

kassel
university



press

**Das Verhalten von Silikongel unter hohen
elektrischen Feldstärken**

Gernot Finis

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Elektrotechnik / Informatik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.- Ing. Albert Claudi
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.- Ing. Bernd Weidemann

Tag der mündlichen Prüfung

18. Juli 2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2005
ISBN 3-89958-139-3
URN urn:nbn:de:0002-1398

© 2005, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Umschlaggestaltung: 5 Büro für Gestaltung, Kassel
Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel
Printed in Germany

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Bediensteter am Fachgebiet Anlagen und Hochspannungstechnik des Fachbereiches Elektrotechnik/Informatik der Universität Kassel.

Großer Dank gilt dem Leiter des Fachgebietes, Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi, für die wissenschaftliche Betreuung während der Bearbeitung des Forschungsprojektes "Silikongel unter hohen elektrischen Feldstärken", welches in enger Zusammenarbeit mit der Firma Tyco Electronics durchgeführt wurde und die Grundlage der vorliegenden Dissertation darstellt. Durch wertvolle Ratschläge und fruchtbare Diskussionen hat Herr Claudi wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Weidemann, Leiter des Fachgebietes Elektrische Maschinen der Universität Kassel, danke ich für die Übernahme des Korreferates und das damit bekundete Interesse an dieser Arbeit. Den Herren Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid und PD Dr.-Ing. Siegfried Heier danke ich für die Bereitschaft zur Teilnahme an der Prüfungskommission.

Herrn Dipl.-Ing. Günther Köhler bin ich für die hilfreichen Diskussionen, seine wertvollen Hinweise und Anregungen sowie seine uneingeschränkte Unterstützung bei der Durchführung der umfangreichen experimentellen Untersuchungen sehr zum Dank verpflichtet. Des Weiteren gilt mein Dank allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des Fachgebietes Anlagen und Hochspannungstechnik, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Yarú Najem Méndez-Hernández, Herrn Oliver Schröder und Frau Ursula Henrich für ihre Hilfsbereitschaft und das sehr angenehme Arbeitsklima. Darüber hinaus danke ich allen studentischen Hilfskräften und Diplomanden für ihren tatkräftigen Einsatz und ihre Unterstützung.

In diesem Zusammenhang möchte ich auch den Menschen danken, die außerhalb des Fachgebietes in die Projektarbeit involviert waren. Insbesondere gilt dieser Dank Herrn Dr.-Ing. Gerold Malin und Herrn Dipl.-Ing. Bodo Böttcher von der Firma Tyco Electronics für die enge und angenehme Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Silikongele.....	6
2.1 Chemie der Silikongele	6
2.2 Werkstoffeigenschaften der Silikongele	10
3 Versuchsmethodik	14
3.1 Prüflinge	14
3.2 Prüfanlagen, Messtechnik und Prüfmethoden	20
3.3 Statistische Versuchsauswertung.....	27
4 Experimentelle Untersuchungen und Interpretation der Ergebnisse	31
4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter	33
4.1.1 Entgasung	35
4.1.2 Vulkanisation.....	39
4.1.3 Präparation der Elektrodenoberfläche vor dem Verguss mit Silikongel	41
4.1.4 Lagerung der Komponenten	42
4.1.5 Unterschiedliche Chargen	44
4.1.6 Standardisierter Herstellungsprozess für Silikongel-Modellisolierungen.....	45
4.1.7 Mechanische Charakterisierung des Vulkanisates	46
4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit	47
4.2.1 Kurzzeitfestigkeit im quasihomogenen elektrischen Feld	47
4.2.1.1 Durchschlagverhalten bei Wechselspannungsbelastung	48

4.2.1.2 Elektrodenmaterial.....	52
4.2.1.3 Spannungsform.....	54
4.2.1.4 Temperatur.....	58
4.2.1.5 Feuchtigkeit.....	63
4.2.1.6 Druck.....	77
4.2.1.7 Ausgedehnte Isolierungen.....	86
4.2.1.8 Regenerationsfähigkeit.....	97
4.2.1.9 Modifikation der Materialformulierung.....	100
4.2.2 Kurzzeitfestigkeit im stark inhomogenen elektrischen Feld.....	104
4.3 Alterungsverhalten.....	107
4.3.1 Elektrische Langzeitfestigkeit im quasihomogenen Feld.....	108
4.3.1.1 Lebensdauerabschätzung auf Basis von Kurzzeitversuchen.....	108
4.3.1.2 Bewertung des Alterungsverhaltens nach ausgewählten Alterungsschritten.....	110
4.3.2 Elektrische Langzeitfestigkeit im stark inhomogenen Feld.....	115
4.3.2.1 Lebensdauerabschätzung auf Basis von Kurzzeitversuchen ($1/\eta = 22$).....	115
4.3.2.2 Konstantspannungsversuche ($1/\eta = 22$).....	118
4.3.2.3 Lebensdauerabschätzung auf Basis von Kurzzeitversuchen ($1/\eta = 154$).....	121
4.3.2.4 Konstantspannungsversuche ($1/\eta = 154$).....	122
4.3.3 Alterungseffekte bei Einwirkung nichtelektrischer Größen.....	129
4.3.3.1 Temperatur.....	129
4.3.3.2 Feuchtigkeit.....	131
4.3.3.3 Härte und Adhäsionseigenschaften.....	131
4.4 Elektrische Festigkeit an Grenzflächen.....	135
4.4.1 Silikongel/Silikongel-Längsgrenzflächen.....	138
4.4.2 Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche.....	147
4.5 Dielektrizitätszahl und Verlustfaktor.....	152
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	155
6 Literaturverzeichnis.....	161

1 Einleitung

Einführung in die Thematik

Die Forderung nach effizienteren Isolations- und Verbindungstechniken im Bereich der Hoch- und Mittelspannungstechnik bedingt den Einsatz von neuen Isolierstoffen, die über ein speziell auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittenes Eigenschaftsprofil verfügen. Für Anwendungen, bei denen neben der Fähigkeit zur Potentialtrennung und einer hohen thermischen Stabilität, die Forderung an den Isolierstoff besteht, dass dieser eine ausgeprägte Eigenklebrigkeit, eine geringe Härte sowie eine hohe Elastizität besitzt und dennoch ein gewisses Maß an Formstabilität aufweist, erscheint der Einsatz von Silikongelen als vielversprechend. Silikongele, die zur Gruppe der kaltvulkanisierenden 2-Komponenten-Silikonelastomere gehören, sind verglichen mit klassischen Dielektrika, wie Gießharz, Öl, Glimmer oder Polyethylen, relativ neue Isolierstoffe. Sie grenzen sich in ihrer stofflichen Struktur insofern von Silikonkautschuk ab, als sie eine wesentlich geringere Vernetzungsdichte besitzen und typischerweise einen hohen Anteil an unvernetzten Bestandteilen - im Wesentlichen Silikonflüssigkeit - enthalten [1], worauf sich die einzigartigen Werkstoffeigenschaften der Silikongele begründen.

Der derzeitige elektrotechnische Einsatzschwerpunkt für Silikongele liegt auf der Verwendung als Vergussmasse für elektronische Komponenten der Kraftfahrzeug- und Leistungselektronik. Der Verguss von Solarzellen sowie die Herstellung von mechanischen Dämpfungselementen stellen weitere Anwendungsfelder dar, bei denen Silikongele Einsatz finden [2]. Bei diesen Anwendungen erfolgt die Werkstoffauswahl in erster Linie aufgrund der mechanischen Eigenschaften des Materials, die eine Kompensation betriebsbedingt auftretender mechanischer Spannungen ermöglichen sowie einen guten Vibrations- und Korrosionsschutz bieten. Die Fähigkeit, hohe elektrische Potentiale zu trennen, spielt bei diesen Anwendungen keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle. Dagegen stellt der Einsatz von Silikongel als Vergussmasse für Hochleistungshalbleitermodule (IGBT) eine Anwendung dar, bei der der Werkstoff höheren elektrischen Feldstärken ausgesetzt ist, wobei die zu trennenden Potentialdifferenzen zur Zeit bis zu $6,5 \text{ kV}$ betragen können [3]. Neben der Potentialtrennung wird bei dieser Anwendung die zusätzliche Anforderung an den Werkstoff gestellt, Zerstörungen aufgrund thermischer Belastungen zu vermeiden. Im Gegensatz zu einem Verguss mit Epoxidharz können durch den Einsatz von Silikongel aufgrund der geringen Härte und hohen Elastizität des Werkstoffes mechanische Spannungen zwischen Chip, Bondraht und Gehäuse, die zu Abrissen und damit zur Zerstörung des Bauteils führen können, vermieden werden.

In den 90-iger Jahren erlangten mit Silikongel gefüllte Niederspannungsverbindungs- muffen mit einer Nennspannung bis 1 kV für den Einsatz in der Energieverteilungstechnik die Marktreife [4]. Diese Muffen sind kompatibel zu allen gebräuchlichen Isolationsmaterialien, besitzen sehr gute elektrische Isolationseigenschaften und sind im Temperaturbereich von -40°C bis 90°C einsetzbar. Aufgrund der einfachen, von der Verbindertechnologie unabhängigen und zeitsparenden Montage hebt, sich diese Technologie von den herkömmlichen Technologien für Verbindungen und Abzweigungen in Niederspannungsnetzen, wie der Gießharztechnik sowie der Warm- und Kaltschrumpftechnik, deutlich ab [5]. Nahezu gleichzeitig wurden weitere Isoliersysteme mit maßgeschneiderten Eigenschaften für spezielle Anwendungen im Bereich der Niederspannungsisolations- und -verbindungstechnik, die allesamt auf der "gel under compression technology" basieren, entwickelt und mit großem Erfolg in den Markt eingeführt [5;6].



Abb. 1.1: GelBox-Verbindungs-muffe [5]

Motivation

Ausgehend von den guten Erfahrungen im Bereich der Niederspannungsisolations- und -verbindungstechnik und dem Wissen, dass Silikongele die Fähigkeit besitzen relativ hohe elektrische Potentiale zu trennen, ist man bestrebt, diese auch für ausgewählte Anwendungen in der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik, für die die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Silikongele besonders interessant erscheinen, einzusetzen. Potentielle Einsatzgebiete sind im Bereich der Kabel-Garnituren (Durchführungen, Endverschlüsse, Muffen) für Kunststoffkabel der Mittelspannungsebene zu sehen, wo bereits erfolgreich Silikonelastomere eingesetzt werden [7]. Weiterhin wäre der Einsatz von Silikongel als Substitut für Silikonflüssigkeiten und Isolieröle in solchen Anwendungen denkbar, bei denen diesen nicht zusätzlich die Aufgabe der konvektiven Wärmeabfuhr zukommt. Durch den Einsatz von Silikongel wäre ein Verzicht auf eine auslaufsichere, öldichte Kapselung möglich, was aus wirtschaftlichen sowie aus umweltschutzrechtlichen Gründen für bestimmte Anwendungen interessant sein könnte.

Neben diesen Anwendungsfeldern ist generell ein Einsatz im Bereich elektrisch hoch belasteter Grenzflächen zwischen zwei Festkörpern denkbar. Die Anpassungsfähigkeit von Silikongel an strukturelle Unebenheiten von Festkörperoberflächen ermöglicht das Verschließen von Hohlräumen, was die elektrische Festigkeit der Grenzfläche erhöht. Dieses bisher hauptsächlich von Silikonfetten besetzte Feld [8] ist ein weiteres Einsatzgebiet, bei dem Silikongele ihre elektrischen und mechanischen Eigenschaften optimal zur Entfaltung bringen könnten.

Stand des Wissens

Eine absolut notwendige Voraussetzung für den Einsatz von Silikongel in der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik ist die genaue Kenntnis der für diese Zwecke relevanten Werkstoffeigenschaften sowie ein umfassendes Wissen über deren Abhängigkeit von den unter den zu erwartenden Einsatzbedingungen auftretenden Einflussfaktoren. Im Gegensatz zu Silikongummi, dessen hochspannungstechnischen Eigenschaften gut erforscht und in einer Vielzahl von Publikationen, wie beispielsweise in [9;55;59], beschrieben sind, finden sich in der Literatur diesbezüglich nur sehr wenige Angaben zu Silikongelen.

YAWORSKI, CRAIG und *ROBERTS* [4] untersuchten ausgewählte Materialeigenschaften von Silikongelen mit dem Ziel, diese als Isolierstoff im Bereich der Niederspannungsverbindungstechnik einzusetzen. In dieser Arbeit finden sich neben einer ausführlichen mechanischen Charakterisierung des Werkstoffes Angaben zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Silikongel bei Beanspruchung durch homogene elektrische Felder. Zudem wird hier auf eine durch Feuchtigkeitseinwirkung stattfindende Minderung der elektrischen Festigkeit sowie auf die hohe elektrische Grenzflächenfestigkeit von Silikongel hingewiesen.

YAWORSKI und *BUKOVNIK* [1] erweiterten den durch diese Arbeit geschaffenen Erkenntnisstand hinsichtlich der Bestimmung des mechanischen Langzeitverhaltens von Silikongel unter Druckeinwirkung sowie durch Untersuchungen zur chemischen Kompatibilität von Silikongelen zu verschiedenen Kabelmantelwerkstoffen. Der Schwerpunkt der von *RUEMENAPP* [3] durchgeführten Untersuchungen, die das Ziel hatten, die Eignung von Silikongelen als Vergussmasse für Leistungshalbleitermodule nachzuweisen, lag auf der Bestimmung des Durchschlagverhaltens verschiedener Silikongel-Formulierungen bei homogener und stark inhomogener elektrischer Feldbelastung unter Normalbedingungen. Erweiternd dazu führte *EBKE* [34] orientierende Untersuchungen zur Resistenz von Silikongel gegenüber Teilentladungen durch.

Neben diesen Arbeiten finden sich in der Literatur keine weiteren Beiträge, die zu einer wesentlichen Erweiterung des Wissens über die hochspannungstechnischen Eigenschaften von Silikongelen beitragen. Dieser Erkenntnisstand ist verglichen mit dem zu klassischen Isolierstoffen unvollständig und darüber hinaus statistisch nur unzureichend abgesichert, um den Werkstoff uneingeschränkt im Bereich der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik einsetzen zu können.

Beispielsweise fehlen Kenntnisse über die Wirkung verschiedenartiger klimatischer Belastungen auf die elektrische Festigkeit des Werkstoffes vollständig. Weiterhin ist aufgrund von Unterschieden im stofflichen Aufbau der sich auf dem Markt befindlichen Silikongele eine Übertragung der publizierten Erkenntnisse, die teils an Silikongelen verschiedener Hersteller gewonnen wurden, auf das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Material nicht ohne weiteres statthaft. Schon allein diese Tatsache macht es zwingend notwendig, die Untersuchungen, die zu den bereits publizierten Erkenntnissen führten, für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Silikongel erneut durchzuführen, um eine statistisch fundierte Datenbasis zu schaffen, die als Bezug für alle weiterführenden Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit oder darüber hinaus dient.

Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, unter Berücksichtigung der in der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik bestehenden Anforderungen, eine aus phänomenologischer Sicht umfassende hochspannungstechnische Charakterisierung des Werkstoffes Silikongel vorzunehmen, um damit einen fundierten und statistisch abgesicherten Kenntnisstand zu schaffen, der eine beanspruchungsgerechte Auslegung von Silikongel-isolierten Bauteilen ermöglicht bzw. die prinzipiellen Grenzen des Werkstoffes für isoliertechnische Anwendungen aufzeigt.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die auf dem Markt befindlichen Silikongele in ihrem chemischen Aufbau und damit in ihren Materialeigenschaften unterscheiden, sollen diese Erkenntnisse beispielhaft unter Verwendung eines speziell für den Einsatz im Bereich der Garniturentechnik optimierten Silikongels (PowerGel[®] der Firma Tyco Electronics) erfolgen.

Aufgabenstellung

Die vorzunehmende hochspannungstechnische Charakterisierung des Werkstoffes Silikongel kann mit vertretbarem ökonomischen Aufwand nur auf Basis von Experimenten an Modellisolierungen erfolgen. Hierzu sind geeignete Versuchsaufbauten, Prüfmethode und Messeinrichtungen zu entwickeln. Ausgehend von Untersuchungen zum Einfluss fertigungsrelevanter Parameter auf die elektrische Festigkeit von Silikongel-Isolierungen ist hinsichtlich dieser Parameter eine Optimierung vorzunehmen, so dass die erzeugten Isolierungen hohe und darüber hinaus reproduzierbare Werte der elektrischen Festigkeit aufweisen.

Auf dieser Grundlage sollen weitere für die Auslegung von Silikongel-Isolierbauteilen bedeutsame Fragestellungen beantwortet werden. Dazu gehört beispielsweise die Kenntnis des Einflusses, der Prüfspannungsform, des verwendeten Elektrodenmaterials, verschiedener klimatischer Vorbelastungen sowie der Größe des elektrisch belasteten Isolierstoffbereiches auf die elektrische Kurzzeitfestigkeit von Silikongel bei Belastung durch homogene bzw. quasihomogene elektrische Felder.

Untersuchungen zum Einfluss der Vernetzungsdichte auf die elektrische Festigkeit des Vulkanisates sowie Untersuchungen zur Regenerationsfähigkeit von Silikongel nach erfolgtem elektrischen Durchschlag erhöhen das Materialverständnis entscheidend und sind aus diesem Grunde mit in die Betrachtung einzubeziehen. Im Weiteren ist die Wirkung feldstärkeerhöhender Fehlstellen im Silikongel sowie die elektrische Festigkeit ausgewählter Längsgrenzflächen im Silikongel bzw. zwischen Silikongel und Polypropylen zu untersuchen.

Neben dem Kurzzeitverhalten soll die Ermittlung des Langzeitverhaltens von Silikongel bei der Belastung sowohl durch quasihomogene als auch durch stark inhomogene Felder Gegenstand geeigneter Experimente sein. Die im Kurzzeitversuch als festigkeitsmindernd identifizierten Einflussfaktoren sind bei diesen Untersuchungen mit einzubeziehen. In diesem Zusammenhang sind auch die mechanischen Eigenschaften von Silikongel, die wesentlich den Charakter des Werkstoffes prägen, auf Veränderungen durch die Einwirkung hoher Temperaturen und Feuchtigkeit hin zu untersuchen.

2 Silikongele

2.1 Chemie der Silikongele

Silikone

Siliziumorganische Verbindungen, zu denen Silikonelastomere zählen, nehmen ausgehend von ihrem chemischen Aufbau und den daraus resultierenden chemisch-physikalischen Eigenschaften eine Mittelstellung zwischen rein anorganischen Verbindungen (z.B. Glas, Keramik, Porzellan) und organischen Polymeren (z.B. Polyethylen, Polyvinylchlorid) ein. Silikone, die entsprechend ihrer chemischen Struktur auch als Organopolysiloxane bezeichnet werden, sind polymere Stoffe, in welchen Siliziumatome über Sauerstoffatome miteinander verknüpft sind, wobei die nicht durch Sauerstoff gebundenen Valenzen der *Si*-Atome durch organische Reste (Restgruppen) abgesättigt sind [9].

Herstellung der Silikone

Silizium wird aus den Salzen verschiedener Kieselsäuren (Silikate) oder aus Siliziumdioxid (Quarz) gewonnen. Die industrielle Gewinnung von elementarem Silizium erfolgt im so genannten elektro-thermischen Verfahren in der Reduktion zwischen Siliziumdioxid (Quarz) und Kohlenstoff (*Abb. 2.1*).

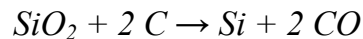


Abb. 2.1: Herstellung von elementarem Silizium

Die großtechnische Synthese von Alkyl- bzw. Aryl-Chlorsilanen/Chlormethylsilanen (Vorprodukte von Methylsilikonen) erfolgt fast ausschließlich nach dem Verfahren von Müller und Rochow (Direktsynthese) [10;11]. Dabei reagiert Silizium mit einem Alkyl- oder Arylchlorid unter dem katalytischen Einfluss von Kupfer und diversen Promotoren bei Temperaturen zwischen 250°C und 300°C. Als Syntheseprodukt wird ein Gemisch aus Alkyl- bzw. Aryl-Chlorsilanen ($R_i\text{SiCl}_{(4-i)}$ mit $i = 1 \dots 3$, *R*: Restgruppe) gebildet. Durch Hydrolyse der Alkyl-Chlorsilane bzw. Aryl-Chlorsilane, die von einer anschließenden Kondensationsreaktion begleitet ist, entstehen unter Abspaltung von Chlorwasserstoff unbeständige Silanole ($R_i\text{Si}(\text{OH})_{(4-i)}$ mit $i = 1 \dots 3$, *R*: Restgruppe).



Abb. 2.2: Bildung von Silanolen aus Silanen

2.1 Chemie der Silikongelege

In einer sich an die Hydrolyse anschließende Kondensreaktion bilden die *Si-OH*-Gruppen dieser Silanole unter Wasserabspaltung *Si-O-Si*-Bindungen (Siloxan-Bindungen). Aus dem monofunktionellen Silanol entsteht beispielsweise Disiloxan (*Abb. 2.3*).

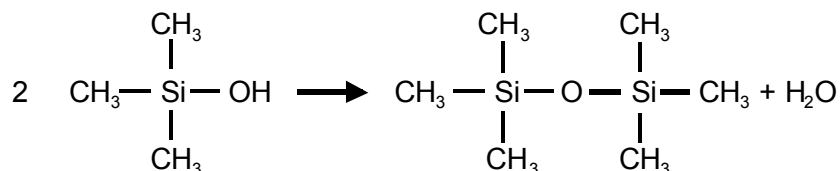


Abb. 2.3: Kondensreaktion von Silanol zu Disiloxan

Da die funktionellen *OH*-Gruppen der Silanole fähig sind, mit einer anderen unter Wasserabspaltung zu reagieren, können sich verschiedenartige polymere Strukturen bilden. Durch Bereitstellung entsprechender Mengen verschiedener funktioneller Ausgangsstoffe ist es möglich, Polysiloxane mit gewünschter Struktur bzw. gewünschter Vernetzungsdichte und damit verbunden bestimmten Merkmalen zu synthetisieren [9].

Bei den Silikonen wird nach dem jeweiligen strukturellen Aufbau zwischen Harzen, Flüssigkeiten (Ölen) und Elastomeren unterschieden. Nahezu alle Silikonprodukte lassen sich aus diesen drei Rohstoffgruppen ableiten [10]. Silikongelege werden der Gruppe der Elastomere zugeordnet, die sich wiederum in zwei Untergruppen, die der hochtemperaturvernetzenden (HTV) und die der kalt- bzw. raumtemperaturvernetzenden (RTV) Elastomere, gliedert. Weiterhin erfolgt eine Unterscheidung zwischen Ein- und Zwei-Komponenten-Systemen. Bei den Zwei-Komponenten-Systeme lässt sich eine weitere Differenzierung bezüglich der Art der Vulkanisation vornehmen. Dabei wird zwischen additionsvernetzenden (nebenproduktfreie Vernetzungsreaktion) und kondensationsvernetzenden (nicht nebenproduktfreie Vernetzungsreaktion) Systemen unterschieden.

Silikongelege

Silikongelege sind gießbare, bei Raumtemperatur vulkanisierbare, additionsvernetzende Zweikomponenten-Silikonkautschuke. Diese Systeme werden als RTV-2 Silikonkautschuke bezeichnet [2]. Eine Komponente (*A*) enthält vinylendblockiertes Polydimethylsiloxan (V-PDMS, *Abb. 2.4a*) sowie sehr geringe Mengen einer platinorganischen Verbindung (*PtX*), die als Katalysator (*Abb. 2.5*) fungiert. Darüber hinaus können Additive in Form von Füllern, Pigmenten sowie speziellen chemischen Substanzen, die zur Einstellung bestimmter Materialeigenschaften dienen, enthalten sein [1;12].

2.1 Chemie der Silikongelege

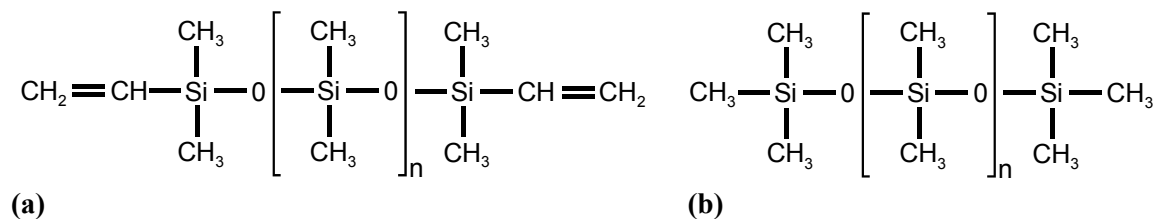


Abb. 2.4: (a) *vinylendblockiertes Polydimethylsiloxan (V-PDMS)* [12] und (b) *Polydimethylsiloxan (PDMS)* [13]

Die zweite Komponente (B) besteht aus einem *Si-H*-funktionellen Vernetzer. Dies kann entweder Polymethylhydrogensiloxan oder ein Copolymer des Polydimethylsiloxan sein [14]. Zusätzlich können auch hier Füllstoffe und vinylhaltige Siloxane enthalten sein. Durch das Mischen der Komponenten wird die Vernetzungsreaktion ausgelöst, bei der es sich um eine Additionsvernetzung, d.h. nebenproduktfreie Vernetzungsreaktion handelt. Dabei werden die vinylendblockierten Polydimethylsiloxane durch eine Platin-katalysierte Hydrosilylierung der Vinylgruppen mit den *Si-H*-Gruppen des Vernetzers verknüpft [10;12;14]. Das Prinzip der Additionsvernetzung ist in *Abb. 2.5* dargestellt.

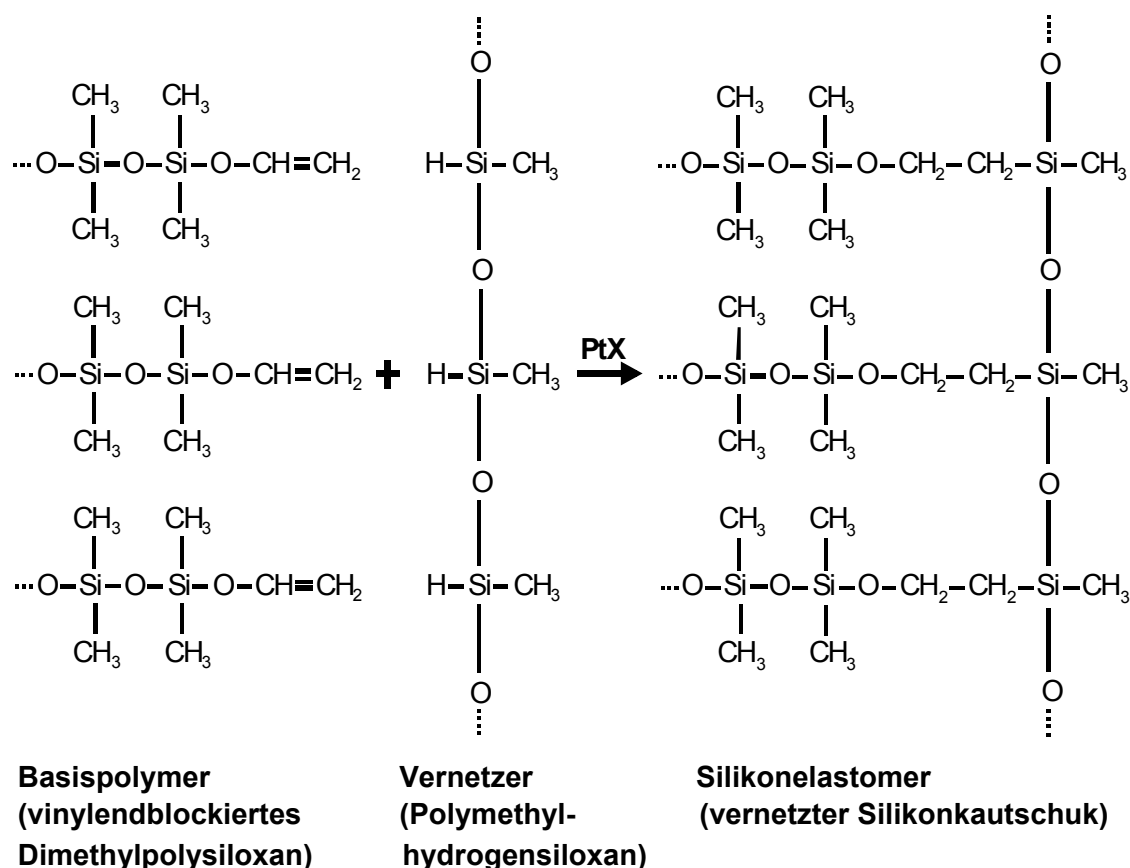


Abb. 2.5: *Vernetzungsprinzip eines additionsvernetzenden Silikonkautschuks* [12]

Untersuchte Silikongel-Formulierung

Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Silikongel (PowerGel[®] der Firma Tyco Electronics) entsteht durch das Mischen der Komponenten *A* und *B* nach Volumenanteilen im Verhältnis von $1 : 1$. Durch das Mischungsverhältnis, in dem die Komponenten zueinander stehen, ist das Verhältnis von Vernetzer, d.h. die Anzahl der für die Vernetzung zur Verfügung stehenden funktionellen *Si-H*-Einheiten, zu den vorhandenen reaktiven Polymerkettenenden bestimmt. Durch dieses Verhältnis sowie durch die mittlere Kettenlänge der Basispolymere ist die Vernetzungsdichte und darüber eine Vielzahl der chemisch-physikalischen Eigenschaften des Vulkanisates festgelegt [12].

Die Formulierung der Komponenten wurde derart vorgenommen, dass bei einem Mischungsverhältnis $A : B = 1 : 1$ mehr reaktive Polymerketten, d.h. eine höhere Anzahl an vinylendblockierten Polydimethylsiloxan-Molekülen (V-PDMS) als *Si-H*-funktionelle Einheiten des Vernetzers zur Verfügung stehen. Aufgrund dieser Tatsache können nicht alle der vorhandenen V-PDMS mit einer *Si-H*-Gruppe eines Vernetzermoleküls reagieren. Es unterliegt statistischen Gesetzmäßigkeiten, ob kein, ein oder beide Enden eines V-PDMS-Moleküls an einer Vernetzungsreaktion teilnehmen. Die V-PDMS, deren beider Enden nicht mit einer *Si-H*-Gruppe des Vernetzermoleküls reagieren, werden nur über den osmotischen Druck im Vulkanisat gehalten [1]. *Abb. 2.6* stellt den Sachverhalt in anschaulicher Art und Weise dar. Durch diese Darstellung wird die Bezeichnung "Silikongel" verständlich, denn unter Gelen versteht man im Allgemeinen Polymere, die durch Aufnahme einer geeigneten Flüssigkeit gequollen sind [5]. Alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf die hier beschriebene Materialformulierung, es sei denn es wird ausdrücklich darauf hingewiesen.

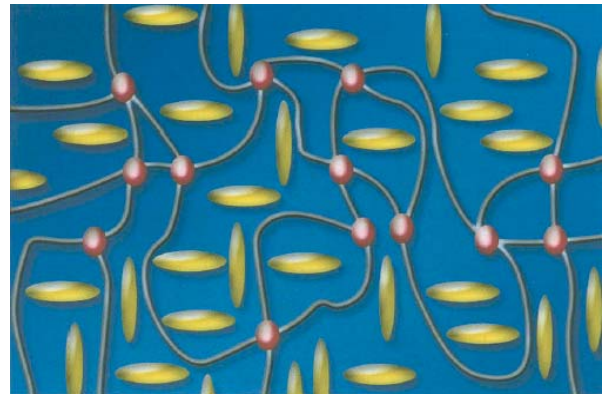


Abb. 2.6: Gel - Polymermatrix mit eingelagerter Flüssigkeit [5]

Transparentes Silikongel

Da das zu untersuchende Silikongel aufgrund des Zusatzens spezieller Additive, die zur Verbesserung der Langzeiteigenschaften dienen [1], seine Transparenz verliert, wurde für Untersuchungen, bei denen im Isolierstoff auftretende Vorgänge einer visuellen Beobachtung zugänglich gemacht werden mussten, eine nahezu identische Materialformulierung eingesetzt, der diese Additive fehlen und die daher transparent erscheint.

Variation des Mischungsverhältnisses

Durch Variation des Mischungsverhältnisses, in dem die Komponenten A und B zueinander stehen, sind die Vernetzungsdichte und damit die Materialeigenschaften des Vulkanisates in gewissen Grenzen beeinflussbar, so dass Vulkanisate mit bestimmten physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise einer bestimmten Härte, erzeugt werden können. Eine Erhöhung des Anteils der Komponente B ($A : B < 1$) und die damit verbundene größere Menge an zur Verfügung stehendem Vernetzer, ergibt ein Vulkanisat mit einer höheren Vernetzungsdichte und damit größerer Härte. Überwiegt der Anteil der Komponente A ($A : B > 1$), so nimmt aufgrund der verringerten Menge an zur Verfügung stehendem Vernetzer die Vernetzungsdichte und damit auch die Härte des Vulkanisates ab, seine Elastizität und Quellbarkeit jedoch zu. Eine derartige Modifikation kann auch durch eine zusätzliche Beimischung von Silikonflüssigkeit (Polydimethylsiloxan, PDMS) zu den Komponenten A und B erreicht werden.

2.2 Werkstoffeigenschaften der Silikongele

Dieses Kapitel beschreibt die Werkstoffeigenschaften von Silikongel, die für die Verwendung als Isolierstoff im Bereich der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik besonders bedeutsam erscheinen.

Mechanische Eigenschaften

Silikongele stellen eine besondere Form des Silikonkautschuks dar. Sie sind formstabil und fließen selbst bei hohen Temperaturen nicht, sind aber aufgrund ihrer niedrigen Vernetzungsdichte sowie dem hohen Anteil an unvernetzten Bestandteilen deutlich weicher als Silikongummi. Aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls und der relativ hohen Spannungsrelaxation (10 % bis 60 % je nach Formulierung), passt sich das Silikongel unter leichtem mechanischen Druck jeder Oberfläche an und benetzt diese mit Silikonflüssigkeit (PDMS), wodurch eine hohe Anhaftung erreicht wird. Die Haftung des Silikongels an Oberflächen erfolgt dabei durch die ausgeprägte Eigenklebrigkeit des Werkstoffes und ist rein physikalischer Natur (Adhäsionskräfte), eine chemische Reaktion mit der Oberfläche findet dabei nicht statt. Silikongele können eine Bruchdehnung von typischerweise mehr als 1000 % aufweisen. Durch diese hohe Bruchdehnung ist das Material trotz seiner Weichheit sehr widerstandsfähig gegen Reißen oder Abscheren. Die Dichte von Silikongel bei 25°C beträgt $0,97 \text{ g/cm}^3$ [1].

Elektrische Eigenschaften

Die dielektrischen Eigenschaften von Silikongelen ähneln denen von Silikonflüssigkeiten und Silikonharzen. Die Dielektrizitätszahl bei Raumtemperatur ist im Bereich von $0,1 \text{ Hz}$ bis 35 MHz frequenzunabhängig und beträgt laut Hersteller des hier verwendeten Silikongels etwa $\epsilon_r = 2,7$ [1]. Andere Silikongel-Hersteller [15] geben einen Wert von $\epsilon_r = 2,8$ an. Auch die Angaben über den spezifischen Durchgangswiderstand bei Raumtemperatur schwanken je nach Silikongel zwischen $\rho = 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ [1] und $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ [15]. Für den Verlustfaktor von Silikongelen bei Raumtemperatur werden in der Literatur Werte von 10^{-3} [1] und $6 \cdot 10^{-3}$ [15] angegeben.

Über die Wechselspannungsfestigkeit von Silikongelen sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden. *YAWORSKI* und *BUKOVNIK* ermittelten im Spannungssteigerungsversuch bei Raumtemperatur mit umgossenen Kugelelektroden im Abstand von 2 mm eine mittlere Wechselspannungsfestigkeit zwischen 25 kV/mm und 41 kV/mm (ASTM D 149) und weisen auf eine signifikante Festigkeitsminderung bei Anwesenheit von Feuchtigkeit hin [1]. *RUEMENAPP* führte vergleichbare Untersuchungen mit Wechsel- und Gleichspannung an Silikongelen verschiedener Hersteller durch und ermittelte bei einem Kugeldurchmesser von 13 mm und einem Abstand von 1 mm , wie in IEC EN 60243-1 für Vergussmassen vorgeschrieben, mittlere Festigkeiten zwischen 57 kV/mm und 71 kV/mm , wobei nur geringe Unterschiede zwischen Wechsel- und Gleichspannungsfestigkeit festgestellt wurden [3]. Der Hersteller *WACKER* [15] gibt eine Durchschlagfestigkeit von 23 kV/mm für sein Silikongel an, wobei hier die Prüfung mit aufgesetzten Plattenelektroden bei einem Abstand von 1 mm erfolgte. Aufgrund der festgestellten Unterschiede zwischen den in der Literatur angegebenen elektrischen Kennwerten ist davon auszugehen, dass neben statistischen Effekten sowie Unterschieden in den Prüfbedingungen, die elektrischen Eigenschaften von Silikongelen starke Abhängigkeiten von der jeweiligen Formulierung aufweisen. Bekräftigt wird diese Annahme durch die in [16] publizierten Untersuchungsergebnisse, die zeigen, dass sich die elektrischen Festigkeiten von Silikongelen verschiedener Hersteller teilweise deutlich unterscheiden. Daher ist eine grundlegende Bestimmung der für die Auslegung von Isolierungen maßgeblichen elektrischen Eigenschaften der hier verwendeten Silikongel-Formulierung erforderlich.

Thermische Eigenschaften

Außer den dielektrischen sind auch die thermischen und thermo-mechanischen Eigenschaften eines Isolierstoffes für die Auslegung einer Isolierung maßgeblich. Häufig müssen Isolierstoffe neben der Potentialtrennung auch die Fähigkeit besit-

zen, die im Isolierstoff entstehende Verlustwärme (z.B. Verlustwärme des Leiters sowie dielektrische Verlustleistung) an die Umgebung abzuführen. Eine unzureichende Abfuhr der in den Isolierstoff eingepprägten Wärme kann zu einer thermischen Zerstörung der Isolierung (Wärmedurchschlag) führen. Das Wärmeleitvermögen wird im Wesentlichen durch die spezifische Wärmeleitfähigkeit bestimmt, die für das hier untersuchte Silikongel laut Hersteller $\lambda = 0,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ beträgt [1]. Andere Silikongel-Hersteller geben einen Wert von $\lambda = 0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [15] an. Verglichen damit liegt die spezifische Wärmeleitfähigkeit von handelsüblicher Silikonflüssigkeit (Polydimethylsiloxan) im Bereich von $\lambda = 0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [17].

Weiterhin ist bei der Auslegung von Isolierungen die thermische Ausdehnung der eingesetzten Isolierstoffe zu berücksichtigen, um eine Zerstörung der Isolierung, wie sie beispielsweise durch Relativbewegungen zwischen Werkstoffen mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten entstehen kann, zu vermeiden. Der Hersteller des hier eingesetzten Silikongels gibt den Volumenausdehnungskoeffizienten mit $\beta \approx 10 \cdot 10^{-4}/\text{K}$ an [1]. Jedoch fehlen hier Angaben zu dem üblicherweise in den Datenblättern von Silikongel-Herstellern angegebenen linearen Ausdehnungskoeffizienten [15]. Nach [18] gilt für den Zusammenhang zwischen dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α und dem Volumenausdehnungskoeffizienten β die Näherung $\beta \approx 3 \cdot \alpha$. Damit ergibt sich der lineare Ausdehnungskoeffizient für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Silikongel zu $\alpha \approx 333 \cdot 10^{-6}/\text{K}$. Dieser Wert ist nahezu identisch mit dem von Silikongelen anderer Hersteller, die $\alpha = 300 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ [15] angeben, was die den Silikongelen zugesprochene Besonderheit, dass eine Vielzahl ihrer thermischen Eigenschaften relativ unabhängig von der Materialformulierung sind [1], bestätigt. Der Vergleich mit handelsüblicher Silikonflüssigkeit, deren Volumenausdehnungskoeffizient typischerweise im Bereich von $\beta = 920 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ bis $\beta = 970 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ liegt [17] und damit in etwa gleich dem von Silikongel ist, lässt darüber hinaus die enge stoffliche Verwandtschaft zwischen Silikongel und Silikonflüssigkeit erkennen.

Eine Vielzahl der physikalischen Werkstoffeigenschaften von Silikongel bleibt über einen weiten Temperaturbereich von -40°C bis weit über 100°C nahezu unverändert [4]. Eine Eigenschaft, die Silikonwerkstoffe deutlich von der Mehrzahl organischer Elastomere abgrenzt. Der Grund für die hohe thermische Stabilität ist im chemischen Aufbau der Silikonelastomere begründet, denn verglichen mit organischen Elastomeren, die zumeist aus einem Kohlenstoff-Gerüst aufgebaut sind, ist die Bindungsenergie der Silizium-Sauerstoff-Bindung deutlich höher [19].

Weitere ausgewählte Werkstoffeigenschaften

Obwohl Silikone aufgrund ihrer niedrigen Oberflächenenergie sehr hydrophob sind [19], haben sie typischerweise eine höhere Wasserdampfdurchlässigkeit und ein höheres Lösungsvermögen für Wasser als organische Polymere [1]. Silikone sind auch gegenüber den meisten gasförmigen Molekülen sehr durchlässig. Sie gehören sogar zu den Materialien, die für Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid mit am durchlässigsten sind [20]. Trotz der hohen Wasserdampfdurchlässigkeit bietet Silikongel einen effektiven Korrosionsschutz [3;4]. Diese Werkstoffeigenschaften von Silikonen bzw. Silikongelen erscheinen insbesondere für die Auslegung von Isolierungen bedeutsam, bei denen ein Kontakt zu Feuchtigkeit zu erwarten bzw. nicht auszuschließen ist.

3 Versuchsmethodik

Dieses Kapitel beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Prüflinge (Silikongel-Modellisolierungen), Prüfanlagen und -methoden sowie die Verfahren zur statistischen Bewertung der Messergebnisse.

3.1 Prüflinge

Einbettung des Isolierstoffes zwischen den Prüfelektroden

Die Durchschlagspannung bzw. -feldstärke ist keine Materialkonstante, sondern vielmehr eine Größe, mit der Isolierstoffe, die unter gleichen Bedingungen geprüft wurden, verglichen werden können. Unter anderem besteht eine signifikante Abhängigkeit dieser Größen von der Prüfmethode. Insbesondere sind hier Abhängigkeiten von der verwendeten Elektrodenform, der Spannungsform und der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit bzw. der Beanspruchungsdauer zu erwarten [13;21].

Da derzeit für Silikongel keine verbindliche Prüfvorschrift zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit existiert, kann die Einbettung des Silikongels zwischen den Prüfelektroden prinzipiell nach zwei unterschiedlichen Methoden erfolgen. Einmal kann die Prüfung an vernetzten Silikongel-Elementen (Platten) mit aufgesetzten Elektroden erfolgen. Zudem besteht die Möglichkeit, die Elektroden mit dem noch unvernetzten Material zu umgießen und nach Abschluss der Vulkanisation die elektrische Prüfung durchzuführen. Gegenüber der Prüfung mit aufgesetzten Elektroden besitzt diese Methode wesentliche Vorteile. Eine Prüfung mit aufgesetzten Platten würde aufwendige Maßnahmen im Versuchsaufbau zur Gewährleistung eines konstanten Elektrodenabstandes erfordern. Denn ohne derartige Maßnahmen würde der Druck aufgesetzter Elektroden das Silikongel verformen und zu einer unzulässigen Reduzierung der Schlagweite führen. Zudem ist bei dieser Art von Versuchsaufbau das Auftreten von Teilentladungen, die zu einer Beeinflussung der Messergebnisse führen, nicht auszuschließen, wie Überlegungen in [9] belegen. Daher wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen standardmäßig mit umgossenen Elektroden gearbeitet, sofern nicht ausdrücklich etwas anderes beschrieben ist.

Ausnutzungsfaktor und Berechnung der Feldverteilung

Das Durchschlagverhalten von Isolierstoffen wird entscheidend von der Art des elektrischen Feldes beeinflusst [13;21]. Daher wurden die Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Silikongel mit verschiedenen feldprägenden Elektroden systemen durchgeführt. Zur Kennzeichnung der "Feldqualität" eines Elektroden systems, die für die Beanspruchung des im Feldsystem liegenden Isolierstoffes von entscheidender Bedeutung ist, dient der Ausnutzungsfaktor nach Schweiger η (Homogenitätsgrad) [22]. Er gibt definitionsgemäß das Verhältnis der homogenen Feldstärke E_0 , die in einem Plattenkondensator mit gleichem Elektrodenabstand herrschen würde, zur Maximalfeldstärke E_{max} des betreffenden Elektroden systems an.

$$\eta = \frac{E_0}{E_{max}} \quad (Gl. 3.1)$$

Darüber hinaus ist zur detaillierten Analyse des Durchschlagverhaltens von Isolierstoffen eine genaue Kenntnis der elektrischen Feldverteilung in dem beanspruchten Isolierstoff notwendig. Aus der Korrelation zwischen der Feldverteilung und der Lage von Entladungskanälen im Isolierstoff lassen sich beispielsweise Hinweise auf die zum Durchschlag der Isolierstrecke führenden Mechanismen gewinnen. Um Interpretationen in diesem Sinne durchführen zu können, erfolgte eine Berechnung der elektrischen Feldverteilung für die eingesetzten feldprägenden Elektrodengeometrien. Diese Berechnungen wurden mit dem Programmsystem Electro[©] durchgeführt, das auf Basis der Boundary Element Method arbeitet. Bei den Berechnungen wurde von einem quasielektrostatischen Feld ausgegangen. Diese Vorgehensweise erscheint gerechtfertigt, da die Wellenlänge der 50-Hz-Wechselspannung, die in der elektrischen Energietechnik die häufigste Belastungsform darstellt, mehrere Größenordnungen über den Abmessungen der eingesetzten Elektroden systeme liegt, so dass Effekte, die durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Feldes bedingt sind, nicht berücksichtigt werden brauchen [23].

Elektrodenanordnungen zur Prägung quasihomogener Feldverteilungen

Für die Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Silikongel bei quasihomogener Feldbeanspruchung der Isolierung wurde standardmäßig ein Versuchsaufbau für Vergussmassen in Anlehnung an IEC EN 60243-1 [24] verwendet. Dieser besteht aus zwei Kugelelektroden, die waagrecht auf der selben Achse in einem definierten Abstand angeordnet sind und mit Silikongel umgossen wurden. Als Werkstoff für die Vergussform wurde Polycarbonat (Makrolon[©]) eingesetzt, das über eine gute thermische Formstabilität verfügt und aufgrund seiner Transparenz die Beobachtung von Entladungseffekten in dem Isolierstoff ermöglicht.

3.1 Prüflinge

Abb. 3.1 zeigt den Standardprüfkörper mit einer Elektrodenanordnung bestehend aus zwei Kugelelektroden. Der Kugeldurchmesser d_K beträgt 20 mm. Die verwendeten Elektrodenabstände s sind im Bereich von 1 mm bis 5 mm (Standard $s = 2$ mm) über Feingewinde frei einstellbar. Als Elektrodenwerkstoffe standen Stahl (V2A), Messing und Aluminium zur Verfügung. Die Oberflächen der Elektroden sind poliert und metallisch glänzend. Die Prüfspannung wird beidseitig über Messingkontakte an die Elektroden angelegt.

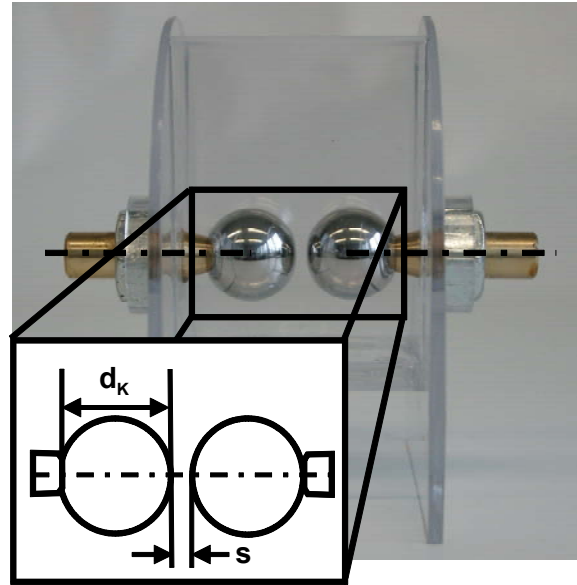


Abb. 3.1: Standardanordnung zur Prägung einer quasihomogenen Feldverteilung

Abb. 3.2 zeigt die berechnete elektrische Feldverteilung im Prüfvolumen für einen Kugeldurchmesser von $d_K = 20$ mm, und einem Abstand von $s = 2$ mm. Diese Anordnung prägt ein nahezu homogenes elektrisches Feld zwischen den Elektroden, das mit zunehmender Entfernung aus dem Zentrum der Anordnung kontinuierlich abnimmt. Für die Berechnung des Ausnutzungsfaktors einer Kugel-Kugel-Anordnung bestehend aus zwei gleich großen Kugeln mit einem Kugelradius r , die waagrecht auf der selben Achse in einem definierten Abstand s angeordnet sind, wird in [25] folgende Beziehung angegeben:

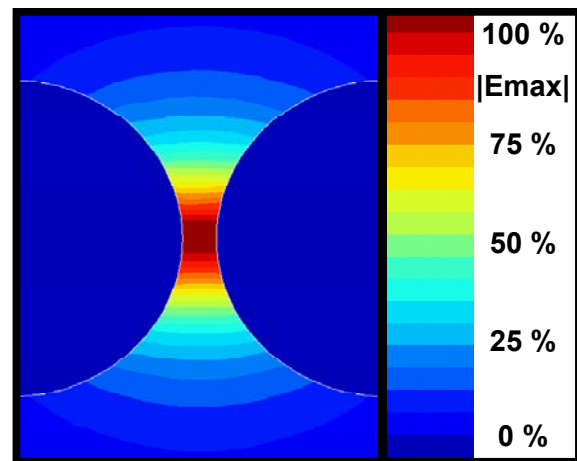


Abb. 3.2: Elektrische Feldverteilung $|E|$ im Prüfvolumen für $s = 2$ mm, $d_K = 20$ mm

$$\eta = \frac{E_0}{E_{\max}} = \frac{2}{p-1} \left[1 + \frac{(1+x)^2}{1-x} \sum_{i=1}^{\infty} \left(x^i \cdot \frac{1-x^{2i+1}}{(1+x^{2i+1})^2} \right) \right]^{-1} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$$\text{mit } \mu = x + \frac{1}{x} = \frac{s+2 \cdot r}{r}, \quad p = \frac{s+r}{r}, \quad x = \frac{\mu}{2} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{2}\right)^2 - 1}$$

r : Kugelradius ($r = d_K/2$), s : Kugelabstand

3.1 Prüflinge

Die Homogenitäts- und Inhomogenitätsgrade der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kugel-Kugel-Elektrodenanordnungen sind in *Tab. 3.1* in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand s für einen Kugeldurchmesser von $d_K = 20 \text{ mm}$ aufgeführt.

$s :$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
$\eta :$	$0,968$	$0,937$	$0,907$	$0,88$	$0,853$
$1/\eta :$	$1,034$	$1,068$	$1,102$	$1,137$	$1,173$

Tab. 3.1: *Homogenitäts- und Inhomogenitätsgrad der Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung in Abhängigkeit des Abstandes s bei einem Kugeldurchmesser von $d_K = 20 \text{ mm}$*

Für die Untersuchungen ausgedehnterer Isolierungen mit homogener Feldverteilung wurden Platte-Platte-Elektrodenanordnungen eingesetzt, deren Randbereiche der von Rogowski (Rogowski-Profil) entwickelten Formgebung genügen [26], um eine Feldüberhöhung an den Randbereichen zu vermeiden. Der Homogenitätsgrad dieser Elektrodenanordnung beträgt idealerweise Eins.

Stark inhomogene Feldverteilung

Spannungsführende metallische Spitzen und Kanten, die in direktem Kontakt mit dem Isolierstoff stehen, sind technisch relevante Fehlstellen, an denen lokal starke Feldüberhöhungen auftreten. Derartige Fehlstellen stellen potentielle Orte für die Entstehung von Teilentladungen dar, die eine starke Degradation des Isolierstoffes bewirken können und die vollständige Zerstörung der Isolierstrecke einleiten können. Zur Nachbildung derartiger Fehlstellen wurde eine mit Silikongel umgossene Spitze-Platte-Elektrodenanordnung verwendet. Diese besteht aus einer Plattenelektrode und einer Nadel, die waagrecht auf derselben Achse in einem Abstand von $s = 3 \text{ mm}$ angeordnet sind. Die Nadel (Hersteller: Ogura Jewel Industry Co. LTD) besteht aus poliertem Stahl (*Abb. 3.3*), der Nadeldurchmesser beträgt $d_N = 0,6 \text{ mm}$.

Der Homogenitätsgrad dieser Anordnung wird im Wesentlichen vom Krümmungsradius der Nadelspitze bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit kamen zwei Nadeln mit unterschiedlichen Krümmungsradien von $r_s = 5 \pm 1 \mu\text{m}$ und $50 \pm 1 \mu\text{m}$ zum Einsatz, wie sie üblicherweise für derartige Materialuntersuchungen eingesetzt werden [27;28;29]. *Abb. 3.4* zeigt beispielhaft die elektrische Feldverteilung im Prüfvolumen der Anordnung für $r_s = 50 \mu\text{m}$ und $s = 3 \text{ mm}$. Deutlich ist der lokal elektrisch hoch belastete Bereich vor der Nadelspitze zu erkennen.

3.1 Prüflinge

Zur Berechnung des Ausnutzungsfaktors der Spitze-Platte-Anordnung wird in der Literatur vielfach von einer Annäherung der Nadelkontur durch einen Rotationshyperboloiden ausgegangen, der durch den Spitzenradius r_s und die Schlagweite s vollständig beschrieben ist. Für diese Anordnung, lässt sich der Feldüberhöhungsfaktor $1/\eta$ und somit die maximale Feldstärke an der Nadelspitze nach Gl. 3.3 bestimmen [27;30].

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\sqrt{s(s+r)}}{\ln\left(\sqrt{(s+r)/r} + \sqrt{s/r}\right)} \quad (\text{Gl.3.3})$$

Danach ergibt sich der Homogenitätsgrad η bzw. Inhomogenitätsgrad $1/\eta$ für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Anordnungen zu:

$r_s :$	$r_s = 50 \mu\text{m}$	$r_s = 5 \mu\text{m}$
$\eta :$	0,0457	0,0065
$1/\eta :$	22	154

Tab. 3.2: Homogenitäts- bzw. Inhomogenitätsgrad der Spitze-Platte-Anordnung in Abhängigkeit vom Rundungsradius r_s der Nadelspitze für $s = 3 \text{ mm}$

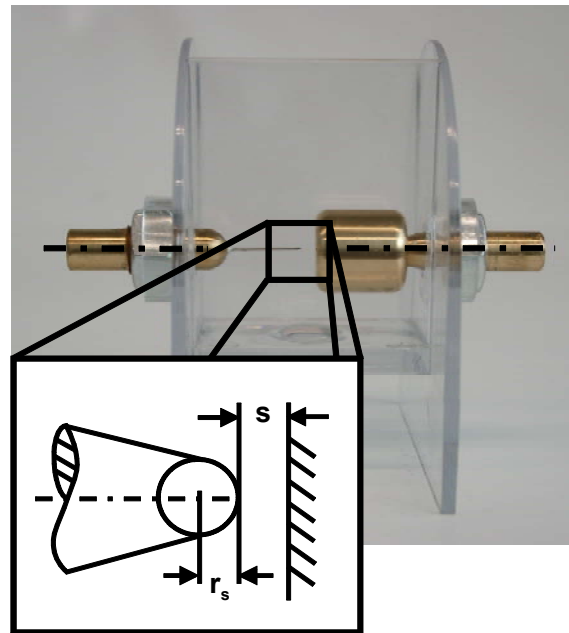


Abb. 3.3: Elektrodengeometrie zur Prägung einer stark inhomogenen Feldverteilung

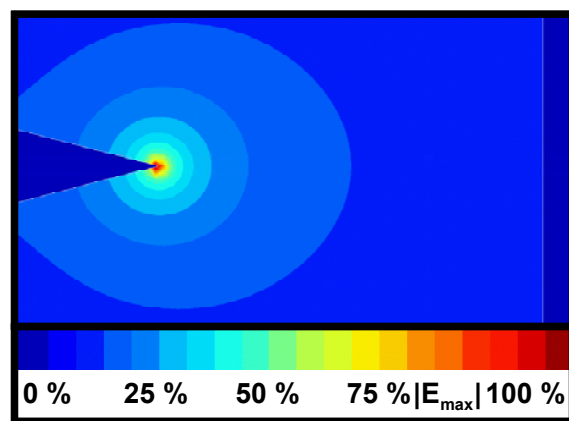


Abb. 3.4: Prägung einer stark inhomogenen elektrischen Feldverteilung $|E|$ mittels einer Spitze-Platte-Anordnung ($r_s = 50 \mu\text{m}$, $s = 3 \text{ mm}$)

Thermische und thermo-mechanische Eigenschaften des Standardprüflings

- **Formstabilität:** Die Untersuchung des Durchschlagverhaltens von Silikongel bei erhöhten Temperaturen erfordert einen Prüfkörper (Vergussform), der seine Formstabilität über einen spezifizierten Temperaturbereich beibehält. Der verwendete Standardprüfkörper besteht aus Polycarbonat (PC), dessen Formbeständigkeits-temperatur 124°C beträgt [31].

Eine thermische Beanspruchung oberhalb dieses Grenzwertes führt zu einem deutlich wahrnehmbaren Verlust der Formstabilität und damit konstruktiv bedingt zu einer undefinierten Lageänderung der Elektodenkonfiguration, was zu fehlerhaften Messwerten führen würde. Um eine undefinierte Lageänderung der Elektroden zu vermeiden, wurde die zulässige Temperatur auf 100°C festgelegt.

- **Thermische Ausdehnungen** des Prüfkörpergehäuses sind unvermeidbar und konstruktiv bedingt stets mit Änderungen des Elektrodenabstandes verbunden. Dieser Umstand ist bei Untersuchungen zur Ermittlung von Durchschlagfeldstärken, bei denen der Prüfkörper thermischen Belastungen ausgesetzt ist, falls notwendig, durch eine rechnerische Korrektur zu berücksichtigen. Die Bestimmung der Abhängigkeit des Elektrodenabstandes s von der Temperatur erfolgte für die standardmäßig eingesetzte Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung (siehe Abb. 3.1), deren Elektrodenabstand bei $T = 22^{\circ}\text{C}$ auf $s = 2 \text{ mm}$ eingestellt wurde. Die thermisch bedingte Änderung des Elektrodenabstandes wurde im Temperaturbereich von -20°C bis 100°C für diskrete Temperaturen (äquidistanten Messpunkte T_i) an fünf Prüfkörpern bestimmt. Durch die Bildung der arithmetischen Mittelwerte der bei den jeweiligen Temperaturen T_i ermittelten Schlagweiten s_i erhält man einen funktionalen Zusammenhang $s_i = f(T_i)$, der in guter Näherung durch eine lineare Funktion approximierbar ist. Die derart ermittelte Änderung der Schlagweite in Abhängigkeit von der Temperatur beträgt $\Delta s/\Delta T \approx 0,004 \text{ mm/K}$. Diese Beziehung wurde in Kapitel 4.2.1.4 verwendet, um die bei verschiedenen Temperaturen bestimmten Durchschlagspannungen auf die jeweilig entsprechenden Durchschlagfeldstärken umzurechnen, so dass ein direkter Vergleich der bei verschiedenen Temperaturen ermittelten Durchschlagfeldstärken möglich ist.

- **Thermisches Übertragungsverhalten:** Das thermische Übergangsverhalten des mit Silikongel befüllten Standardprüfkörpers ist im Hinblick auf die Festlegung und Optimierung von Vernetzungszeiten sowie für die Bestimmung von Zeiträumen, die zum Erreichen bestimmter thermischer Zustände im Prüfvolumen notwendig sind, von Interesse. Zur Bestimmung dieser Charakteristik wurde der Prüfling durch Heizen bzw. Kühlen von einem thermisch stationären Anfangszustand in einen neuen thermisch stationären Endzustand überführt. Die Messung der Temperatur erfolgt mittels eines mittig zwischen den Kugel-Elektroden eingebetteten Pt-100-Widerstandes. Aus den ermittelten Temperatur-Zeit-Charakteristiken (Abb. 3.5) lassen sich charakteristische Zeiten, die zum Erreichen bestimmter thermischer Zustände im Prüfvolumen benötigt werden, bestimmen. Die in Abb. 3.5 dargestellten Kennlinien gelten auch in guter Näherung für durchfeuchtete Prüflinge

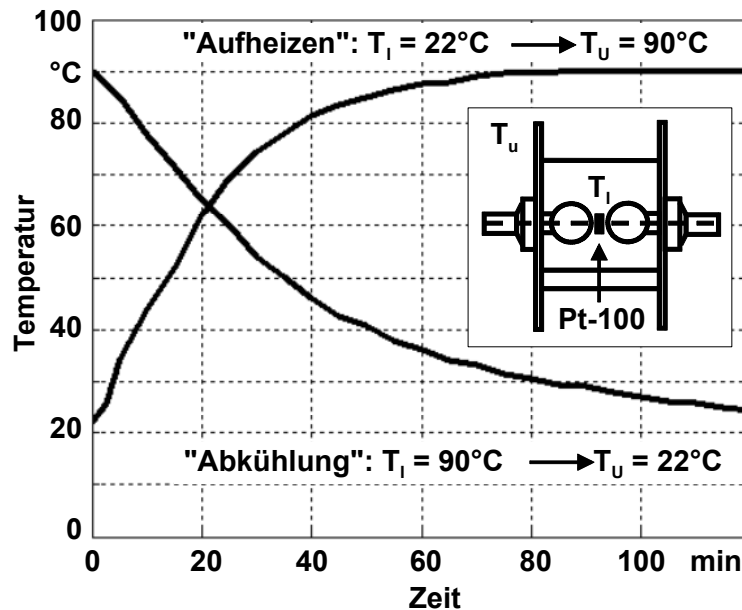


Abb. 3.5: Thermisches Verhalten des mit Silikongel befüllten Standardprüfkörpers

3.2 Prüfanlagen, Messtechnik und Prüfmethode

Elektrische Prüfanlagen und Messtechnik

- 50-Hz-Wechselspannungsprüfanlage:** In Abb. 3.6 ist die für die Durchschlagprüfung mit netzfrequenter Wechselspannung verwendete Prüfanlage dargestellt. Der Stelltransformator ermöglicht eine quasi stufenlose Einstellung der den Hochspannungstransformator speisenden Spannung. Die Spannungsmessung erfolgt hochspannungsseitig über einen kapazitiven Messteiler bestehend aus einer Kapazität $C_1 = 100 \text{ nF}$ und einem Scheitelspannungsmesssystem V_s , das eine zweite auf den jeweiligen Messbereich angepasste Kapazität enthält. Über einen Schutzwiderstand wird der Prüfling P mit der Hochspannung verbunden. Der Vorwiderstand beträgt $R_v = 2 \text{ M}\Omega$ und dient im Falle des Durchschlages zur Strombegrenzung. Die maximale Ausgangsspannung des Transformators beträgt 100 kV , der max. Ausgangsstrom 50 mA . Der vom Scheitelspannungsmesssystem V_s angezeigte Kennwert entspricht dem Spitzenwert der Prüfspannung.

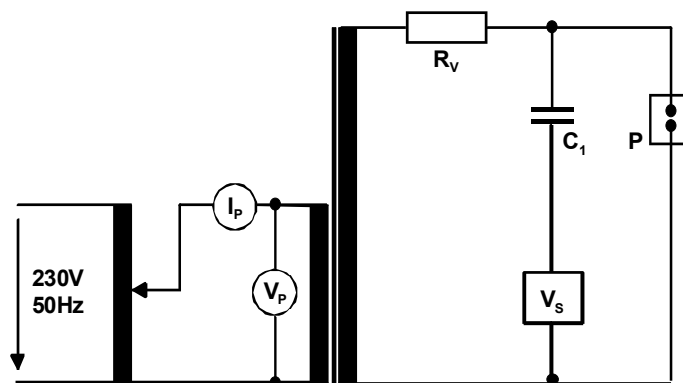


Abb. 3.6: 50-Hz-Wechselspannungsprüfanlage

nung dividiert durch den Faktor $\sqrt{2}$. Aufgrund der im gesamten Stellbereich auftretenden sehr geringen Abweichung der Prüfspannungsform von der idealen Sinusform, kann dieser Wert dem Effektivwert gleichgesetzt werden.

- Gleichspannungsprüfanlage:** Abb. 3.7 zeigt die verwendete Gleichspannungsprüfanlage. Die Gleichrichtung der vom Hochspannungstransformator bereitgestellten Wechselspannung erfolgt mittels einer Einweggleichrichtung, bestehend aus einer Diode D , einem Widerstand $R_V = 1\text{ M}\Omega$ und einer Kapazität $C = 10\text{ nF}$. Die Spannungsmessung erfolgt hochspannungsseitig über einen ohmschen Messteiler, bestehend aus $R_1 = 280\text{ M}\Omega$ und einem Spannungsmesssystem V_{UW} , das den zweiten auf den jeweiligen Messbereich angepassten Widerstand R_2 enthält.

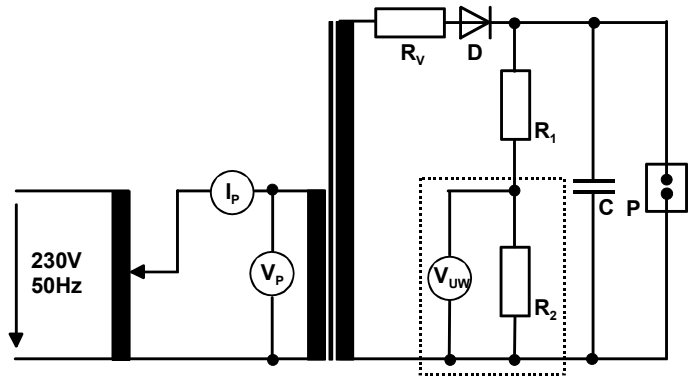


Abb. 3.7: Gleichspannungsprüfanlage

- Prüfumgebung:** Zur Vermeidung äußerer Überschläge wurden alle Durchschlagprüfungen in einer SF_6 -Umgebung (SF_6 : Schwefelhexafluorid) durchgeführt.

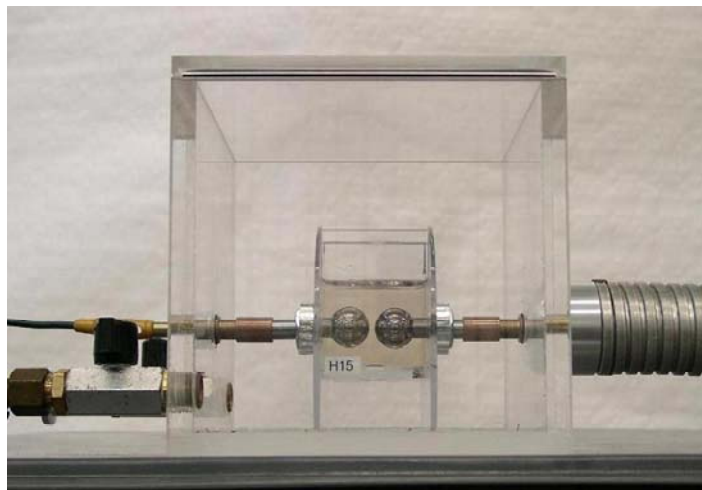


Abb. 3.8: Prüfling in Prüfgefäß mit SF_6 -Atmosphäre, die zur Verhinderung äußerer Überschläge dient

- Teilentladungsmesstechnik und Interpretation:** Bei Teilentladungen (TE) handelt es sich um Entladungsprozesse, die auf einen kleinen Teil der Isolierung beschränkt sind. Obwohl Teilentladungen in der Regel nicht unmittelbar zum Versagen der Isolierung führen, haben sie dennoch einen schädigenden Einfluss (Ero-

(AKV), der zur Auskopplung der Teilentladungsimpulse und zur Bereitstellung der Prüfspannung dient. Diese Messdaten, d.h. die Teilentladungsimpulse im Bezug zur anliegenden Prüfspannung, werden im Teilentladungsmesssystem (TEM) verarbeitet. Der Grundstörpegel der scheinbaren Ladung des gesamten Versuchsaufbaus beträgt in dem für die durchgeführten Untersuchungen relevanten Bereich der Prüfwechselfspannung von 0 V bis 20 kV weniger als $q_s < 3\text{ pC}$.

Moderne Teilentladungsmesssysteme stellen eine Vielzahl an Funktionen zur statistischen Verarbeitung und Darstellung der Messdaten zur Verfügung, die zur Bewertung der detektierten Teilentladungen herangezogen werden können [35]. Die "klassische" Teilentladungsinterpretation bei Wechselfspannung erfolgt anhand des Phasenwinkel-Ladungs-Diagrammes (PWD), in dem die gemessene scheinbare Ladung in Abhängigkeit zur Phasenlage der Prüfspannung aufgetragen ist. Das Erscheinungsbild der entsprechenden Teilentladung im PWD ist dabei abhängig vom physikalischen Prozess am Entstehungsort der Teilentladung. Aussagekräftige Kenngrößen im PWD sind die Phasenlage der Teilentladungen im Bezug zur Prüfwechselfspannung, Polaritätseffekte, Impulshäufigkeit und -regelmäßigkeit sowie die Veränderungen der Intensität der Teilentladungen mit der Spannung. Aufgrund der zugrunde liegenden physikalischen Effekte lassen sich Teilentladungen prinzipiell in vier Gruppen (Ursachen) einteilen. Ursachen für Teilentladungen können Feldüberhöhungen an scharfen Kanten metallischer Teile im Isolierstoff (äußere Teilentladungen), Hohlräume im Dielektrika (innere Teilentladungen), tangential belastete Grenzflächen (Gleit-, Oberflächenentladungen) oder schlecht verbundene metallische Strukturen (Mikrodurchschläge, Kontaktrauschen) sein [23;36].

Da im Laborversuch bei der Bestimmung des Verhaltens von Isolierstoffen unter der Einwirkung von Teilentladungen gezielt mit verschiedenartig modellierten Fehlstellen (z.B. Spitzen, Gaseinschlüsse) gearbeitet wird, dient die Analyse hier unter anderem dazu, die Fehlstelle anhand des charakteristischen Erscheinungsbildes der Teilentladungsimpulse im PWD nach [23;36] als die wirksame Teilentladungsquelle zu identifizieren. Die Bewertung der Isolationsfähigkeit eines Isolierstoffes bei Vorhandensein derartig modellierter Fehlstellen erfolgt anhand der zeitlichen Entwicklung der Teilentladungsaktivität, d.h. aus der Darstellung der scheinbaren Ladung über der Zeit (*siehe 4.2.2, Abb. 4.49*). Neben der Teilentladungseinsetzfeldstärke, die im Wesentlichen die materialeigene elektrische Festigkeit des Isolierstoffes charakterisiert, lassen sich aus der Korrelation der Teilentladungsaktivität und potentiell feststellbaren Zerstörungserscheinungen im Isolierstoff bzw. dem Versagen der Isolationsfähigkeit Aussagen über die Teilentla-

dungsresistenz des entsprechenden Isolierstoffes gewinnen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die gemessene Intensität von Teilentladungen allein für die Abschätzung ihrer Gefährlichkeit wenig nützlich ist, da nur die scheinbare Ladung an den Prüflingsanschlüssen und nicht die tatsächliche Ladung eines Teilentladungsimpulses erfasst werden kann. Daher ermöglicht der Messwert der scheinbaren Ladung nicht unbedingt eine direkte Aussage über die Schädigung im Inneren des Isolierstoffes [23].

Definitionen

Zusammenfassend sollen hier noch einmal die für diese Arbeit bedeutsamen Begrifflichkeiten aus dem Bereich der elektr. Festigkeitslehre dargestellt werden:

- **Elektrischer Durchschlag (elektrisches Versagen):** Erheblicher Verlust von Isoliereigenschaften des Prüflings unter elektrischer Beanspruchung, der im Prüfkreis einen Strom verursacht.
- **Durchschlagspannung:** Spannung, bei der ein Prüfling den Durchschlag unter festgelegten Bedingungen erfährt.
- **Durchschlagfeldstärke:** Unter Durchschlagfeldstärke bzw. elektrische Durchschlagfestigkeit wird der Scheitelwert der maximalen Feldstärke im Prüfvolumen zum Zeitpunkt des Durchschlages verstanden. Die Durchschlagfeldstärke berechnet sich aus dem Scheitelwert der Durchschlagspannung \hat{u}_D , dem Homogenitätsgrad η und dem Elektrodenabstand s der Elektrodengeometrie nach Gl. 3.4.

$$\hat{E}_{D_{\max}} = \frac{\hat{u}_D}{s \cdot \eta} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

mit

$\hat{E}_{D_{\max}}$: Scheitelwert der Durchschlagfeldstärke

\hat{u}_D : Scheitelwert der Durchschlagspannung

s : Elektrodenabstand (Schlagweite)

η : Ausnutzungsfaktor (Homogenitätsgrad, siehe 3.1)

- **Teilentladungseinsetzspannung und -feldstärke:** Im Rahmen dieser Arbeit wird unter der Teilentladungseinsetzspannung bzw. -feldstärke die Spannung bzw. Feldstärke verstanden, bei der im Spannungssteigerungsversuch erstmalig Teilentladungsimpulse mit einem Pegel der scheinbaren Ladung $q_s \geq 5 \text{ pC}$ detektiert werden.

- **Überschlag:** Verlust von Isoliereigenschaften im Gas oder im flüssigen Medium, das einen Prüfling unter elektrischer Beanspruchung umgibt.

Nichtelektrische Messtechnik und Prüfmethoden

- **Materialhärte und Adhäsionseigenschaften:** Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Silikongel beschränkt sich auf die Bestimmung der Härte sowie der Adhäsionseigenschaften. Diese Auswahl erschien sinnvoll, da die dem Silikongel zugesprochenen und für isoliertechnische Anwendungen besonders vorteilhaften mechanischen Eigenschaften im Wesentlichen durch diese beiden Größen zum Ausdruck kommen. Eine geeignete empirische Methode zur Charakterisierung und messtechnischen Ermittlung der Materialhärte und der Adhäsionseigenschaften von weichen Festkörpern insbesondere von Gelen, Klebern und Lebensmitteln ist die Textur Profil Analyse (TPA) [38]. Dieses Verfahren beruht auf der Messung der Kraft, die während eines definierten Messzyklus, bestehend aus einer Ein- und Ausfahrbewegung bei vorgegebenem Weg und vorgegebener konstanter Geschwindigkeit, auf einen Stempel wirkt. Durch eine genaue Messvorschrift hinsichtlich des verwendeten Stempels und des Messzyklus sowie der Geometrie der Probe und der Position der Messstelle an der Probenoberfläche ist das Verfahren eindeutig festgelegt. Aus der ermittelten Kraft-Zeit-Charakteristik lassen sich Härte und Adhäsionseigenschaften des Materials bestimmen.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurden mit einem Texture Analyser von Typ *TA.XT2* ausgeführt, der mit einem über einen kugelförmigen Messkopf mit einem definierten Kugeldurchmesser d_{KM} im Kontakt zur Probe stehenden Messstempel ausgestattet ist. Zu Beginn der Messung wird der Messstempel, der eine empfindliche Wägezelle enthält, mit einer konstanten Geschwindigkeit bis an die Oberfläche der zu untersuchenden Probe herangefahren. Die Erkennung der Oberfläche erfolgt durch einen Schwellwert, der als Kraft F_0 vorgegeben wird. Bei Erreichen des Auslösewertes F_0 , wird die eigentliche Kraft-Weg-Messung mit den gewählten Messparametern automatisch gestartet. Dabei fährt der Messstempel mit der vorgewählten konstanten Geschwindigkeit v_p in die Probe hinein bis die vorgegebene Eindringtiefe s_p erreicht ist. Nach Erreichen der Endposition fährt der Messstempel mit der gleichen konstanten Geschwindigkeit v_p bis an die Startposition zurück. Während des gesamten Messzyklus wird die Kraft F_p gemessen und als Kraft-Zeit-Kennlinie dargestellt. *Abb. 3.10* zeigt das Prinzip der Messung.

3.3 Statistische Versuchsauswertung

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Charakterisierung der Härte des Silikongels durch die Kraft F_H und die der Adhäsionseigenschaften durch die Kraft F_A unter Verwendung der in *Tab. 3.3* aufgeführten Messvorrichtungen und Verfahrensparameter.

<i>Texture Analyser</i>	<i>Typ TA.XT2</i>
<i>Messkopf ; Kugeldurchmesser</i>	<i>SMS P/0,25S ; $d_{KM} = 6,3 \text{ mm}$</i>
<i>Schwellwert</i>	<i>$F_0 = 0,05 \text{ N}$</i>
<i>Eindringtiefe</i>	<i>$s_p = 3 \text{ mm}$</i>
<i>Eindring-/Ausfahrgeschwindigkeit</i>	<i>$v_{Ein} = 1 \text{ mm/s}$; $v_{Aus} = 10 \text{ mm/s}$</i>
<i>Zylinderförmige Probe: Durchmesser d_p ; Höhe h_p</i>	<i>$d_p = 75 \text{ mm}$; $h_p = 50 \text{ mm}$ <i>Messstelle: $d_p/2$ (Zentrum)</i></i>

Tab. 3.3: *Messvorrichtungen und Verfahrensparameter*

- ***Chemische Analysen:*** Die durchgeführten chemischen Analysen wurden in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wollforschungsinstitut (DWI) an der RWTH Aachen von Dr. Weichold durchgeführt. Auf eine ausführliche Beschreibung der dabei angewandten Methoden wird hier verzichtet, da dies den Rahmen dieser Arbeit weit übersteigen würde. Vielmehr sei hier auf die entsprechende Fachliteratur, beispielsweise [74], verwiesen.

3.3 Statistische Versuchsauswertung

Das Versagen der elektrischen Festigkeit in Form von Entladungen (elektrischer Durchschlag) ist wegen der Vielzahl physikalischer Einflussgrößen nicht deterministisch beschreibbar. Deshalb ist es naheliegend, diese Größen als Zufallsgrößen aufzufassen und Kennwerte von Entladungen (z.B. Durchschlagsspannung) mit statistischen Methoden zu beschreiben [23]. Zur statistischen Auswertung der Versuchsdaten wurde die Weibull-Verteilung verwendet. Sie gehört zur Gruppe der Extremwertverteilungen, die alle von dem gleichen Modell ausgehen. Dieses Modell beinhaltet, dass jede eintretende Realisierung einen Extremwert (Minimum oder Maximum) aller möglichen Realisierungen darstellt. Übertragen auf das Durchschlagverhalten paralleler Isolierstrecken (z.B. parallele Stützisolatoren) bedeutet dies, dass der Durchschlag stets am zufällig dielektrisch schwächsten Teilelement der Isolierung erfolgt, bei kontinuierlichen Isolierungen (z.B. Kabel) zufällig im dielektrisch schwächsten Volumenelement.

Diese Theorie des schwachstellenbestimmenden Durchschlages wird heute als allgemein geeignet anerkannt, das Durchschlagverhalten insbesondere fester Dielektrika zu beschreiben. Daher sind Extremwertverteilungen, insbesondere die Weibull-Verteilung, zur statistischen Beschreibung des Durchschlagverhaltens fester Isolierstoffe prädestiniert [9;37;40]. Weiterhin rechtfertigt die Tatsache, dass im Rahmen dieser Untersuchungen nur ein relativ geringer Stichprobenumfang je Versuchsreihe (standardmäßig 10 Messwerte) zur Verfügung stand und daher Anpassungstests zur Bestimmung besser geeigneter theoretischer Verteilungsfunktionen zur Beschreibung des Durchschlagverhaltens zu keinen brauchbaren Ergebnissen führte [37;41], die Verwendung der Weibull-Verteilung.

Die Ableitung von Extremwertfunktionen erfolgt aus dem Multiplikationssatz der Statistik für unabhängige Ereignisse. Durch die Wahl unterschiedlicher Anfangsverteilungen entstehen unterschiedliche Extremwertverteilungen. Eine davon ist die Weibull-Verteilung, deren Verteilungsfunktion in ihrer allgemeinen, dreiparametrischen Form wie folgt definiert ist [37]:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-x_0}{x_{63}-x_0}\right)^\delta\right) & \text{für } x > x_0 \\ 0 & \text{für } x \leq x_0 \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

mit

$F(x)$: Theoretische Verteilungsfunktion

x_{63} : 63-%-Quantil (Lageparameter)

x_0 : Anfangswert (Schwellwert)

δ : Weibull-Exponent (Streumaß)

Durch diese Verteilungsfunktion wird die Zufallsgröße wahrscheinlichkeitstheoretisch vollständig charakterisiert. Aufgrund der problematischen Parameterschätzung für die Parameter der dreiparametrischen Weibull-Verteilung verwendet man in der Hochspannungstechnik häufig die zweiparametrische Form der Verteilung, die durch die Festlegung des Anfangswertes $x_0 = 0$ aus der dreiparametrischen Form hervorgeht. Insbesondere die Unzulänglichkeiten bei der Schätzung des Anfangswertes x_0 [37] rechtfertigen diese Vorgehensweise. Aufgrund der Tatsache, dass eine zu optimistische Schätzung des Anfangswertes x_0 - der beispielsweise im Falle einer Festigkeitsprüfung die sichere Stehspannung einer Isolierung repräsentieren würde - schwerwiegende technische Fehlschlüsse nach sich ziehen könnte, wurde auch im Rahmen dieser Arbeit die zweiparametrische Form der Verteilung verwendet.

Die Darstellung der empirischen und der theoretischen Verteilungsfunktion erfolgte im Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung, welches durch Anwendung einer doppellogarithmischen Transformation auf die theoretische Verteilungsfunktion entsteht. Aufgrund dieser Transformation erscheint die theoretische Verteilungsfunktion $F(x)$ in diesem Netz als Gerade. Zur Bildung der empirischen Verteilungsfunktion $F_i(x)$ werden die Einzelrealisierungen nach ihrer Rangfolge als Einzelpunkte entsprechend der Summenfunktion nach Gl. 3.6 in das Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung eingezeichnet. Diese Summenfunktion hat sich besonders für kleine Stichprobenumfänge bewährt und gewährleistet geringere Abweichungen der Einzelpunkte von der geschätzten Verteilungsgeraden $F(x)$ [9;42].

$$F_i(x) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad \text{für } n < 50 \quad (\text{Gl. 3.6})$$

mit

- $F_i(x)$: Empirische Verteilungsfunktion
- i : Rangfolge der Einzelrealisierung
- n : Stichprobenumfang

Die Schätzung der Parameter x_{63} und δ der theoretischen Verteilungsfunktion erfolgte nach der Maximum-Likelihood-Methode. Basierend auf dieser Parameterschätzung können charakteristische Werte, wie z.B. Konfidenzbereiche und Verteilungsmomente, bestimmt werden. Die graphische Darstellung der Verteilungsfunktionen sowie die Berechnung benötigter statistischer Kennwerte erfolgte mit den Programmsystemen XSel[©] sowie MATLAB[©] (Statistic Tool Box).

Bewertung von statistischen Versuchsdaten

Die Bewertung und der Vergleich statistischer Versuchsdaten (Versuchsreihen) erfolgte anhand der geschätzten Verteilungsparameter der zweiparametrischen Weibull-Verteilung, dem 63-%-Quantil der Verteilungsfunktion x_{63} und dem Weibull-Exponent δ , der ein Maß für die Streuung der Messwerte darstellt. Diese werden jeweils explizit im Weibull-Diagramm in der Form $[x_{63}; \delta]$ angegeben. Weiterhin werden die berechneten Konfidenzintervalle zur statistischen Bewertung der Versuchsreihen herangezogen. Zeigen die Konfidenzintervalle zweier geschätzter Verteilungsfunktionen eine ausgeprägte Überlappung, so kann auf keinen Merkmalsunterschied zwischen den Verteilungsfunktionen geschlossen werden, d.h. sie sind statistisch nicht voneinander unterscheidbar.

Abschätzung der sicheren Stehspannung (Dimensionierung von Isolierungen)

Aufgrund der erwähnten Unzulänglichkeiten bei der Parameterschätzung für die dreiparametrische Weibull-Verteilung (Gl. 3.5) wurde der Anfangswert, dem beispielsweise die Bedeutung einer sicheren Stehspannung bzw. -feldstärke zukommen kann, gleich Null gesetzt. Die Festlegung von Betriebsspannungen bzw. -feldstärken, muss daher anhand geeigneter Quantile (z.B. 1-%-Quantil der Durchschlagfeldstärke) der entsprechenden Verteilungsfunktion erfolgen. Alternativ kann die Ermittlung eines Orientierungswertes für die Stehspannung bzw. -feldstärke nach der in praktischen Fällen bewährten Näherung $X_{D0} = X_{D50} - 3 \cdot \rho$, die auf Grundlage der Gauß'schen Normalverteilung [41] beruht, erfolgen [26;43]. Dabei entspricht X_{D50} dem arithmetischen Mittelwert (z.B. Durchschlagspannung bzw. -feldstärke) und ρ der Varianz der entsprechenden Versuchsdaten.

4 Experimentelle Untersuchungen und Interpretation der Ergebnisse

Für den Einsatz von Silikongel als Isolierstoff in der Hoch- und Mittelspannungs-isolations- und -verbindungstechnik ist es notwendig, die dafür relevanten Werkstoffeigenschaften sowie deren Abhängigkeit von den unter den zu erwartenden Einsatzbedingungen auftretenden Einflussgrößen genau zu kennen. Dieses Kapitel beschreibt die diesbezüglichen, auf der Basis von Experimenten an Silikongel-Modellisolierungen gewonnenen, Erkenntnisse, die eine Grundlage für eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung von Silikongel-Isolierungen liefern sollen. Aufgrund des geringen Wissens über die hochspannungstechnischen Eigenschaften von Silikongel und deren Beeinflussung durch äußere Faktoren ist es notwendig, grundlegende Untersuchungen durchzuführen, die zu einer Beschreibung des Werkstoffes aus phänomenologischer Sicht führen sollen.

Der erste Teil der Untersuchungen zielt darauf ab, die relevanten Prozessparameter für die Herstellung von Silikongel-Modellisolierungen zu benennen und derart zu optimieren, dass die gefertigten Modellisolierungen die maximale elektrische Festigkeit besitzen. Ergänzende Untersuchungen zur Robustheit des Herstellungsprozesses gegenüber chargenabhängigen Schwankungen in der Werkstoff-Qualität sowie der Variation sonstiger fertigungsrelevanter Einflüsse vervollständigen diesen Teil der Untersuchungen. Zur Erweiterung des Materialverständnisses erfolgten Untersuchungen, die das Durchschlagverhalten von Silikongel im quasihomogenen Feld näher beleuchten sollen.

Darauf aufbauend wurde die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren und Vorbelastungen auf die Durchschlagfestigkeit (Kurzzeitprüfung) von Silikongel-Modellisolierungen untersucht. Neben dem Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit wurden weitere für die Auslegung von Isolierungen bedeutsame Fragestellungen, wie beispielsweise der Einfluss des Elektrodenmaterials, der Einfluss mechanischer Druckeinwirkungen sowie der Einfluss einer Vergrößerung der Isolierung auf die elektrische Festigkeit, aufgegriffen. Untersuchungen zum Einfluss der Vernetzungsdichte auf die elektrische Festigkeit sowie zur Regenerationsfähigkeit von Silikongel nach erfolgtem elektrischen Durchschlag runden diesen Teil der Arbeit ab.

Standardmäßig wurden für diese Untersuchungen Modellisolierungen eingesetzt, bei denen der Isolierstoff einer homogenen bzw. quasihomogenen Belastung ausgesetzt ist. Die Bestimmung der Durchschlagspannung bzw. -festigkeit der Modellisolierungen erfolgte dabei im Kurzzeitversuch (Rampentest) mit netzfrequenter Wechsellspannung, da diese die überwiegende Belastungsart in der Energieübertragungs- und -verteilungstechnik darstellt.

Zur Vervollständigung des Eigenschaftsprofils bei Kurzzeitbelastung wurden Untersuchungen zum Einfluss der Prüfspannungsform sowie der Wirkung leitfähiger feldstärkerhöhender Fehlstellen untersucht. Anhand dieser Kurzzeituntersuchungen kann eine erste Bewertung des Isolierstoffes bezüglich seiner isoliertechnischen Eigenschaften sowie derer Beeinflussung durch äußere Faktoren (Vorbelastungen), wie sie unter praxisrelevanten Bedingungen auftreten, erfolgen. Um eine systematische Einordnung des Isolierstoffes Silikongel zu ermöglichen und einen Bezug zu gut erforschten Isolierstoffen herstellen zu können, wurden zusätzlich ausgewählte Untersuchungen unter identischen Bedingungen für Silikongel und Silikonflüssigkeit durchgeführt.

Neben dem Kurzzeitdurchschlagverhalten von Silikongel-Modellisolierungen ist das Langzeit- bzw. Alterungsverhalten von Silikongel bei homogener und stark inhomogener Feldbelastung sowie unter der Wirkung praxisrelevanter äußerer Einflussgrößen zu bestimmen. Auch Veränderungen der charakteristischen mechanischen Eigenschaften, auf denen sich die vorteilhaften Eigenschaften von Silikongel begründen, wurden in die Betrachtungen mit einbezogen.

Da aufgrund der einzigartigen Kombination von elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Silikongel besonders an elektrisch belasteten Grenzflächen ein hohes Einsatzpotential des Werkstoffes zu erwarten ist, wurde das Durchschlagverhalten ausgewählter verschiedenartig gefertigter Silikongel/Silikongel- und Silikongel/Polymer-Längsgrenzflächen untersucht. Die Bestimmung der Dielektrizitätszahl und des Verlustfaktors von Silikongel schließen die Untersuchungen ab.

Die in diesem Kapitel durchgeführte Charakterisierung der hochspannungstechnischen Eigenschaften von Silikongel, stützt sich auf Untersuchungen, bei denen mehr als 1200 Prüflinge zum Einsatz kamen. Basierend auf den ermittelten Ergebnissen können die "Schlüsselparameter", die für den Einsatz von Silikongel als Isolierstoff in der Hoch- und Mittelspannungs-isolations- und -verbindungstechnik bedeutend sind, identifiziert und Richtlinien für den Entwurf und die Auslegung von Silikongel-Isolierungen abgeleitet werden.

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

Die Verarbeitung von Silikongel zur Herstellung von Isolationen erfolgt in mehreren Prozessschritten. Im ersten Prozessschritt erfolgt die Mischung beider Komponenten in einer Zweikomponenten-Misch- und -dosieranlage. Der eigentliche Mischvorgang findet dabei in einem statischen Mischrohr statt, über das das gemischte Material in die zu befüllende Vergussform geleitet wird. Zur Entfernung der im Gemisch eingeschlossenen Luft, die beispielsweise bereits in den einzelnen Komponenten enthalten ist oder aber beim Befüllen der Vergussform eingebracht wurde, ist eine Entgasung der mit Silikongel gefüllten Vergussform bei verringertem Druck vorzunehmen. Eine thermische Behandlung zur Beschleunigung der Vulkanisation (Vernetzungsreaktion) sowie die sich daran anschließende Konditionierung des Materials unter spezifizierten Bedingungen schließen den Verarbeitung ab. *Abb. 4.1* zeigt die schematische Darstellung des Verarbeitungsprozesses von Silikongel zur Herstellung von Modellisolierungen mit den dazugehörigen Prozessgrößen.

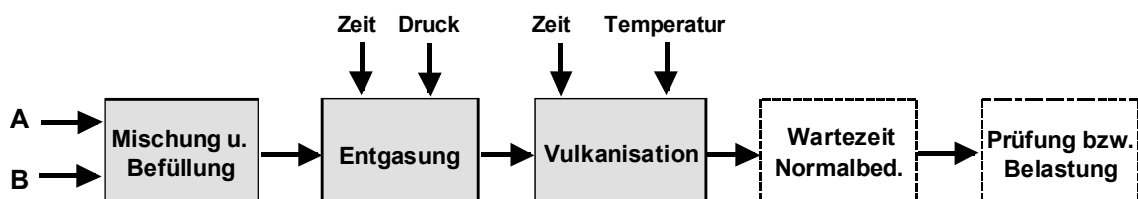


Abb. 4.1: *Verarbeitungsschritte zur Herstellung von Silikongel-Isolierungen*

Neben den Parametern des Verarbeitungsprozesses selbst sind weitere Faktoren zu betrachten, die einen potentiellen Einfluss auf die elektrische Festigkeit der Silikongel-Isolierung besitzen. Die Beschaffenheit bzw. der Zustand der Elektrodenoberfläche hinsichtlich der Reinheit vor dem Verguss mit Silikongel hat erwartungsgemäß einen großen Einfluss auf die Durchschlagfestigkeit der Isolierung. Zudem können potentielle Schwankungen in der Qualität des eingesetzten Silikongels zu veränderten elektrischen Materialeigenschaften führen.

Darüber hinaus ist ein Einfluss der Lagerungsbedingungen und -dauer der Komponenten vor der Verarbeitung auf das Durchschlagverhalten des Vulkanisates nicht auszuschließen. Zusätzlich ist zur Vermeidung von Vulkanisationsstörungen (d.h. zur Sicherstellung einer spezifikationsgerechten Vulkanisation) die Kompatibilität zu den eingesetzten Materialien, die in direktem Kontakt mit dem unvernetzten Gemisch stehen (z.B. Vergussform), sicherzustellen.

Bei den additionsvernetzenden RTV-2 Silikonkautschuken kann es durch eine Reihe von Substanzen, die im Kontakt zu dem unvernetzten Gemisch stehen und die Funktion des Platin-Katalysators beeinträchtigen, zu Vulkanisationsstörungen kommen (Inhibierung). Diese Substanzen (Inhibitoren) können sich sowohl an der Oberfläche eines mit dem Gemisch in Kontakt kommenden Substrates als auch in der Umgebungsluft befinden. Als die wichtigsten inhibierenden Stoffe sind Schwefel bzw. bestimmte Schwefelverbindungen, Amine und aminhaltige Stoffe, Urethane, Organometalle und dabei speziell Organozinn-Verbindungen sowie diverse natürliche und synthetische Öle, Fette und Wachse zu benennen. Flüssige Anteile, deutlich weichere Vulkanisatoberflächen im Kontaktbereich oder eine deutlich verzögerte Ausvulkanisation weisen auf eine Inhibierung hin [12;44].

Aus den vorstehenden Gründen wurden Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen Prozessparameter für die Verarbeitung von Silikongel zur Herstellung von Modellisolierungen durchgeführt. Darüber hinaus war die Reproduzierbarkeit des gesamten Herstellungsprozesses für die Silikongel-Modellisolierungen sicherzustellen. Denn nur unter dieser Voraussetzung ist es möglich, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit in unterschiedlichen Versuchsreihen ermittelten Untersuchungsergebnisse direkt in Beziehung zueinander zu setzen (Vergleichbarkeit). Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit, das Verhalten von Silikongel unter hohen elektrischen Belastungen zu ermitteln, wurde zweckmäßigerweise eine möglichst hohe elektrische Festigkeit in Kombination mit einer geringen Messwertstreuung als Gütekriterium für ein optimal verarbeitetes Silikongel bzw. eine optimal gefertigte Silikongel-Modellisolierung definiert. Darüber hinaus ist eine ungestörte und vollständige Vernetzung des Materials, wodurch sich Vulkanisate mit definierten mechanischen Eigenschaften ergeben, eine stets zu erfüllende Voraussetzung.

Die elektrische Prüfung der unter verschiedenen Verarbeitungsbedingungen hergestellten Silikongel-Modellisolierungen erfolgte im Spannungssteigerungsversuch (Rampentest) mit netz-frequenter Wechselspannung. Als Elektrodenanordnung wurde eine Kugel-Kugel-Anordnung verwendet, die ein quasihomogenes Feld im Prüfvolumen zwischen den Kugelelektroden generiert (*siehe 3.1*). Die Wahl dieser Anordnung erscheint für diese Art von Untersuchungen sinnvoll, da die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fehlstellen im elektrisch hoch belasteten Isolierstoffvolumen (z.B. Lufteinschlüsse) hier um ein Vielfaches größer ist als bei Verwendung von Elektrodenanordnungen, die nur lokale Bereiche des Isolierstoffes einer hohen elektrischen Belastung aussetzen (z.B. Spitze-Platte-Anordnung).

Die mechanische Charakterisierung des im Sinne der elektrischen Festigkeit als optimal angesehenen Vulkanisates anhand der Größen Härte und Adhäsionsfähigkeit, die als weitere Qualitätsmerkmale herangezogen werden, schließen die Untersuchungen ab.

4.1.1 Entgasung

Beobachtungen an transparentem Silikongel (*siehe 2.1*) zeigten, dass nach dem Befüllen der Vergussform mit dem noch unvernetzten Silikongel im Inneren des Materials deutlich sichtbare Gaseinschlüsse vorhanden sind (*siehe Abb. 4.2*). Derartige gasgefüllte Hohlräume im Dielektrikum sind generell als Schwachstellen in der Isolation anzusehen, die einen Ausgangspunkt für eine teilentladungsbedingte Materialzerstörung darstellen. Aus diesem Grund sind vorhandene Gaseinschlüsse vor Abschluss der Vulkanisation möglichst vollständig aus dem Gemisch zu entfernen. Dabei sind die Entgasungsparameter Druck und Zeitdauer so zu variieren, dass eine möglichst effektive und vollständige Entfernung der Gaseinschlüsse stattfindet. Dies müsste sich in einer erhöhten elektrischen Festigkeit des optimal entgasten Vulkanisates widerspiegeln.



Abb. 4.2: Lufteinschlüsse in nicht entgastem Silikongel

In der Literatur finden sich nur wenige Angaben über die für die Entgasung von Silikongel anzuwendenden Entgasungsdrücke und -zeiten, die speziell darauf abzielen, Vulkanisate mit einer möglichst hohen elektrischen Festigkeit zu erzeugen. Der Silikongel-Hersteller *WACKER* empfiehlt für die Verarbeitung seiner Silikongele einen Entgasungsdruck von 10 hPa bis 20 hPa und einen Richtwert für die Entgasungsdauer von 5 min [44]. *RUEMENAPP* verwendet bei der Verarbeitung des Silikongels für seine Untersuchungen einen Druck von 20 hPa , der über einen Zeitraum von 10 min ansteht [3]. Detailliertere Untersuchungen zur Ermittlung optimaler Entgasungsparameter mit dem Ziel, Silikongel mit einer hohen elektrischen Festigkeit zu erzielen, führte *REUTER* durch. Er erzielte bei der Verwendung eines Entgasungsdruckes von 5 hPa über einen Zeitraum von 15 min Vulkanisate mit der höchsten elektrischen Festigkeit [45]. Trotz der Unterschiede in der Wahl der Entgasungsparameter weisen alle Autoren einheitlich auf die Bedeutsamkeit einer Entgasung des Silikongels vor Abschluss der Vernetzung hin.

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

Voruntersuchungen zum zeigten, dass Effektivität und Durchführbarkeit der Entgasung stark von der verwendeten Vergussform abhängig sind und aus diesem Grund die Formulierung einer allgemeingültigen Entgasungsvorschrift nicht möglich ist. Dieser Umstand und die Tatsache, dass seitens des Herstellers des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Silikongels keine Angaben zur Wahl der Entgasungsparameter zur Verfügung stehen, machten Untersuchungen zur Ermittlung optimaler Entgasungsparameter für die eingesetzte Vergussform zwingend erforderlich.

Die Untergrenze des Entgasungsdruckes wird durch die Expansion des Silikongels unter Einwirkung des Unterdruckes bestimmt. Weiterhin ist durch die Verwendung von sehr niedrigen Entgasungsdrücken das Ausgasen flüchtiger Bestandteile (z.B. Additive, niedermolekulare Bestandteile), die für eine ordnungsgemäße Vulkanisation notwendig bzw. zur Erzielung bestimmter Materialeigenschaften erforderlich sind, nicht auszuschließen [44;45]. Demgegenüber steht, dass bei der Verwendung von höheren Entgasungsdrücken eine effektive Entfernung von Lufteinschlüssen nicht mehr gewährleistet ist. Die Expansion des Silikongels kann durch die Wahl eines geeigneten Druck-Zeit-Profiles beeinflusst werden. Dabei bewirkt ein kurzzeitiges Belüften - d.h. die Einwirkung von Umgebungsdruck - ein Zerplatzen und Zusammenfallen der Blasen.

Die in *Abb. 4.3* dargestellte Bildsequenz zeigt anhand des mit Silikongel gefüllten Standardprüfkörpers verschiedene Stadien des Entgasungsprozesses (10 hPa, $t = 0$ min bis 15 min), der sich unmittelbar an die Befüllung anschließt. Deutlich ist die anfänglich starke Expansion des Silikongels zu erkennen (*Abb. 4.3a*). Durch das Fortschreiten der Vulkanisation ist die maximal mögliche Entgasungsdauer festgelegt.

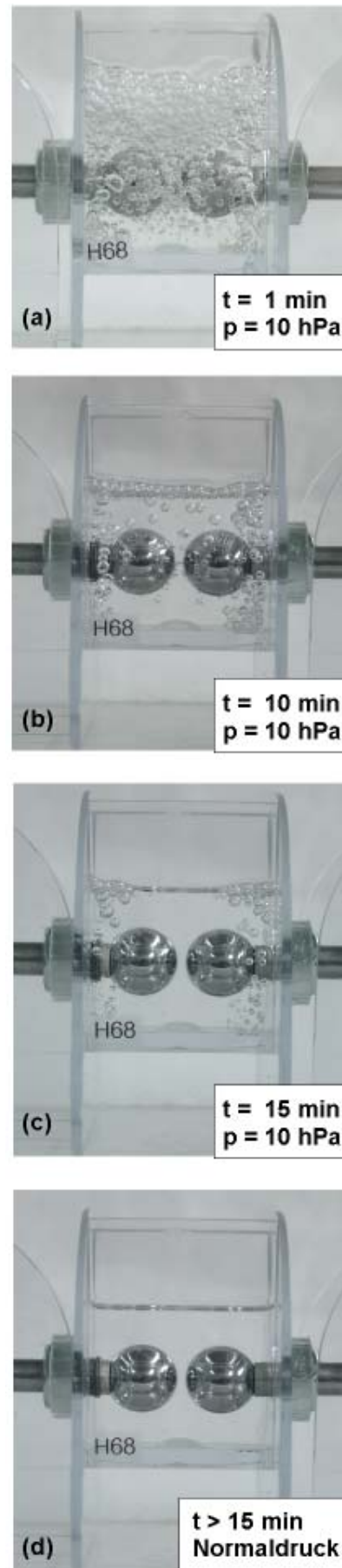


Abb. 4.3: Entgasungsprozess

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

Die durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss des Entgasungsprozesses auf die elektrische Festigkeit des Silikongels erfolgten im Parameterbereich von 10 hPa bis 100 hPa für den Entgasungsdruck und für eine Entgasungsdauer von 5 min bis 60 min . Unmittelbar nach der Entgasung erfolgte die Vernetzung des Silikongels über 2 h bei 90°C . Die elektrische Prüfung erfolgte nach einer Wartezeit von 24 h bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (23°C , $< 40 \% \text{ r.F.}$). Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass in Verbindung mit der verwendeten Vergussform (siehe 3.1, Abb. 3.1) eine gestufte Entgasung beginnend mit 100 hPa für 10 min gefolgt von 10 hPa für weitere 10 min mit kurzzeitigen Belüftungen (Einwirkung von Normaldruck) ein Vulkanisat mit der höchsten Durchschlagspannung ergibt, das im Sinne des gewählten Gütekriteriums als optimal anzusehen ist. Die in Abb. 4.4 dargestellten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von nicht entgasten und dem nach der angegebenen Vorschrift entgasten Silikongel machen den signifikanten Einfluss der Entgasung deutlich.

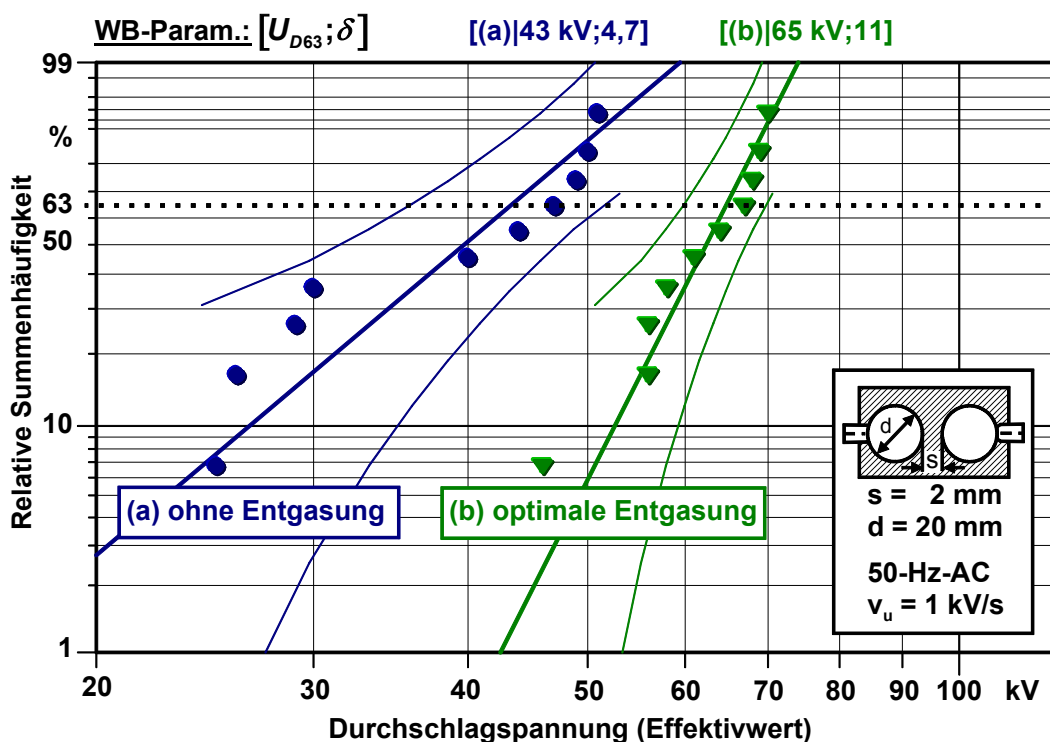


Abb. 4.4: Einfluss der Entgasung auf die Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung der Silikongel-Modellisierungen

Verglichen mit einem nicht entgasten Vulkanisat wurde durch eine optimale Entgasung eine Steigerung der 63-%-Durchschlagspannung um 50 % verbunden mit einer deutlichen Abnahme der Messwertstreuung erreicht. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Variationen der Entgasungsparameter um den als optimal identifizierten Parameterbereich keinen signifikanten Einfluss auf die Durchschlag-

festigkeit der Vulkanisate haben. Beispielsweise liefert eine Entgasung bei 100 hPa über einen Zeitraum von 30 min Vulkanisate, deren Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung sich statistisch nur unwesentlich von der in *Abb. 4.4 (b)* dargestellten unterscheidet. Damit ist nachgewiesen, dass eine Entgasung des unvernetzten Silikongels eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen einer hohen elektrischen Festigkeit der Silikongel-Isolierung ist. Die geringere Durchschlagfestigkeit des nicht entgasten Silikongels kann dabei direkt auf das Vorhandensein von Fehlstellen in Form von Gaseinschlüssen im Prüfvolumen zurückgeführt werden.

Beobachtungen an transparentem Silikongel zeigten, dass nach der Entgasung keine sichtbaren Gaseinschlüsse mehr im Silikongel vorhanden sind. Dagegen sind in nicht entgastem Silikongel deutliche Lufteinschlüsse feststellbar (*siehe Abb. 4.2*). Hier verhindert die niedrige Viskosität des gemischten, aber noch unvernetzten Silikongels das Entweichen der gasförmigen Einschlüsse aufgrund der Schwerkraft. Der von gasgefüllten Hohlräumen in polymeren Isolierstoffen ausgehende, die elektrische Festigkeit mindernde Effekt ist bekannt und ausführlich in der Literatur beschrieben [23;40]. Dabei beruht die von einer im elektrisch belasteten Silikongel eingebetteten, luftgefüllten Fehlstelle ausgehende, festigkeitsmindernde Wirkung auf zwei sich gegenseitig begünstigenden Eigenschaften. Einmal kommt es aufgrund der unterschiedlichen relativen Dielektrizitätszahlen von Silikongel ($\epsilon_{r,S} \approx 2,8$) und Luft ($\epsilon_{r,L} \approx 1$) zu einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke in der gasgefüllten Fehlstelle. Eine Vorschrift zur Berechnung der elektrischen Feldstärke im Inneren eines kugelförmigen Hohlraumes, der in einem elektrisch homogen belasteten, ungestörten Dielektrikum eingeschlossen ist, findet sich in [40;46]. Danach ergibt sich im Inneren der kugelförmigen, luftgefüllten Fehlstelle eine um den Faktor $3\epsilon_{r,S}/(\epsilon_{r,L}+2\epsilon_{r,S})$ gegenüber der Grundfeldstärke E_0 erhöhte homogene Feldstärke E_L . Neben der erhöhten Feldstärke in der luftgefüllten Fehlstelle kommt zusätzlich die gegenüber der des ungestörten Silikongels geringe elektrische Festigkeit der Luft zum Tragen. Daher können in derartigen Fehlstellen auch in dem Fall, dass die elektrische Feldstärke weit unter der Durchschlagfeldstärke des ungestörten Silikongels liegt, Teilentladungen entstehen.

Die Messung der Teilentladungsaktivität an nicht entgasten elektrisch belasteten Prüflingen zeigte stets ein Auftreten innerer Teilentladungen, lange bevor es zu einem elektrischen Durchschlag kam. Eine von Teilentladungen in luftgefüllten Hohlräumen ausgehende Degradation von Silikongel wies *EBKE* anhand einer Modellanordnung bestehend aus einer elektrisch homogen belasteten Silikongel-Probe mit einer künstlich darin eingebrachten Luftblase nach [34].

4.1.2 Vulkanisation

Die Reaktivität, die durch die Kenngrößen Verarbeitungszeit (Topfzeit) und Vulkanisationszeit charakterisierbar ist, ist abhängig von der Temperatur und deren Einwirkdauer. Die Kenntnis einer potentiellen Abhängigkeit zwischen der elektrischen Festigkeit und dem Vulkanisationsprozess ist im Hinblick auf die Anwendbarkeit möglicher Verarbeitungstechnologien von großem praktischen Interesse. Beispielsweise kann die Anwendung höherer Vernetzungstemperaturen eine deutliche Zeitersparnis während der Fertigung bewirken. Dagegen kann eine Raumtemperaturvernetzung (Kaltvernetzung) beim Kontakt mit temperaturempfindlichen Materialien vorteilhaft sein. Neben der thermischen Beeinflussung des Vulkanisationsprozesses selbst ist der Einfluss auf die gesamte Isolierung, bestehend aus Prüfkörpergehäuse, Elektroden und dem Isolierstoff, zu betrachten. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Werkstoffe können beim Erwärmen und Abkühlen der Proben mechanische Spannungen entstehen, die zu einer Ablösung des Silikongels von der Elektrodenoberfläche und damit verbunden zu einer erheblichen Herabsetzung der elektrischen Festigkeit der Isolierung führen könnten. Daher war sicherzustellen, dass derartige Effekte, die nicht von den elektrischen Eigenschaften des Isolierstoffes herrühren, ausgeschlossen sind.

Laut Herstellerempfehlung ist die Vernetzung des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Silikongels bei 90°C durchzuführen. Aufgrund der Tatsache, dass der Einsatz höherer Vernetzungstemperaturen die Verwendung einer temperaturbeständigeren Vergussform erfordern würde (*siehe 3.1*), erfolgte hier eine Beschränkung der Vernetzungstemperatur auf 90°C . Daneben wurde die Vulkanisation bei 22°C durchgeführt, um eine Verarbeitung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen zu simulieren. Der Abschluss der Vernetzungsreaktion, die von den geometrischen Beschaffenheiten der Vergussform abhängig ist, wurde über die Materialhärte bestimmt. Die Bestimmung der mechanischen Härte (Herstellerspezifikation, *vgl. 4.1.6*) des Vulkanisates zeigte, dass die Vernetzung des Silikongels in Verbindung mit der hier zum Einsatz kommenden Vergussform nach Einwirken einer Temperatur von 90°C über einen Zeitraum von 2 h als abgeschlossen betrachtet werden kann. Dagegen nimmt die Vernetzung bei Raumtemperatur wesentlich mehr Zeit in Anspruch. Die elektrische Prüfung der bei erhöhter Temperatur vernetzten Proben erfolgte nach einer 24-stündigen Lagerung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen.

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

Die in *Abb. 4.5* dargestellten 95%-Konfidenzbereiche der ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung zeigen eine vollständige Überlappung. Daher ist ein Einfluss der Vernetzungstemperatur auf die Durchschlagspannung für die untersuchten Vernetzungsparameter nicht nachweisbar.

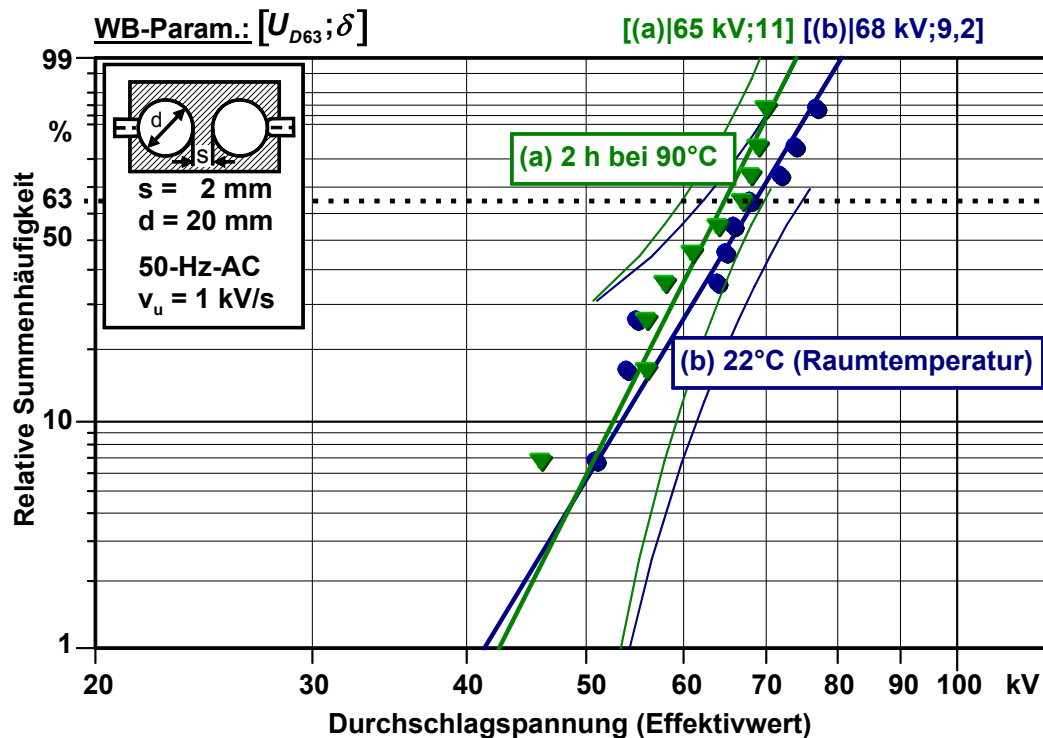


Abb. 4.5: Einfluss der Vernetzungstemperatur auf die Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung der Silikongel-Modellisolierungen

Aufgrund der unveränderten Durchschlagspannung der Modellisolierungen kann die Entstehung von Fehlstellen an den Grenzflächen zwischen dem Silikongel und der Elektrodenoberfläche in Form von Ablösungen während der sich der Vulkani-sation bei 90°C anschließenden Abkühlphasen ausgeschlossen werden. Zusätzlich unterstreichen die in Kapitel 4.2.1.6 beschriebenen Untersuchungen zum Einfluss von mechanischer Druckeinwirkung auf die Durchschlagfestigkeit der hier einge-setzten Modellisolierung die hohe Qualität der Grenzfläche unter der Einwirkung von Normaldruck. Aufgrund der Tatsache, dass im allgemeinen die elektrische Festigkeit von Grenzflächen abhängig vom Anpressdruck ist, jedoch für die hier eingesetzte Modellisolierung ein derartiger Einfluss nicht festgestellt werden kann, ist davon auszugehen, dass bereits unter Normaldruck ein optimaler Verbund zwischen Silikongel und der Elektrodenoberfläche erreicht wird. Demnach werden die durch die thermischen Ausdehnungen auftretenden mechanischen Spannungen durch die mechanischen Eigenschaften des Silikongels (Klebrigkeit, Elastizität) kompensiert.

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

Darüber hinaus zeigen Untersuchungen zur Bewertung des Alterungsverhaltens von Silikongel unter thermischer Belastung (*siehe 4.3.3.1*), dass ein Einfluss einer verlängerten Vulkanisationszeit bei erhöhter Temperatur auf die elektrische Festigkeit nicht zu erwarten ist. Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen, die auf keine Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit von der beim Vulkanisationsprozess herrschenden Temperatur (22°C und 90°C) und deren Einwirkungsdauer schließen lassen, erfolgt der Vernetzungsprozess bei der Herstellung der Silikongel-Modellisolierungen im Sinne einer effektiven Fertigung (Zeitersparnis) bei 90°C über einen Zeitraum von 2 h.

4.1.3 Präparation der Elektrodenoberfläche vor dem Verguss mit Silikongel

Fremdschichten auf den Elektrodenoberflächen, die zu einer verminderten Anhaftung des Silikongels auf der Elektrodenoberfläche führen oder Vulkanisationsstörungen verursachen, können die elektrische und mechanische Qualität der Grenzfläche zwischen Silikongel und Elektrodenoberfläche stark vermindern. Die Reinheit der Elektrodenoberflächen, d.h. das Vorhandensein möglicher Fremdschichten, kann somit einen signifikanten Einfluss auf die elektrische Festigkeit der Isolierung besitzen.

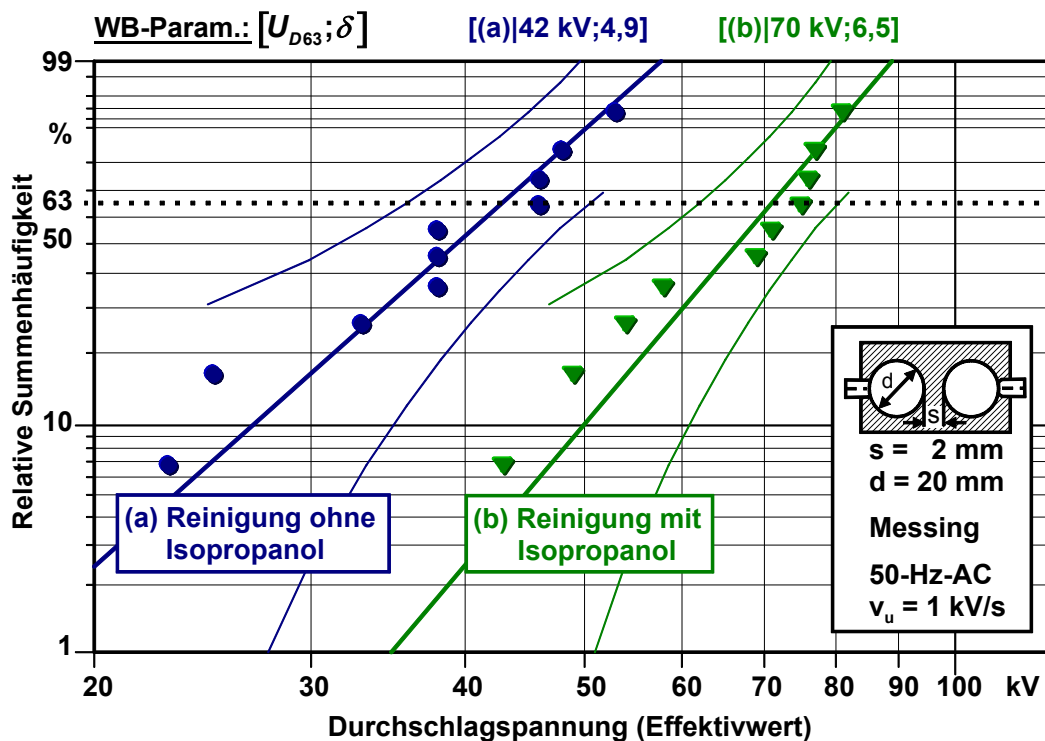


Abb. 4.6: Verteilungsfunktionen der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Vorbehandlung der Elektrodenoberflächen (Messing) vor dem Verguss mit Silikongel

Um eine möglichst gleichbleibende Oberflächenqualität mit hohem Reinheitsgrad zu erreichen, erfolgte eine gründliche Reinigung der Elektrodenoberflächen mit in Isopropanol getränkten Präzisionstüchern (Kimwipes Tissues[®]) vor dem Verguss mit Silikongel. *Abb. 4.6* zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Prüflingen, deren Messingelektroden im Anlieferungszustand ohne Isopropanol, d.h. ausschließlich unter der Verwendung trockener Präzisionstücher gereinigt wurden, sowie von Prüflingen bei denen die Reinigung zusätzlich mit Isopropanol erfolgte. Das Ergebnis macht deutlich, dass eine ungenügende Reinigung der Elektrodenoberflächen zu einer drastischen Verminderung der Durchschlagspannung (40 % bezüglich des 63-%-Quantils) sowie zu einer deutlichen Vergrößerung der Messwertstreuung führt. Bereits die feststellbare verminderte Anhaftung des Silikongels an der Oberfläche der ungereinigten Elektroden deutet die herabgesetzte elektrische Qualität der Grenzfläche an und erklärt die verminderte Durchschlagspannung der Modellisolierung.

Diese Untersuchung dokumentiert die Notwendigkeit einer sorgfältigen Reinigung der Elektrodenoberfläche, die Voraussetzung ist, um reproduzierbare hohe elektrische Festigkeitswerte zu erreichen. Eine Reinigung der Elektrodenoberflächen mit in Isopropanol getränkten Präzisionstüchern vor dem Verguss mit Silikongel wurde daher standardmäßig bei der Fertigung aller Prüflinge durchgeführt.

4.1.4 Lagerung der Komponenten

Untersucht wurde der Einfluss von Lagerungsbedingungen bzw. -dauer der Komponenten *A* und *B* vor der Verarbeitung auf die Durchschlagfestigkeit des Vulkanisates. Die Kenntnis potentieller Änderungen im Durchschlagverhalten gibt wichtige Hinweise für den praktischen Umgang mit dem Material und ermöglicht Aussagen über die Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen, bei denen die Fertigung der Prüflinge aus unterschiedlich lang gelagerten Komponenten erfolgte. Als potentielle Einflüsse auf die Komponenten sind die Absorption von Feuchtigkeit sowie die Entmischung der Rohstoffe (Separation) aufgrund verschiedener Stoffdichten zu benennen [44]. Verglichen wurde die Durchschlagspannung eines Vulkanisates, das nach einer viermonatigen Standzeit der Komponenten in den luftdicht verschlossenen Vorratskammern der Misch- und Dosieranlage hergestellt wurde, mit einem Vulkanisat, das unmittelbar aus den Komponenten im Anlieferungszustand hergestellt wurde.

Aus *Abb. 4.7* wird deutlich, dass eine längere Lagerungsdauer der Komponenten vor der Verarbeitung zu einer Abnahme der Durchschlagspannung des Vulkanisates führt. Gegenüber Vulkanisaten, die aus Komponenten im Anlieferungszustand

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

hergestellt wurden, zeigen Vulkanisate, deren Herstellung aus Komponenten nach einer Standzeit von vier Monaten in den luftdicht verschlossenen Vorratskammern der Misch- und Dosieranlage erfolgte, eine Abnahme der 63-%-Durchschlagsspannung um 13 %.

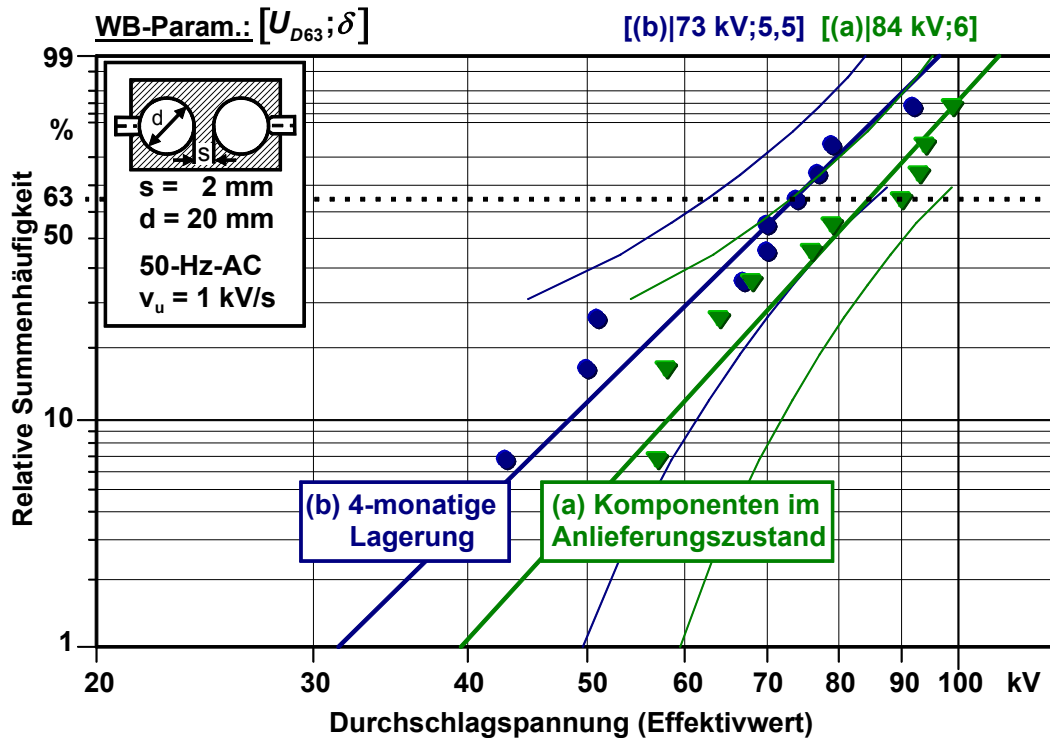


Abb. 4.7 Einfluss der Lagerungsdauer der Komponenten A und B auf die Verteilungsfunktion der Durchschlagsspannung der Vulkanisate

Wie bereits dargelegt, wird eine Aufnahme von Feuchtigkeit sowie die Separation der in den einzelnen Komponenten enthaltenen Rohstoffe aufgrund der Schwerkraft als Ursache für das ermittelte Verhalten angesehen. Beobachtungen zeigten, dass Komponente B in einer Umgebung mit erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt chemisch reagierte, was durch die Ausbildung deutlich wahrnehmbarer Vernetzungserscheinungen an deren Oberfläche zum Ausdruck kam. Darüber hinaus ist von Silikonflüssigkeit, die ein wesentlicher Bestandteil beider Komponenten ist, bekannt, dass sie Feuchtigkeit aufnimmt, womit ein signifikanter Verlust der elektrischen Festigkeit einhergeht (vgl. 4.2.1.5).

Zusätzlich dazu war nach einer längeren Lagerungsdauer eine deutliche Entmischung an der Komponente A feststellbar. Diese enthält weiß gefärbte Additive, die sich nach längerer Standzeit am Grund der Vorratskammer des Mixers absetzten. Die Verarbeitung der Komponenten ohne ein erneutes Durchmischen führt demnach zu Vulkanisaten mit einer stark differierenden Zusammensetzung an Rohstoffen. Eine Kontamination mit Fremdstoffen sowie chemische Prozesse sind

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

zusätzlich als weitere Ursachen für den beobachteten Festigkeitsverlust nicht auszuschließen. Diese Untersuchung zeigt, dass eine längere Lagerung der Komponenten zu Vulkanisaten mit einer verringerten elektrischen Festigkeit führt. Daher sind längere Lagerungszeiten bzw. Standzeiten in den Vorratsbehältnissen der Misch- und Dosieranlage vor der Verarbeitung zu vermeiden.

4.1.5 Unterschiedliche Chargen

Zur Erfassung möglicher chargenabhängiger Qualitätsschwankungen des im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Silikongels wurde die Durchschlagspannung von Vulkanisaten, die aus den Komponenten unterschiedlicher Chargen im Anlieferungszustand hergestellt wurden, bestimmt und miteinander verglichen. Die Fertigung der Proben sowie die elektrische Prüfung erfolgte dabei stets unter identischen Bedingungen. *Abb. 4.8* zeigt die Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung der aus fünf verschiedenen Chargen hergestellten Prüflinge.

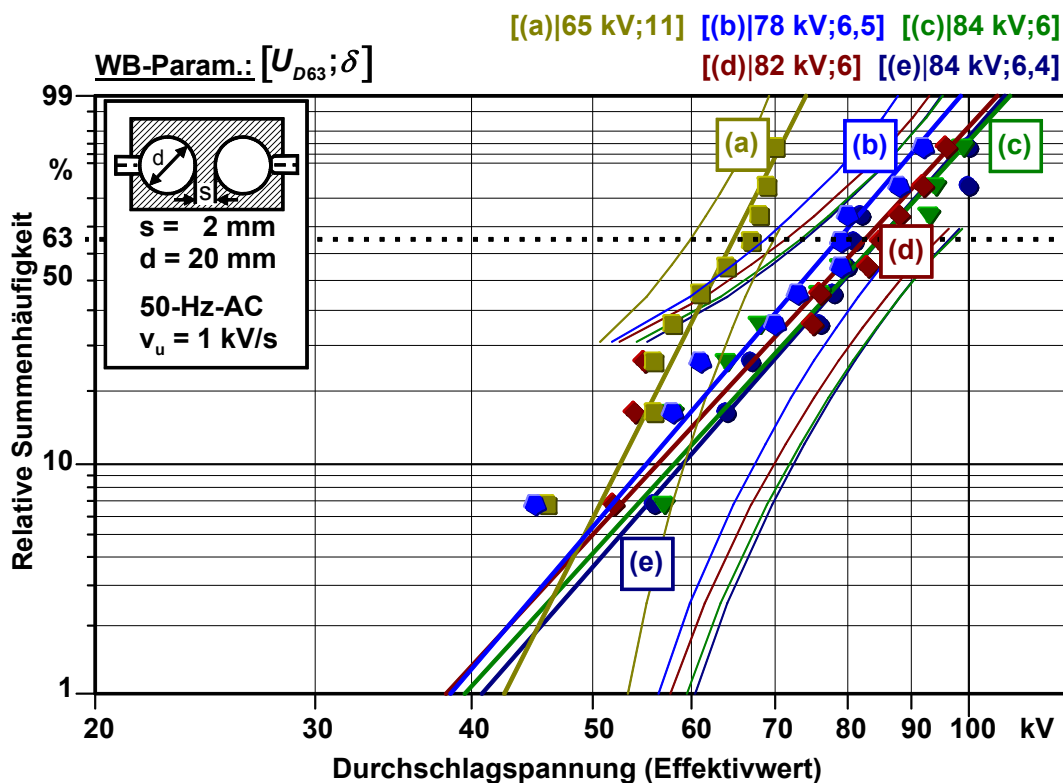


Abb. 4.8: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikongel, das unter identischen Bedingungen aus unterschiedlichen Chargen hergestellt wurde

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

Bei vier von fünf untersuchten Chargen ist kein statistischer Unterschied im Durchschlagverhalten erkennbar. Bezüglich des Mittelwertes, gebildet aus den 63-%-Quantilen der Durchschlagspannung dieser vier statistisch nicht unterscheidbaren Chargen, stellt man in einem Falle eine um circa 20 % reduzierte 63-%-Durchschlagspannung bei deutlich verringerter Messwertstreuung fest. Aufgrund der wesentlich reduzierten Streuung ist diese Abnahme als wesentlich unkritischer einzustufen, als es zunächst erscheint. Betrachtet man beispielsweise das 1-%-Quantil der Durchschlagspannung, dem für die praktische Auslegung von Isolierungen eine wesentlich größere Bedeutung beizumessen ist als dem 63-%-Quantil, so weist das Material dieser Charge den höchsten Wert auf.

Eine mögliche Ursache für die Abweichung in der Durchschlagspannung könnte neben äußeren Einflüssen, wie beispielsweise die Anwesenheit von Feuchtigkeit oder die Kontamination mit Fremdstoffen, in Qualitätsunterschieden der verwendeten Rohmaterialien (z.B. Kettenlängenverteilung der verwendeten Basispolymere sowie eine unterschiedliche Konzentration an Additiven) begründet sein.

Aufgrund dieses Ergebnisses erfolgte bei allen Untersuchungen, deren Ergebnisse direkt miteinander in Beziehung gesetzt wurden, die Fertigung der Prüflinge stets mit Komponenten der gleichen Charge. Nur auf dieser Basis ist ein direkter Vergleich der Untersuchungsergebnisse zulässig.

4.1.6 Standardisierter Herstellungsprozess für Silikongel-Modellisierungen

Basierend auf den Ergebnissen der vorangehenden Untersuchungen erfolgte die Herstellung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Silikongel-Modellisierungen nach dem in *Abb. 4.9* dargestellten Verarbeitungsschema.

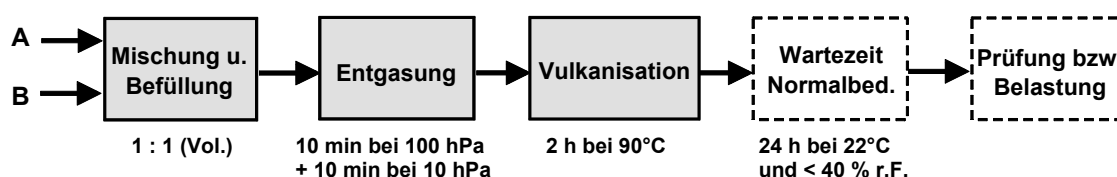


Abb. 4.9: *Verarbeitungsschritte bei der Herstellung von Silikongel-Modellisierungen*

Vor dem Verguss der Elektroden mit dem unvernetzten Silikongel erfolgte eine gründliche Reinigung der Oberflächen mit in Isopropanol getränkten Präzisionstüchern. Die Verarbeitung der Komponenten *A* und *B* des Silikongels erfolgte in einer statischen Zweikomponenten-Misch- und -Dosieranlage nach Volumenanteilen im Verhältnis 1 : 1. Das Gemisch wurde über das Mischrohr in die mit Elekt-

4.1 Verarbeitungsrelevante Parameter

roden bestückte Vergussform geleitet. Die sich anschließende Entgasung der gesamten Modellisolierung erfolgte abgestuft in zwei Schritten mit einem Evakuierungsdruck von 100 hPa gefolgt von einem solchen von 10 hPa für jeweils 10 min . Bei Bedarf erfolgte eine kurze zwischenzeitliche Belüftung (Normaldruck), um ein Überschäumen des Silikongels über den Rand der Vergussform hinaus zu vermeiden. Zur Beschleunigung der Vernetzungsreaktion wurde der Prüfling nach der Entgasung 2 h bei einer Temperatur von 90°C gelagert. Eine sich daran anschließende 24 -stündige Konditionierung des Prüflings bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (23°C , relative Feuchtigkeit $< 40 \%$) schloss den Herstellungsprozess der Silikongel-Modellisolierung ab.

4.1.7 Mechanische Charakterisierung des Vulkanisates

Die mechanische Charakterisierung der Vulkanisate erfolgte anhand der Härte und der Adhäsionseigenschaften. Die Bestimmung dieser Eigenschaften wurde an Silikongel-Proben nach Abschluss des Vernetzungsprozesses und anschließender 100 -stündiger Lagerung in einer staubfreien Umgebung bei Normalbedingungen durchgeführt. Die detaillierte Beschreibung des Messverfahrens, der verwendeten Verfahrensparameter sowie die Vorgehensweise zur Interpretation der Messergebnisse findet sich in *Kapitel 3.2*; *Abb. 4.10* zeigt die für das untersuchte Silikongel charakteristische Kraft-Zeit-Kennlinie.

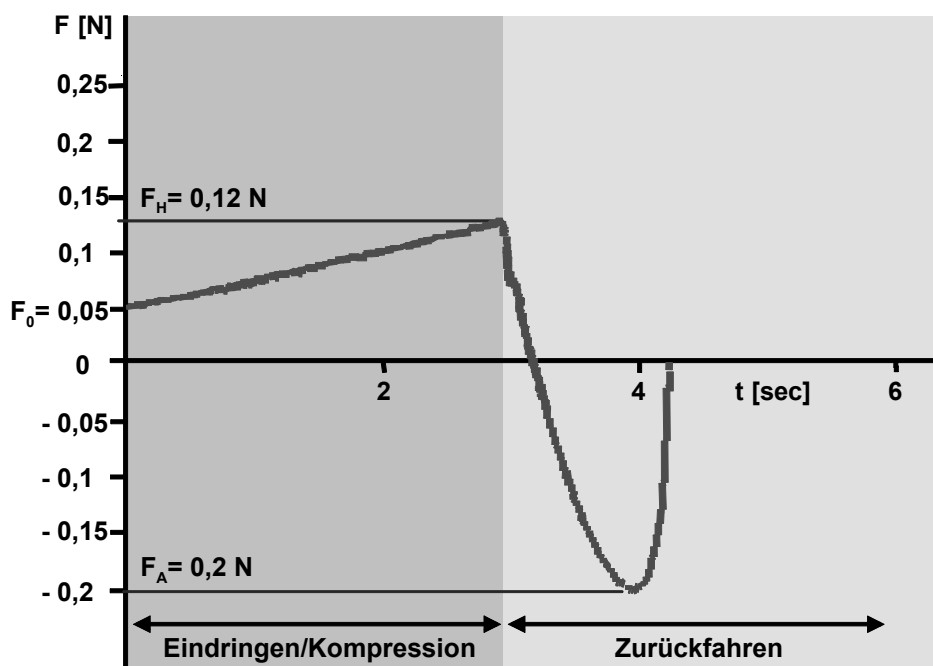


Abb. 4.10: *Ermittelte Kraft-Zeit-Kennlinie mit den Kräften F_H und F_A zur Charakterisierung der Härte (F_H) und Adhäsionseigenschaften (F_A) des Silikongel nach der Vulkanisation (Neuzustand)*

Die ermittelten Kräfte, die zur Charakterisierung der Materialhärte und der Adhäsionseigenschaften des Vulkanisates dienen, betragen nach der Herstellung und einer sich daran anschließenden 100-stündigen Lagerung in einer staubfreien Umgebung bei Normalbedingungen $F_H = 0,12 \text{ N}$ als Maß für die Härte sowie $F_A = 0,2 \text{ N}$ als Maß für die Adhäsionseigenschaften. Diese Werte stellen Mittelwerte aus Einzelmessungen an zehn Proben dar. Bemerkenswert ist die geringe Streuung der Messwerte. Die Standardabweichung für die Kraft F_H beträgt $0,002 \text{ N}$, die der Kraft F_A ist nur geringfügig größer.

Weiterhin konnten keine Vernetzungsstörungen in Form von Erweichungen bzw. dem Vorhandensein von unvernetzten Bereichen auf der Oberfläche der Vulkanisate, die in Kontakt mit den hier eingesetzten Werkstoffen standen, festgestellt werden, was auf eine gute chemische Kompatibilität zwischen der Vergussform, dem Elektrodenmaterial und dem Silikongel schließen lässt.

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Die Durchschlagprüfung mit kontinuierlicher Spannungssteigerung ist eine geeignete Methode um die Kurzzeitisolierfähigkeit von dielektrischen Materialien zu bestimmen. Basierend auf diesen Kurzzeituntersuchungen kann eine erste Bewertung des Isolierstoffes bezüglich seiner isoliertechnischen Eigenschaften und seiner Beeinflussung durch äußere Faktoren vorgenommen werden. Standardmäßig erfolgte die Bestimmung der Kurzzeitdurchschlagspannung bzw. -festigkeit von Silikongel-Modellisierungen mit netzfrequenter Wechselspannung, da diese die überwiegende Belastungsart in der Energieübertragungs- und -verteilungstechnik darstellt. Dabei wurde die Prüfspannung ausgehend von Null kontinuierlich mit einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von 1 kV/s bis zum elektrischen Versagen der Isolierung gesteigert. Diese Prüfmethode wurde standardmäßig angewandt, sofern nicht an entsprechender Stelle ausdrücklich etwas anderes beschrieben wird.

4.2.1 Kurzzeitfestigkeit im quasihomogenen elektrischen Feld

Für alle Untersuchungen wurden Prüflinge bestehend aus einer mit Silikongel umgossenen Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung zur Prägung einer quasihomogenen Feldverteilung (siehe 3.1, Abb. 3.1) verwendet, deren Herstellung nach der in Kapitel 4.1.6 beschriebenen Fertigungstechnologie erfolgte.

4.2.1.1 Durchschlagverhalten bei Wechselspannungsbelastung

Feste Isolierstoffe haben prinzipiell sehr hohe elektrische Festigkeiten, die deutlich über denjenigen von gasförmigen und flüssigen Isolierstoffen liegen. Je nach Aufbau des Prüflings und Art der Beanspruchung können verschiedene Ursachen für den Durchschlag fester Isolierstoffe verantwortlich sein. Im Bereich sehr kurzer Beanspruchungszeiten (Mikro- bis Millisekundenbereich) kommt es aufgrund von Stoßionisationsprozessen zum Durchschlag bei hohen elektrischen Feldstärken (rein elektrischer Durchschlag). Bei längeren Beanspruchungszeiten kann die Wärmeentwicklung im Dielektrikum zur thermischen Zerstörung des Isolierstoffes führen (Wärmedurchschlag). Dagegen kann es bei sehr langen Beanspruchungszeiten zu einem Durchschlag aufgrund einer Degradation des Isolierstoffes infolge von Teilentladungen kommen (Erosionsdurchschlag). Der Erosionsdurchschlag wird in der Regel durch das Vorhandensein technologisch bedingter Fehlstellen eingeleitet. Deshalb spricht man hier auch von einem technologisch bedingten Durchschlag bzw. dem Fehlstellendurchschlag. Der Übergang zwischen den Zerstörungsmechanismen erfolgt in der Regel fließend und lässt sich nicht ohne Weiteres auf einen bestimmten Zeit- und Feldstärkebereich abgrenzen [13].

Eine gezielte Weiterentwicklung und Optimierung der hochspannungstechnischen Eigenschaften von Silikongel erfordert ein grundlegendes Verständnis der das Durchschlagverhalten bestimmenden Mechanismen. Aus diesem Grund erfolgte eine Analyse des Entladungsverhaltens im quasihomogenen Feld bei Wechselspannungsbelastung. Dabei lässt der Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldverteilung im Isolierstoff und der räumlichen Lage der Entladungskanäle Rückschlüsse auf die Homogenität des Stoffgefüges bzw. auf das Vorhandensein jeglicher Art von festigkeitsmindernden Fehlstellen (z.B. Gaseinschlüsse) zu. Da Fehlstellen mit stark herabgesetzter elektrischer Festigkeit bevorzugte Orte für den Start von Entladungen oder aber auch bevorzugte Entladungswege im Isolierstoff darstellen, müsste sich das Vorhandensein derartiger Fehlstellen im Isolierstoff aus der räumlichen Lage der Entladungskanäle zwischen den Elektroden erkennen lassen. Um eine direkte Beobachtung der Entladungskanäle zu ermöglichen, wurde bei dieser Untersuchung transparentes Silikongel (*siehe 2.1*) eingesetzt.

Abb. 4.11 zeigt beispielhaft zwei charakteristische Erscheinungsformen von Entladungskanälen zwischen den feldprägenden Kugelelektroden. Die zum Durchschlag führende Entladung verursacht eine Zersetzung des Isolierstoffes, wobei durch die in das Material eingetragene Energie Gas freigesetzt wurde, das sich im entstandenen Entladungskanal angesammelt hat.



Abb. 4.11: Erscheinungsformen von Entladungskanälen im Silikongel unmittelbar nach erfolgtem elektrischen Durchschlag der Isolierstrecke

Die Korrelation zwischen der räumlichen Lage der Entladungskanäle und der im Prüfvolumen herrschenden Feldstärkeverteilung, die an zehn Proben durchgeführt wurde, ließ keinen Zusammenhang zwischen der Höhe der erreichten Durchschlagspannung und der räumlichen Lage des Entladungskanals erkennen. Statistisch etwa gleichverteilt, erfolgte die Entladung im elektrisch hoch beanspruchten Gebiet im Zentrum zwischen den Kugelelektroden (siehe Abb. 4.11a) sowie deutlich außerhalb dieses Bereiches (siehe Abb. 4.11b) im elektrisch wesentlich geringer beanspruchten Isolierstoffvolumen. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes wurde die Feldverteilung im elektrisch beanspruchten Bereiches des Isolierstoffes berechnet und dem in Abb. 4.11b gezeigten Entladungskanal unterlegt (Abb. 4.12).

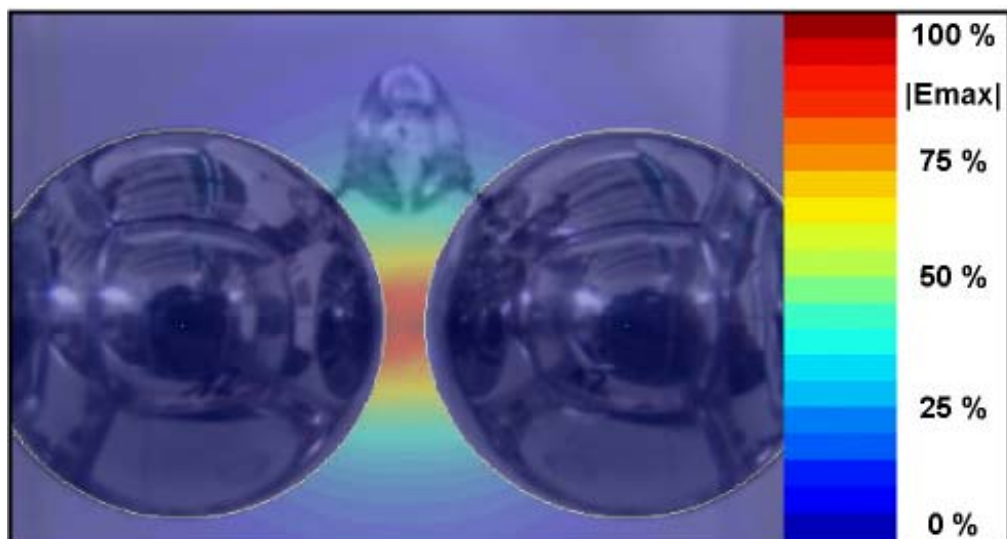


Abb. 4.12: Lage eines Entladungskanals zwischen den feldprägenden Elektroden mit unterlegter elektrischer Feldverteilung (Betrag der Feldstärke)

Dabei zeigt sich, dass die Feldbeanspruchung (Betrag der elektrischen Feldstärke) im elektrisch hoch belasteten Gebiet (rot unterlegt) in etwa um den Faktor Drei höher ist als im Gebiet durch das die Entladung erfolgte (blaugrün unterlegt). Dieses Verhalten ist kennzeichnend für eine durch Fehlstellen initiierte Entladung. Dabei ist dieses für Festkörper typische Durchschlagverhalten im Gegensatz zum Gasdurchschlag aufgrund des wesentlich komplexeren Aufbaus des Isolierstoffes und einer Vielzahl an äußeren Einflussfaktoren physikalisch kaum modellierbar. Als mögliche Fehlstellen kommen Verunreinigungen durch Fremdstoffe, mikroskopische und makroskopische Gaseinschlüsse sowie Strukturinhomogenitäten im Materialgefüge in Frage. Darüber hinaus kann das lokale Vorhandensein von Feuchtigkeit im Material als weitere Ursache für das beobachtete Verhalten nicht ausgeschlossen werden. Um die Art der zum Durchschlag führenden Fehlstellen zu identifizieren, wurden weitere analytische Untersuchungen durchgeführt.

Nachweis von Lufteinschlüssen und Mikrorissen

Zum Nachweis potentiell im Isolierstoff vorhandener Lufteinschlüsse und Mikrorisse wurden rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund der mechanischen Materialeigenschaften wurden Gefrierbrüche angefertigt. Die Probe wurde nach dem Standardverfahren mit Gold bedampft, um im Hochvakuum analysiert werden zu können. Es zeigte sich jedoch, dass das Material nicht ausreichend formstabil war und während der Bedampfung vollständig seine Form verlor. Die Analyse der Probe ließ keine Strukturen auf der Oberfläche erkennen und auch keine Rückschlüsse auf die ursprüngliche Oberfläche zu. Auch die Analyse der Struktur einer weiteren Probe mittels Environmental Scanning Electronmicroscopy (ESEM), die im schwachen Vakuum an einer unpräparierten Probe durchgeführt werden kann und daher als Material schonender anzusehen ist, ließ keine Analyse der Materialstruktur zu, da es bei der Umgebungsanpassung (schwaches Vakuum) im Mikroskop zu einem Ausgasen der Probe kam. Auch hier war eine Veränderung der Form und eine feststellbare Blasenbildung an der Probenoberfläche die Folge. Daneben wurden während der Messung Schädigungen der Probe durch den Elektronenstrahl beobachtet [47]. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass derartige rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zur Analyse des Materialgefüges von Silikongelen gänzlich ungeeignet sind.

Aus der Beobachtung, dass Silikongel-Proben, die einem Unterdruck ausgesetzt werden, beginnen Gas freizusetzen, kann jedoch nicht zwangsläufig auf das Vorhandensein mikroskopischer oder gar makroskopischer Gaseinschlüsse im Material geschlossen werden. Vielmehr kann es sich dabei auch um das Entweichen von im Werkstoff gelösten Gasen handeln, die das Material bei der Konditionie-

rung unter Normalbedingungen aufgenommen hat. Dass Silikoneleastomere ein hohes Lösungsvermögen für Gase besitzen, ist allgemein bekannt [20]. Weiterhin spricht die Tatsache, dass Silikongel eine deutlich niedrigere Gleichspannungsfestigkeit als Wechsellastspannungsfestigkeit (Scheitelwert) besitzt (*siehe 4.2.1.3*), für einen nahezu hohlraumfreien Werkstoffaufbau. Wären im Isolierstoff gasgefüllte Fehlstellen vorhanden, in denen Teilentladungen entstehen könnten, so würde dies aufgrund einer teilentladungsbedingten Degradation des Isolierstoffes (*vgl. 4.1.1*) in einer deutlich verminderten Wechsellastspannungsdurchschlagfestigkeit Ausdruck finden. Darüber hinaus lassen sich in transparenten Silikongel-Proben, die nach dem standardisierten Herstellungsverfahren gefertigt wurden, im Regelfall keine visuell wahrnehmbaren Gaseinschlüsse feststellen (*4.1.1, Abb. 4.3d*).

Strukturinhomogenitäten

Ein direkter Nachweis von Strukturinhomogenitäten im Materialaufbau konnte nicht erbracht werden. Der Grund hierfür ist, dass es zur Untersuchung von Silikongelen an geeigneten Verfahren, die eine orts aufgelöste Analyse der Materialstruktur ermöglichen, fehlt [3;47]. Aufgrund der Tatsache, dass ein direkter Nachweis von potentiellen Strukturinhomogenitäten nicht möglich ist, wurde mittels Gelpermeationschromatographie (GPC) die Molekulargewichtsverteilung der in den Silikongel-Komponenten *A* und *B* enthaltenen Basispolymere bestimmt. Dabei wurde für beide Komponenten eine bimodale Molekulargewichtsverteilung (Verteilung mit zwei Maxima) der Basispolymere mit starken Unterschieden in den Molekulargewichten ermittelt [47]. Aufgrund der festgestellten statistischen Unterschiede in den Molekulargewichten und damit in den Kettenlängen der Basispolymere ist die Ausbildung von mikrostrukturellen Inhomogenitäten (Cluster) in der Werkstoffstruktur nicht auszuschließen. Inwieweit dies einen Einfluss auf das Durchschlagverhalten von Silikongel besitzt, ist derzeit nicht zu beantworten. Weiterführende Untersuchungen, bei denen ausschließlich Basispolymere mit einer sehr geringen Streuung in der statistischen Kettenlängenverteilung verwendet werden, könnten hierzu entscheidende Hinweise liefern.

Neben der Entstehung von strukturellen Inhomogenitäten aufgrund statistischer Unterschiede in der Molekulargewichtsverteilung könnte bei der Verarbeitung der Komponenten eine unzureichende Vermischung zu einer Entstehung von makroskopischen Strukturinhomogenitäten führen. Beispielsweise könnte eine ungleichmäßige Konzentration des Vernetzers im Gemisch zur Bildung von Gebieten mit starken Unterschieden in der Vernetzungsdichte und damit in der elektrischen Festigkeit führen. Dass die Vernetzungsdichte des Vulkanisates einen Einfluss auf dessen elektrische Festigkeit besitzt, zeigen die in *Kapitel 4.2.1.9* beschriebenen

Untersuchungen. Inwieweit sich jedoch das an großvolumigen Proben ermittelte Durchschlagverhalten auf die hier diskutierte Problematik, bei der sich die Betrachtung auf Isolierstoffbereiche sehr geringer Ausdehnung richtet, übertragen lässt, bleibt Gegenstand von Spekulationen. Ein indirekter Nachweis der Vermutung, dass eine unzureichende Vermischung der Komponenten zur Entstehung von festigkeitsmindernden strukturellen Inhomogenitäten führt, könnte durch ein verändertes Mischverfahren mit veränderter Mischgüte erbracht werden. Würde der Einsatz eines Verfahrens mit erhöhter Mischgüte zu einer Veränderung im Durchschlagverhalten führen, so würde dies die geäußerte Vermutung stützen.

4.2.1.2 Elektrodenmaterial

Silikongel kann in technischen Isolierungen mit verschiedenen Elektrodenmaterialien, beispielsweise in Form von Leitermaterialien, in Kontakt stehen. Daher ist es von großem praktischen Interesse, potentielle Abhängigkeiten zwischen dem verwendeten Elektrodenmaterial, welches an den Isolierstoff grenzt, und der elektrischen Festigkeit der Isolierung zu erkennen. Die nachfolgend aufgeführten physikalischen Ursachen und Mechanismen können dabei zu einer prinzipiellen Abhängigkeit zwischen der elektrischen Festigkeit der Isolierung und der Materialkombination an der Grenzfläche führen: Eine schlechte Haftung des Dielektrikums auf der Elektrodenoberfläche stellt in der Regel eine Fehlstelle mit verringerter elektrischer Festigkeit dar und beeinflusst dementsprechend die elektrische Festigkeit der Gesamtisolierung. Die Haftung des Silikongels auf der Elektrodenoberfläche ist unmittelbar von der Benetzung (Spreitung) zwischen der Elektrodenoberfläche und dem unvernetzten Silikongel abhängig, die vom Gleichgewicht der Oberflächenspannungen (zwischenmolekulare Kräfte) der beteiligten Materialien und damit direkt von der Materialkombination bestimmt wird. Weiterhin kommen an Grenzflächen auch entladungsphysikalische Effekte zum Tragen. In Isolierstoffen kann die Ladungsträgerbereitstellung nicht nur durch innere Feldemission aus flachen Haftstellen (fehlerbedingte Donatorzustände) erfolgen, sondern zusätzlich auch durch Injektion aus Bereichen hoher Feldstärke (z.B. an feldstärkeerhöhenden Fehlstellen durch Elektrodenrauheit) aus der negativ geladenen Elektrode. Ein sich einstellendes Ungleichgewicht zwischen der Anzahl der pro Zeiteinheit emittierten und rekombinierten Ladungsträger (Elektronen) kann bei Wechselspannung zur Bildung unipolarer Raumladungen führen und damit die elektrische Belastung vor der jeweils positiv geladenen Elektrode erhöhen. Dabei wird die Menge der injizierten Elektronen unabhängig vom vorausgesetzten Injektionsmechanismus (felderleichternde thermische Injektion und reine Feldinjektion) von der Elektronenaustrittsenergie des Elektrodenwerkstoffes im Vakuum und der Elektronenlagerungsenergie (Elektrodenaffinität) des Isolierstoffes bestimmt [9;13].

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Die Untersuchungen wurden unter Verwendung der Elektrodenmaterialien Messing, Aluminium und Edelstahl (V2A), die auch in der Verbindungs- und Garniturentechnik ihren Einsatz finden, im Spannungssteigerungsversuch mit netzfrequenter Wechselfspannung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen durchgeführt. Zur Erhöhung der statistischen Sicherheit wurde bei dieser Untersuchung, abweichend von den Schilderungen in *Kapitel 3.3*, ein Stichprobenumfang von 20 Proben je Versuchsreihe gewählt. *Abb. 4.13* zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung. Aufgrund der nahezu vollständigen Überlappung der 95%-Konfidenzbereiche der ermittelten Verteilungsfunktionen ist ein Einfluss des verwendeten Elektrodenmaterials auf die Durchschlagspannung statistisch nicht nachweisbar.

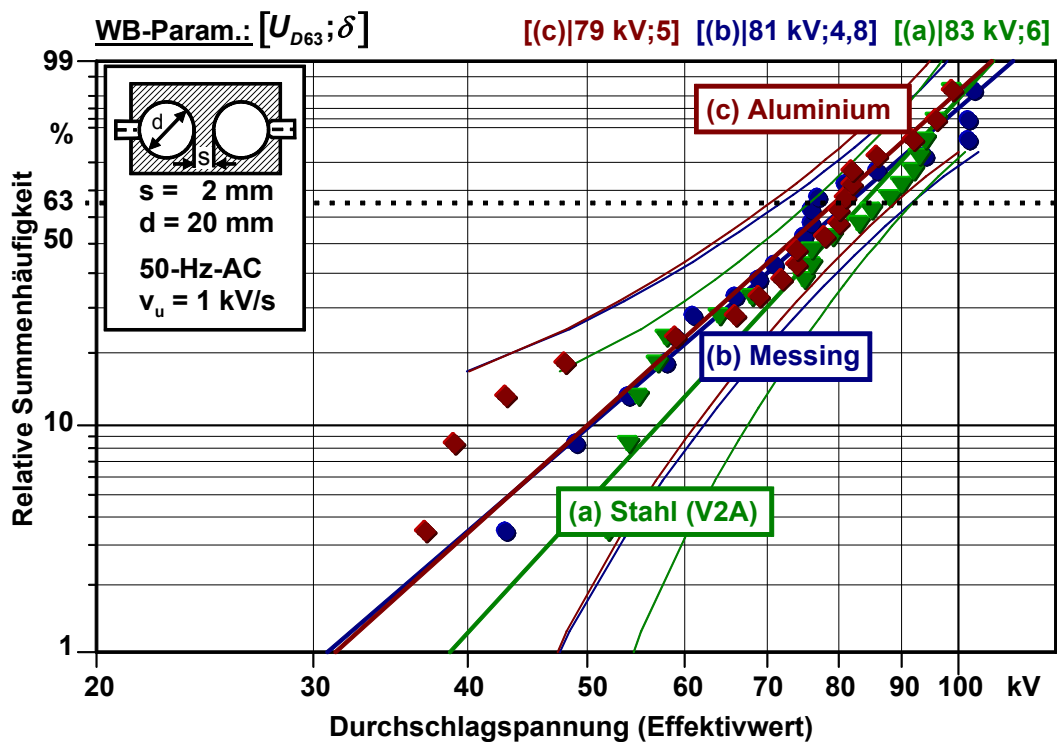


Abb. 4.13: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung bei Verwendung von Edelstahl (V2A), Messing und Aluminium als Elektrodenwerkstoff

Berücksichtigt man die Tatsache, dass Fremdschichten auf den Elektrodenoberflächen zu einer drastischen Herabsetzung der Durchschlagspannung führen (vgl. 4.1.3), so wird deutlich, dass nicht das Elektrodenmaterial, sondern ausschließlich die Qualität und Reinheit der Elektrodenoberfläche der die elektrische Festigkeit der Isolierung bestimmende Faktor ist. Potentiell auftretende materialspezifische Einflüsse werden hierdurch um ein Vielfaches überdeckt.

Weiterhin ist aufgrund dieses Ergebnisses die Rechtfertigung erbracht, die untersuchten Elektrodenmaterialien parallel nebeneinander einzusetzen, sofern sich dies bei der Versuchsdurchführung als vorteilhaft erweist (vgl. 4.2.1.7), ohne dass die direkte Vergleichbarkeit der ermittelten Messergebnisse verloren geht.

4.2.1.3 Spannungsform

Silikongel kann in technischen Isolierungen der Beanspruchung durch verschiedene Spannungsformen ausgesetzt sein. Allgemein bekannt ist, dass die elektrische Festigkeit von Isolierstoffen eine Abhängigkeit von der Spannungsform sowie von der Zeitdauer der Belastung aufweist [13;21]. Die Dauerbelastung für die in der elektrischen Energietechnik eingesetzten Isolierungen stellt in der Regel die 50-Hz-Wechselspannung dar. Neben dieser Beanspruchung treten im Betrieb bedingt durch Schalthandlungen oder Blitzeinschlag impulsförmige Überspannungen auf (transiente Spannungsbeanspruchungen). Bei der Auslegung von Isolierungen ist die Anforderung, diesen transienten Spannungen standzuhalten, zu berücksichtigen. Auch die Belastung von Silikongel mit Gleichspannung stellt einen technisch relevanten Belastungsfall dar. Beispielsweise dann, wenn Silikongel-isolierte Komponenten für den Aufbau einer Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) zum Einsatz kommen sollen.

Die Bestimmung der Stoßspannungsfestigkeit wurde mittels eines mehrstufigen Stoßgenerators zur Erzeugung der in IEC EN 60060-1 definierten Spannungsformen Impuls $1,2/50 \mu s$ (Blitzstoßspannung) und Impuls $250/2500 \mu s$ (Schaltstoßspannung) durchgeführt [48]. Der Ablauf der Stoßspannungsprüfungen erfolgte in Anlehnung an die in IEC EN 60243-3 beschriebene Verfahrensweise [49]. Dabei wurde ausgehend von einem Startwert, der aus Vorversuchen für die Blitzstoß- zu $100 kV$ und für die Schaltstoßspannung zu $70 kV$ (Scheitelwerte) bestimmt wurde und in beiden Fällen laut Prüfvorschrift circa 70 % der zu erwartenden Durchschlagspannung betrug, im Spannungssteigerungsversuch mit jeweils drei Impulsen je Spannungsstufe die Durchschlagspannung ermittelt. Die Scheitelspannung jeder Serie wurde prüftechnisch bedingt um $5 kV$ gegenüber der Scheitelspannung der vorhergehenden Serie erhöht, wobei die minimale Pausenzeit zwischen zwei Stößen $60 s$ betrug. Die Stoßspannungsfestigkeit ist dabei definiert als der Scheitelwert der Serie von Stößen, die erreicht worden wäre, wenn der Durchschlag sich nicht ereignet hätte. Die verwendeten Prüfkreise zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit bei 50-Hz-Wechsel- sowie Gleichspannungsbelastung sind in Kapitel 3.2 dargestellt und beschrieben. Die elektrische Prüfung erfolgt in Anlehnung an IEC EN 60243-1 bzw. -2 im Spannungssteigerungsversuch (Rampentest) mit einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von $v_u = 1 kV/s$ [24;50].

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Zur quantitativen Bewertung der elektrischen Festigkeit von Silikongel in Abhängigkeit der Spannungsform erfolgte einheitlich die Angabe des Scheitelwertes der Durchschlagfeldstärke, der sich nach Gl. 3.4 errechnet. Abb. 4.14 zeigt die Verteilungsfunktionen der Durchschlagfeldstärke in Abhängigkeit der Prüfspannungsform.

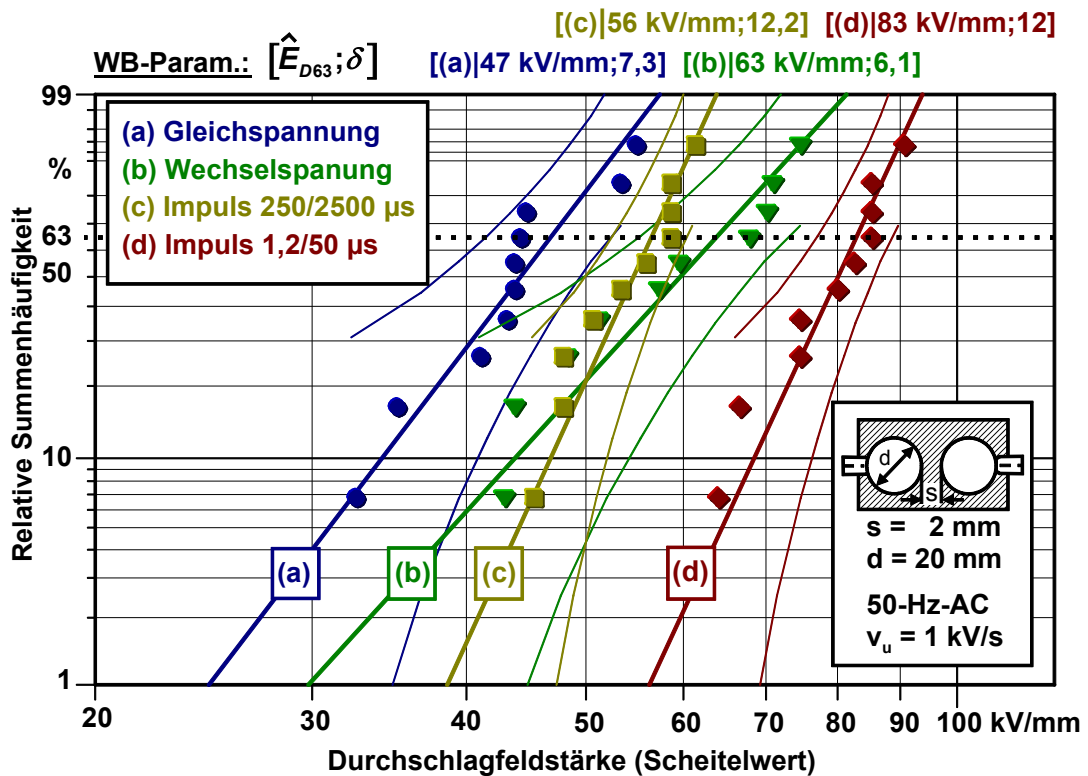


Abb. 4.14: Verteilungsfunktionen der Durchschlagfeldstärke für verschiedene Prüfspannungsformen im quasihomogenen Feld

Für eine Belastung mit Impuls 1,2/50 μ s weist Silikongel die höchste Durchschlagfeldstärke auf. Die Durchschlagfeldstärke bei Wechselspannungsbelastung und bei Belastung mit Impuls 250/2500 μ s sind in etwa miteinander vergleichbar. Gegenüber dem unter Wechselspannungsbelastung erzielten Wert der 63-%-Durchschlagfestigkeit ist die 63-%-Gleichspannungsfestigkeit nochmals um circa 25 % herabgesetzt. Dies ist bemerkenswert, denn für die meisten Isolierstoffe ist der Wert der Gleichspannungsfestigkeit deutlich höher als der Scheitelwert der Wechselspannungsfestigkeit bei Netzfrequenz [23;50]. Die Ursache dafür liegt darin begründet, dass bei der Gleichspannungsbelastung wesentliche den Durchschlag begünstigende Einflüsse, wie beispielsweise die dielektrische Erwärmung oder das Auftreten innerer Teilentladungen in Fehlstellen, entfallen [26]. Zusätzlich kann es im Gleichfeld zur Bildung von unipolaren Raumladungen kommen, die eine Feldstärkereduzierung an Fehlstellen bewirken, wohingegen im Wechselfeld durch eine zeitweilige Heteropolarität zwischen Raumladung und Fehlstellenpotential Feldstärkeüberhöhungen auftreten können.

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Die Tatsache, dass *RUEMENAPP* [3] bei vergleichbaren Untersuchungen an Silikongelen und *OESTERHELD* [9] bei Untersuchungen an Silikongummi keine signifikanten Unterschiede zwischen der Gleich- und Wechsellspannungsfestigkeit feststellte, unterstreicht die Andersartigkeit von Silikonelastomeren bezüglich dieser Eigenschaft. Die Eigenschaft, dass für Silikongel die ermittelten Scheitelwerte der Wechsellspannungsdurchschlagfeldstärke höher sind als die der Gleichspannungsdurchschlagfeldstärke, ist zudem als Indiz für einen nahezu hohlraumfreien Werkstoffaufbau zu werten. Wären im Isolierstoff Hohlräume vorhanden von denen eine teilentladungsbedingte Materialzerstörung ausgehen könnte, so würde sich dies in einer deutlich verminderten Wechsellspannungsdurchschlagfestigkeit widerspiegeln (vgl. 4.1.1).

Die Ursache für die hohe Durchschlagfestigkeit von Silikongel bei Blitzstoßbelastung im Vergleich zu den übrigen Prüfspannungsformen ist auf Unterschiede in der Belastungszeit zurückzuführen.

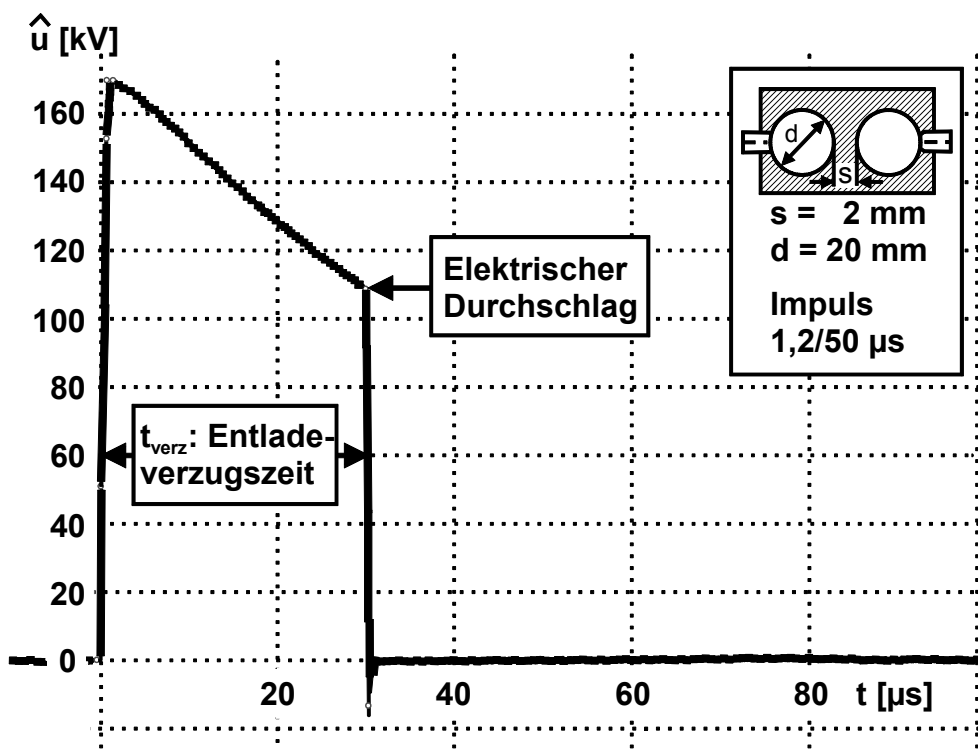


Abb. 4.15: Zeitlicher Verlauf der Prüfspannung (Impulse $1,2/50 \mu\text{s}$) an einer Silikongel-Modellisolierung während des elektrischen Durchschlages

Aufgrund der sehr kurzen Zeit der Stoßspannungsbeanspruchung können bei den meisten Isolierstoffen die dielektrische Erwärmung, andere thermische Effekte und der Einfluss injizierter Raumladungen verringert sein. Insbesondere die Bedingungen für das Auftreten eines Startelektrons, das zum Aufbau einer Entladungslawine und zum Durchschlag der Isolierung führen würde, sind bei den kurzen und

im Verhältnis zur Wechselspannungsbeanspruchung pro Zeiteinheit seltenen Beanspruchungen des Isolierstoffvolumens durch Stoßspannung sehr viel schlechter. Folglich ergeben sich aufgrund der geringen Beanspruchungszeit bei Stoßspannungsbelastung höhere Festigkeitswerte als beispielsweise bei Kurzzeit-Wechselspannungsprüfungen [24]. Die das Entladungsverhalten eines flüssigen bzw. festen Dielektrikums bei sehr kurzen impulsförmigen Beanspruchungen kennzeichnende Spannungs-Zeit-Charakteristik gleicht der von Gasentladungen bekannten Stoßkennlinie. Ein derartiges Entladungsverhalten bei Stoßbeanspruchung ist beispielsweise auch von Polyethylen bekannt [23]. *Abb. 4.15* zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Prüfspannung bei der Belastung eines Prüflings mit Blitzstoßspannung (Impulse $1,2/50 \mu\text{s}$) beim Versagen der Isolierung. Die mit t_{verz} bezeichnete Zeitdauer kennzeichnet das geschilderte Verhalten.

Der Vergleich der Messwertstreuungen zeigt, dass bei der Gleich- und Wechselspannungsbelastung etwa gleich große Streumaße gefunden wurden. Der Rückgang der Messwertstreuung bei Impulsbelastung kann zum Teil auf die prüftechnisch bedingte Art der Spannungssteigerung, die in 5 kV -Schritten erfolgte, zurückgeführt werden. Die Höhe der Messwertstreuung von Silikongel ist dabei durchaus mit den für andere feste und flüssige Isolierstoffe ermittelten Werten vergleichbar. Silikonflüssigkeit, die unter identischen Bedingungen auf ihre elektrische Festigkeit hin geprüft wurde, wies Messwertstreuungen in vergleichbarer Größe (*vgl. 4.2.1.9, Abb. 4.46*) auf, dieses Ergebnis wird zudem durch die in [51] berichteten Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Isolierölen untermauert. Auch *OESTERHELD*, der Untersuchungen an Silikongummi für Kabelendverschlüsse durchführte, berichtet über Messwertstreuungen in der hier festgestellten Größenordnung [9].

Für die Beantwortung der praxisrelevanten Frage, welche Prüfspannungsformen bei der Auslegung von Silikongel-Isolierungen als die kritischste anzusehen ist, ist die für die jeweilige Applikation maßgebliche Prüfvorschrift heranzuziehen. Beispielsweise ist es in der Kabeltechnik üblich, Prüfungen bei Wechsel- und Blitzstoßspannung durchzuführen, wobei das zu verwendende Verhältnis der Prüfpegel $\hat{u}_{\text{Blitz}}/\hat{u}_{\text{AC}} = 2,5$ bis 3 beträgt [52]. Obwohl Silikongel im Vergleich zur Wechselspannungsfestigkeit eine deutlich höhere Blitzstoßspannungsfestigkeit besitzt, wird daraus deutlich, dass ein Silikongel-isoliertes Bauteil im Rahmen einer Blitzstoßspannungsprüfung einer wesentlich härteren Beanspruchung standhalten muss und daher für Blitzstoßbeanspruchung auszulegen ist.

4.2.1.4 Temperatur

Häufig sind Isolierungen unter praktischen Einsatzbedingungen thermischen Belastungen ausgesetzt. Dabei ist zu beachten, dass die elektrische Festigkeit von Isolierstoffen eine temperaturabhängige Größe darstellt. Bei festen Isolierstoffen unter kurzzeitiger elektrischer Belastung bewirkt eine erhöhte Temperatur einen Festigkeitsverlust durch die Bereitstellung zusätzlicher freier Elektronen aufgrund thermischer Aktivierung (elektrischer Durchschlag). Bei elektrischer Langzeitbelastung kann es aufgrund von entstehender Verlustwärme (Leiterstrom, Polarisationsverluste) zu einer thermischen Zerstörung der Isolation kommen (Wärmedurchschlag). Flüssige Isolierstoffe (Mineralöle, Silikonflüssigkeiten), bei denen sich das Lösungsvermögen für Wasser mit der Temperatur ändert, weisen eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der elektrischen Festigkeit auf [13;23;40]. Da bei einem Einsatz von Silikongel im Bereich der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik eine zuverlässige Isolationsfähigkeit des Materials über einen spezifizierten Temperaturbereich gegeben sein muss, sind Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die elektrische Festigkeit von Silikongel von großem praktischen Interesse. Die Bestimmung der Durchschlagspannung bzw. -feldstärke von Silikongel erfolgte im Temperaturbereich von -40°C bis 100°C . Dabei liegt der obere Temperaturwert 100°C deutlich über der für VPE-Kabel zulässigen dauerhaften Betriebstemperatur von 90°C [53]. Darüber hinaus ist eine Prüfung bei höheren Temperaturen aufgrund der thermischen Formstabilität des zur Verfügung stehenden Prüfkörpers (vgl. 3.1) nicht möglich. Die Temperaturuntergrenze wurde zu -40°C gewählt, um einen Einsatz des Isolierstoffes in klimatisch kalten Regionen zu simulieren.

Zur Bestimmung der Durchschlagspannung in Abhängigkeit der Temperatur wurden die Prüflinge 24 h spannungslos bei den jeweilig spezifizierten Prüftemperaturen in einer Klimakammer gelagert. Voruntersuchungen zum thermischen Verhalten der Prüflinge zeigten, dass bei jeder der gewählten Prüftemperaturen nach einer Lagerungsdauer von 5 h im gesamten Isolierstoffvolumen sicher vom Erreichen des thermisch stationären Zustandes ausgegangen werden kann. Da aufgrund der Höhe der zu erwartenden Durchschlagspannungen eine Prüfung in der Klimakammer nicht möglich war, erfolgte die Prüfung der elektrischen Wechselspannungsfestigkeit im Spannungssteigerungsversuch nach der Entnahme der Prüflinge aus der Klimakammer bei Raumtemperatur und Normalbedingungen. Dabei betrug die Zeitspanne zwischen der Entnahme des Prüflings aus der Klimakammer, der Platzierung in der elektrischen Prüfumgebung, bis zum Durchschlag für alle Prüflinge weniger als 5 min. Die maximale Abweichung zwischen der für die Prüfung spezifizierten und der zur Zeit des elektrischen Durchschlages im Isolierstoff zwi-

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

schen den Elektroden herrschenden Temperatur lässt sich anhand der empirisch ermittelten Temperatur-Zeit-Charakteristiken des Prüflings (siehe 3.1, Abb. 3.5) mit $|\Delta T| = 3^\circ\text{C}$ abschätzen. Die geringe Abweichung zwischen der spezifizierten und der tatsächlichen Prüftemperatur rechtfertigt den gewählten Ablauf der Prüfung. Abb. 4.16 zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung der Modellisolierungen in Abhängigkeit der Temperatur.

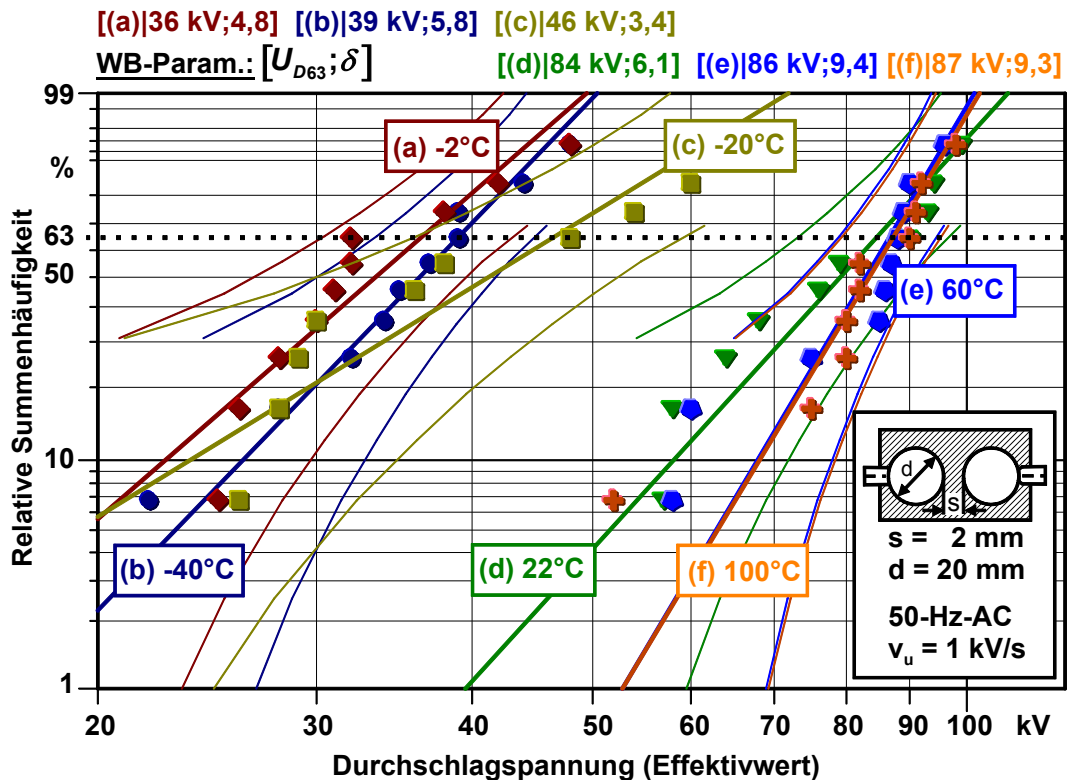


Abb. 4.16: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikongel-Modellisolierungen in Abhängigkeit der Temperatur

Die alleinige Betrachtung der an unterschiedlich temperierten Modellisolierungen ermittelten Durchschlagspannungen erlaubt jedoch noch keine quantitative Aussage zum Einfluss der Temperatur auf die elektrische Durchschlagfestigkeit von Silikongel. Vielmehr ist der systematische Einfluss einer temperaturabhängigen Änderung des Elektrodenabstandes (Verschiebung auf der gemeinsamen Achse), der im Wesentlichen durch die thermische Ausdehnung des Prüfkörpergehäuses (siehe 3.1) verursacht wird, zu berücksichtigen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, erfolgte eine Umrechnung der bei den verschiedenen Temperaturen ermittelten Durchschlagspannungen auf die Durchschlagfeldstärke unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Änderung des Elektrodenabstandes und der damit verbundenen Änderung des Homogenitätsgrades nach Gl. 4.1.

$$\hat{E}_{D,korr} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{D,eff}}{s(T) \cdot \eta(s(T))} \quad (Gl. 4.1)$$

Die in Gl.4.1 enthaltene Funktion $s(T)$ beschreibt die Abhängigkeit des Elektrodenabstandes von der Temperatur (siehe 3.1). Die mit einer Schlagweitenänderung verbundene Änderung des Homogenitätsgrades wird durch die Funktion $\eta(s(T))$ nach Gl. 3.2 berücksichtigt. Abb. 4.17, Kennlinie (a) zeigt die 63%-Quantile mit den zugehörigen 95%-Konfidenzbereichen für die in Abhängigkeit der Temperatur unter Berücksichtigung der thermischen Abstandsänderung nach Gl. 4.1 ermittelten Durchschlagfeldstärken.

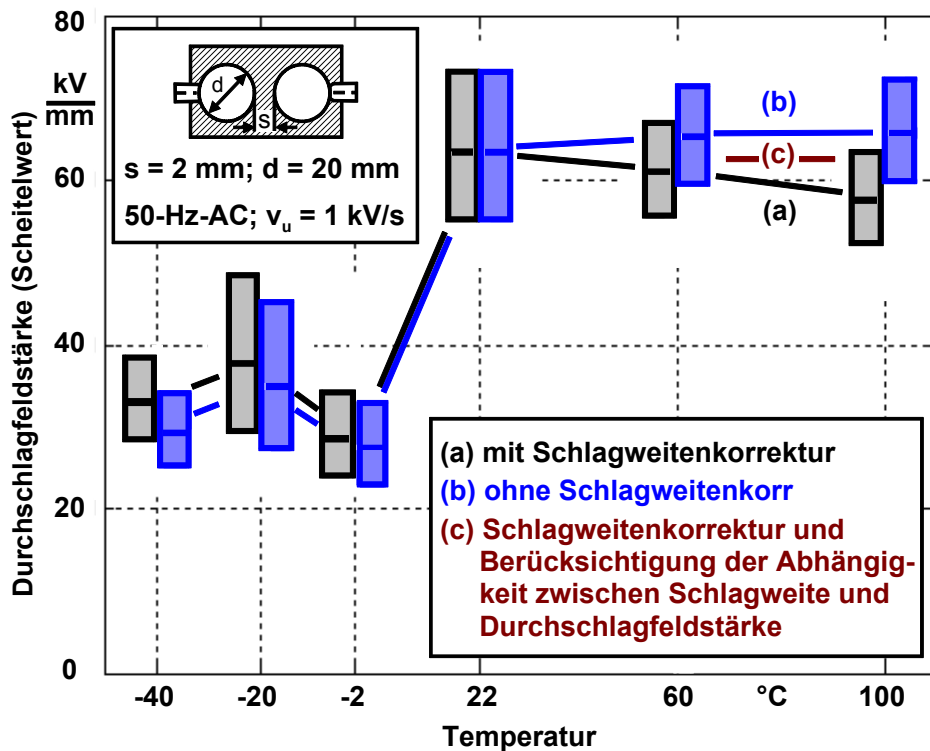


Abb. 4.17: 63%-Quantile der Durchschlagfeldstärke mit den zugehörigen 95%-Konfidenzbereichen als Funktion der Temperatur

Um den Einfluss dieser Korrektur zu verdeutlichen, sind zusätzlich die 63%-Durchschlagfeldstärken, bei deren Berechnung die Schlagweite unabhängig von der Prüflingstemperatur konstant mit $s = 2 \text{ mm}$ erfolgte, dargestellt (Abb. 4.17, Kennlinie (b)). Dabei sind deutliche Abweichungen zwischen den auf die verschiedenen Weisen errechneten Feldstärkewerten feststellbar. Insbesondere für höhere Temperaturen wird der Einfluss der rechnerischen Korrektur offensichtlich.

Die Schlussfolgerung, dass mit steigender Temperatur eine Abnahme der Durchschlagfeldstärke des Silikongels stattfindet, ist dennoch nicht zulässig. Vielmehr ist hier zusätzlich die empirische Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke vom Elektrodenabstand zu berücksichtigen. Bei den Untersuchungen zur Abhängigkeit zwischen der Durchschlagfeldstärke und dem Elektrodenabstand der Kugel-Kugel-Anordnung wurde ein stark nichtlinearer Zusammenhang ermittelt, nach dem ein vergrößerter Elektrodenabstand mit einer verringerten Durchschlagfestigkeit verbunden ist (*siehe 4.2.1.7, Abb. 4.37*). Um diesem Einfluss Rechnung zu tragen, wurden die nachfolgend dargelegten Überlegungen angestellt, die zu einer Abschätzung der Auswirkungen dieser zusätzlichen Abhängigkeit auf die Durchschlagfeldstärke der thermisch beanspruchten Silikongel-Modellisolierung dienen.

Nähert man die in Kapitel 4.2.1.7, *Abb. 4.37* dargestellte Abhängigkeit zwischen der 63%-Durchschlagfeldstärke und der Schlagweite, die bei Raumtemperatur für diskrete Schlagweiten ermittelt wurde, über eine Näherungsfunktion (z.B. Minimierung einer geeigneten Funktion oder Regression) an, so lässt sich unter Verwendung einer derartigen Funktion, die von kleinen Schlagweitenänderungen ausgehende Reduzierung der 63%-Durchschlagfeldstärke abschätzen. Betrachtet man die Erwärmung der Probe von 22°C auf 100°C , die nach dem empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen Schlagweite und Temperatur (*siehe 3.1*) eine effektive Vergrößerung der Schlagweite um $\Delta s \approx 0,2 \text{ mm}$ bewirkt, so ergibt sich eine geschätzte Reduktion der 63%-Durchschlagfeldstärke von 6 %, die nicht der thermischen Einwirkung auf den Isolierstoff selbst zuzuschreiben und daher entsprechend zu korrigieren ist. In *Abb. 4.17, Kennlinie (c)* ist die Auswirkung dieser zusätzlichen Korrektur für $T = 100^{\circ}\text{C}$ dargestellt.

Aufgrund der Tatsache, dass die zugrunde gelegte Abhängigkeit zwischen der Durchschlagfeldstärke und der Schlagweite (*4.2.1.7, Abb. 4.37*) bei Raumtemperatur ermittelt wurde und bei höheren Temperaturen Abweichungen im Verhalten nicht auszuschließen sind, wird jedoch generell auf eine zusätzliche rechnerische Korrektur dieser Art verzichtet. Die durchgeführte Abschätzung verdeutlicht dennoch, dass die unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Schlagweitenkorrektur ermittelte Abnahme der elektrischen Durchschlagfeldstärke für hohe Temperaturen nicht in dem Maße stattfindet bzw. gegeben ist, wie es die Darstellung *Abb. 4.17, Kennlinie (a)* zunächst vermuten lässt. Daher wurde prinzipiell bei allen weiteren Untersuchungen, bei denen Prüflinge einer thermischen Beanspruchung ausgesetzt wurden, auf eine Schlagweitenkorrektur zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagfeldstärke verzichtet, d.h. die Bewertung der Untersuchungsergebnisse erfolgte direkt anhand der ermittelten Durchschlagspannungen.

Betrachtet man die ermittelten Untersuchungsergebnisse unter Berücksichtigung dieses Sachverhaltes, so lassen sich zum Einfluss der Temperatur auf die elektrische Festigkeit von Silikongel folgende Aussagen treffen: Eine signifikante Abhängigkeit zwischen der Durchschlagspannung bzw. elektrischen Durchschlagfestigkeit von Silikongel und der Temperatur ist im Temperaturbereich von 20°C bis 100°C nicht feststellbar. Daher kann in diesem Bereich von einem thermisch völlig unkritischen Verhalten des Silikongels ausgegangen werden. Dieses Verhalten wird auch von *RUEMENAPP* beschrieben, der vergleichbare Untersuchungen an Silikongelen mit Gleichspannung bei 20°C und 100°C durchführte [3;54]. Auch *OESTERHELD* stellte bei seinen Untersuchungen an Silikonelastomeren für Anwendungen in der Garniturentechnik keine nachweisbaren Unterschiede in deren elektrischer Durchschlagfestigkeit bei 20°C und 120°C fest [9;55].

Die hohe Temperaturbeständigkeit von Silikonen resultiert aus ihrem chemischen Aufbau. Im Vergleich zu organischen Elastomeren, die meist aus einem Kohlenstoff-Gerüst aufgebaut sind, liegt die Bindungsenergie der Silizium-Sauerstoff-Bindung (Hauptkette, vgl. 2.1) deutlich höher, was sich insbesondere darin äußert, dass die meisten physikalischen und mechanischen Eigenschaften in einem weiten Temperaturbereich nur geringe Abhängigkeiten von der Temperatur zeigen [19].

Im Gegensatz zum thermisch unkritischen Verhalten bei erhöhter Temperatur führt die thermische Belastung mit Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes zu einer signifikanten Abnahme der Durchschlagfeldstärke. Bereits bei einer Temperatur von -2°C beträgt die Verminderung der 63-%-Durchschlagfeldstärke mehr als 50 % gegenüber dem bei Raumtemperatur und Normalbedingungen ermittelten Wert. Zusätzliche Untersuchungen, die zur statistischen Absicherung des gefundenen Verhaltens bei den Temperaturen -2°C , 2°C und 5°C durchgeführt wurden, untermauern dieses Ergebnis. Auch hier fand eine Abnahme der Durchschlagfestigkeit in vergleichbarer Größe statt. Aufgrund dieses Verhaltens unterscheidet sich Silikongel deutlich von den übrigen in der Hochspannungstechnik eingesetzten festen polymeren Isolierstoffen, die keinen derartigen Verlust der elektrischen Festigkeit bei Beanspruchung durch Temperaturen in Gefrierpunktnähe aufweisen.

Die verminderte elektrische Festigkeit von Silikongel bei Temperaturen in Gefrierpunktnähe kann auf der Wirkung unterschiedlicher Mechanismen beruhen. Einmal könnte eine Abkühlung der Proben aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien zu einer Ablösung des Silikongels von der Elektrodenoberfläche und somit zu einer Fehlstelle führen. Trennversuche zeigen jedoch, dass die Anhaftung des Silikongels auf der Elektro-

denoberfläche auch bei Temperaturen von -40°C noch ausreichend gegeben ist und die mechanischen Eigenschaften von Silikongel nahezu unverändert bleiben. Daher ist eine verminderte Qualität der Grenzfläche als Ursache für den Verlust an elektrischer Festigkeit als unwahrscheinlich einzustufen. Weiterhin kann eine Kristallisation von im Silikongel vorhandenen Wassermolekülen als Ursache für den Verlust an elektrischer Festigkeit ausgeschlossen werden, da die Verminderung der elektrischen Festigkeit bereits bei Temperaturen von 2°C und 5°C eintrat.

Eine mögliche Erklärung für den Festigkeitsverlust von Silikongel bei Abkühlung kann jedoch auf der Bildung von freiem Wasser beruhen. Dieser festigkeitsmindernde Mechanismus ist von Silikonflüssigkeiten her bekannt und in einer Vielzahl von Publikationen, z.B. [23;56], beschrieben. Ist das Lösungsvermögen einer Silikonflüssigkeit für Wasser erschöpft, kommt es zur Bildung von freiem Wasser in Form einer Emulsion, was mit einem drastischen Verlust an elektrischer Festigkeit einhergeht. Da sich das Lösungsvermögen für Wasser mit der Temperatur ändert, ergibt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit von der Temperatur. Aufgrund des im Silikongel enthaltenen Anteils an unvernetzter Silikonflüssigkeit (Polydimethylsiloxan) ist eine Analogie zu dem beschriebenen, von Silikonflüssigkeiten her bekannten, Verhalten zu vermuten. Experimente, die diesem Erklärungsversuch nachgehen, sind im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2.1.5 Feuchtigkeit

Isolierstoffe sind unter praktischen Betriebsbedingungen häufig Feuchtigkeit ausgesetzt. Dabei führt das Eindringen von Feuchtigkeit bei allen organischen Isolierstoffen zu einer Verschlechterung der Isolationseigenschaften [57]. Feldverzerrungen, Hydrolyse sowie ein Anstieg des Verlustfaktors sind zu benennende Effekte, die durch die Anwesenheit von Feuchtigkeit in Isolierstoffen hervorgerufen werden und zu einer Verminderung der elektrischen Festigkeit führen können [58]. Von Silikonflüssigkeit (Polydimethylsiloxan), die zu einem hohen Anteil in der in dieser Arbeit untersuchten Materialformulierung enthalten ist [1], ist bekannt, dass bereits ein geringer Anteil (weniger als 50 ppm) an Feuchtigkeit zu einer signifikanten Veränderung der elektrischen Eigenschaften, insbesondere zu einer drastischen Verminderung der elektrischen Festigkeit, führt [13;23]. Dagegen wird in [59] berichtet, dass die maximale Wasseraufnahme von Silikongummi, das bei 28°C in Wasser gelagert wurde, $0,15\%$ beträgt, wobei kein signifikanter von der Wasserlagerung ausgehender Einfluss auf die elektrische Kurzzeitdurchschlagfestigkeit festgestellt wurde.

Aufgrund der Tatsache, dass Silikongel aus vernetzten Silikonpolymeren und einem hohen Anteil an unvernetzter Silikonflüssigkeit besteht, ist eine Beeinflussung der elektrischen Festigkeit von Silikongel, das in Kontakt zu einer Umgebung mit erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt steht, zu erwarten. Die Höhe einer potentiellen Festigkeitsminderung ist dabei von entscheidender Bedeutung für die Auslegung von Isolierungen bzw. ausschlaggebend bei der Beurteilung der prinzipiellen Eignung von Silikongel als Isolationsmaterial für bestimmte Applikationen, bei denen ein Feuchtigkeitskontakt nicht auszuschließen oder zu vermeiden ist. Aus diesem Grund wurde die Durchschlagsspannung von Silikongel-Modellisierungen nach einer direkten Wasserexposition sowie nach einer Lagerung unter verschiedenen klimatischen Bedingungen bestimmt.

Wasserexposition

Bestimmt wurde die Durchschlagsspannung von Silikongel-Modellisierungen nach einer spannungslosen Lagerung in demineralisiertem Wasser bei Raumtemperatur. Die Wandungen der verwendeten Prüflinge wurden vor der Wasserlagerung mit Bohrungen (Durchmesser 3 mm) versehen, um eine möglichst große Kontaktfläche zwischen der Oberfläche des Isolierstoffes und dem umgebenden Wasser herzustellen. Die Festlegung des benötigten Konditionierungszeitraumes, der zu einer vollständigen Durchfeuchtung der Prüflinge notwendig ist, gestaltete sich als problematisch. Eine messtechnische Bestimmung der Wasseraufnahme von Silikongel erfolgte gravimetrisch (Detektionslimit (Minimum) 600 ppm) bei Raumtemperatur in einer mit Wasser gesättigten Atmosphäre. Im Rahmen dieses Detektionslimits wurde über einen Zeitraum von mehreren Wochen keine Gewichtszunahme der Proben beobachtet [47]. Damit ist nachgewiesen, dass falls das Silikongel Feuchtigkeit absorbiert hat, der Anteil kleiner als 600 ppm ist. Gegen die Vermutung, dass der Konditionierungszeitraum für diese Untersuchung zu gering gewählt wurde und so eine vollständige Durchfeuchtung der Proben nicht erreicht werden konnte, spricht das in [59] berichtete Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten von Silikongummi, das bei 28°C in Wasser gelagert wurde und dabei seine maximale Wasseraufnahme in sehr kurzer Zeit (wenige Tage) erreichte.

Aufgrund der Tatsache, dass die Festlegung des benötigten Konditionierungszeitraumes, der für eine vollständige Durchfeuchtung des Prüflings notwendig ist, messtechnisch nicht bestimmt werden konnte, wurde dieser Zeitraum so gewählt, dass die durch die Wasserlagerung hervorgerufene festigkeitsmindernde Wirkung nahezu ihre vollständige Ausprägung erreicht, d.h. mit einem Minimum der elektrischen Festigkeit des Prüflings verbunden ist. Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit war diese Vorgehensweise als geeignet anzusehen, da die Festlegung

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

von Betriebsfeldstärken anhand der minimalen elektrischen Festigkeit zu erfolgen hat. Dazu wurde der Einfluss zweier unterschiedlicher Lagerungszeiten von 1000 h sowie von 5000 h in demineralisiertem Wasser auf die Durchschlagspannung von Modellisolierungen untersucht. Aus dem ermittelten Zusammenhang zwischen der Einwirkdauer und der Durchschlagspannung erfolgte die Abschätzung der benötigten Einwirkdauer, um die "Umgebung" des Minimums der Durchschlagspannung zu erreichen. Die Bestimmung der Durchschlagspannung erfolgte nach der jeweils spezifizierten Lagerungszeit unmittelbar nach Entnahme der Prüflinge aus dem Wasserbad. Als Referenz dienen die Durchschlagspannungen von Prüflingen, deren Lagerung über einen Zeitraum von 48 h bei Raumtemperatur und Normalbedingungen erfolgte.

Abb. 4.18 zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung. Der Vergleich der ermittelten 63%-Durchschlagspannungen zeigt, dass die Wasserlagerung einen signifikanten Einfluss auf die Durchschlagspannung von Silikonel besitzt. Verglichen mit den bei Raumtemperatur und Normalbedingungen konditionierten Proben beobachtet man nach einer 1000-stündigen Lagerung in demineralisiertem Wasser eine Verminderung der 63%-Durchschlagspannung um 51 %, bei einer 5000-stündigen Lagerung eine Verminderung um 58 % verbunden mit einer Abnahme der Messwertstreuung.

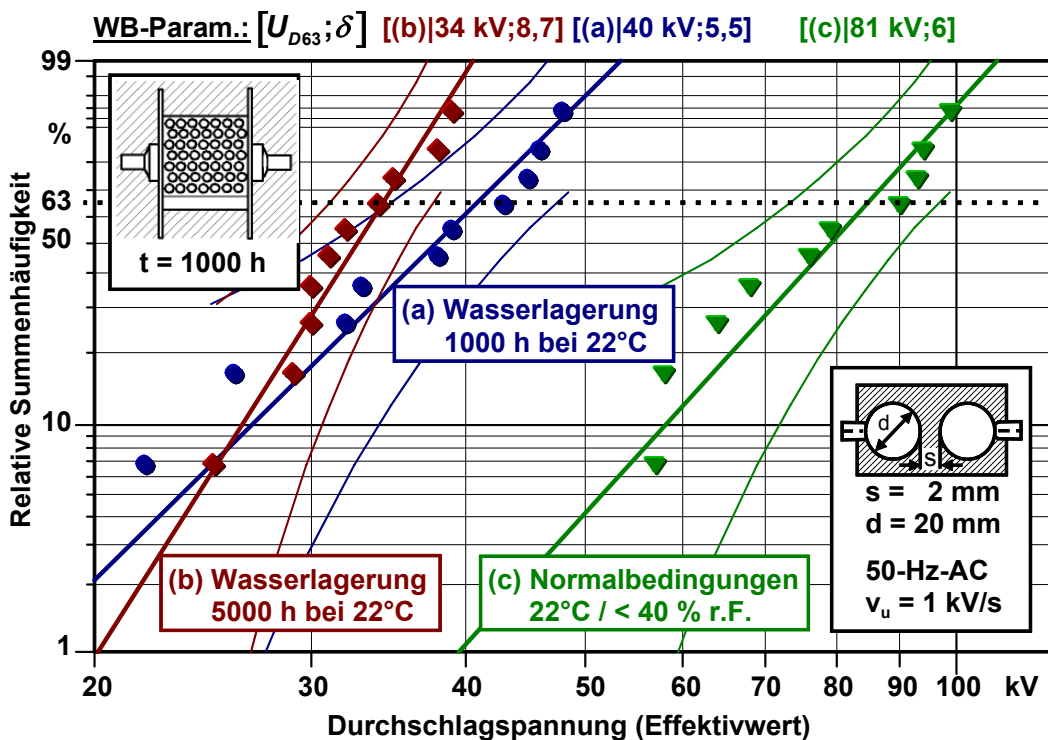


Abb. 4.18: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung in Abhängigkeit der Lagerungsdauer der Prüflinge in demineralisiertem Wasser bei 22°C

Dieses Untersuchungsergebnis zeigt zunächst, dass die von der Wasserlagerung ausgehende Herabsetzung der Durchschlagspannung für die verwendeten Modellisolierungen bereits nach 1000 h stark ausgeprägt ist und sich nur geringfügig vor der um 4000 h verlängerten Lagerungszeit unterscheidet. Insbesondere die prozentuale Verminderung der 63-%-Durchschlagspannung (51 % bei *Versuchsreihe (a)* bzw. 58 % bei *Versuchsreihe (b)*) in Bezug auf den bei Raumtemperatur und Normalbedingungen ermittelten Wert (*Versuchsreihe (c)*) rechtfertigt diese Annahme. Um die Versuchszeiten für weiterführende Untersuchungen in einem angemessenen Rahmen zu halten, wurde im Folgenden bei allen weiteren Untersuchungen, die im Zusammenhang mit dem Einfluss von Feuchtigkeit standen, eine Lagerungsdauer von 1000 h in der entsprechenden Umgebung gewählt.

Nachweis von Feuchtigkeit im Silikongel

Zum Nachweis, dass Silikongel nach einer Wasserlagerung Feuchtigkeit absorbiert hat, wurden Materialproben mittels Infrarotspektroskopie auf das Vorhandensein von Feuchtigkeit untersucht. Die IR-Spektren wurden mittels abgeschwächter Totalreflexion (attenuated total reflection, ATR) auf Galliumträgern durchgeführt. Dazu wurden Silikongel-Proben über einen Zeitraum von circa 1000 h in demineralisiertem Wasser gelagert und anschließend auf das Vorhandensein von Spuren aufgenommenen Wassers hin untersucht. Dabei konnte anhand des IR-Spektrums bei einer Probe eindeutig die Anwesenheit von Wasser im Material nachgewiesen werden. *Abb. 4.19* zeigt die IR-Spektren zweier Silikongel-Proben, die nach der Wassereexposition angefertigt wurden. Die in den IR-Spektren bei 2962 cm^{-1} , 2904 cm^{-1} , 1409 cm^{-1} , 1260 cm^{-1} , 1092 cm^{-1} , 1024 cm^{-1} und 801 cm^{-1} auftretenden charakteristischen Resonanzen identifizieren die Proben eindeutig als Polydimethylsiloxan.

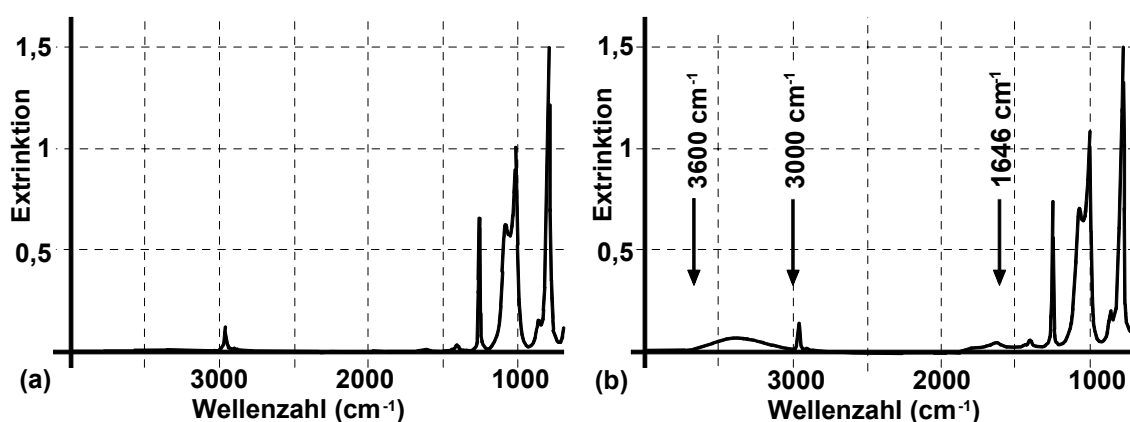


Abb. 4.19: IR-Spektren von wassergelagerten Silikongel-Proben (a) Spektrum ohne die für Wasser in Festkörpern charakteristischen Resonanzen, (b) Spektrum mit den für Wasser in Festkörpern charakteristischen Resonanzen [47]

Das in *Abb. 4.19b* dargestellte IR-Spektrum zeigt zusätzlich die für *OH*-Gruppen charakteristische breite Absorption im Bereich von circa 3600 cm^{-1} bis 3000 cm^{-1} mit einem Maximum bei 3392 cm^{-1} . Dies bedeutet zunächst nicht notwendigerweise die Anwesenheit von Wasser. Dagegen ist die sehr schwache Resonanz bei 1646 cm^{-1} charakteristisch für Wasser in Festkörpern. Da das Polymer keine *OH*-Gruppen enthält (beide Resonanzen sind in Referenzproben nicht vorhanden) kann die Anwesenheit der beiden Resonanzen nur durch vorhandenes Wasser erklärt werden [47]. Diese charakteristischen Resonanzen konnten in den IR-Spektren der beiden anderen Proben nicht bzw. nur stark abgeschwächt (*Abb. 4.19a*) festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass in diesen Proben kein bzw. nur sehr geringe Spuren von Wasser vorhanden waren.

Dieses Untersuchungsergebnis zeigt, dass Silikongel prinzipiell in der Lage ist Feuchtigkeit aufzunehmen. Wenn auch nicht bei allen Proben der Nachweis von absorbiertem Feuchtigkeit erbracht werden konnte, so lassen sich dennoch weitere Indizien für eine Durchfeuchtung des Isolierstoffes nach einer Wasserexposition finden. Einmal konnte nach der 1000-stündigen Wasserlagerung eine deutliche Abnahme der Adhäsionsfähigkeit des aus dem Inneren der Proben entnommenen Materials festgestellt werden. Weiterhin kann die Tatsache, dass die Einwirkung von Feuchtigkeit auf Silikongel-Isolierungen zu einer drastischen Verminderung der elektrischen Festigkeit führt, nur durch ein Eindringen von Feuchtigkeit in das Innere der Isolierung, d.h. den Bereich zwischen den Elektroden, erklärt werden. Daher ist davon auszugehen, dass Silikongel ebenso wie Silikonflüssigkeit nur eine sehr geringe Menge (einige *ppm*) an Feuchtigkeit aufnimmt, was dennoch bei beiden Stoffen eine signifikante Abnahme der elektrischen Festigkeit hervorruft.

Feuchtklima

Um die Wirkung verschiedener klimatischer Bedingungen auf die elektrische Festigkeit von Silikongel zu simulieren, wurden die Modellisolierungen jeweils 1000 h bei verschiedenen Temperatur-Feuchtigkeits-Kombinationen gelagert (Klimareihe $22^{\circ}\text{C}/90\% \text{ r.F.}$ und $80^{\circ}\text{C}/90\% \text{ r.F.}$) und anschließend auf ihre Durchschlagfestigkeit untersucht. Die Bestimmung der Durchschlagspannung erfolgte unmittelbar nach Entnahme der Prüflinge aus der Klimakammer. Aus *Abb. 4.20* ist ersichtlich, dass die Konditionierung der Proben im Feuchtklima stets zu einer starken Verminderung der Durchschlagspannung führt. Bezüglich der 63-%-Durchschlagspannung von Silikongel, ermittelt bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (*Versuchsreihe (c)*), wurde nach der Lagerung im Klima $80^{\circ}\text{C}/90\% \text{ r.F.}$ (*Versuchsreihe (d)*) eine Verminderung um 51 % sowie für die Lagerung im Klima $22^{\circ}\text{C}/90\% \text{ r.F.}$ (*Versuchsreihe (e)*) eine Verminderung um 41 % ermittelt.

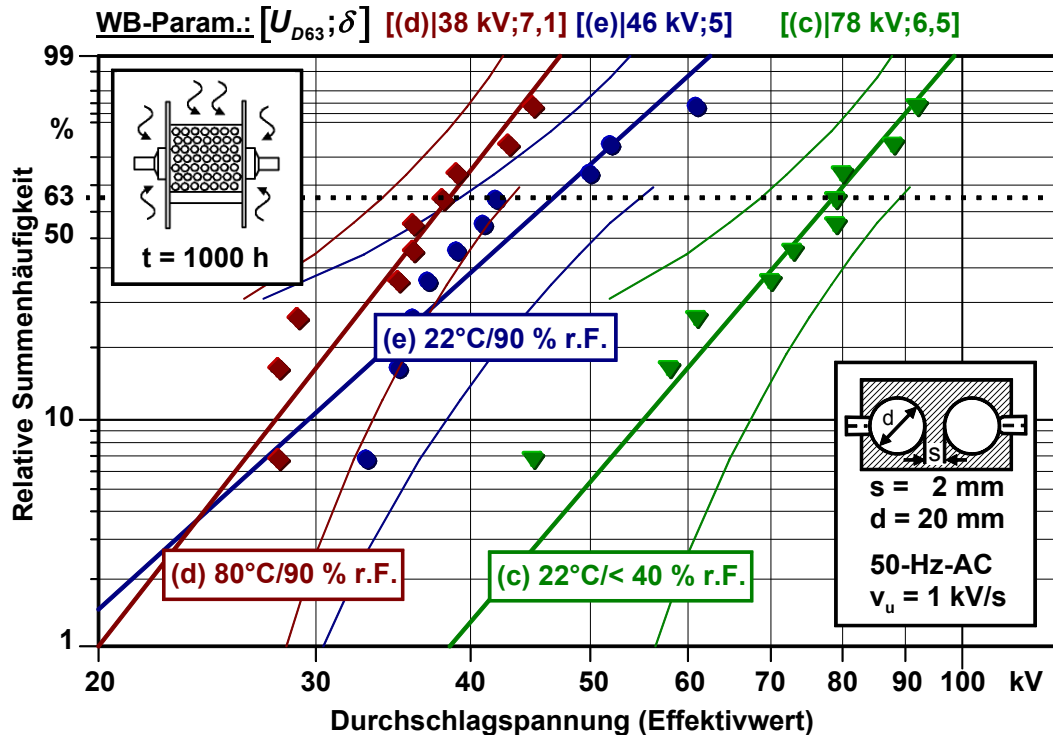


Abb. 4.20: Einfluss verschiedener klimatischer Umgebungsbedingungen auf die Durchschlagsspannung von Silikongel

Das Ergebnis zeigt, dass die Verminderung der Durchschlagsspannung nach der Konditionierung in einer Umgebung mit einem erhöhten Feuchtigkeitsgehalt (Abb. 4.20, Versuchsreihe (d), (e)) mit der einer Wasserlagerung bei Raumtemperatur (Abb. 4.18, Versuchsreihe (a), (b)) gleichzusetzen ist. Dies ist ein deutliches Indiz dafür, dass sich das Wasseraufnahmeverhalten von Silikongel in Luft mit definierter Feuchtigkeit von dem in demineralisiertem Wasser nicht wesentlich unterscheidet; eine Eigenschaft die von organischen Isolierstoffen her bekannt ist [59]. Weiterhin lässt die Tatsache, dass bei konstanter Feuchtigkeit die Steigerung der Temperatur eine Abnahme der Durchschlagsspannung zur Folge hat, auf temperaturabhängiges Feuchtigkeitsaufnahmevermögen von Silikongel schließen.

Um mögliche Ähnlichkeiten im Durchschlagverhalten von Silikongel und -flüssigkeit unter dem Einfluss von Feuchtigkeit aufzuzeigen, wurden Untersuchungen mit einer kommerziellen Silikonflüssigkeit durchgeführt. Dazu wurden die mit Silikonflüssigkeit befüllten Prüfkörper unter identischen Bedingungen (Raumtemperatur und Normalbedingungen sowie bei 80°C/90 % r.F.) konditioniert und im Anschluss daran deren Durchschlagsspannungen bestimmt und in Beziehung zueinander gesetzt. Bezüglich der 63%-Durchschlagsspannung wurde nach der Lagerung im Klima 80°C/90 % r.F. für Silikonflüssigkeit eine Verminderung von 62 % festgestellt, was eine Analogie im Durchschlagverhalten von Silikongel und -flüssigkeit bei Einwirkung von Feuchtigkeit aufzeigt.

Neben dem Einfluss der Feuchtigkeit auf den Isolierstoff selbst ist eine Verminderung der Qualität der Grenzfläche zwischen der Elektrodenoberfläche und dem Silikongel aufgrund von Feuchtigkeit nicht auszuschließen. Korrosionserscheinungen auf der Elektrodenoberfläche sowie eine reduzierte Anhaftung des Silikongels an der Elektrode können hier potentielle Schwachstellen in der Isolierung darstellen. Jedoch zeigten Trennversuche, die nach der elektrischen Prüfung durchgeführt wurden, dass sich die Anhaftung des Silikongels auf der Elektrodenoberfläche nach einer Wasserlagerung nur sehr geringfügig von der Anhaftung unter trockenen Bedingungen unterscheidet. Zudem wurden bei der optischen Bewertung der Elektrodenoberflächen, die nach der elektrischen Prüfung erfolgte, keine sichtbaren Korrosionserscheinungen festgestellt. Aus diesen Gründen ist die Grenzfläche zwischen dem Silikongel und der Elektrode nicht als die das Durchschlagverhalten der Isolierung unter dem Einfluss von Feuchtigkeit bestimmende Fehlstelle anzusehen (vgl. 2.4.1.6).

Trocknung

Zur weiteren Erhärtung der Vermutung, dass die in das Silikongel eingedrungene Feuchtigkeit ursächlich für den Verlust an elektrischer Festigkeit ist, wurden Prüfkörper nach einer 1000-stündigen Lagerung in demineralisiertem Wasser einer Trocknung unterzogen, die über einen Zeitraum von 500 h bei 90°C im Wärmeschrank erfolgte. Um eine direkte Vergleichbarkeit mit den unter Normalbedingungen ermittelten Durchschlagspannungen herstellen zu können, erfolgte die elektrische Prüfung nach einer sich der Trocknung anschließenden 24-stündigen Lagerung bei 22°C und Normalbedingungen. Das Ergebnis der Untersuchung ist *Abb. 4.21, Versuchsreihe (g)* dargestellt. Die nach einer 1000-stündigen Wasserlagerung bei 22°C (*Versuchsreihe (f)*) sowie die unter Normalbedingungen (*Versuchsreihe (c)*) ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung dienen als Referenz.

Aus *Abb. 4.21* geht deutlich hervor, dass die wassergelagerten Proben nach einer Trocknung (*Versuchsreihe (g)*) Durchschlagspannungen erreichen, die von den bei Raumtemperatur und Normalbedingungen ermittelten Werten (*Versuchsreihe (c)*) nur unwesentlich abweichen. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der elektrischen Festigkeit und dem Feuchtigkeitsgehalt im Isolierstoff besteht. Weiterhin zeigt dieses Ergebnis, dass die festigkeitsmindernde Wirkung von Feuchtigkeit auf Silikongel durch eine Trocknung aufgehoben werden kann.

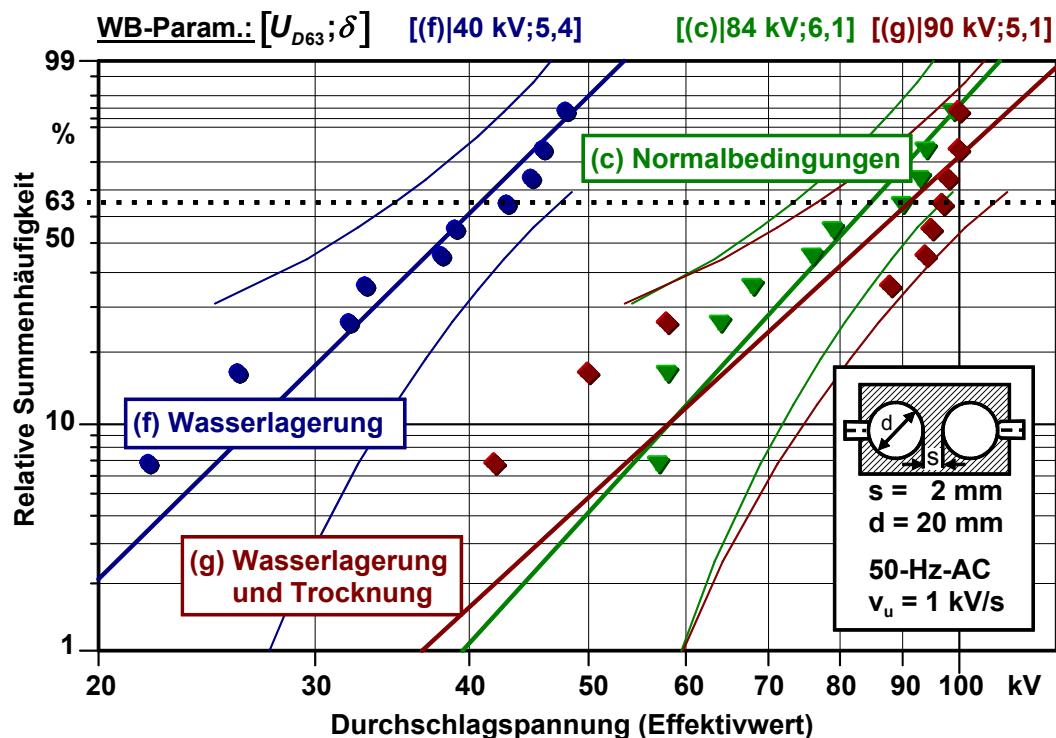


Abb. 4.21: Einfluss einer 500-stündigen Trocknung bei 90°C auf die Verteilungsfunktion der Durchschlagsspannung von durchfeuchteten Silikongel-Modellisolierungen

Wasserabscheidung

Um ein tieferes Verständnis über die Mechanismen zu erlangen, die zu der beobachteten Verminderung der elektrischen Festigkeit von Silikongel-Isolierungen bei Einwirkung von Temperaturen in Gefrierpunktnähe führen (siehe 4.2.1.4), wurden weitere Experimente durchgeführt.

Experiment 1

In Isolierölen findet der Übergang von gelöstem Wasser (optisch nicht sichtbar) zu freiem Wasser (sichtbar) statt, wenn der maximale Wassersättigungsgehalt des Isolieröls unter den Gehalt des darin gelösten Wassers fällt. Ursache hierfür kann beispielsweise ein Temperaturabfall sein. Deutlich sichtbar wird dieser Effekt durch eine Trübung des Öls. Es ist bekannt, dass dieser Effekt zu einer signifikanten Abnahme der elektrischen Festigkeit führt [23]. Aufgrund der stofflichen Struktur von Silikongel, das einen hohen Anteil an unvernetztem Polydimethylsiloxan enthält (siehe 2.1), ist zu vermuten, dass dieser Effekt auch im Silikongel auftritt und auch hier für die Herabsetzung der elektrischen Festigkeit ursächlich ist. Dies könnte den elektrischen Festigkeitsverlust von Silikongel, der bei Abkühlung von Raumtemperatur auf Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes festgestellt wurde (siehe 4.2.1.4), erklären.

Diese Vermutung sollte zunächst durch ein Experiment gestützt werden, welches darauf abzielt, das Auftreten des beschriebenen Effektes im Silikongel nachzuweisen. Dazu wurde ein mit transparentem Silikongel (*siehe 2.1*) gefüllter Prüfkörper über eine Zeitdauer von 1000 h im Klima $80^{\circ}\text{C}/90\% \text{ r.F.}$ gelagert. Nach der Entnahme aus der Klimakammer trat bei der sich anschließenden Lagerung bei 22°C und Normalbedingungen eine deutlich wahrnehmbare Trübung im Silikongel auf. Dabei erreichte die Trübung ausgehend vom transparenten Zustand (*Abb. 4.22a*) nach 15 min ihre vollständige Ausprägung (*Abb. 4.22b*). Durch eine 24-stündige Trocknung der Probe konnte der transparente Ausgangszustand wieder hergestellt werden.

Proben, die 1000 h bei $22^{\circ}\text{C}/90\% \text{ r.F.}$ gelagert und im Anschluss daran auf 0°C abgekühlt wurden, zeigten das Auftreten einer Trübung in stark abgeschwächter Form, was ein weiteres Indiz für ein temperaturabhängiges Feuchtigkeitsaufnahmevermögen ist. Ein direkter Nachweis mittels ATR-Spektroskopie, wonach es sich bei den beobachteten Trübungen um freies Wasser handelt, konnte nicht erbracht werden [47].

Experiment 2

Zur Stützung der These, dass es sich bei der Trübung um emulgiertes Wasser handelt, das für die Reduzierung der elektrischen Festigkeit ursächlich ist, wurde ein weiteres Experiment durchgeführt.

Bei diesem Experiment wurde nach einer 1000 h Lagerung der Proben im Klima $80^{\circ}\text{C}/90\% \text{ r.F.}$ die sich anschließende Konditionierungsdauer der Prüflinge bei Raumtemperatur und Normalbedingungen und der elektrischen Prüfung variiert, so dass die Prüfung bei verschiedenen Materialtemperaturen stattfand. Aufgrund

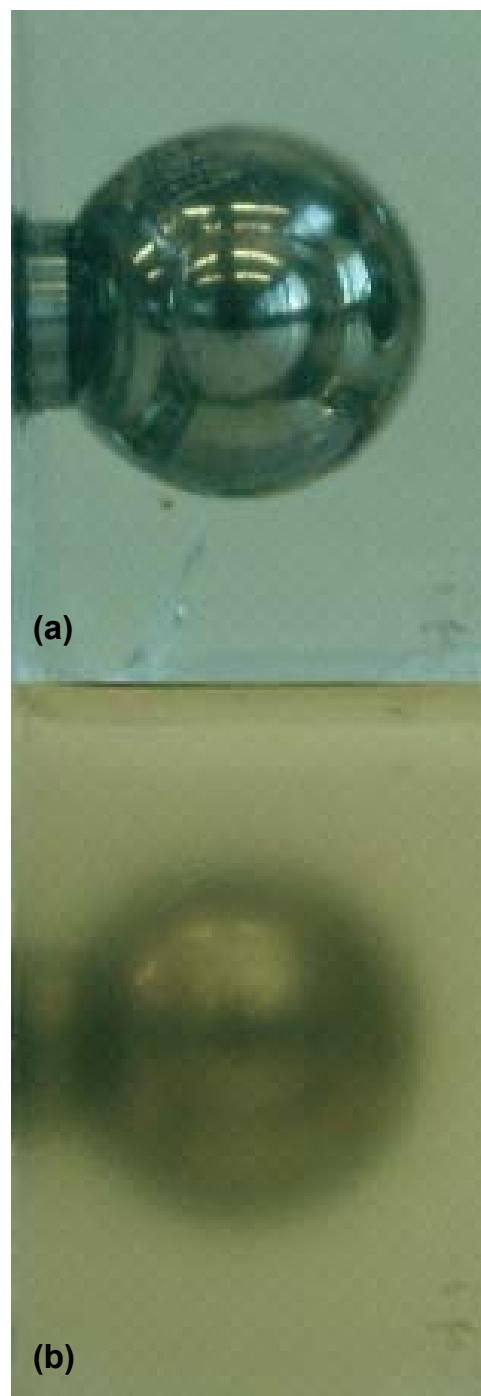


Abb. 4.22: Wasserabscheidung (a) unmittelbar nach der Entnahme aus einem Klima von 80°C und 90% relativer Feuchte, (b) Zustand nach 15-minütiger Lagerung bei 22°C und Normalbedingungen

der beobachteten zeitlichen Entwicklung der Trübung (vgl. *Experiment 1*) und des zugrunde gelegten temperaturabhängigen Feuchtigkeitsaufnahmevermögens von Silikongel, müsste während des Abkühlvorganges mit abnehmender Temperatur eine immer größere Menge an Feuchtigkeit emulgiert werden, was sich in einer verminderten Durchschlagspannung widerspiegeln müsste.

Dazu wurde die Durchschlagspannung von Proben direkt nach der Entnahme aus der Klimakammer sowie von Proben nach deren Abkühlung auf Raumtemperatur bestimmt. Die Materialtemperatur im Prüfvolumen beträgt im Falle der elektrischen Prüfung direkt nach der Entnahme der Probe aus der Klimakammer zum Zeitpunkt des Durchschlages noch mindestens 75°C (siehe 3.1, Abb.3.5). Korreliert mit der zeitlichen Entwicklung der Trübung, die an klarem Silikongel beobachtet wurde und zu diesem Zeitpunkt noch nicht ihre vollständige Ausprägung erreicht hatte, ist davon auszugehen, dass hier noch nicht die maximale Menge an Feuchtigkeit emulgiert wurde. Im zweiten Falle erfolgte die elektrische Prüfung nach einer Lagerungsdauer von 2 h bei 22°C und Normalbedingungen. Nach dieser Zeit sind nahezu alle thermischen Ausgleichsvorgänge abgeschlossen und der gesamte Prüfkörper befindet sich bei 22°C im thermischen Gleichgewicht (siehe 3.1, Abb. 3.5). *Experiment 1* zeigt, dass die sich zu diesem Zeitpunkt einstellende Trübung ihre vollständige Ausprägung erreicht hat und so von einer maximalen Menge an emulgierter Feuchtigkeit im Isolierstoff ausgegangen werden kann. Nach der entwickelten Theorie müsste mit zunehmender Abkühldauer die Menge an emulgierter Feuchtigkeit (freies Wasser) zunehmen, was sich wiederum in einer Abnahme der Durchschlagspannung widerspiegeln müsste. Der schematische Ablauf der Prüfungen ist in Abb. 4.23 dargestellt.

Die während der Abkühlphase der Prüflinge für zwei verschiedene Temperaturen ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung zeigt Abb. 4.24. Das Ergebnis bestätigt das postulierte Verhalten, wonach die Minderung der Durchschlagspannung von Silikongel, das bei hohen Temperaturen und hoher relativer Feuchte gelagert wurde, stark von der Materialtemperatur zum Zeitpunkt der elektrischen Prüfung (*Versuchsreihe (h), (i)*) abhängt. Aufgrund des beobachteten Zusammenhanges zwischen der Isolierstofftemperatur und der sich einstellenden Trübung, bei der angenommen wird, dass es sich hierbei um emulgiertes Wasser handelt, kann die mit einer verringerten Isolierstofftemperatur verbundene Abnahme der Durchschlagspannung durch das Vorhandensein einer größeren Menge an emulgiertem Wasser erklärt werden.

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

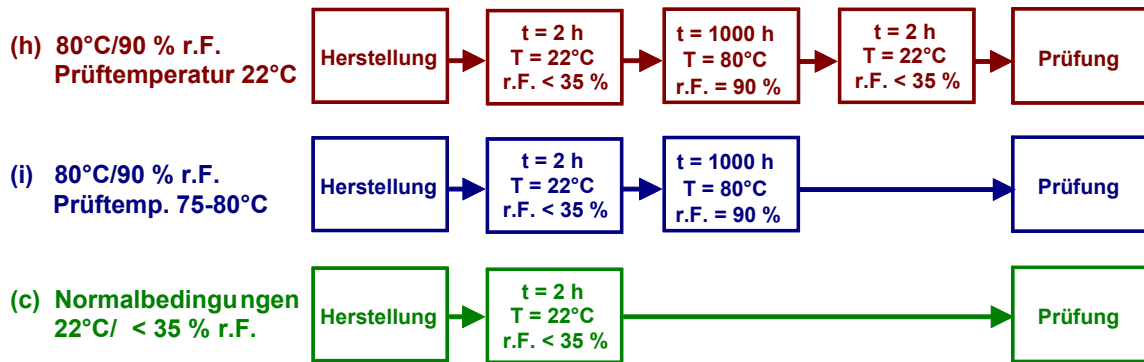


Abb. 4.23: Konditionierungs- und Prüfschema

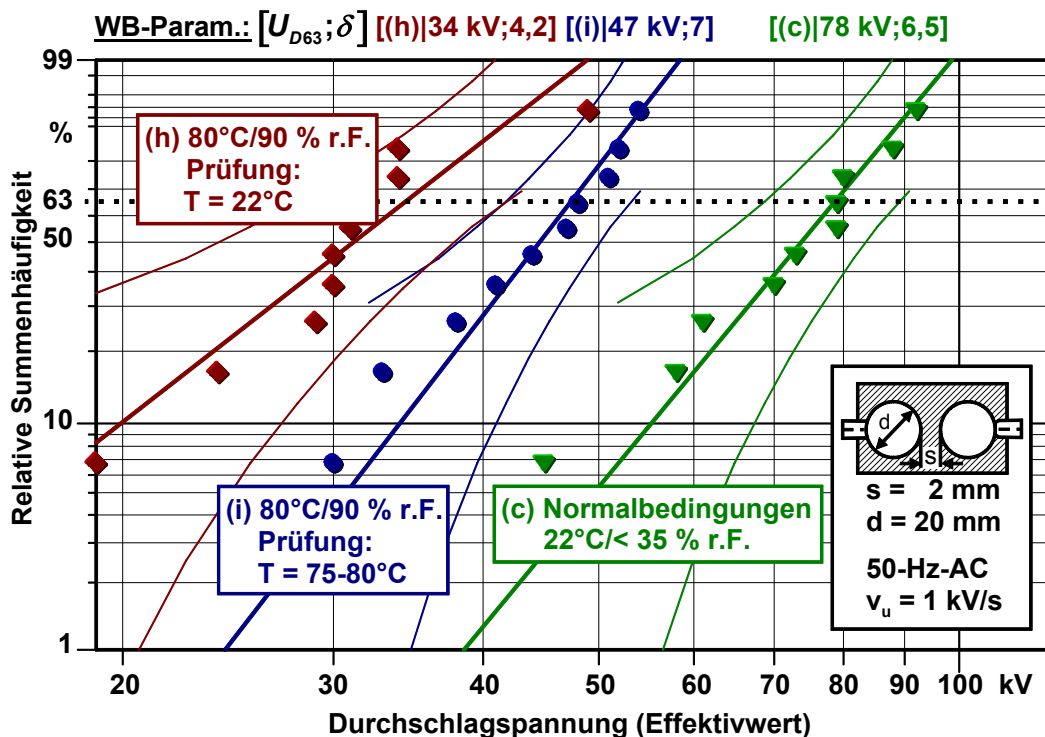


Abb. 4.24: Ermittelte Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikonel, das in einer Atmosphäre mit hohem Feuchtigkeitsgehalt (80°C/90 % r.F.) konditioniert wurde, während der Abkühlphase in Abhängigkeit der Isolierstofftemperatur

Experiment 3

Zur weiteren Stützung der These, dass emulgiertes Wasser, welches durch das Abkühlen von Raumtemperatur auf Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes auftritt (siehe 4.2.1.4), für den Verlust an elektrischer Festigkeit ursächlich ist, wurde ein drittes Experiment durchgeführt. Wie bereits in *Experiment 2* gezeigt, nimmt die elektrische Festigkeit mit der Menge an emulgiertem Wasser ab. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die elektrische Festigkeit von Silikonel, das in Kontakt zu Feuchtigkeit stand, durch Trocknung zu steigern (siehe Abb. 4.21).

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Unter der Voraussetzung, dass Silikongel bei Raumtemperatur und Normalbedingungen eine gewisse Menge an Feuchtigkeit aus der Umgebung aufgenommen hat, müsste sich diese durch eine Trocknung bei höheren Temperaturen reduzieren lassen. Beim Abkühlen eines Silikongels mit verringertem Feuchtigkeitsgehalt ist daher zu erwarten, dass die Menge an emulgiertem Wasser gegenüber einem unter Normalbedingungen konditionierten Silikongel reduziert ist, was in einer höheren Durchschlagspannung zum Ausdruck kommen müsste.

Die Trocknung der Prüflinge erfolgte über einen Zeitraum von 1000 h bei einer Temperatur von 90°C im Wärmeschrank. Unmittelbar folgend wurde eine 24-stündige Lagerung in einer Klimakammer bei -2°C vorgenommen. Die elektrische Prüfung erfolgte direkt nach Entnahme der Prüflinge aus der Klimakammer. Die dabei ermittelte Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung ist in *Abb. 4.25* dargestellt. Ergänzend dazu sind die bei Raumtemperatur und Normalbedingungen sowie die nach einer Abkühlung von Raumtemperatur auf -2°C (siehe 4.2.1.4, *Abb. 4.16*) ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikongel dargestellt.

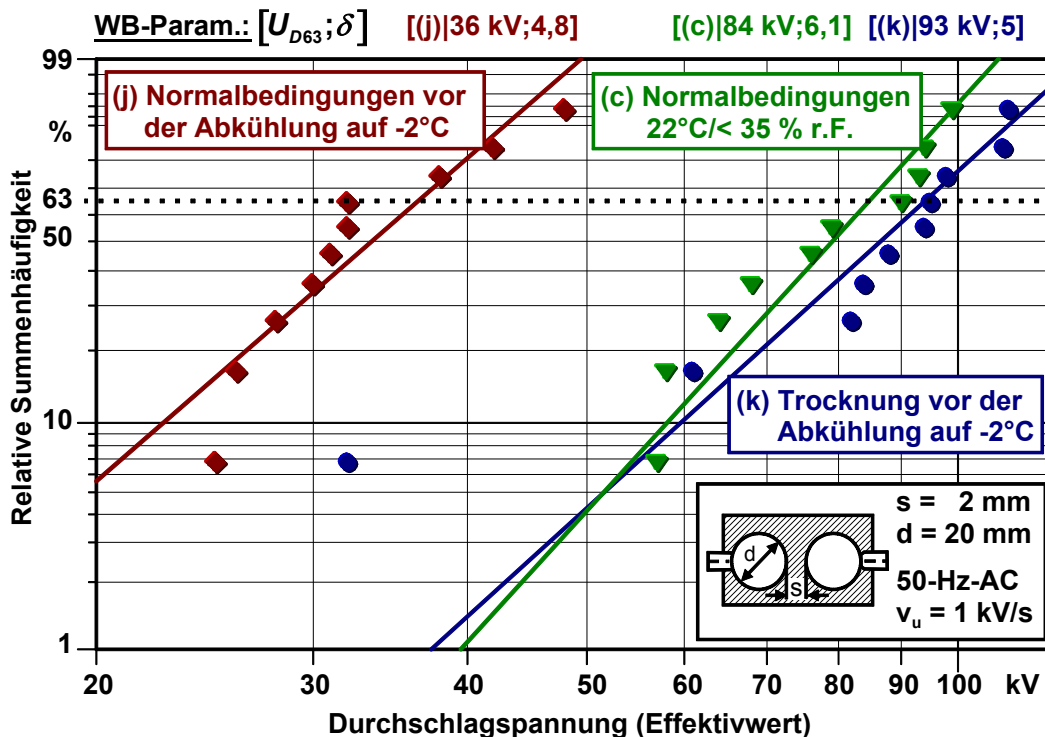


Abb. 4.25: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikongel nach der Abkühlung auf -2°C in Abhängigkeit der Vorbehandlung vor Beginn der Abkühlphase

Aus *Abb. 4.25* geht hervor, dass die Durchschlagspannung von Silikongel nach einer Trocknung und einer sich daran anschließenden Abkühlung und Lagerung bei -2°C (*Versuchsreihe (k)*) mit der von Silikongel bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (*Versuchsreihe (c)*) vergleichbar ist. Das heißt, eine signifikante Abnahme der Durchschlagspannung, wie sie bei einer Konditionierung der Proben bei Raumtemperatur und Normalbedingungen und anschließender Abkühlung (*Versuchsreihe (j)*) beobachtet wurde, fand hier nicht statt. Auch dieses Experiment lässt nur den Schluss zu, dass der beobachtete Verlust an elektrischer Festigkeit in direktem Zusammenhang mit der Emulgierung von Feuchtigkeit im Isolierstoff steht. Übertragen auf die Auslegung von praktischen Isolierungen bedeutet dies, dass durch eine Trocknung und eine anschließende gasundurchlässige Kapselung (Dampfsperre) von Silikongel-isolierten Bauelementen der beim Abkühlen auf tiefe Temperaturen eintretende Verlust an elektrischer Festigkeit vermieden werden kann.

Feuchtigkeit in Kombination mit niedrigen Temperaturen

Die vorausgegangenen Untersuchungen zeigen, dass sowohl eine Wasserexposition als auch die Einwirkung von Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes (*siehe 4.2.1.4*) zu einer starken Verminderung der elektrischen Festigkeit von Silikongel führen. Für den praktischen Einsatz von Silikongel ist es daher von grundlegendem Interesse, das Zusammenwirken beider festigkeitsmindernder Einflüsse im Sinne einer "worst case"-Abschätzung zu simulieren, um daraus Betriebsfeldstärken, die einen sicheren Betrieb unter ungünstigsten klimatischen Bedingungen gewährleisten, festlegen zu können.

Aus diesem Grund wurde die Durchschlagspannung von Silikongel-Proben nach einer Wasserlagerung bei Raumtemperatur (*1000 h bei 22°C*) und einer sich direkt daran anschließenden 24-stündigen Lagerung der Proben bei -2°C ermittelt. Hierbei ist zu vermuten, dass eine gegenüber der Wasserexposition bei 22°C erhöhte Menge an Feuchtigkeit im Isolierstoff vorhanden ist und dass aufgrund einer möglichen Kristallisation von Wassermolekülen ein noch kritischerer Zustand der Isolierung erreicht wird. Als Referenz dienen die Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Proben, die nach einer 24-stündigen Lagerung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (*Versuchsreihe (c)*) bzw. nach einer 1000-stündigen Wasserlagerung (*Versuchsreihe (b)*) ermittelt wurden. Zur Erhöhung der statistischen Sicherheit wurde bei dieser Untersuchung ein Stichprobenumfang von 20 Proben je Versuchsreihe verwendet. *Abb. 4.26* gibt den schematischen Ablauf der Untersuchungen wider.

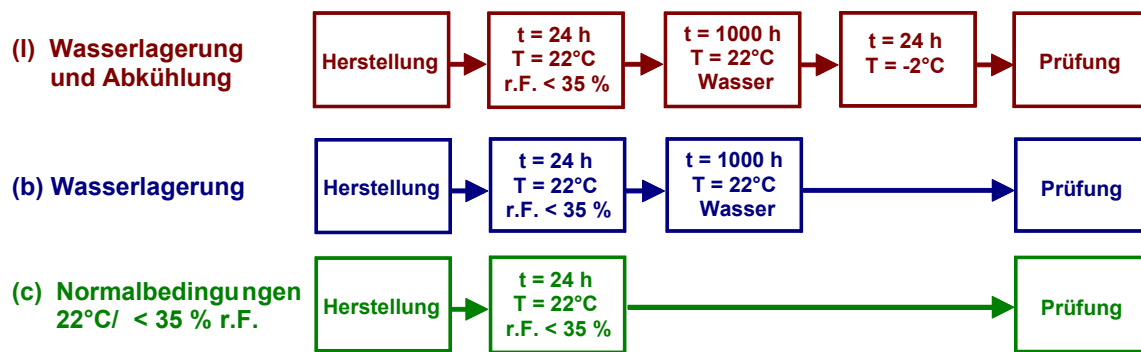


Abb. 4.26: Konditionierungs- und Prüfbedingungen

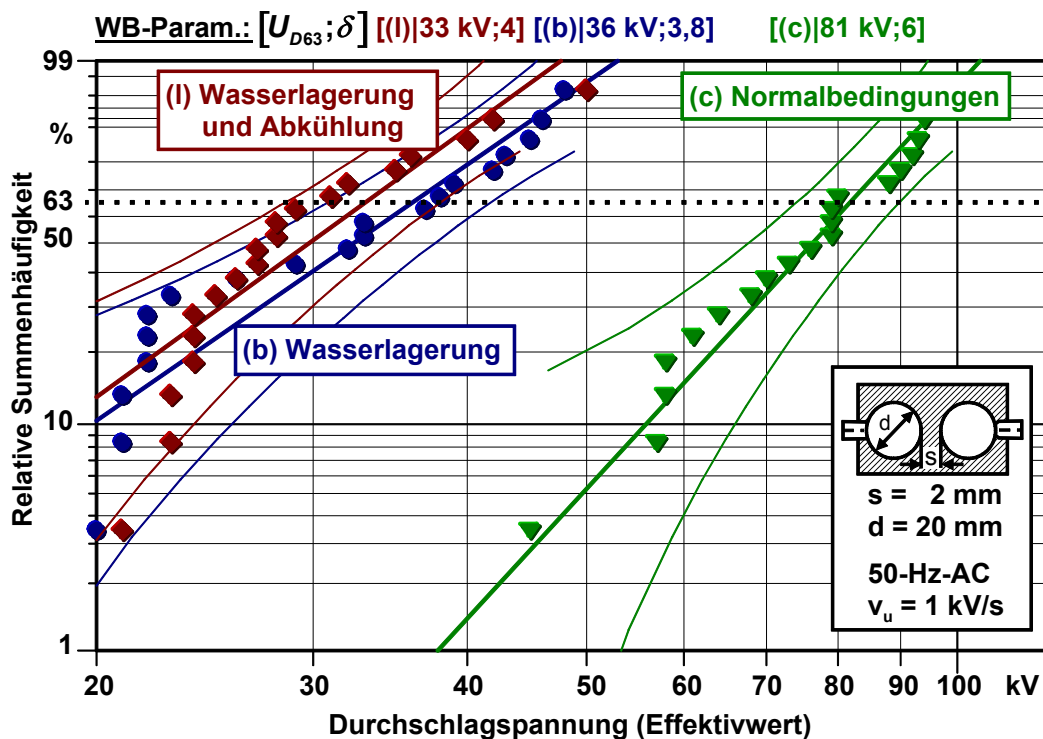


Abb. 4.27: Verteilungsfunktionen der Durchschlagsspannung von durchfeuchtetem Silikongel nach Abkühlen auf -2°C (l), von durchfeuchtetem Silikongel bei 22°C (b) sowie von Silikongel bei 22°C und Normalbedingungen (c)

Diese Untersuchung zeigt, dass die Durchschlagsspannung von durchfeuchteten Silikongel-Modellisolierungen nach der Abkühlung auf Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes (*Versuchsreihe (l)*) verglichen mit der von durchfeuchteten Modellisolierungen bei 22°C nochmals herabgesetzt ist. Bezüglich des 63-%-Quantils beträgt diese Abnahme 8 % bei nahezu unveränderter Messwertstreuung. Diesem Effekt ist bei der Auslegung von Isolierungen, bei deren Betrieb derartige Belastungen zu erwarten sind, Rechnung zu tragen.

Bewertung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die 63-%-Kurzzeitdurchschlagsspannung von Silikongel-Modellisierungen, die spannungslos in Kontakt zu Feuchtigkeit standen, um bis zu 60 % gegenüber den bei Raumtemperatur und Normalbedingungen konditionierten Isolierungen vermindert ist. Damit einhergehend kommt es zu einer Zunahme der Messwertstreuung, was bei der Festlegung von Betriebsfeldstärken entsprechend zu berücksichtigen ist. Das Durchschlagverhalten von Silikongel bei Anwesenheit von Feuchtigkeit lässt deutliche Parallelen zu demjenigen von Isolierölen erkennen. Dadurch ist auch der stattfindende Verlust an elektrischer Festigkeit, der bei Abkühlung eines bei Raumtemperatur und Normalbedingungen konditionierten Silikongels auftritt und durch das Freiwerden von im Silikongel gelöster Feuchtigkeit hervorgerufen wird, erklärbar. Die durchgeführten Untersuchungen lassen klar erkennen, dass Silikongel nicht als Feuchtigkeitsbarriere wirkt. Daher sollte eine direkte Einwirkung von Feuchtigkeit auf das Silikongel im praktischen Einsatz vermieden werden (z.B. durch Dampfsperren). Anderenfalls ist eine drastische Herabsetzung der Betriebsfeldstärke notwendig.

4.2.1.6 Druck

Der Einsatz von mechanischer Druckeinwirkung zur Steigerung der elektrischen Festigkeit und Lebensdauer von Isolierungen ist ein allgegenwärtiges Prinzip im Bereich der Isolations- und -verbindungstechnik. Dabei beruht die von einer Druckeinwirkung auf Isolierbauteile ausgehende festigkeitssteigernde Wirkung im Wesentlichen auf zwei Mechanismen. Zum einen besteht bei den Isoliergasen eine ausgeprägte Abhängigkeit zwischen der elektrischen Festigkeit und dem einwirkenden Druck. Auch flüssige Isolierstoffe weisen eine derartige Abhängigkeit auf, allerdings in wesentlich schwächer ausgeprägter Form [23]. Die Zunahme der Stoffdichte ist in beiden Fällen als die wesentliche Ursache für die gesteigerte elektrische Festigkeit des unter Druckeinwirkung stehenden gasförmigen bzw. flüssigen Isolierstoffes zu benennen. Des Weiteren lässt sich die elektrische Festigkeit konstruktiv bedingter Grenzflächen zwischen zwei Festkörpern durch gezielte mechanische Druckeinprägung bedeutend steigern. In diesem Fall zielt der Einsatz der Druckeinwirkung darauf ab, einen optimalen Verbund zwischen den die Grenzfläche bildenden Materialien herzustellen, um die Entstehung von Fehlstellen in Form von Lufteinschlüssen zu vermeiden sowie mechanischen Ablösungen und Rissbildungen aufgrund thermisch bedingter Materialbewegungen entgegenzuwirken. Eine durch die Druckeinwirkung erzielte Steigerung der elektrischen Festigkeit der eingesetzten Werkstoffe ist hierbei von untergeordneter Bedeutung bzw. überhaupt nicht angestrebt. Der auf die Verbesserung der elektrischen Eigen-

schaften von elektrisch beanspruchten Grenzflächen abzielende Einsatz von mechanischer Druckeinwirkung ist in vielfältigen technischen Anwendungen umgesetzt. Beispiele hierfür stellen die bereits in der Niederspannungsverbindungstechnik eingesetzten Silikongel-Verbindungs-muffen [4;5] sowie die unter Druckeinwirkung stehende Grenzfläche zwischen dem Silikongummi-Schirm und GFK-Stab von Hochspannungsisolatoren [9] dar.

Damit ist die Bedeutung von mechanischer Druck- bzw. Krafteinwirkung als Design-Parameter bei der Auslegung von technischen Isolierungen aufgezeigt. Nunmehr blieb festzustellen, welchen Einfluss eine mechanische Druckeinwirkung auf das Durchschlagverhalten von Silikongel-Modellisolierungen besitzt. Dazu wurde zunächst einmal der für die Auslegung von Silikongel-Isolierungen relevante Druckbereich spezifiziert, der sich aus physikalischen, technischen sowie wirtschaftlichen Randbedingungen ableitet.

Aussonderung unvernetzter Bestandteile bei Druckeinwirkung

YAWORSKI und *BUKOVNIK* berichten, dass die Einwirkung von Überdrücken auf eine Silikongel-Probe zu einer Aussonderung von unvernetzten Bestandteilen (Polydimethylsiloxan) und damit verbunden zu einer Volumenabnahme der Probe führen kann [1]. Wie in *Kapitel 2.1* dargestellt, besteht das untersuchte Silikongel im Wesentlichen aus einer Polymermatrix, in der ein hoher Anteil an unvernetztem Polydimethylsiloxan (PDMS) eingelagert ist (Quellung). Nach [1] verhält sich das unvernetzte PDMS wie ein Lösungsmittel für die Polymermatrix und wird durch einen sich einstellenden osmotischen Druck im Vulkanisat gehalten. Bei der Einwirkung von externen Drücken, die größer sind als der durch die Quellung hervorgerufene osmotische Druck, wird solange unvernetztes PDMS ausgesondert, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen dem osmotischen Druck und dem Umgebungsdruck einstellt. Dies ist ein diffusionsgesteuerter Prozess, dessen Geschwindigkeit von der Geometrie der Probe sowie der Viskosität des PDMS abhängt.

Abb. 4.28 zeigt die Abhängigkeit zwischen dem wirksamen Überdruck, der Zeit und der daraus resultierenden Volumenänderungen für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Silikongel. Die Messungen wurden an scheibenförmigen Silikongel-Proben mit einer Stärke von 1 mm für die einwirkenden Überdrücke $p_1 = 138\text{ hPa}$ (2 psi) sowie $p_2 = 345\text{ hPa}$ (5 psi) über einen Zeitraum von 2200 h durchgeführt.

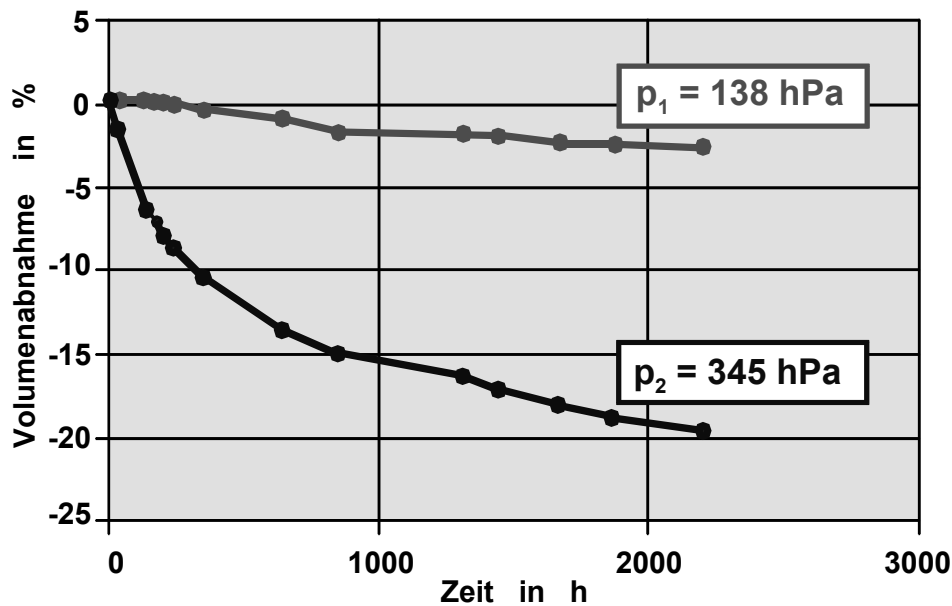
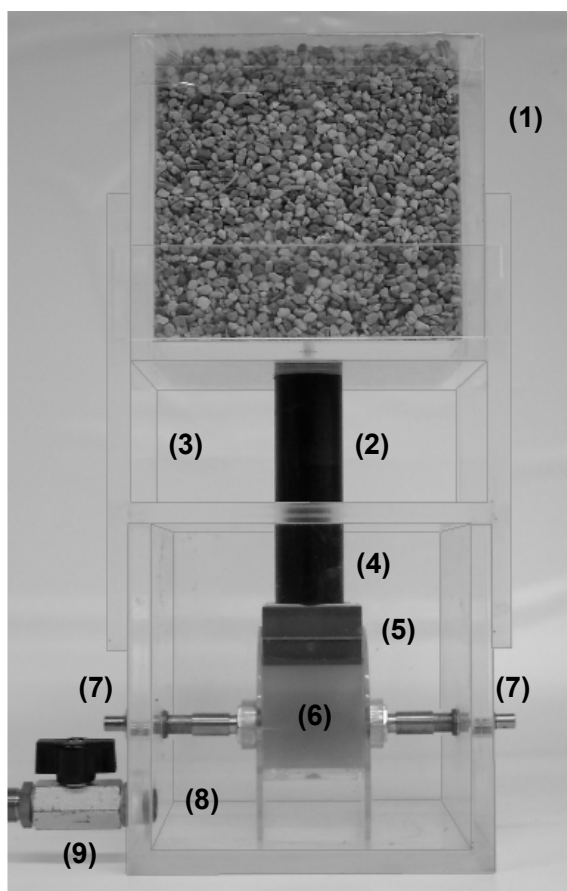


Abb. 4.28: *Volumenänderung von Silikongel, hervorgerufen durch die Aussonderung von unvernetzten Bestandteilen (Polydimethylsiloxan) aus dem Vulkanisat in Abhängigkeit des wirksamen Überdruckes und der Zeit [1]*

Aus Abb. 4.28 ist ersichtlich, dass bereits ein Überdruck von $p_1 = 138 \text{ hPa}$ zu einem signifikanten Ölverlust und einer damit verbundenen Volumenabnahme führt. Neben der Volumenabnahme, die zur Entstehung von Hohlräumen und damit zu Fehlstellen in der Isolation führen kann, ist aufgrund des Verlustes an unvernetztem PDMS eine deutliche Veränderung der mechanischen Eigenschaften zu verzeichnen. Beispielsweise geht eine Abnahme der Adhäsionsfähigkeit mit zunehmendem Verlust an PDMS einher. Damit wird eine weitere für das Silikongel charakteristische und für seinen Einsatz als Isolationswerkstoff an Grenzflächen bedeutsame Eigenschaft in ihrer Qualität stark herabgesetzt. Der „kritische“ Überdruck, bei dessen Überschreitung die Aussonderung unvernetzter Bestandteile beginnt, beträgt für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Silikongel 120 hPa ($1,8 \text{ psi}$) [1]. Demnach würde ein Silikongel-isoliertes Bauelement, bei dem das Silikongel unter einem um $p > 120 \text{ hPa}$ gegenüber dem Umgebungsdruck erhöhten Innendruck steht, eine geschlossene und druckstabile Ummantelung erfordern, um einen Verlust an unvernetzten Bestandteilen zu vermeiden. Da in der Praxis die konstruktive Auslegung langzeitstabiler druckfester Ummantelungen (30 Jahre) für höhere Drücke nur mit einem hohen konstruktiven und wirtschaftlichen Aufwand beherrschbar ist, fand im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen in der Regel eine Beschränkung auf die Verwendung von Drücken unterhalb des kritischen Überdruckes von 120 hPa statt, so dass hier, basierend auf den vorangestellten Werkstoffeigenschaften, gänzlich auf eine druckstabile Ummantelung verzichtet werden konnte.

Versuchstechnik

Zur Bestimmung von Abhängigkeiten zwischen einer Druckeinwirkung und der elektrischen Festigkeit von Silikongel wurden zunächst Untersuchungen unter Verwendung einer in Silikongel eingebetteten und unter mechanischer Druckeinwirkung stehenden Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung durchgeführt. Das Prüfkörpergehäuse wurde nach der Vulkanisation mit Bohrungen (*Durchmesser 3 mm*) versehen (*siehe Abb. 4.30b*), um einen direkten Kontakt des Silikongels zu dem umgebenden Medium (z.B. Wasser) zu ermöglichen. *Abb. 4.29* zeigt die entwickelte Prüfvorrichtung samt Prüfling. Der Druck wird über die Masse m generiert und über einen Stempel direkt in das Prüfvolumen eingeprägt. Gegenüber anderen Prinzipien der Druckeinprägung besitzt dieses auf der Wirkung der Schwerkraft beruhende Prinzip den entscheidenden Vorteil, dass ein potentieller Austritt von Isolierstoff aus dem Prüfkörperinneren keinen Einfluss auf den im Prüfvolumen zwischen den Elektroden herrschenden Innendruck besitzt. Ein Verlust an Isolierstoff könnte durch ein kontinuierlich fortschreitendes Austreten von Silikongel an den Grenzflächen zwischen Stempel und den Prüfkörperwandungen sowie durch die Bohrungen in den Wandungen eintreten.



Legende:

- (1) Masse m (Kiesbehältnis)
- (2) Stempel zur Kraftübertragung
- (3) Führung
- (4) Passung
- (5) Passgenauer Stempel zur Druckeinprägung
- (6) Isolierstoff unter mechanischer Druckeinwirkung (erhöhter Innendruck)
- (7) Elektrische Anschlüsse zu den Prüfelektroden
- (8) SF₆-Umgebung
- (9) SF₆-Zuleitung

Abb. 4.29: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Durchschlagspannung von unter mechanischer Druckeinwirkung stehenden Silikongel-Isolierungen

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Weiterhin mussten beim Entwurf des gesamten Prüfaufbaus die besonderen Anforderungen, die mit einer Hochspannungsprüfung verbunden sind, berücksichtigt werden. Dies umfasst die Bereitstellung einer Isoliergasatmosphäre (SF_6) zur Vermeidung äußerer Überschläge sowie ein Verzicht auf eine elektronische Druckmessensorik im Hochspannungsprüfkreis. Sonst bestünde die Gefahr, dass diese durch induzierte elektromagnetische Felder, die beim Durchschlag des Prüflings entstehen, zerstört würde. Aufgrund dieses Umstandes konnte die Bestimmung des durch die Masse m in das Prüfvolumen eingepprägten Innendruckes nur indirekt erfolgen. Unter Berücksichtigung der Prüfkörpergeometrie und der Vernachlässigung der adhäsiven Reibungskräfte ergibt sich der funktionale Zusammenhang zwischen der Masse m und dem erzielten Druck p_R zu:

$$p_R = \frac{m \cdot g}{A} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

mit

A : Fläche des Stempels

m : Masse

g : Erdbeschleunigung

Da die Materialeigenschaften, insbesondere die Adhäsionseigenschaften des Silikongels, potentielle Einflüsse (z.B. "Verklebungen" zwischen Stempel und Gehäusewandung) auf die sich im Prüfvolumen einstellende Druckverteilung haben könnten, erfolgte

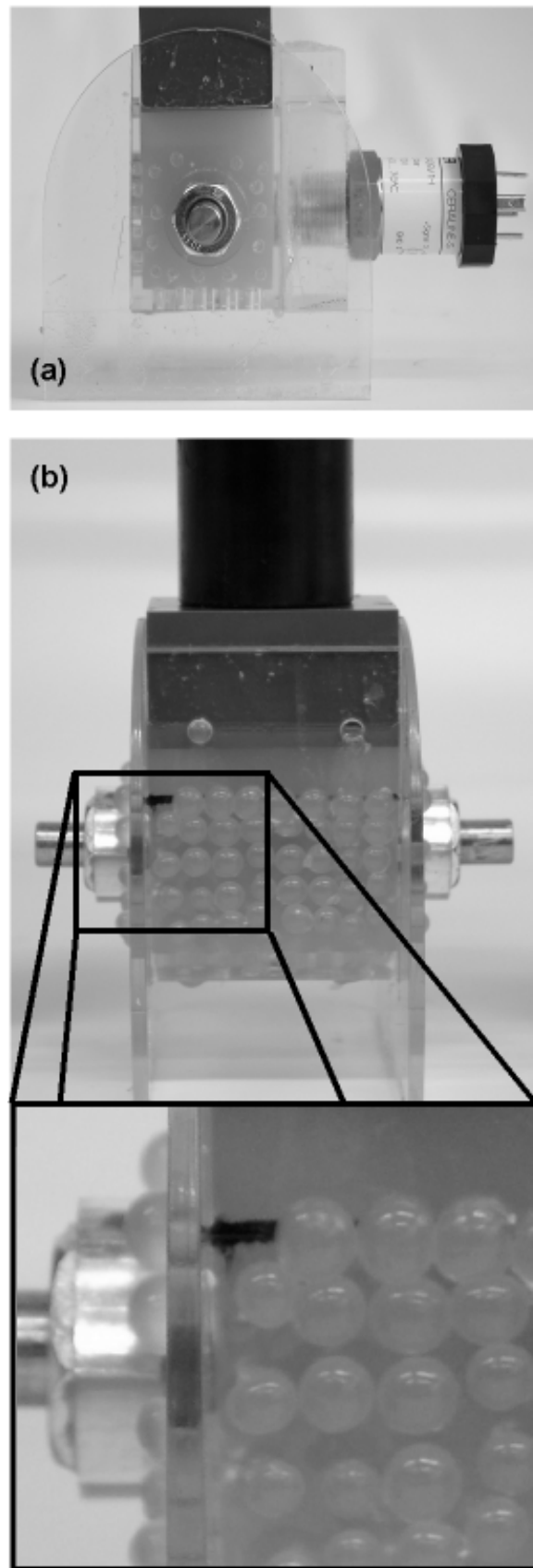


Abb. 4.30: (a) Prüfling mit Drucksensor; (b) Austritt von Silikongel aus den Bohrungen der Prüfkörperwandungen unter mechanischer Druckeinwirkung

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

eine messtechnische Überprüfung der Anwendbarkeit von Gl. 4.2 zur Einstellung des Innendruckes durch eine Druckmessung, die an einem baugleichen mit Drucksensor ausgestatteten Prüfkörper durchgeführt wurde. Zur Erfassung des im Prüfkörper herrschenden Innendruckes wurde ein Drucksensor seitlich an der Wandung in Höhe der Elektroden platziert (Abb. 4.30a). Die dabei festgestellte Abweichung $|\Delta p|$ zwischen den gemessenen Druckwerten p_M und dem sich aus der Berechnung ergebenden Werten p_R beträgt im gesamten untersuchten Druckbereich von 0 hPa bis 200 hPa weniger als 5 %. Damit ist die Gültigkeit von Gl. 4.2 zur Beschreibung der Abhängigkeit des Innendruckes von der Masse m nachgewiesen. Weiterhin lässt das gleichmäßige Austreten von Silikongel aus den Bohrungen der Prüfkörperwandungen durch Krafteinprägung auf eine homogene Druckverteilung im gesamten Prüfkörper schließen (Abb. 4.30b). Darüber hinaus erfüllt dieser Aufbau die Anforderung, den gewünschten Druck über lange Zeiträume hinweg aufrechtzuerhalten. Nach Aufbringen der Masse m stellt sich nach wenigen Minuten ein konstanter, langzeitstabiler Druck ein. Damit steht ein Versuchsaufbau zur Verfügung, der eine definierte und langzeitstabile Einstellung des Innendruckes in Verbindung mit einer Hochspannungsprüfung ermöglicht.

Raumtemperatur und Normalbedingungen

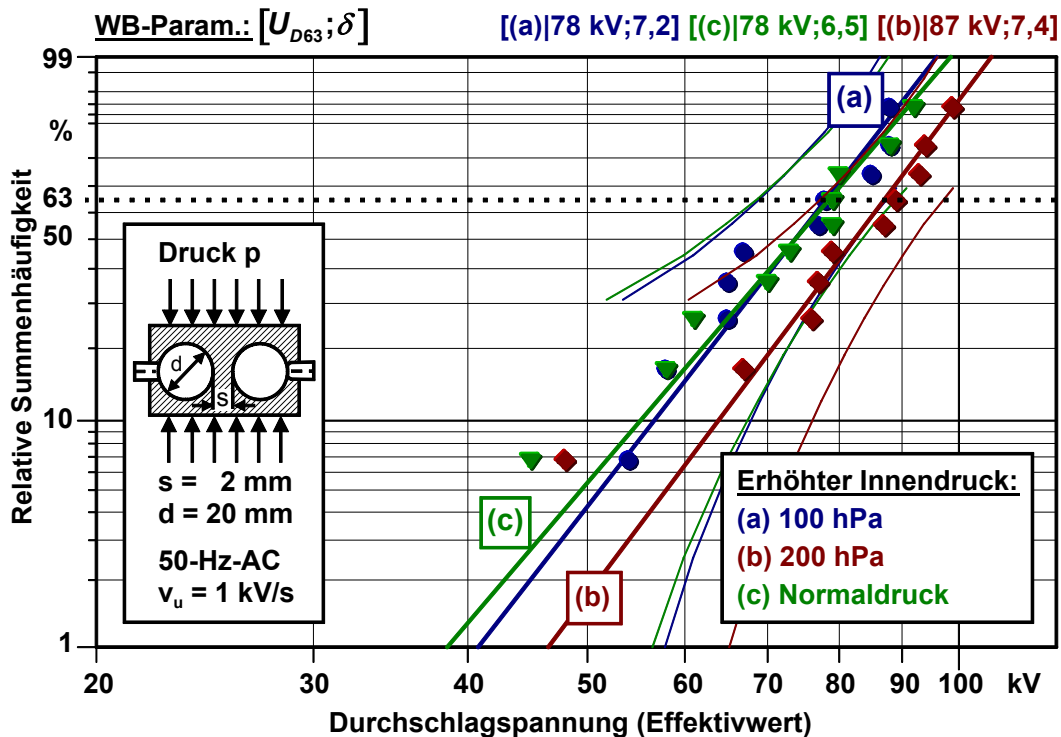


Abb. 4.31: Verteilungsfunktionen der Durchschlagsspannung der Silikongel-Modellisolierung in Abhängigkeit des Innendruckes

Abb. 4.31 zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung in Abhängigkeit des Innendruckes. Der Vergleich zwischen der bei Normaldruck und der bei 100 hPa erhöhtem Innendruck ermittelten Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung lässt statistisch keinen Unterschied erkennen. Dieses Ergebnis zeigt, dass sowohl die materialeigene elektrische Festigkeit des Silikongels als auch die Qualität der Grenzschicht zwischen Silikongel und Elektrode durch den um 100 hPa erhöhten Innendruck nicht beeinflusst wird und dokumentiert damit die hohe Güte der Silikongel-Modellisolierung unter Normaldruck. Im Fall eines um 200 hPa erhöhten Innendruckes, der aber aus den bereits dargelegten Gründen für ungekapselte Silikongel-Isolierungen keine praktische Relevanz besitzt, ist eine 11-prozentige Steigerung der 63-%-Durchschlagspannung bei nahezu unveränderter Messwertstreuung feststellbar.

Feuchtigkeit in Kombination mit mechanischer Druckeinwirkung

Die folgende Untersuchung ging der Fragestellung nach, inwieweit der elektrische Festigkeitsverlust einer Silikongel-Modellisolierung, die spannungslos in direktem Kontakt zu demineralisiertem Wasser steht, durch den Einsatz von mechanischer Druckeinwirkung vermindert werden kann. Möglicherweise führt ein erhöhter Innendruck des Isolierstoffes, der im Kontakt zu demineralisiertem Wasser steht, zu einer verringerten Feuchtigkeitsaufnahme, was sich erwartungsgemäß in einer erhöhten elektrischen Festigkeit widerspiegeln müsste. Weiterhin zeigten Beobachtungen, dass die Haftung des Silikongels auf der Elektrodenoberfläche unter Einwirkung von Feuchtigkeit geringfügig vermindert ist. Eine Druckeinwirkung könnte auch hier zu einer Verbesserung der Grenzflächeneigenschaften und damit verbunden zu einer erhöhten elektrischen Festigkeit der Isolierung führen.

Um prinzipielle Abhängigkeiten zwischen Innendruck, Feuchtigkeit sowie der elektrischen Festigkeit zu erkennen, wurden unter 100 hPa erhöhten Innendruck stehende Modellisolierungen einer 1000-stündigen Wasserlagerung ausgesetzt (Abb. 4.32) und anschließend auf ihre Durchschlagspannung hin untersucht (Versuchsreihe (a)). Weiterhin erfolgte die Bestimmung der Durchschlagspannung von Prüflingen unter Druckeinwirkung, die zu-

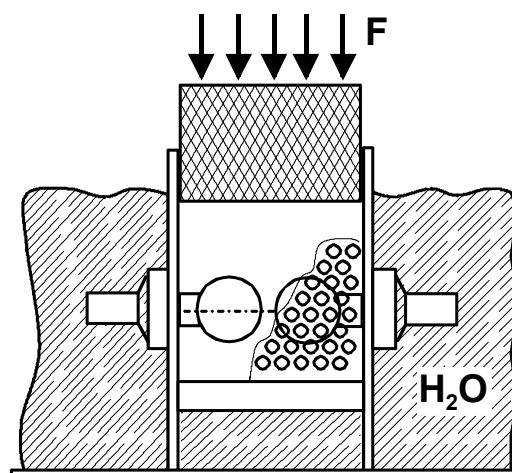


Abb. 4.32: Modellisolierung unter mechanischer Druckeinwirkung in direktem Kontakt zu demineralisiertem Wasser

vor einer drucklosen Wasserlagerung ausgesetzt wurden (*Versuchsreihe (b)*). Die zugehörigen Konditionierungs- und Prüfbedingungen sowie die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung sind in *Abb. 4.33* und *Abb. 4.34* dargestellt. Ergänzend dazu sind die Ergebnisse der unter Normalbedingungen (*Versuchsreihe (e)*), unter Einwirkung eines Überdruckes von 100 hPa (*Versuchsreihe (d)*) sowie nach einer drucklosen Wasserlagerung (*Versuchsreihe (c)*) ermittelten Durchschlagspannung dargestellt, die als Referenz herangezogen werden.

Die in *Abb. 4.34* dargestellten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung, die für Silikongel, das in Kontakt zu demineralisiertem Wasser stand (*Versuchsreihe (a)*, *(b)*, *(c)*), ermittelt wurden, sind statistisch nicht voneinander zu unterscheiden. Unabhängig vom Einsatz der mechanischen Druckeinwirkung sind die 63-%-Durchschlagspannungen um mehr als 50 % gegenüber der von Silikongel bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (*Versuchsreihe (e)*) reduziert.

Diese Untersuchung belegt, dass ein erhöhter Innendruck der Isolierung dem durch die Einwirkung von Feuchtigkeit hervorgerufenen Verlust an elektrischer Festigkeit nicht entgegenwirken kann. Daher ist davon auszugehen, dass eine Verringerung der Feuchtigkeitsaufnahme aufgrund der Druckeinwirkung nicht stattfindet. Ein weiteres Indiz für eine unverminderte Feuchtigkeitsaufnahme ist in der verminderten Adhäsionsfähigkeit des in Wasser gelagerten Silikongels zu sehen. Materialproben, die nach der Wasserlagerung aus dem Inneren der Isolierung entnommen wurden, unterscheiden sich in ihren Adhäsionseigenschaften von denen eines unter Normalbedingungen konditionierten Silikongels. Diese verminderte Adhäsionsfähigkeit des Silikongels könnte zu einer potentiellen Beeinflussung der Haftung zwischen Silikongel und Elektrode führen. Ein erhöhter Innendruck während der Prüfung, der darauf abzielte, die potentiell herabgesetzte elektrische Festigkeit dieser Grenzfläche zu steigern (*Versuchsreihe (b)*), führte jedoch auch hier zu keiner Steigerung der Durchschlagspannung.

Damit ist gezeigt, dass die elektrische Festigkeit von Silikongel-Modellisolierungen, die unter der Einwirkung von Feuchtigkeit stehen, unabhängig vom herrschenden Innendruck (100 hPa Überdruck) der Isolierung ist. Dennoch ist dem Einsatz von Druckeinprägungen auf Isolierbauteile mit konstruktiv bedingten Längsgrenzflächen eine hohe Bedeutung beizumessen. Diese Problematik wird ausführlich in *Kapitel 4.4* behandelt.

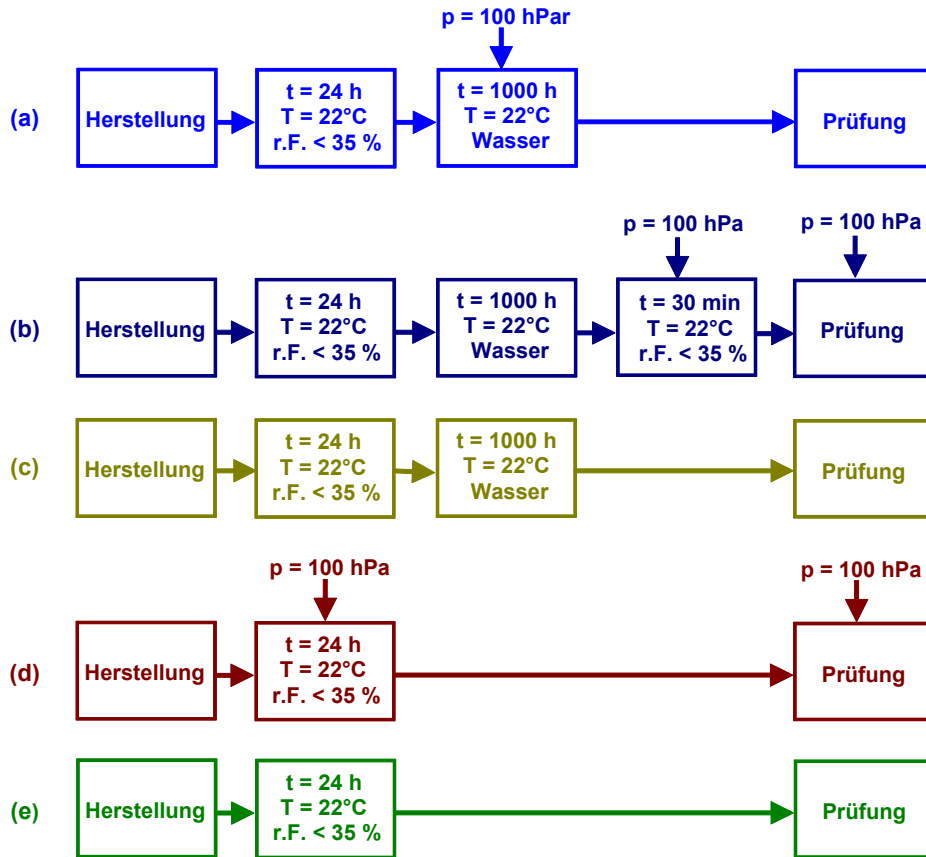


Abb. 4.33: Konditionierungs- und Prüfbedingungen

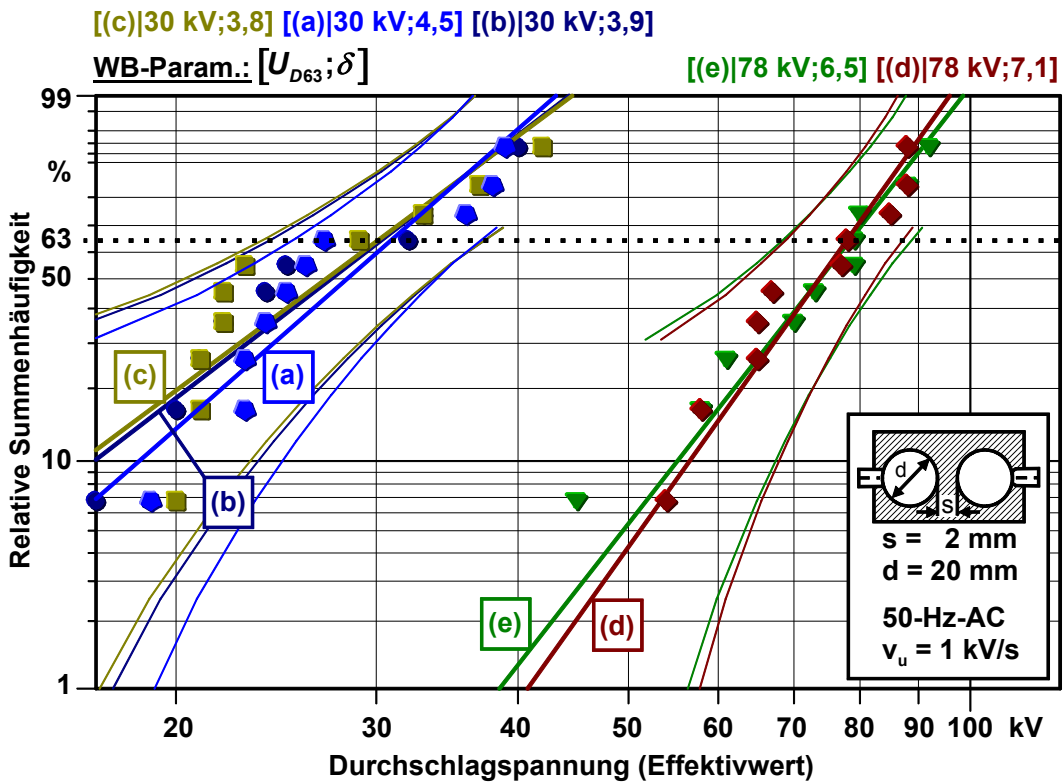


Abb. 4.34: Die Wirkung von Feuchtigkeit und erhöhtem Innendruck auf die Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikongel-Modellisolierungen

4.2.1.7 Ausgedehnte Isolierungen

Beim elektrischen Durchschlag einer Isolierung handelt es sich um einen statistischen Prozess. Betrachtet man eine diskrete Entladungsstelle der Isolierung, so wächst die Entladung statistischen Gesetzen folgend in Richtung des elektrischen Feldes und führt beim Erreichen der Elektroden zum elektrischen Durchschlag. Dieser Zufallsprozess wird in der Statistik mathematisch durch die Verteilungsfunktion einer geeigneten Zufallsgröße (z.B. Durchschlagfeldstärke, Durchschlagspannung) beschrieben. Bei Feststoffisolierungen sind in der Regel eine Vielzahl an Fehlstellen vorhanden, die als potentielle Entladungsstellen zu betrachten sind. Welche dieser Entladungsstellen Initiator für eine zum Durchschlag führende Entladung ist, ist dabei zufällig. Betrachtet man das Durchschlagverhalten von Isolierungen des gleichen Isolierstoffes, so ist in der Regel eine Verminderung der Durchschlagfestigkeit mit zunehmender Elektrodenoberfläche (Flächeneffekt), zunehmendem Isolationsvolumen (Volumeneffekt), zunehmender Anzahl gleicher Objekte (Effekt der großen Zahlen) und zunehmender Beanspruchungszeit (Zeiteffekt, Lebensdauergesetz) feststellbar. Die theoretischen Grundlagen zur Vergrößerungsproblematik (Vergrößerungsgesetz, Wachstumsgesetz) sind ausführlich in der Fachliteratur, wie z.B. in [9;37;40;51], beschrieben.

Da für die bisher durchgeführten Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Silikongel bei quasihomogener Feldbelastung ausschließlich eine Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung mit einem Kugeldurchmesser von 20 mm und einem Kugelabstand von 2 mm eingesetzt wurde, bei der aufgrund der geringen geometrischen Ausdehnung nur ein vergleichsweise kleiner Bereich des Isolierstoffes einer elektrischen Beanspruchung ausgesetzt ist, stellt sich die Frage, inwieweit eine Ausdehnung des beanspruchten Isolierstoffbereiches einen Einfluss auf dessen Durchschlagfestigkeit besitzt. Die hierbei behandelte Vergrößerungsproblematik bezieht sich ausschließlich auf die Variation der geometrischen Abmessungen von Elektrodenanordnungen mit homogenen und quasihomogenen Feldverteilungen. Die dabei potentiell auftretenden Vergrößerungseffekte lassen sich im Wesentlichen auf drei unterschiedliche Ursachen zurückführen:

- **Statistischer Vergrößerungseffekt:** Mit einer Vergrößerung der Isolierung ist ein statistischer Anstieg der Anzahl an Fehlstellen und damit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass eine dieser Fehlstellen den Durchschlag initiiert, verbunden. Dabei kann zwischen dem Flächeneffekt, der speziell die Wirkung von Fehlstellen im Bereich der direkt an die Elektroden grenzenden Isolierstoffschicht beschreibt und dem Volumeneffekt, der die Wirkung der Fehlstellen im Isolierstoff kennzeichnet, differenziert werden. Beispielsweise stellen Strukturfehler auf der Elekt-

rodenoberfläche sowie eine mangelnde Anhaftung zwischen Isolierstoff und Elektrodenoberfläche Fehlstellen dar, deren Vorhandensein durch den Flächeneffekt zum Ausdruck kommt. Strukturelle Inhomogenitäten im Werkstoffaufbau, Gaseinschlüsse sowie Verunreinigungen sind Fehlstellen, deren festigkeitsmindernde Wirkung vom Isolierstoffvolumen abhängt und daher dem Volumeneffekt zuzuordnen sind.

- **Technologischer Vergrößerungseffekt:** Technologische Gegebenheiten können die Dichte und Größe der Fehlstellen einer vergrößerten Isolierung beeinflussen, was in der Regel die Durchschlagwahrscheinlichkeit erhöht und damit die Durchschlagfestigkeit mindert. Derartige Effekte sind jedoch im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen nicht zu erwarten, da die Fertigung aller untersuchten Modellisolierungen nach dem gleichen Fertigungsverfahren und unter identischen Bedingungen erfolgte. Darüber hinaus lassen die mechanischen Eigenschaften - insbesondere die hohe Elastizität - des Isolierstoffes das Entstehen von mechanischen Spannungen, die beispielsweise bei ausgedehnteren Isolierungen zu Rissbildungen führen können, unwahrscheinlich erscheinen.

- **Physikalischer Vergrößerungseffekt (Dickeeffekt):** Unter gewissen Umständen sind physikalische Effekte bei der Vergrößerung von Isolierungen zu beachten. Es ist bekannt, dass der Durchschlag in bestimmten Isolierstoffen die Folge feldverstärkender Raumladungen ist. Voraussetzung hierfür ist die Fähigkeit hochpolymerer extrem schwach leitfähiger Kunststoffe, Elektronen über lange Zeit in ihrem Volumen zu speichern. Bei Wechselspannungsbeanspruchung werden in jeder negativen Spannungshalbwelle Elektronen aus der Kathode emittiert und in Haftstellen eingefangen. In der positiven Halbwelle wird ein Teil dieser Elektronen aktiviert und driftet zur Elektrode zurück. Der Rest verbleibt im Dielektrikum. Unter dieser Annahme kommt es zur Ausbildung von ortsfesten negativen Raumladungen vor den Elektroden. Das Vorhandensein dieser Raumladungen wirkt sich bei Wechselspannung stets feldverstärkend aus, da in einer der beiden Spannungshalbwellen eine entgegengesetzte Polarität zwischen der Raumladung und der benachbarten Elektrode vorliegt. Hierdurch wird in Elektrodennähe ein örtlich hoher Potentialgradient und somit eine Überlastung des Grenzschichtbereichs verursacht, wodurch der Durchschlag eingeleitet werden kann. Auch mit diesen Raumladungsprozessen ist ein Volumeneffekt verbunden, bei dem das beanspruchte Isolierstoffvolumen mit zunehmender Isolierstoffdicke zunimmt und sich in ähnlicher Weise auf die Festigkeit einer Isolierung auswirkt wie der statistische Vergrößerungseffekt. Allerdings tritt dieser Effekt nur bei der Änderung der Isolierstoffdicke auf und nicht wie im Falle des statistischen Volumeneffektes auch bei der Va-

riation der Elektrodenfläche [13]. Darüber hinaus bewirkt der physikalische Vergrößerungseffekt vor allem in Bereichen sehr kleiner Isolierstoffdicken eine starke Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke von der Dicke der Isolierung. Der Gradient dieser Dickenabhängigkeit nimmt mit zunehmender Isolierstoffdicke ab [9].

Um festzustellen, inwieweit Silikongel dem im Vergrößerungsgesetz der Hochspannungstechnik abgelegten Verhalten, nach dem eine Reduktion der elektrischen Festigkeit mit zunehmender Ausdehnung der Isolierung einhergeht, genügt, wurde die elektrische Festigkeit ausgewählter Silikongel-Modellisolierungen untersucht. Die Kenntnis von Abhängigkeiten zwischen der Durchschlagfestigkeit und den geometrischen Ausdehnungen einer Isolierung ist zwingend notwendig für die Auslegung technischer Isolierungen, die in der Regel wesentlich ausgedehnter sind als die hier im Labormaßstab gefertigten und auf ihre elektrische Festigkeit hin untersuchten Modellisolierungen. Die Herstellung und Konditionierung der für die Untersuchungen eingesetzten Prüflinge erfolgte nach dem in *Kapitel 4.1.6* beschriebenen Standardverfahren, die elektrische Prüfung mit netzfrequenter Wechselspannung im Spannungssteigerungsversuch mit einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von 1 kV/s .

Variation der Schlagweite der Kugel-Kugel-Anordnung

Für eine erste Abschätzung, inwieweit der Elektrodenabstand und damit verbunden die Größe des elektrisch belasteten Isolierstoffvolumens einen Einfluss auf die Durchschlagfeldstärke von Silikongel besitzt, wurden Untersuchungen mit Kugel-Kugel-Elektrodenanordnungen (*siehe 3.1, Abb. 3.1*) durchgeführt, deren Kugelabstand s bei konstantem Kugeldurchmesser von 20 mm im Bereich von 1 mm bis 5 mm variiert wurde. *Abb. 4.35* zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes. Ergänzend dazu sind in *Abb. 4.36* die entsprechenden Verteilungsfunktionen der Durchschlagfeldstärke dargestellt, die unter Berücksichtigung des Ausnutzungsfaktors $\eta(s)$ gemäß *Gl. 3.4* aus den Durchschlagspannungen errechnet wurden.

Abb. 4.37 zeigt diesen Sachverhalt in einer Darstellung, bei der die 63%-Durchschlagfeldstärken mit den zugehörigen 95%-Konfidenzbereichen über dem Elektrodenabstand aufgetragen sind. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass mit zunehmender Vergrößerung der Schlagweite s eine nichtlineare Abnahme der Durchschlagfeldstärke, wie sie tendenziell auch bei Silikongummi [60] feststellbar ist, stattfindet. Beträgt die Abnahme der 63%-Durchschlagfeldstärke bei der Vergrößerung der Schlagweite von 1 mm auf 2 mm noch mehr als 26 %, so beträgt sie bei der Erhöhung von 4 mm auf 5 mm nur noch 15 %. Ein systematischer Einfluss der Schlagweite auf die Streuung der Messwerte ist nicht feststellbar.

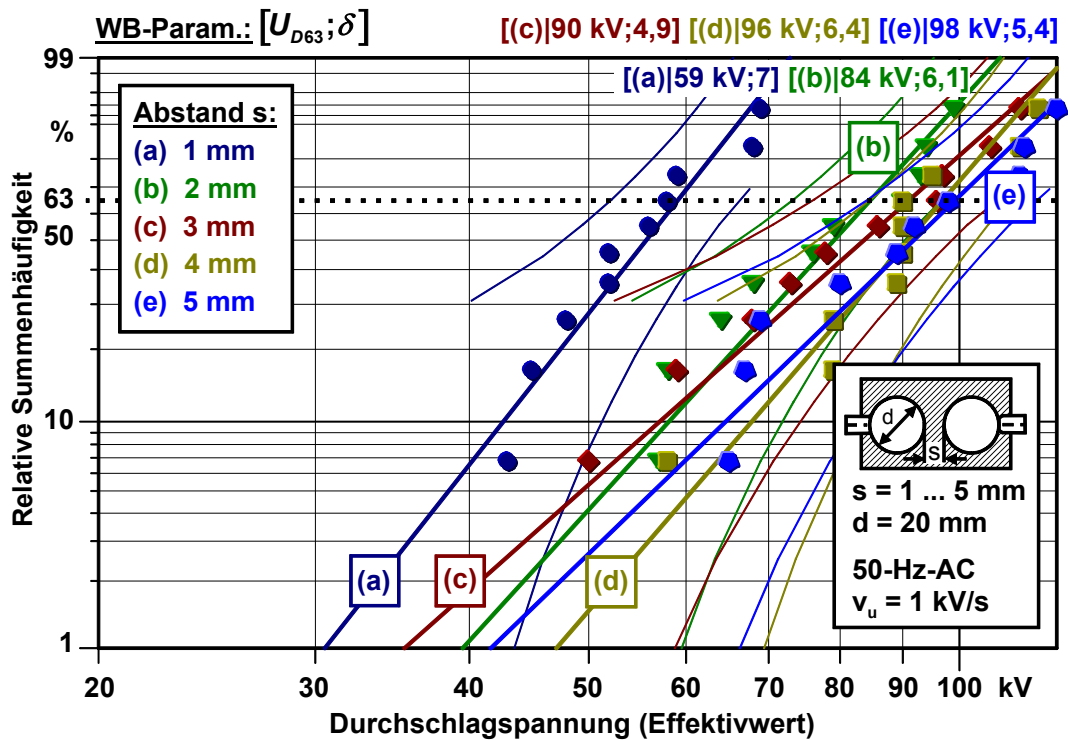


Abb. 4.35: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes bei Verwendung einer Kugel-Kugel-Anordnung

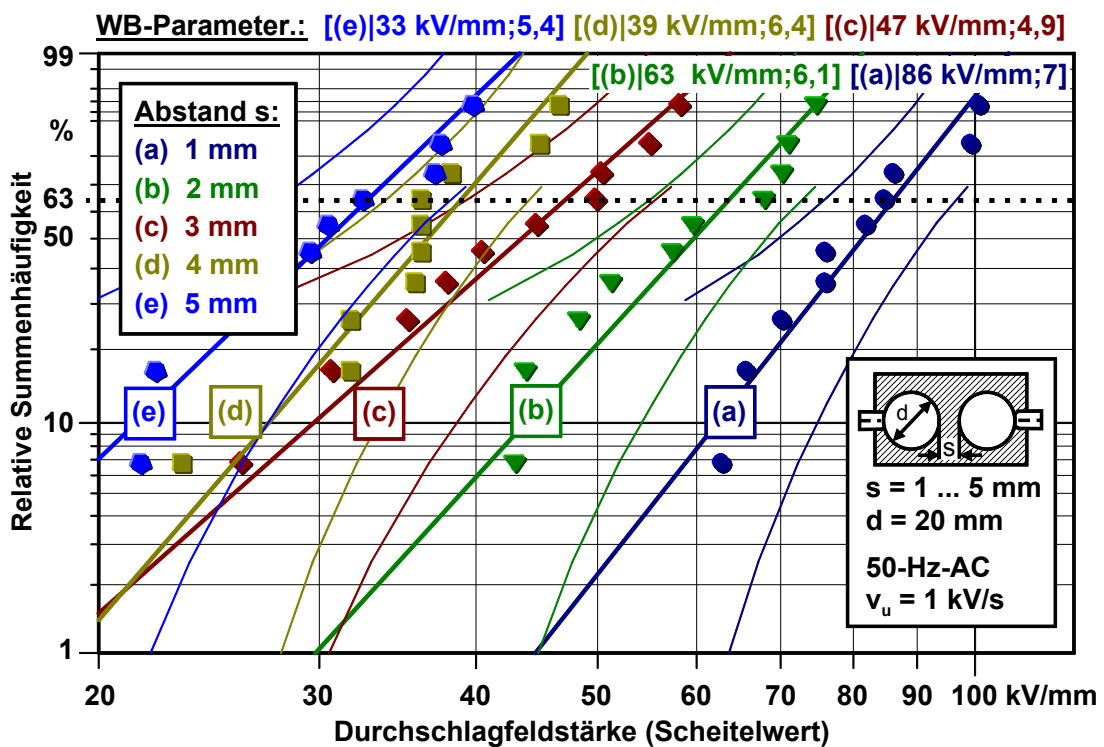


Abb. 4.36: Verteilungsfunktionen der Durchschlagfeldstärke in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes bei Verwendung einer Kugel-Kugel-Anordnung

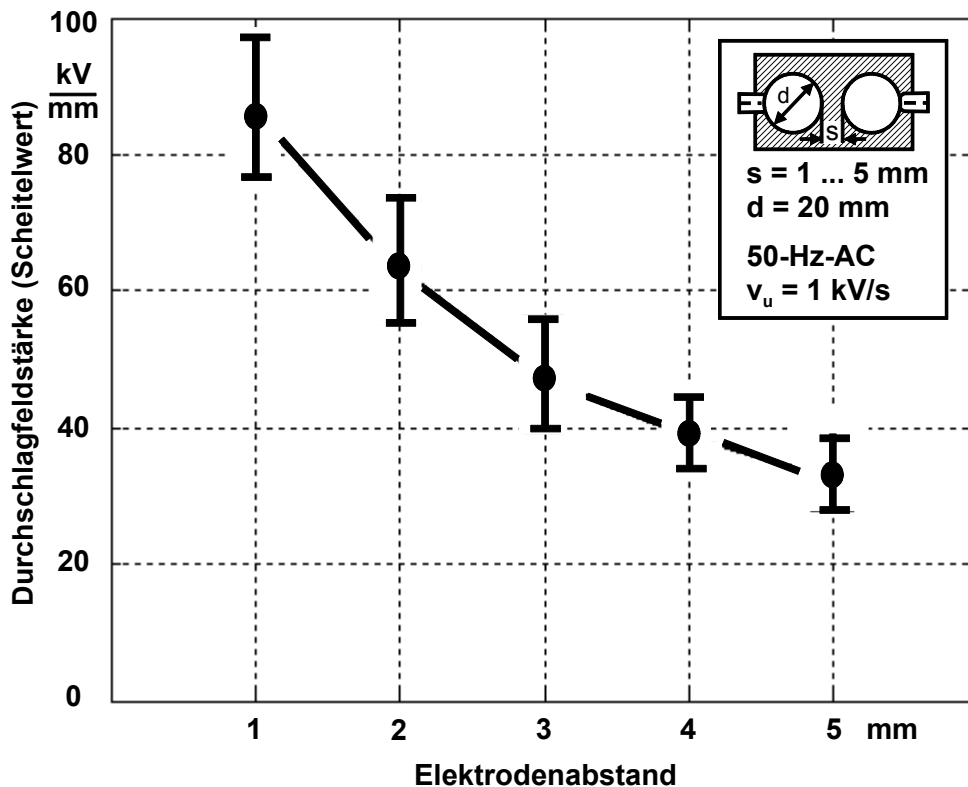


Abb. 4.37: 63%-Quantile der Durchschlagfeldstärke mit zugehörigen 95%-Konfidenzbereichen in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes

Da sich die effektiv wirksame Elektrodenoberfläche bei Variation der Schlagweite im Vergleich zum belasteten Isolierstoffvolumen nur vergleichsweise geringfügig ändert, kann die hier stattfindende Verminderung der Durchschlagfestigkeit bei Vergrößerung der Schlagweite im Wesentlichen nur auf der Wirkung des statistischen Volumen- oder des Dickeneffektes beruhen. Zieht man außerdem das Phänomen in Betracht, dass die elektrischen Entladungen im Silikongel häufig weit außerhalb des elektrisch hoch belasteten Isolierstoffvolumens stattfinden (*siehe* 4.2.1.1, *Abb. 4.12*), was auf einen durch Fehlstellen initiierten Durchschlag hindeutet, so kann der statistische Volumeneffekt als der das Durchschlagverhalten bestimmende Effekt angesehen werden. Ferner wird diese Annahme durch Untersuchungen an Silikongummi gestützt, bei dem oberhalb einer Isolierstoffdicke von $0,5\text{ mm}$ kein nachweisbarer Dickeneffekt festgestellt wurde [9].

Ausgedehnte Isolierungen mit quasihomogener/homogener Feldbelastung

Motiviert durch die Ergebnisse der vorangehenden Untersuchung, bei der eine signifikante Abhängigkeit zwischen der Durchschlagfeldstärke und dem Elektrodenabstand festgestellt wurde, erfolgten nun Untersuchungen an wesentlich ausgedehnteren Elektrodensystemen. Es galt festzustellen, ob die Durchschlagfestigkeit

bei weiterer Vergrößerung der Isolierung einem unteren Grenzwert zustrebt. Um die gewünschten Vergrößerungseffekte zu erhalten, kamen neben der Kugel-Kugel- verschiedene Platte-Platte-Elektrodenanordnungen zum Einsatz, deren Randbereiche zur Vermeidung von Feldüberhöhungen mit Rogowski-Profilen [26] versehen wurden. Die Elektrodenkonfigurationen zur Prägung homogener bzw. quasihomogener Feldverteilungen sind in *Abb. 4.38* dargestellt. Nachfolgend wird die angewandte Methode zur Bestimmung der Vergrößerungsfaktoren für die Kugel-Kugel-Anordnung beschrieben, die aufgrund der geringen geometrischen Abmessungen der Anordnungen sorgfältig durchzuführen war. Als wirksame Elektrodenfläche A_{Eff} der Elektrodenanordnung wurde näherungsweise die Fläche der Anordnung angenommen, auf der 90 % der ermittelten Höchstfeldstärke herrscht. Dazu wurden die Äquipotentiallinien, auf denen die geforderte Bedingung $\hat{E} / \hat{E}_{\text{max}} = 0,9$ erfüllt ist, simulatorisch bestimmt und darauf basierend die effektiv wirksame Elektrodenoberfläche berechnet (*Abb. 4.39*).

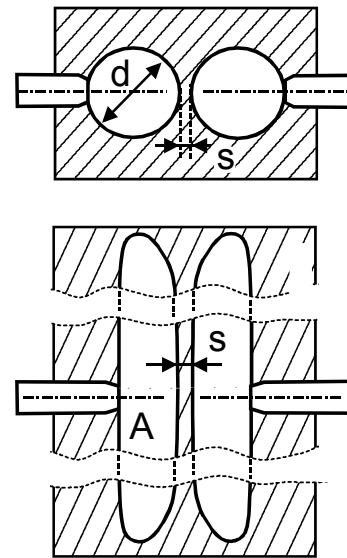


Abb. 4.38: Elektrodenanordnungen zur Prägung quasihomogener und homogener Feldverteilungen

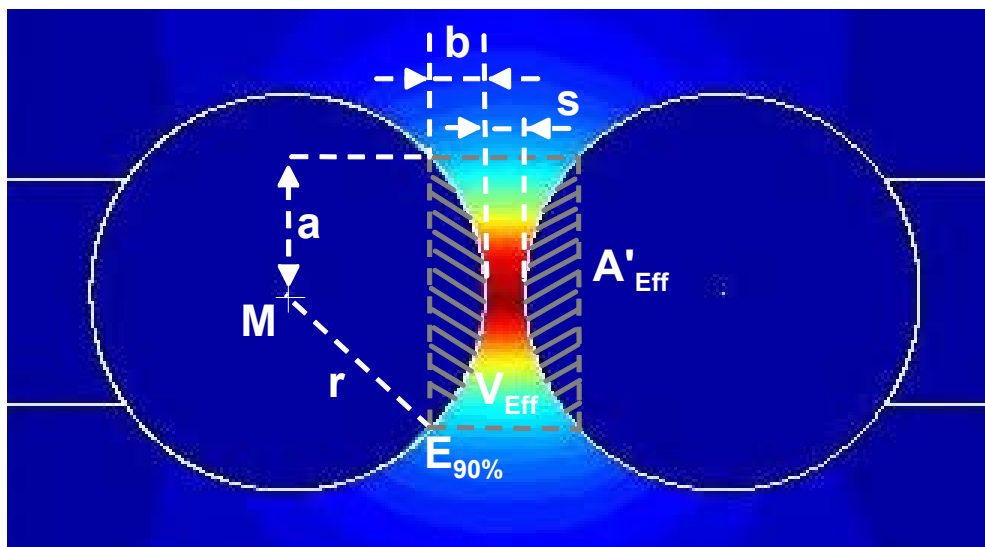


Abb. 4.39: Veranschaulichung zur Berechnung der effektiv wirksamen Kugeloberfläche bzw. des effektiv wirksamen Isolierstoffvolumens

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Ausgehend von den geometrischen Verhältnissen eines Kugelabschnittes [41], dessen Mantelfläche A_{Mantel} sich nach Gl. 4.3 und dessen Volumen V_{KAbsch} sich nach Gl. 4.4

$$A_{Mantel} = \pi (a^2 + r^2) \quad (Gl. 4.3)$$

$$V_{KAbsch} = \frac{1}{3} \pi b^2 (3r - b) \quad \text{mit} \quad a = \sqrt{b(2r - b)} \quad (Gl. 4.4)$$

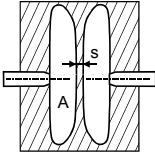
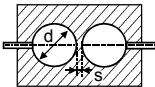
berechnet, ergibt sich die effektiv wirksame Elektrodenoberfläche A_{Eff} , an deren Oberfläche die zu Grunde gelegte Forderung an die minimal herrschende Feldstärke erfüllt ist, zu

$$A_{Eff} = 2 A_{Mantel} \quad (Gl. 4.5)$$

Das zugehörige effektive Prüfvolumen V_P ergibt sich näherungsweise zu

$$V_P = \pi a^2 (s + 2b) - 2 V_{KAbsch} \quad (Gl. 4.6)$$

Tab. 4.1 gibt die geometrischen Größen für ausgewählte Elektrodenkonfigurationen wider.

Anordnung	Bezeichnung	s [mm]	A_w [cm ²]	V_w [cm ³]
	PP2K	2	2,7	1,1
	PP5K	5	2,7	2,7
	PP2G	2	150	15
	PP5G	5	150	38
	KK2	2	0,07	0,046
	KK5	5	0,07	0,101

Tab. 4.1: Geometrische Größen der verwendeten Kugel-Kugel- und Platte-Platte-Elektrodenanordnungen

Die dadurch erzielten Vergrößerungsfaktoren betragen für die effektiv wirksame Elektrodenoberfläche A_w circa 1 / 40 / 2140 sowie für das effektiv wirksame Isolierstoffvolumen V_w circa 1 / 2 / 25 / 60 / 330 / 835 (Bezugsanordnung KK2). Die ermittelten Durchschlagspannungen wurden unter Berücksichtigung des jeweiligen Ausnutzungsfaktors η nach Gl. 3.4 in die entsprechenden Scheitelwerte der Durchschlagfeldstärken umgerechnet und sind in Abb. 4.40 dargestellt.

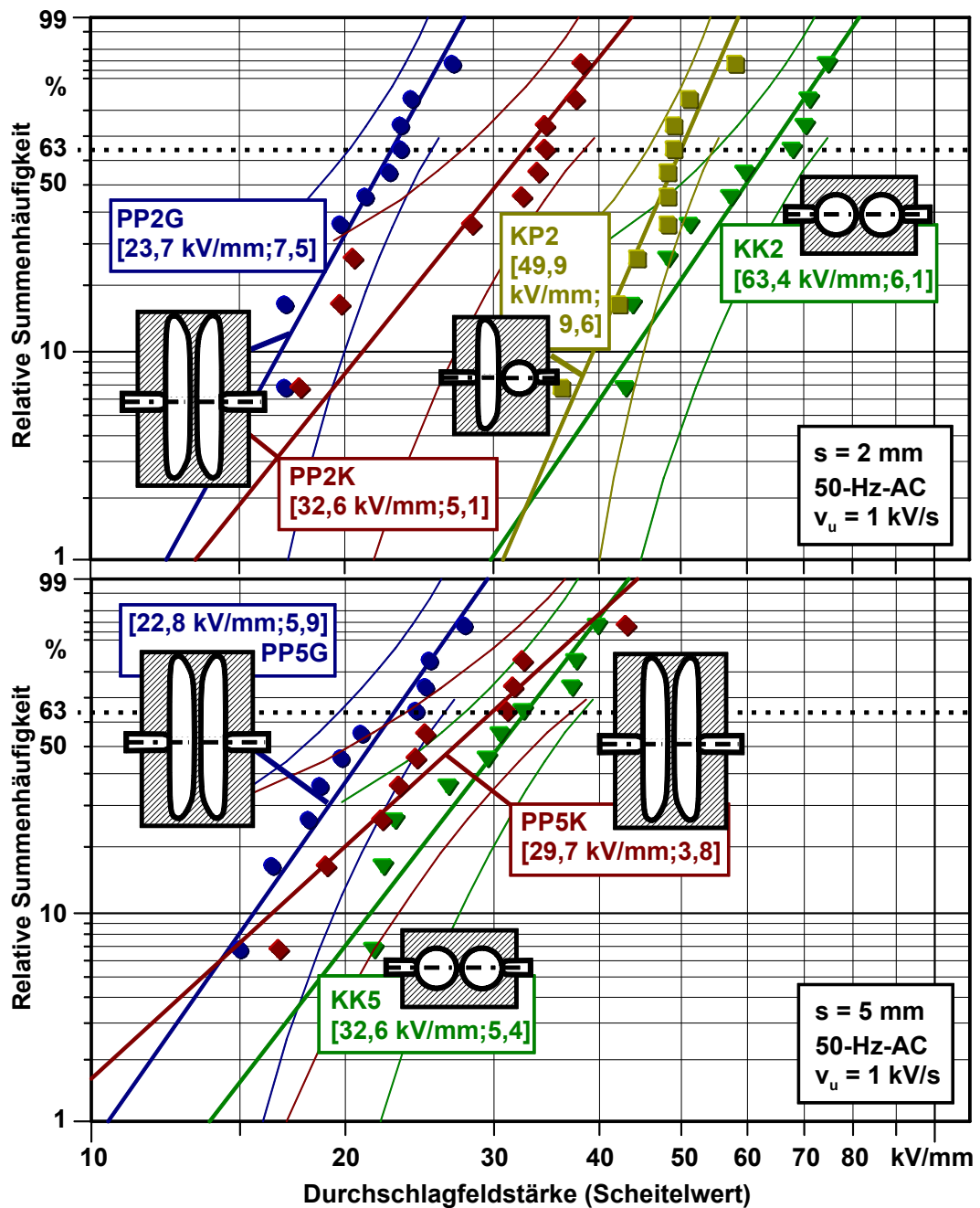


Abb. 4.40: Verteilungsfunktionen der Durchschlagfeldstärke von Silikongel bei Verwendung verschiedener Elektrodenysteme mit homogener und quasihomogener Feldverteilung

Ergänzend zur Darstellung der Verhältnisse im Weibull-Diagramm zeigt *Abb. 4.41* die 63-%-Durchschlagfeldstärke mit dazugehörigem 95%-Konfidenzbereich in Abhängigkeit des wirksamen Isolierstoffvolumens. Betrachtet man zunächst für die einzelnen Elektrodenanordnungen ausschließlich die Abhängigkeit zwischen Durchschlagfeldstärke und Schlagweite, so zeigt sich auch hier, dass mit einer Zunahme der Schlagweite stets eine Abnahme der Durchschlagfeldstärke verbunden ist. Diese Abhängigkeit nimmt jedoch mit Vergrößerung der Anordnung, d.h. mit der Vergrößerung der Elektrodenoberfläche und damit des Isolierstoffvolumens,

signifikant ab. Beträgt die Abnahme der 63-%-Durchschlagspannung für die Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung bei einer Vergrößerung der Schlagweite von 2 mm auf 5 mm circa 50 % (Versuchsreihen KK2, KK5), so beträgt die Abnahme bei Verwendung der Platte-Platte-Anordnung mit einem Plattendurchmesser von 29 mm noch circa 9 % (Versuchsreihe PP2K, PP5K) bzw. bei einem Plattendurchmesser von 98 mm weniger als 4 % (Versuchsreihe PP2G, PP5G).

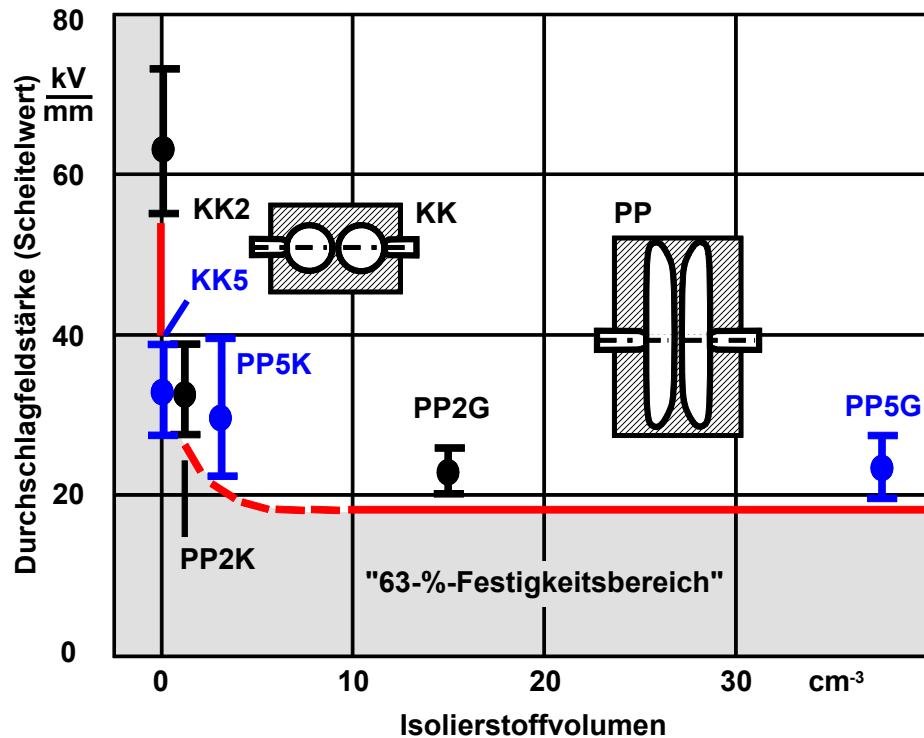


Abb. 4.41: Durchschlagfeldstärke in Abhängigkeit des belasteten Isolierstoffvolumens. Dargestellt sind die 63-%-Quantile der Durchschlagfeldstärke mit zugehörigen 95-%-Konfidenzbereichen

Dieses Verhalten ist ein deutliches Indiz dafür, dass der statistische Vergrößerungseffekt das Verhalten von Silikongel bei homogenen bzw. quasihomogenen Feldbelastungen dominiert. Auch hier wird deutlich, dass der Dickeneffekt (physikalischer Vergrößerungseffekt) keinen feststellbaren Einfluss auf das Durchschlagverhalten besitzt. Denn bei einer Dominanz des Dickeneffektes wäre, im Gegensatz zum statistischen Volumeneffekt, keine signifikante Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit mit Änderung der Elektrodenfläche verbunden.

Führt man die Bewertung der Untersuchungsergebnisse für konstante Schlagweiten, d.h. in Abhängigkeit der Elektrodenoberfläche und somit des belasteten Isolierstoffvolumens durch, so geht erwartungsgemäß auch hier eine Abnahme der Durchschlagfeldstärke mit steigender Elektrodenoberfläche bzw. vergrößertem Isolierstoffvolumen einher. Für die Schlagweite $s = 2 \text{ mm}$ ist ein großer Unter-

schied zwischen der mittels Kugel-Kugel- (*Versuchsreihe KK2*) und den mittels der Platte-Platte-Anordnungen ermittelten 63-%-Durchschlagfeldstärken (*Versuchsreihen PP2K, PP2G*) feststellbar. Bei einer Schlagweite von $s = 5 \text{ mm}$ fällt die Abnahme der 63-%-Durchschlagfeldstärke bei Vergrößerung der Elektrodenoberfläche bzw. des Isolierstoffvolumens wesentlich geringer aus (*Versuchsreihen KK5, PP5K, PP5G*).

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ist zu vermuten, dass sich auch mit weiterer Vergrößerung der Elektrodenanordnung, was sowohl durch die Variation der Elektrodenoberfläche als auch durch Variation der Schlagweite (vgl. *Abb. 4.41, PP2G, PP5G*) erreicht werden kann, die elektrische Festigkeit von Silikongel einem unteren Grenzwert nähert. Setzt man den aus *Abb. 4.41* ersichtlichen Trend fort, so ist davon auszugehen, dass für noch ausgedehntere Isolierungen mit homogener bzw. quasihomogener Feldbelastung die 63-%-Durchschlagfeldstärke bei leichter Zunahme der Messwertstreuung auf einen unteren Grenzwert von ca. 20 kV/mm zustrebt. Dieser Wert kann in Verbindung mit der Messwertstreuung als Orientierungswert für die Auslegung von Silikongel-Isolierungen, die unter Normalbedingungen betrieben werden, herangezogen werden.

Betrachtet man dagegen die 63-%-Durchschlagfeldstärke, die mittels der Kugel-Kugel-Anordnung bei einer Schlagweite von $s = 2 \text{ mm}$ ermittelt wurde (*Versuchsreihe KK2*), so ist ein deutlicher Unterschied zu den Werten, die unter der Verwendung der übrigen Anordnungen ermittelt wurden, festzustellen. Im Bereich derart kleiner Isolierstoffvolumina, scheint Silikongel eine besonders ausgeprägte Abhängigkeit zwischen der Durchschlagfestigkeit und dem beanspruchten Isolierstoffvolumen zu besitzen. Zum Nachweis der Signifikanz dieser Abhängigkeit sowie zur Untermauerung der bisherigen Ergebnisse wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, bei dem eine der Kugeln der Kugel-Kugel-Anordnung ($d_K = 20 \text{ mm}$, $s = 2 \text{ mm}$) gegen eine Platte ersetzt wurde. Aufgrund des gegenüber der Kugel-Kugel-Anordnung geringfügig vergrößerten elektrisch beanspruchten Isolierstoffvolumens müsste es hierdurch zu einer deutlich feststellbaren Abnahme der Durchschlagfeldstärke kommen. Die Verteilungsfunktion der Durchschlagfeldstärke für die Kugel-Platte-Anordnung ist in *Abb. 4.40 (Versuchsreihe KP2)* dargestellt. Dabei wurde gegenüber der Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung (*Versuchsreihe KK2*) eine Abnahme der 63-%-Durchschlagfeldstärke um 21% festgestellt. Gegenüber der nächst größeren Platte-Platte-Anordnung (*Versuchsreihe PP2K*) ist dieser Wert um 38 % erhöht, womit die geäußerte Vermutung bestätigt ist und die signifikante Abhängigkeit zwischen Durchschlagfestigkeit und beanspruchtem Isolierstoffvolumen für sehr kleine Silikongel-Volumina aufgezeigt ist.

Dieses Ergebnis sowie auch der in *Abb. 4.37* dargestellte Zusammenhang zwischen Elektrodenabstand und Durchschlagfeldstärke verdeutlicht außerdem eine Problematik, die sich aus der Prüfung von Silikongelen unter Verwendung des in IEC EN 60243-1 geforderten Versuchsaufbaues für Vergussmassen ergibt, der eine Verwendung einer Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung mit einem Kugeldurchmesser von $12,5\text{ mm bis }13\text{ mm}$ und einem Abstand von $1\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ vorsieht [24]. Aufgrund des sehr kleinen beanspruchten Isolierstoffvolumens ergeben sich Festigkeitswerte, die gegenüber den technisch nutzbaren Werten deutlich erhöht sind. Da keine verbindliche Vorschrift für die Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Silikongelen existiert, sollte die Prüfung besser mit einer vergrößerten Elektrodenanordnung durchgeführt werden, um so Festigkeitswerte zu ermitteln, die das Isoliervermögen von Silikongelen im Hinblick auf den praktischen Einsatz, bei dem in der Regel ein deutlich größerer Bereich des Isolierstoffes einer elektrischen Belastung ausgesetzt ist, besser wiedergeben.

Einfluss von Feuchtigkeit auf ausgedehnte Isolierungen

Die Untersuchung zum Einfluss von Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit von Silikongel zeigte, dass eine Durchfeuchtung des Vulkanisates zu einer um mehr als 50 % reduzierten Durchschlagfestigkeit führt (*Kapitel 4.2.1.5*). Dies unterstreicht, dass bei der Auslegung von Isolierungen dem Einfluss von Feuchtigkeit auf den Isolierstoff Silikongel besondere Beachtung zu schenken ist. Da diese Untersuchungen ausschließlich mit Prüflingen durchgeführt wurden, bei denen ein verhältnismäßig kleines Isolierstoffvolumen (Kugel-Kugel-Anordnung) dem Einfluss von Feuchtigkeit ausgesetzt wurde, erschien es notwendig derartige Untersuchungen auch an stark vergrößerten Isolierungen durchzuführen. Aus dem Zusammenhang zwischen dem unter Einfluss von Feuchtigkeit stehenden Isolierstoffvolumen und dessen Durchschlagfestigkeit lassen sich daher wichtige Hinweise für eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung von Isolierungen ableiten. Zur Vergrößerung des belasteten Isolierstoffvolumens wurden Plattenelektroden mit einem Plattendurchmesser von 98 mm und einer Schlagweite von 2 mm eingesetzt. Die Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit erfolgt direkt nach einer 1000-stündigen spannungslosen Lagerung in demineralisiertem Wasser bei Raumtemperatur nach dem standardisierten Prüfverfahren.

In *Abb. 4.42* ist das Ergebnis der Untersuchung dargestellt. Zusätzlich zu den Verteilungsfunktionen der Durchschlagfeldstärke, die für die ausgedehnteren Isolierungen ermittelt wurden (*Versuchsreihe (a)* und *(b)*), sind die unter identischen Bedingungen für die Kugel-Kugel-Anordnung ermittelten Ergebnisse (*Versuchsreihe (c)* und *(d)*) dargestellt.

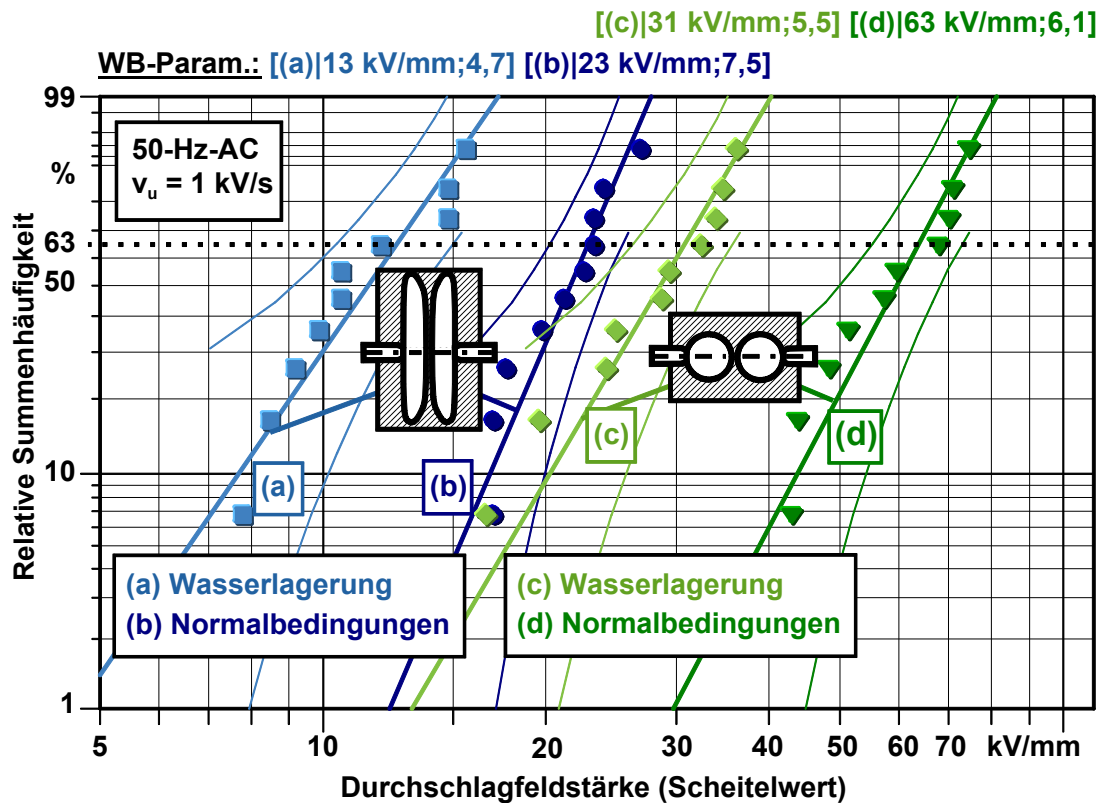


Abb. 4.42: Verteilungsfunktionen der Durchschlagfeldstärke von Silikongel unter Einfluss von Feuchtigkeit in Abhängigkeit des Isolierstoffvolumens

Die bei vergrößertem Isolierstoffvolumen und unter Einwirkung von Feuchtigkeit festgestellte Verminderung der 63%-Durchschlagspannung (*Versuchsreihe (a)*) beträgt, verglichen mit dem unter Normalbedingungen ermittelten Wert (*Versuchsreihe (b)*), 45 %. Das zeigt, dass hier, ebenso wie bei Verwendung der Kugel-Kugel-Anordnung, eine Herabsetzung der 63%-Durchschlagspannung auf etwa die Hälfte ihres ursprünglichen bei Raumtemperatur und Normalbedingungen ermittelten Wertes stattfindet. Aufgrund dieses Ergebnisses ist davon auszugehen, dass die prozentuale Festigkeitsminderung von Silikongel bei Einwirkung von Feuchtigkeit und homogener bzw. quasihomogener elektrischer Belastung nahezu unabhängig von der Größe des belasteten Isolierstoffvolumens ist. Weiterhin ist feststellbar, dass mit dem Einfluss von Feuchtigkeit stets eine Zunahme der Messwertstreuung verbunden ist, was zu einer weiteren Verminderung der statistisch abgesicherten elektrischen Festigkeit führt und damit eine weitere Herabsetzung der Betriebsfeldstärke erfordert.

4.2.1.8 Regenerationsfähigkeit

Gasförmige und flüssige Dielektrika besitzen nach einem elektrischen Durchschlag die Möglichkeit zur selbstständigen Wiederherstellung ihrer Isolationsfähigkeit durch konvektiven Stoffaustausch. Im Gegensatz dazu verfügen feste Iso-

lierstoffe nicht über diese Eigenschaft. Nach einem Durchschlag ist die Isolationsfähigkeit fester Dielektrika irreversibel geschädigt. In der Literatur sowie in den Datenblättern verschiedener Silikongel-Hersteller finden sich Hinweise, dass Silikongel nach erfolgtem Durchschlag fähig ist, in einem gewissen Umfang seine Isolationsfähigkeit wiederzugewinnen [3;34]. Da keine statistisch abgesicherten Erkenntnisse über die Höhe der nach einem Durchschlag wiedergewonnenen elektrischen Festigkeit vorlagen, wurde Silikongel im Rahmen dieser Arbeit auf diese Eigenschaft hin untersucht. Um die nach erfolgtem Durchschlag im Silikongel auftretenden Schädigungen im Werkstoff sichtbar zu machen, wurde transparentes Silikongel (*siehe 2.1*) eingesetzt. Die Herstellung der Prüflinge erfolgte nach den in *Kapitel 4.1.6* beschriebenen Standardverfahren.

Abb. 4.43a zeigt beispielhaft einen gasgefüllten Entladungskanal unmittelbar nach dem Durchschlag. *Abb. 4.43b* zeigt den Zustand nach 24-stündiger spannungsloser Lagerung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen. Es zeigt sich, dass die gasförmigen Spaltprodukte aus dem Entladungskanal vollständig verschwunden sind. Dies ist auf die hohe Gasdurchlässigkeit (*siehe 4.4.1*) sowie die hohe Elastizität des Werkstoffes zurückzuführen. Die Rückstellkräfte der Polymermatrix üben solange einen Druck auf die Gasblase aus bis alle gasförmigen Spaltprodukte in das umliegende Material diffundiert sind, was zu einer Verschließung des Kanals führt. Auch dem hohen Gehalt an unvernetzter Silikonflüssigkeit (Polydimethylsiloxan) im Silikongel ist bei der Verschließung des Kanals eine gewisse Bedeutung beizumessen. Zurück bleibt ein dünner elektrisch nicht leitfähiger Kanal, der eine schwarze Substanz enthält.

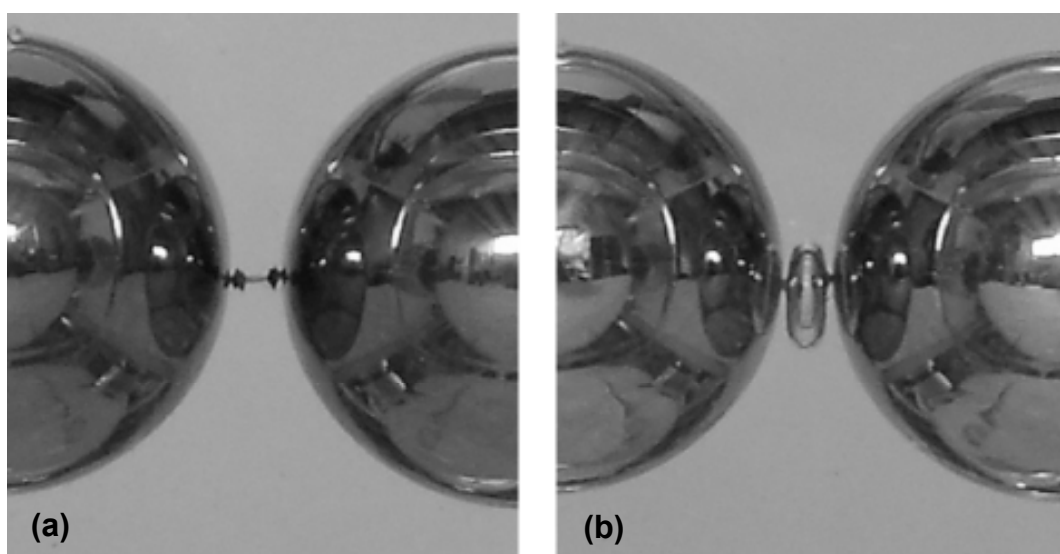


Abb. 4.43: *Entladungskanal unmittelbar nach erfolgter Entladung (a) und Zustand nach 24-stündiger spannungsloser Lagerung unter Normalbedingungen (b)*

Der Grund für die Nichtleitfähigkeit des Kanals resultiert aus dem chemischen Aufbau des Silikongels. Aufgrund der Schwarzfärbung des Kanals ist vom Vorhandensein elementaren Kohlenstoffs auszugehen, der durch die während des Durchschlages in das Material eingetragene Energie freigesetzt wurde. Da Silikongel keinen Kohlenstoff der Hauptkette besitzt, kann dieser nur aus den von der Hauptkette abgespaltenen Methylgruppen stammen (*siehe 2.1*), die ihrerseits durch Aufbruch der *C-H*-Bindungen weiter zersetzt werden. Die Abspaltung und weitere Zersetzung von Methylgruppen konnte an Polyethylen, das sich von Silikon nur in der Hauptkette nicht aber in den Substituenten unterscheidet, nachgewiesen werden [34]. Wie Widerstandsmessungen an Entladungskanälen belegten, ist die Menge an freigesetztem Kohlenstoff jedoch nicht ausreichend um einen leitfähigen Kanal zwischen den Elektroden auszubilden. Weiterhin wird in [34] berichtet, dass es durch freie Radikale an der Stelle abgespaltener Methylgruppen bzw. durch bisher ungenutzte funktionelle Gruppen der Vernetzungsmoleküle zu erneuten Vernetzungsreaktionen kommen kann, was zusätzlich zur Wiederherstellung einer gewissen elektrischen Festigkeit beitragen würde.

Die nach einer 24-stündigen spannungslosen Lagerung der Prüflinge erneut im Spannungssteigerungsversuch ermittelten Durchschlagspannungen erreichten im Mittel weniger als 20 % ihres jeweilig ursprünglichen Wertes (*siehe Abb. 4.44*).

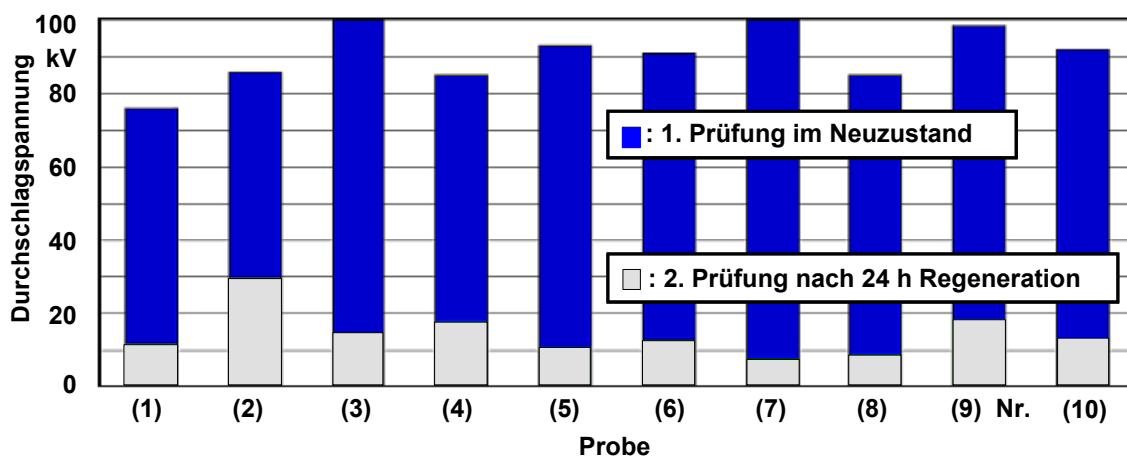


Abb. 4.44: *Ursprüngliche und nach 24-stündiger spannungsloser Lagerung unter Normalbedingungen wiedergewonnene Kurzzeitdurchschlagspannung*

Dieses Untersuchungsergebnis bestätigt, dass Silikongel nach erfolgtem Durchschlag und einer sich daran anschließenden Regenerationsphase ohne elektrische Belastung in einem gewissen Umfang das Isoliervermögen wiedergewinnt. Im Hinblick auf den Einsatz als Isolationsmaterial im Bereich der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik kann hier jedoch nicht von einer elektrischen Regeneration im Sinne einer vollständigen Wiederherstellung der

Isolationsfähigkeit gesprochen werden. Vor allem wenn man bedenkt, dass in elektrischen Energieversorgungsnetzen im Falle eines elektrischen Durchschlages wesentlich höhere Energien freigesetzt werden, die zu einer wesentlich großvolumigeren Schädigung des Isolierstoffes führen. Darüber hinaus stehen unter praktischen Betriebsbedingungen die benötigten Zeiträume für eine derartige Regeneration nicht zur Verfügung.

4.2.1.9 Modifikation der Materialformulierung

Für die bisher durchgeführten Untersuchungen wurde ausschließlich die in *Kapitel 2.1* beschriebene Materialformulierung verwendet. Aufgrund der stofflichen Zusammensetzung der Komponenten *A* und *B* können durch die Variation des Mischungsverhältnis *A* : *B* Vulkanisate mit unterschiedlichen Vernetzungsdichten und darüber verbunden mit Unterschieden in ihren mechanischen Eigenschaften erzeugt werden. Weiterhin ist eine Modifikation der Formulierung durch die Beimischung von Silikonflüssigkeit (Polydimethylsiloxan) möglich, was ebenfalls zu einer veränderten Vernetzungsdichte führt. Eine Variation der Vernetzungsdichte und eine damit verbundene potentielle Beeinflussung des Durchschlagverhaltens ist aus zweierlei Hinsicht interessant. Einmal stehen dadurch Vulkanisate mit stark veränderten mechanischen Eigenschaften zur Verfügung, die das Einsatzspektrum von Silikongel als Konstruktions- und Isolationsmaterial erweitern bzw. individuelle Anpassungen an spezielle Problemstellungen ermöglichen. Zum andern lassen sich durch die Kenntnis potentieller Abhängigkeiten zwischen Vernetzungsdichte und Durchschlagverhalten wichtige Hinweise über die Natur des Durchschlagprozesses gewinnen, was entscheidend zum Materialverständnis beiträgt. Die Herstellung der Prüflinge erfolgte abgesehen vom Mischvorgang nach dem in *Kapitel 4.1.6* beschriebenen Verarbeitungsverfahren.

Variation des Mischungsverhältnisses

Bei dieser Untersuchung erfolgte die Variation der Vernetzungsdichte über das Mischungsverhältnis *A* : *B*, über das das Verhältnis von Vernetzer zu reaktiven Polymerketten festgelegt wird (*siehe 2.1*). Die auf ihre Durchschlagspannung hin untersuchten Vulkanisate wurden durch Mischen der Komponenten im Verhältnis *A* : *B* von 1 : 2, 1 : 1 sowie 2 : 1 hergestellt. Da Komponente *B* den Vernetzer enthält, ergibt sich bei einem höheren Anteil dieser Komponente ein Vulkanisat mit einer höheren Vernet-

Vulkanisat	Härte nach (K. 3.2)
<i>A</i> : <i>B</i> = 1 : 1	$F_{H,PG1:1} = 0,12 \text{ N}$
<i>A</i> : <i>B</i> = 1 : 2	$F_{H,PG1:2} = 0,5 \text{ N}$
<i>A</i> : <i>B</i> = 2 : 1	$F_{H,PG2:1} = 0,07 \text{ N}$

Tab. 4.2: Materialhärte unterschiedlicher Vulkanisate, die durch Variation des Mischungsverhältnis *A* : *B* entstehen

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

zungsdichte und einer damit verbundenen höheren mechanischen Härte. Aufgrund der bestehenden Korrelation zwischen der Vernetzungsdichte und der Härte des Vulkanisates wird wegen der praktischen Relevanz neben der Angabe des verwendeten Mischungsverhältnisses $A : B$ die Härte der Vulkanisate, deren Bestimmung nach der in *Kapitel 3.2* beschriebenen Methode erfolgte, zu deren Charakterisierung herangezogen.

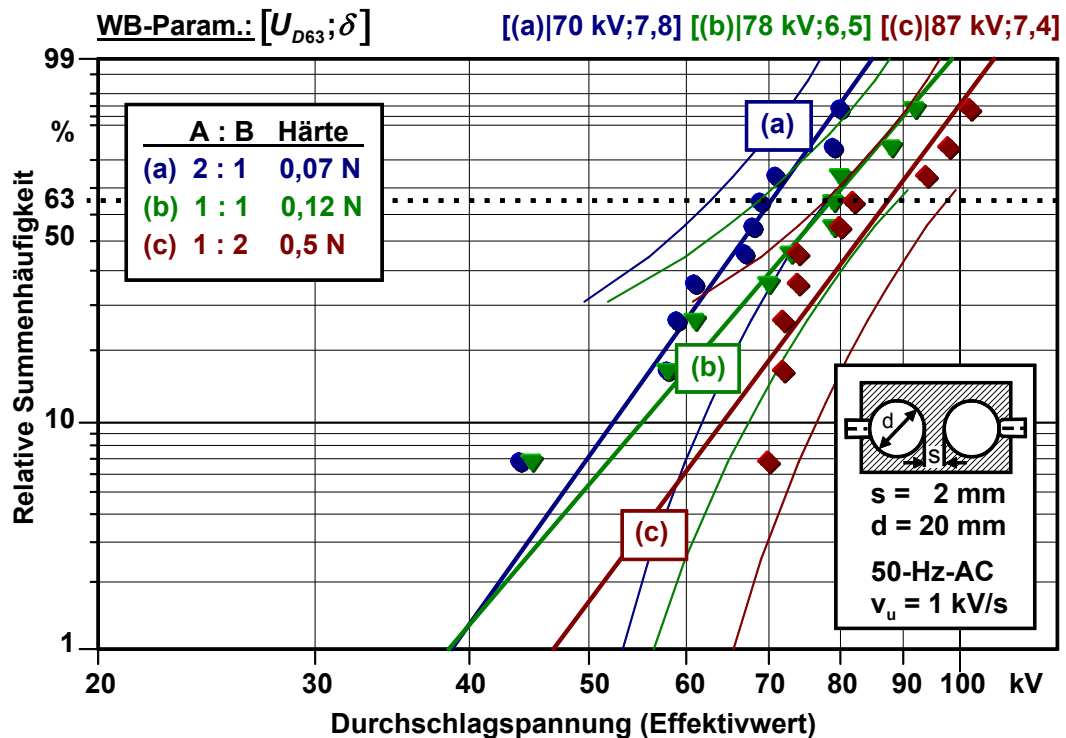


Abb. 4.45: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung in Abhängigkeit der Materialhärte der Vulkanisate eingestellt über das Mischungsverhältnis $A : B$, in dem die Komponenten zueinander stehen

Die erzeugten Vulkanisate unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Konsistenz signifikant. Dabei zeichnet sich das Vulkanisat, das durch Mischen der Komponenten $A : B = 2 : 1$ erzeugt wurde, durch eine extrem niedrige Härte (*siehe Tab. 4.2*) und hohe Adhäsionsfähigkeit aus, weist dabei jedoch keine Formstabilität auf. Das Mischen der Komponenten im Verhältnis $A : B = 1 : 2$ liefert ein Vulkanisat, dessen mechanische Charakteristik sich deutlich der eines Festkörpers nähert, was durch ein hohes Maß an Formstabilität, große Härte (*siehe Tab. 4.2*) sowie eine Abnahme der Adhäsionsfähigkeit zum Ausdruck kommt.

Abb. 4.45 zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung für die unterschiedlichen Vulkanisate. Das Ergebnis dieser Untersuchung deutet an, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Materialhärte des Vulkanisates und dessen elektrischer Durchschlagfestigkeit besteht. Ein Anstieg der Härte ist

mit einem Anstieg der Durchschlagfestigkeit verbunden. Dabei ist ein systematischer Einfluss auf die Streuung der Messwerte nicht festzustellen. Diese Untersuchung zeigt weiterhin, dass durch eine gezielte Variation des Mischungsverhältnisses $A : B$ Vulkanisate mit stark veränderten mechanischen Eigenschaften zur Verfügung stehen, die dazu nur vergleichsweise geringe Unterschiede in ihren Durchschlagfestigkeiten aufweisen.

Beimischung von Silikonflüssigkeit

Ergänzend zur Variation der Materialformulierung über das Mischungsverhältnis $A : B$, erfolgte eine Variation der Materialformulierung durch die Beimischung von Silikonflüssigkeit (Polydimethylsiloxan). Polydimethylsiloxan, das keine vinylenblockierten Endgruppen besitzt (siehe 2.1, Abb. 2.4b), kann nicht an der Vernetzungsreaktion teilnehmen, wird also nur durch den osmotischen Druck im Vulkanisat gehalten. Aufgrund der Beimischung von Silikonflüssigkeit wird der Anteil an unvernetzten Bestandteilen erhöht und damit die Vernetzungsdichte des Vulkanisates verringert. Untersucht wurde die Auswirkung eines erhöhten Silikonölanteils im Vulkanisat auf dessen Durchschlagspannung. Dazu wurde kommerzielle Silikonflüssigkeit in verschiedenen Anteilen (siehe Abb. 4.46) den Komponenten A und B beigemischt.

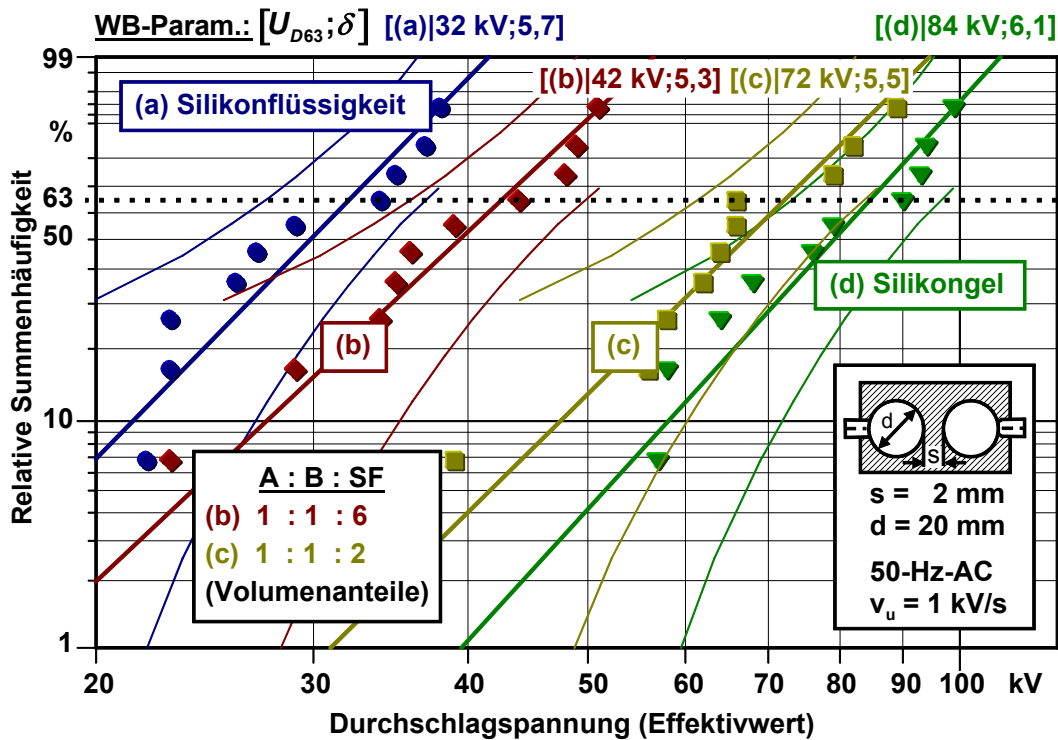


Abb. 4.46: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikonflüssigkeit (SF) (a), Silikonigel mit Beimischung von Silikonflüssigkeit (b), (c) sowie Silikonigel ($A : B = 1$) (d)

Weiterhin wurde die Durchschlagspannung von reiner Silikonflüssigkeit, die aus linearen Polymeren begrenzter Länge ohne räumliche Vernetzung besteht, unter identischen Bedingungen bestimmt, um eine weitere Referenz für die Beurteilung des Durchschlagverhaltens der Vulkanisate zu erhalten. *Abb. 4.46* zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung. Erwartungsgemäß wird eine deutliche Abnahme der Durchschlagspannung mit zunehmendem Anteil an beigemischter Silikonflüssigkeit festgestellt. Silikonflüssigkeit (*Versuchsreihe (a)*), die keine Polymermatrix enthält, weist die niedrigste Durchschlagspannung auf. Ein statistischer Unterschied in den Messwertstreuungen der einzelnen Versuchsreihen ist auch bei dieser Untersuchung nicht feststellbar.

Die Analyse des Entladungsverhaltens bezüglich der räumlichen Ausbildung der Entladungskanäle zeigte hier eine starke Abhängigkeit vom unvernetzten Anteil von Silikonflüssigkeit im Vulkanisat. Bei dem Vulkanisat, bestehend aus den Silikongel-Komponenten A und B und einer 50-prozentigen Beimischung von Silikonflüssigkeit (*Versuchsreihe (c)*), erfolgt der Durchschlag, wie auch beim Silikongel selbst, in circa 50 % der Fälle deutlich außerhalb des elektrisch hoch belasteten Feldbereiches (*siehe 4.2.1.1, Abb. 4.12*), wohingegen bei den Vulkanisaten mit deutlich höherem Anteil an unvernetzter Silikonflüssigkeit (*Versuchsreihe (b)*) die Ausbildung des Entladungskanals ausschließlich im hoch belasteten Feldbereich direkt zwischen den Kugelelektroden stattfindet. Diese Unterschiede im Durchschlagverhalten können durch die Wirkung der Polymermatrix erklärt werden. Mit der Zunahme der Vernetzungsdichte findet eine Änderung im Durchschlagverhalten statt. Das heißt, mit steigender Vernetzungsdichte findet ein Übergang vom Mechanismus des Flüssigkeitsdurchschlages hin zum Mechanismus des Festkörperdurchschlages statt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Vernetzungsdichte auf die elektrische Festigkeit der entsprechenden Vulkanisate zeigen, dass eine Verringerung der Vernetzungsdichte, was sowohl durch Änderungen im Mischungsverhältnis als auch durch eine Beimischung von Silikonflüssigkeit erreicht werden kann, eine Verringerung der Durchschlagfestigkeit bewirkt. Damit ist dokumentiert, dass die Dichte der im Silikongel enthaltenen Polymermatrix (Vernetzungsdichte) im Wesentlichen die elektrische Festigkeit des Vulkanisates bestimmt. Silikonflüssigkeit, die keine solche Polymermatrix besitzt, weist die niedrigste elektrische Festigkeit auf. Durch die beschriebenen Modifikationen und Variationen in der Materialformulierung lassen sich Vulkanisate mit unterschiedlichen elektrischen und mechanischen Eigenschaften herstellen. Dabei lassen sich Vulkanisate mit hoher elektrischer Festigkeit, deren mechanische Eigenschaften quasi ausgehärtete-

tem Silikongummi gleichen, aber auch sehr weiche Vulkanisate mit verschwindender Formstabilität und verhältnismäßig geringer elektrischer Festigkeit (vergleichbar mit der von Silikonflüssigkeit) herstellen, was in Grenzen eine individuelle Anpassung der Materialeigenschaften an die jeweilige Applikation ermöglicht.

4.2.2 Kurzzeitfestigkeit im stark inhomogenen elektrischen Feld

Spannungsführende metallische Spitzen und Kanten, die in direktem Kontakt mit dem Isolierstoff stehen, können als potentielle Fehlstellen angesehen werden, an denen lokal starke Feldstärkeüberhöhungen auftreten. In diesen Bereichen kann es zur Zündung von Teilentladungen kommen, die die vollständige Zerstörung der Isolierstrecke einleiten können. Betrachtet man beispielsweise einen in Silikongel eingebetteten metallischen Verbinder (*Abb. 4.47*), der die elektrische Verbindung zwischen zwei potentialführenden Leitern herstellt, so treten die höchsten Feldstärken an der Grenzfläche zwischen der Oberfläche des Verbinders und dem angrenzenden Isolationsmaterial auf. Mikroskopische und makroskopische Unebenheiten auf der metallischen Oberfläche des Verbinders sowie leitfähige komplexe Geometrien mit scharfen Kanten stellen hierbei technisch relevante Fehlstellen dar, für die sich die oben angeführte Problematik ergibt.



Abb. 4.47: Verbinder

Für eine erste Beurteilung des Isolationsvermögens von Silikongel bei Beanspruchung durch stark inhomogene elektrische Felder wurde die elektrische Kurzzeitfestigkeit bei Gleich- und Wechselspannungsbeanspruchung im Spannungssteigerungsversuch bestimmt. Zur Nachbildung feldstärkerhöhender Fehlstellen diente eine mit Silikongel umgossene Spitze-Platte-Elektrodenanordnung (*siehe 3.1, Abb. 3.3*). Der sich aus dem Rundungsradius der Nadelspitze und der Schlagweite errechnete Inhomogenitätsgrad der eingesetzten Anordnung beträgt $1/\eta = 22$. Die Versuchsdurchführung erfolgte bei Raumtemperatur und Normalbedingungen. Dabei wurde die Prüfspannung ausgehend von 0 V mit einer kontinuierlichen Steigerungsgeschwindigkeit von 1 kV/s (Effektivwert bzw. Spitzenwert) bis zum elektrischen Durchschlag der Isolierung erhöht. Während der elektrischen Prüfung erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung der Teilentladungsaktivität.

4.2 Elektrische Kurzzeitfestigkeit

Die ermittelten Durchschlagspannungen sowie die zugehörigen Maximalwerte der elektrischen Feldstärke im Prüfvolumen (Scheitelwerte an der Nadelspitze) sind in *Abb. 4.48* dargestellt.

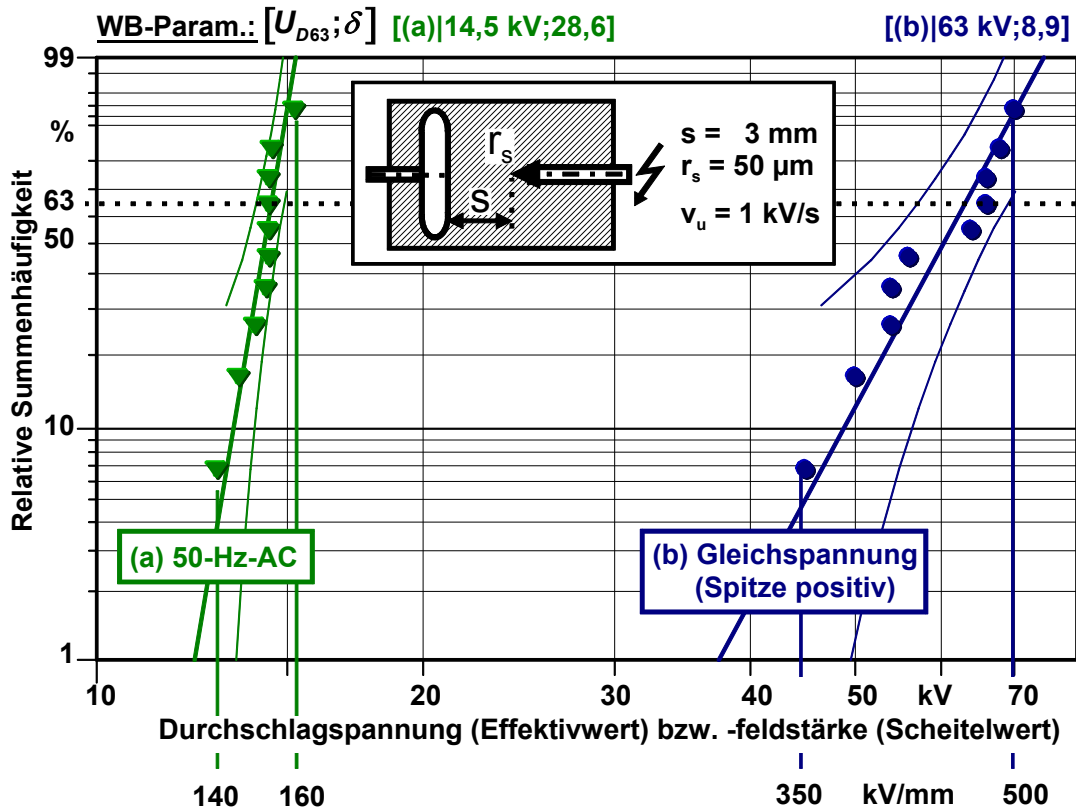


Abb. 4.48: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung und -feldstärke im stark inhomogenen elektrischen Feld ($1/\eta = 22$) für Wechsel- und Gleichspannungsbelastung

Die im Kurzzeitversuch bei stark inhomogener Feldbeanspruchung ermittelte Gleichspannungsfestigkeit von Silikongel ist deutlich höher als die Wechselspannungsfestigkeit. Bezogen auf das 63%-Quantil der Wechselspannungsdurchschlagfeldstärke ergibt sich für die Gleichspannungsdurchschlagfeldstärke ein um den Faktor 3 erhöhter Wert. Die Messwertstreuung bei Wechselspannungsbelastung ist dagegen stark vermindert, was sich durch einen stark erhöhten Weibull-Exponenten (Streumaß) ausdrückt.

Verglichen mit den bei homogener großvolumiger Feldbelastung ermittelten Durchschlagfeldstärken (*siehe 4.2.1.7*) zeigt sich, dass Silikongel bei der Belastung durch sehr hohe, räumlich stark begrenzte elektrische Felder deutlich bessere isolierende Eigenschaften aufweist. Auf dieses Verhalten wird auch in [3] hingewiesen.

Um zu einem tieferen Verständnis über die Natur des Durchschlagprozesses zu gelangen, erfolgte die Analyse der während der Wechselspannungsprüfung aufgezeichneten Teilentladungsaktivität. *Abb. 4.49* zeigt exemplarisch die zeitliche Entwicklung der Teilentladungsaktivität (scheinbare Ladung über der Zeit) während der Wechselspannungsprüfung. Es ist deutlich zu erkennen, dass vor dem elektrischen Durchschlag der Isolierstrecke Teilentladungen auftreten, deren Einsetzspannungen (9 kV bis 14 kV , Effektivwerte) bzw. -feldstärken (100 kV/mm bis 150 kV/mm , Scheitelwerte) deutlich unter den Durchschlagspannungen bzw. -feldstärken liegen. Dieses Verhalten wurde bei acht von zehn untersuchten Prüflingen beobachtet. Ein spontanes elektrisches Versagen der Isolierung, ohne dass zuvor eine nennenswerte Teilentladungsaktivität beobachtet wurde, konnte nur an zwei Prüflingen beobachtet werden.

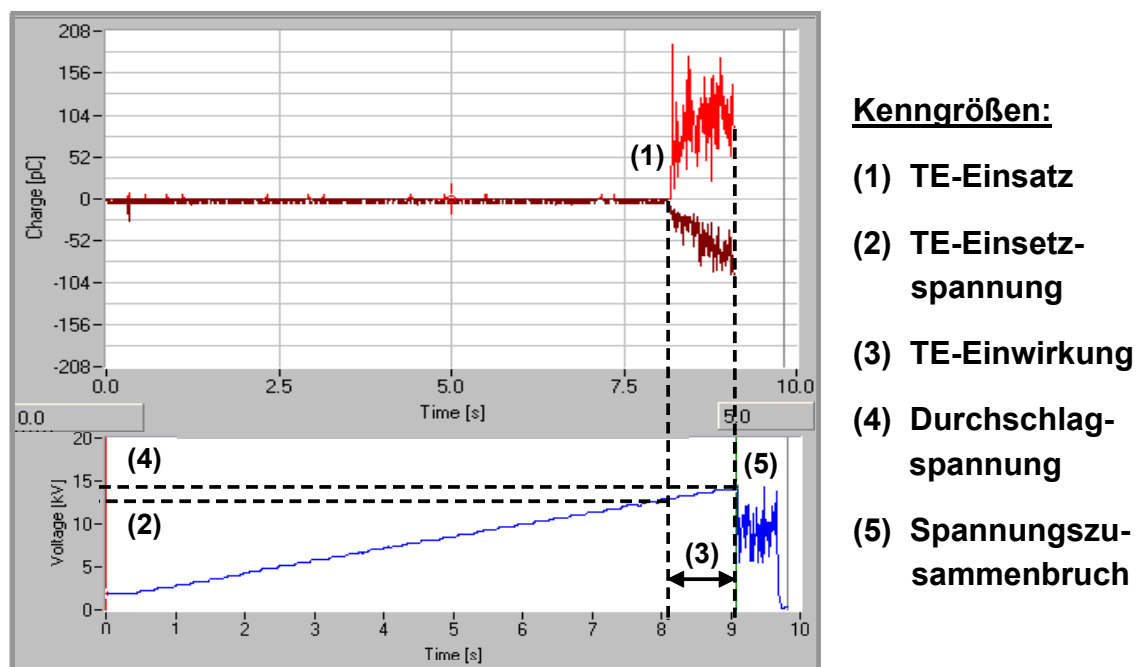


Abb. 4.49: *Teilentladungsaktivität (scheinbare Ladung über der Zeit) im Spannungssteigerungsversuch mit netzfrequenter Wechselspannung*

Auf eine quantitative Analyse der Teilentladungsaktivität bei der Gleichspannungsprüfung wurde verzichtet, da hier erst bei wesentlich höheren Spannungen Teilentladungsimpulse festgestellt wurden und nicht sichergestellt werden konnte, dass diese ausschließlich von der Nadelspitze und nicht aus anderen Teilentladungsquellen herrühren, deren Teilentladungseinsetzfeldstärke erst beim Erreichen höherer Prüfspannungspegel erreicht wird. Diese Untersuchung zeigt, dass der Durchschlag von Silikongel im stark inhomogenen Feld bei Wechselspannungsbelastung von Teilentladungen eingeleitet wird. Aus dem Unterschied im Teilentladungsverhalten erklären sich nach [3] auch die großen Unterschiede in den Wer-

ten der Gleich- und Wechsellspannungsfestigkeit. Da bei Gleichspannungsbelastung die Teilentladungseinsetzfeldstärken wesentlich höher liegen und die Anzahl der Teilentladungsimpulse geringer zu sein scheint, werden höhere Feldstärken benötigt, um die gleiche Menge an schädigender Energie in den Werkstoff einzutragen und den Durchschlag einzuleiten. Die Tatsache, dass Silikongel bei der Belastung durch sehr hohe, räumlich stark begrenzte elektrische Felder deutlich bessere isolierende Eigenschaften aufweist als bei einer großvolumigeren Belastung durch homogene Felder, lässt sich durch das Vorhandensein von technologischen und strukturellen Fehlstellen im Werkstoff begründen. Wie bereits in *Kapitel 4.2.1.1* dargestellt wurde, wird das Durchschlagverhalten von Silikongel bei homogener Feldbelastung im Wesentlichen durch Fehlstellen im Isolierstoff bestimmt. Da die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Fehlstellen in dem kleinen Volumen vor der Nadelspitze (modellierte Inhomogenität) als äußerst gering angesehen werden kann, werden dort lokal deutlich höhere elektrische Festigkeitswerte erreicht. Die Teilentladungseinsetzfeldstärke kennzeichnet daher im Wesentlichen die materialeigene (intrinsische) elektrische Festigkeit des Isolierstoffes. Wohingegen die praktisch nutzbare elektrische Festigkeit vor allem durch Fehlstellen bestimmt ist (vgl. *4.2.1.1* und *4.2.1.6*).

4.3 Alterungsverhalten

Um die Zuverlässigkeit von Isolierungen während des Betriebes über lange Zeiträume zu gewährleisten, sind bei der Dimensionierung zeit- und belastungsabhängige Eigenschaftsänderungen der eingesetzten Isolierstoffe zu berücksichtigen. Derartige Veränderungen werden als Alterung bezeichnet. DIN 50035-1 definiert den Begriff Alterung unabhängig vom Nützlichkeitsaspekt, als die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse. Die sichtbaren oder messbaren Wirkungen der Alterungsursachen, die sich beispielsweise in einer Veränderung der Materialeigenschaften ausdrücken, werden als Alterungserscheinungen bezeichnet [61]. In der Praxis führen derartige Eigenschaftsänderungen von Isolierstoffen meist zu einer nicht umkehrbaren, schädlichen Änderung der Betriebsfähigkeit von Isolierungen, die durch eine mit der Zeit anwachsende Fehlerhäufigkeit gekennzeichnet ist [62].

Es gibt verschiedene Ursachen und Mechanismen, die zu einer Alterung und einer damit verbundenen Qualitätsminderung von Isolierstoffen führen. Bei der Einteilung von Alterungsursachen kann prinzipiell zwischen inneren und äußeren Ursachen unterschieden werden. Dabei werden unter inneren Ursachen thermodynamisch instabile Zustände des Materials, die selbstständig ohne die Einwirkung äu-

ßerer Ursachen ablaufen können (z.B. Depolymerisation) verstanden. Als äußere Ursachen werden chemische und physikalische Einwirkungen der Umgebung auf das Material (z.B. elektrische Felder, Teilentladungen, Wärme), welche zu Alterungsvorgängen führen, bezeichnet. Durch die kombinierte Wirkung verschiedener Alterungsursachen kommt es in der Praxis häufig zu komplexen, gemeinsam ablaufenden chemischen und physikalischen Alterungsvorgängen.

Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen war es, die Auswirkungen ausgewählter Alterungsursachen auf die elektrische Festigkeit von Silikongel zu bestimmen. Dabei erfolgte die Auswahl der Alterungsszenarien unter Berücksichtigung der in der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungs-technik zu erwartenden Einsatzbedingungen, die durch praxisgerechte Versuche nachgebildet wurden.

4.3.1 Elektrische Langzeitfestigkeit im quasihomogenen Feld

Um in kurzer Zeit Erkenntnisse über das Alterungsverhalten von Silikongel bei Belastung durch homogene bzw. quasihomogene elektrische Felder zu erlangen, wurden Spannungssteigerungsversuche mit unterschiedlichen Spannungssteigerungsgeschwindigkeiten durchgeführt (4.3.1.1). Ergänzend dazu kam eine Methode zur Bestimmung des Alterungsverhaltens zum Einsatz, bei der die Wirkung einer elektrischen Vorbelastung auf die im Anschluss daran ermittelte Durchschlagspannung bewertet wurde (4.3.1.2). Die Durchführung von Konstantspannungsversuchen erschien hier nicht sinnvoll, da schon aufgrund der großen Streuungen der im Rampentest ermittelten Durchschlagspannungen (siehe 4.2.1.3) eine geeignete Festlegung der Spannungsstufen, die in einem angemessenen Zeitraum bei allen Prüflingen zu einem Versagen führen würden, nicht möglich war. Für die Untersuchungen kamen Prüflinge bestehend aus einer mit Silikongel umgossenen Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung (siehe 3.1, Abb. 3.1) zum Einsatz, deren Herstellung nach der in Kapitel 4.1.6 beschriebenen Technologie erfolgte.

4.3.1.1 Lebensdauerabschätzung auf Basis von Kurzzeitversuchen

Abb. 4.50 zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung, die für die Spannungssteigerungsgeschwindigkeiten $v_u = 1 \text{ kV/1 s}$ (quasilinear) bzw. $\Delta U/\Delta t = 2 \text{ kV/1 min}$, 2 kV/10 min und 2 kV/1 h (stufenförmig) bei Raumtemperatur und Normalbedingungen ermittelt wurden. Aufgrund der großen Überlappung der 95%-Konfidenzbereiche der ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung ist ein systematischer Einfluss der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit und damit der Beanspruchungsdauer bei quasihomogener Feldbelastung auf die Durchschlagspannung von Silikongel nicht nachweisbar.

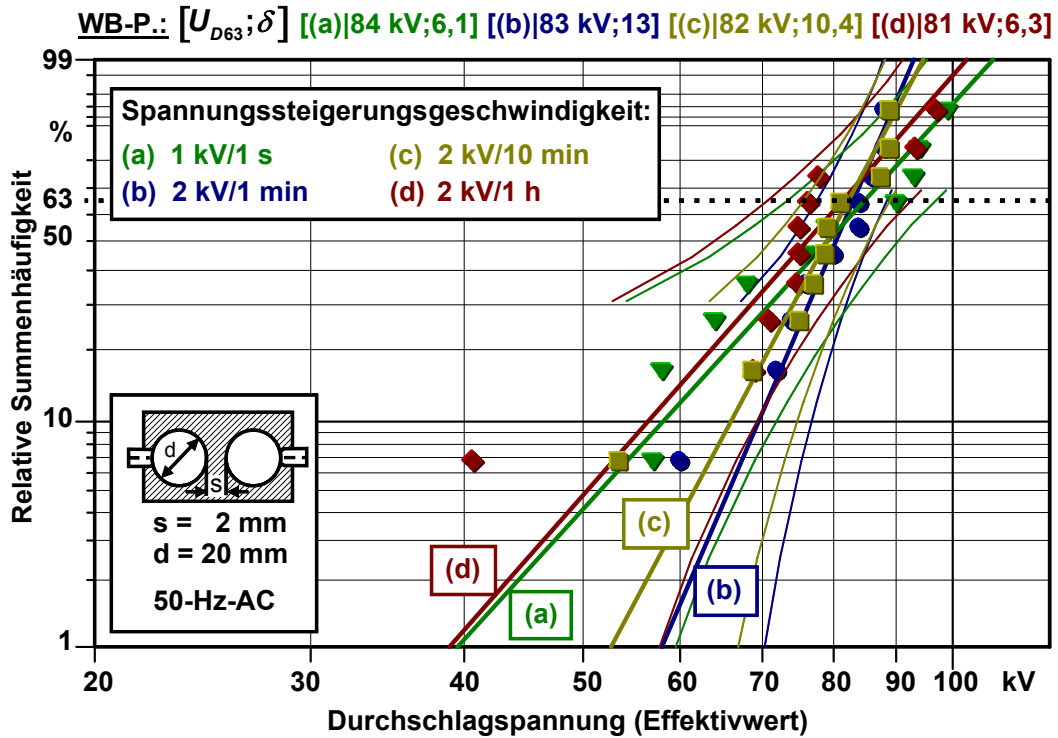


Abb. 4.50: Verteilungsfunktionen der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit zur Bewertung des Alterungsverhaltens von Silikongel

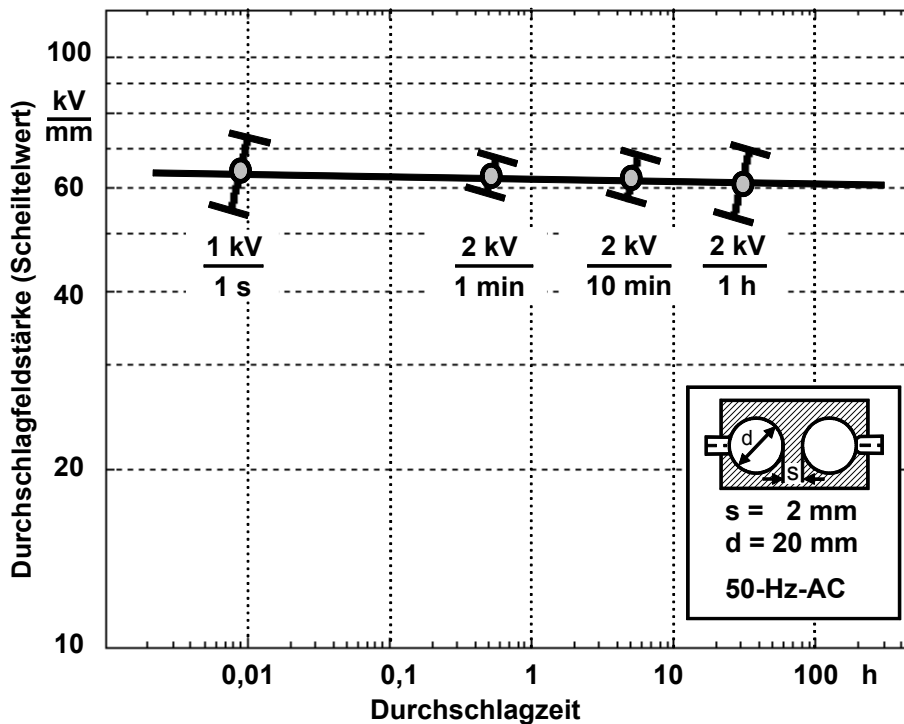


Abb. 4.51: 63%-Quantile der Durchschlagfeldstärke mit zugehörigen 95%-Konfidenzbereichen in Abhängigkeit der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit, aufgetragen über der Versagenszeit (Lebensdauer kennlinie des Spannungssteigerungsversuches)

Noch deutlicher wird dieser Sachverhalt in der doppeltlogarithmischen Darstellung der Form $\hat{E}_d = f(t_d)$ in der die 63-%-Quantile der Durchschlagzeiten mit den entsprechenden Durchschlagfeldstärken für alle Spannungssteigerungsraten aufgetragen sind (Abb. 4.51). Eine lineare Regression [41] für alle logarithmierten Messwertpaare $[\lg \hat{E}_{d63}, \lg t_d]$ ergibt als Anstieg der Regressionsgeraden einen Regressionskoeffizienten nahe Null. Diese Ausgleichsgerade kann nach [37] als Lebensdauerkennlinie des Spannungssteigerungsversuches interpretiert werden. Ebenso lässt der visuelle Vergleich der 95-%-Konfidenzbereiche der 63-%-Durchschlagfeldstärke mit zunehmender Belastungszeit keine Verringerung der Durchschlagfestigkeit erkennen. Aufgrund der festgestellten Unabhängigkeit der elektrischen Durchschlagfestigkeit von der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit, und damit von der Belastungsdauer, ist eine Alterung von Silikongel bei homogener Feldbelastung nicht nachweisbar.

4.3.1.2 Bewertung des Alterungsverhaltens nach ausgewählten Alterungsschritten

Zur Erhöhung der Aussagekraft der auf der Basis von Spannungssteigerungsversuchen gewonnenen Ergebnisse zum Alterungsverhalten von Silikongel bei quasi-homogener Feldbelastung (siehe 4.3.2.1) wurden zusätzliche Untersuchungen unter Anwendung einer weiteren Prüfmethode durchgeführt. Dabei erfolgte die Bewertung des Alterungsverhaltens anhand des Vergleiches entsprechend ausgewählter Eigenschaftswerte von Prüflingen im ungealterten und gealterten Zustand. Aus dem Vergleich statistischer Kennwerte, die an den ungealterten Prüflingen sowie an den Prüflingen nach einer entsprechenden künstlichen Alterung ermittelt wurden, lassen sich Aussagen über deren Alterungsbeständigkeit gewinnen. Diese Vorgehensweise liefert aussagekräftige Ergebnisse zur Bewertung des Alterungsverhaltens eines Isolierstoffes unter praktischen Betriebsbedingungen und stellt damit eine sinnvolle Erweiterung zu den auf Basis von Spannungssteigerungsversuchen ermittelten Ergebnissen dar.

Bei diesen Untersuchungen wurden die 63-%-Durchschlagspannungen von Prüflingen im Neuzustand ($U_{D63,0}$) und von Prüflingen nach verschiedenen Vorbelastungen ($U_{D63,A}$) ermittelt, und aus deren Vergleich (nach Gl. 4.7) Aussagen über das Alterungsverhalten gewonnen.

$$\Delta U_{D63} = \frac{U_{D63,A} - U_{D63,0}}{U_{D63,0}} \cdot 100 \quad \text{in } \% \quad (\text{Gl. 4.7})$$

4.3 Alterungsverhalten

Eine derartige Vorgehensweise eignet sich besonders für den Fall, dass kein geeignetes Modell zur Beschreibung des Alterungsverhaltens zur Verfügung steht. Weiterhin bietet diese Methode den Vorteil, dass mit vertretbarem technischen Aufwand eine große Anzahl von Prüflingen im Parallelbetrieb über große Zeiträume (bis 7500 h) hinweg einer elektrischen Vorbelastung ausgesetzt werden können. Die Vorbelastung der Prüflinge erfolgte mit einer netzfrequenten Wechselspannung von 20 kV bei Raumtemperatur und Normalbedingungen sowie unter dem direkten Einfluss von demineralisiertem Wasser. Dieser Spannung hielten im Kurzzeitversuch bei 22°C und Normalbedingungen sowie unter dem Einfluss von Feuchtigkeit alle Prüflinge stand (siehe 4.2.1.5, Abb. 4.18). Aufgrund der im Spannungssteigerungsversuch ermittelten Unabhängigkeit zwischen Belastungsdauer und Durchschlagspannung (siehe 4.3.1.1) war während der Vorbelastung nicht mit Ausfällen zu rechnen, sofern es angesichts der wesentlich längeren Belastungsdauer zu keiner Änderung im Alterungsverhalten gekommen war. Die Bestimmung der Durchschlagspannung erfolgte nach spezifizierten Alterungsschritten mit Wechselspannung im Spannungssteigerungsversuch mit einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von 1 kV/s bei Raumtemperatur und Normalbedingungen.

Feldbeanspruchung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen

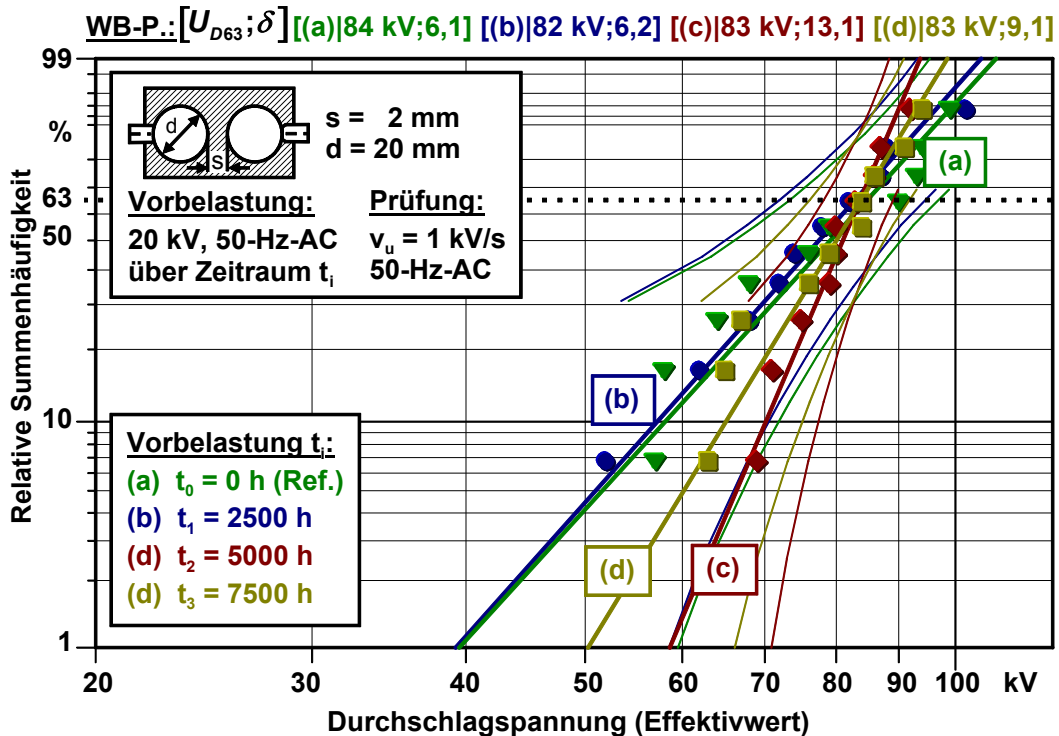


Abb. 4.52: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikongel nach ausgewählten Alterungsschritten unter homogener Feldbeanspruchung

Die Bewertung des Alterungsverhaltens erfolgte jeweils anhand der nach drei Alterungsschritten von jeweils 2500 Stunden ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung. Voruntersuchungen, bei denen stichprobenartig die Teilentladungsaktivität einzelner Prüflinge erfasst wurde, zeigten, dass bei diesem Spannungspegel keine Teilentladungen auftreten. Daher kann bei dieser Untersuchung ausschließlich der Alterungsmechanismus der Feldalterung zu Grunde gelegt werden. Erwartungsgemäß hielten alle Prüflinge der elektrischen Vorbelastung von 20 kV stand. *Abb. 4.52* zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung, die aufgrund der deutlichen Überlappung der 95-%-Konfidenzbereiche statistisch nicht voneinander zu unterscheiden sind. Dieses Ergebnis untermauert den im Spannungssteigerungsversuch ermittelten Sachverhalt, nach dem eine quasihomogene Feldbelastung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen zu keiner feststellbaren elektrischen Alterung von Silikongel führt. Das heißt, dass der Durchschlag von Silikongel bei der Beanspruchung durch quasihomogene und damit auch durch homogene Felder ausschließlich von der momentanen elektrischen Beanspruchung bestimmt wird. Ein derartiges Verhalten wurde auch für Silikongummi gefunden. Dies zeigt, dass sich Silikonelastomere in dieser Eigenschaft deutlich von anderen Isolierstoffen, wie Polyethylen oder Epoxidharz, bei denen ein systematischer Einfluss der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit auf die elektrische Festigkeit und damit eine Alterung festgestellt wurde, unterscheiden [9;58]. Darüber hinaus wird in [3] berichtet, dass Silikongel auch nach einer 800-stündigen 20 kV-Gleichspannungsbelastung bei 20°C sowie bei 100°C keine elektrischen Alterungserscheinungen zeigt.

Feldbeanspruchung in Kombination mit Feuchtigkeit

Elektrisch unbelastetes Silikongel, das in Kontakt zu Feuchtigkeit stand, weist verglichen mit trockenem Silikongel eine signifikant verminderte Kurzzeitdurchschlagfestigkeit auf (vgl. 4.2.1.5). Neben den in *Kapitel 4.2.1.5* angeführten potentiellen Ursachen für dieses Verhalten kann insbesondere die kombiniert auftretende Wirkung von elektrischem Feld und Feuchtigkeit elektro-chemische Veränderungen im Isolierstoff hervorrufen, die zu einer weiteren Herabsetzung der elektrischen Festigkeit führen können [23]. Zur Nachbildung dieses praxisrelevanten Belastungsfalles wurden Prüflinge während der elektrischen Vorbelastung (20 kV) dem direkten Kontakt mit demineralisiertem Wasser (22°C) ausgesetzt und im Anschluss daran deren Kurzzeitdurchschlagfestigkeit bestimmt (Rampentest). *Abb. 4.53* zeigt die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung in Abhängigkeit verschiedenartiger Vorbelastungen.

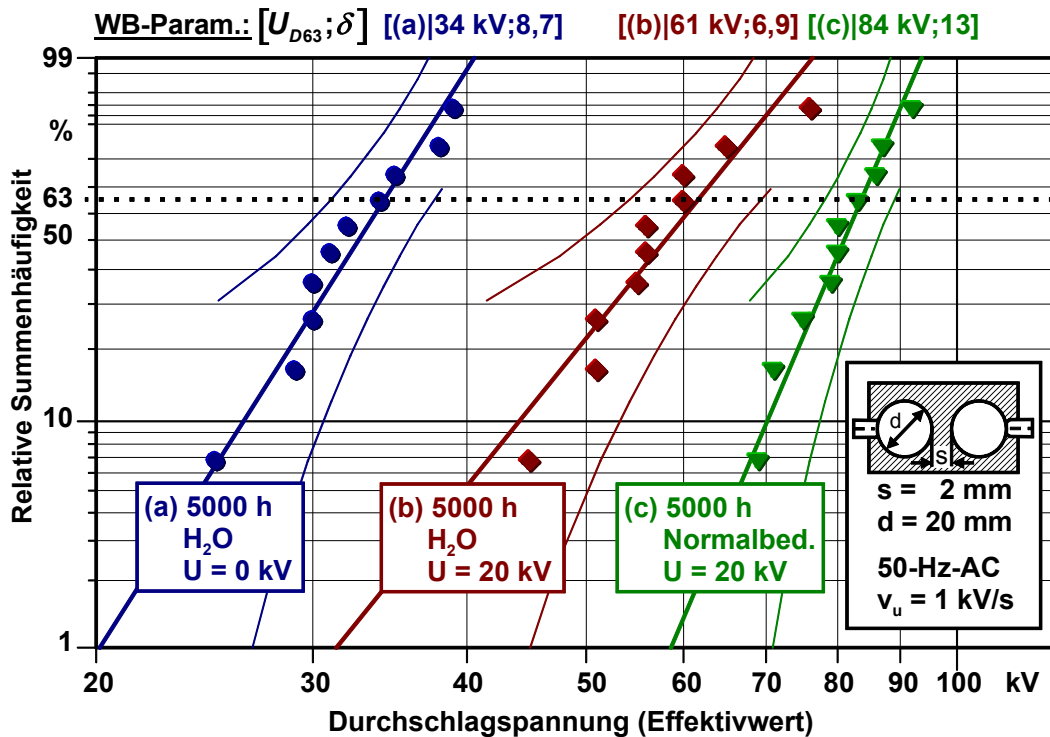


Abb. 4.53: Verteilungsfunktionen der Durchschlagsspannung von Silikongel in Abhängigkeit verschiedenartiger Vorbelastungen

Auffällig ist die Tatsache, dass die Verminderung der Durchschlagspannung unter dem kombinierten Einfluss von Feuchtigkeit und elektrischem Feld (*Versuchsreihe (b)*) wesentlich geringer ausfällt als unter der Einwirkung von Feuchtigkeit ohne Feldbelastung (*Versuchsreihe (a)*). Gegenüber der nach einer 5000-stündigen Lagerung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (*Versuchsreihe (c)*) ermittelten 63-%-Durchschlagsspannung ergibt sich hier ein nur um 27 % verminderter Wert, wohingegen die Reduzierung im Falle der spannungslosen Wasserlagerung circa 60 % beträgt. Um Unregelmäßigkeiten während der Versuchsdurchführung als Grund für dieses Verhalten auszuschließen, wurde diese Untersuchung unter identischen Bedingungen wiederholt, wobei sich das berichtete Verhalten bestätigte.

Um eine Erklärung für dieses Verhalten zu finden, wurden zunächst die Elektrodenoberflächen auf mögliche Korrosionserscheinungen hin untersucht und eine Bewertung der Materialkonsistenz vorgenommen. Dabei wurden bei keinem der Prüflinge Korrosionserscheinungen auf den Elektrodenoberflächen festgestellt. Weiterhin wurde bei den Proben, die in Kontakt zu Wasser standen (*Versuchsreihe (a)* und *(b)*) nur eine geringfügig wahrnehmbare Abnahme der Anhaftung des Silikongels auf der Elektrodenoberfläche festgestellt. Aufgrund dieser Tatsachen sind die Unterschiede in der Durchschlagfestigkeit insbesondere zwischen den Versuchsreihen *(a)* und *(b)* also nicht zu erklären. Jedoch konnte an den unter Feldbe-

anspruchung und Feuchtigkeitseinfluss stehenden Proben (*Versuchsreihe (b)*) im Vergleich zu den übrigen Proben (*Versuchsreihen (a)* und *(c)*) eine Verfärbung des Silikongels sowie ein geringfügiger Anstieg der Materialhärte festgestellt werden, was auf den Ablauf einer chemischen Reaktion hindeutet. Dass es sich dabei um eine thermisch aktivierte Reaktion handelt, die durch dielektrische Verluste aufgrund eines erhöhten Feuchtigkeitsgehaltes im Isolierstoff hervorgerufen sein könnte und von der bekannt ist, dass sie zu einer Verfärbung des Silikongels führt (vgl. 4.3.3.1, Abb. 4.60), konnte ausgeschlossen werden. Messungen, bei denen ein PT-100 Widerstand in unmittelbarer Nähe des elektrisch hoch belasteten Isolierstoffvolumens platziert wurde, ergaben keinen Hinweis auf eine zusätzlich Erwärmung des Isolierstoffes über die Umgebungstemperatur hinaus.

Laut Hersteller des Silikongels ist der Anstieg der Materialhärte durch den Ablauf einer sekundären Vernetzungsreaktion – ermöglicht durch spezielle der Material-Formulierung beigefügte Additive – zu erklären. Diese wirkt einer Zersetzung des Silikongels durch Depolymerisation entgegen, indem eine erneute Vernetzung zwischen gespaltenen Polymerketten herbeigeführt wird, was zu einem Anstieg der Vernetzungsdichte führen kann, und damit den beobachteten Anstieg der Materialhärte erklären könnte. Diese sekundäre Vernetzungsreaktion im Silikongel, das in Kontakt zu Feuchtigkeit stand, muss in jedem Fall durch die Wirkung des elektrischen Feldes begünstigt worden sein, denn bei einer spannungslosen Wasserlagerung konnten die beschriebenen Phänomene nicht beobachtet werden.

Der Anstieg der Materialhärte, der auf die erhöhte Vernetzungsdichte zurückzuführen ist, liefert eine potentielle Erklärung für die deutlich verminderte Abnahme der Durchschlagspannung bei einer kombinierten Belastung durch Feuchtigkeit und elektrisches Feld. Untersuchungen von Vulkanisaten, die bei Raumtemperatur und Normalbedingungen durchgeführt wurden, ergaben, dass mit einem Anstieg der Vernetzungsdichte stets ein Anstieg der elektrischen Festigkeit verbunden ist (siehe 4.2.1.9). Zudem wird in [59] berichtet, dass die elektrische Festigkeit von Silikongummi, das eine wesentlich höhere Vernetzungsdichte als Silikongel aufweist, eine vergleichsweise geringe Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt zeigt, wohingegen der Einfluss von Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit von Silikonflüssigkeit (siehe 2.1, Abb. 2.4b) stark ausgeprägt ist (siehe 4.2.1.5). Diese Tatsachen legen den Schluss nahe, dass der Einfluss von Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit von Silikongel mit steigender Vernetzungsdichte des Vulkanisates abnimmt und liefern einen Erklärungsansatz für das beobachtete Verhalten.

Aus praktischer Sicht bedeutet dies, dass der Zustand eines elektrisch unbelasteten, in Kontakt zu Feuchtigkeit stehenden Silikongel-isolierten Bauteils, das nach erfolgter Durchfeuchtung (z.B. vor der Inbetriebnahme der Isolierung) einer elektrischen Beanspruchung ausgesetzt wird, als wesentlich kritischer einzuschätzen ist als der Zustand, bei dem die Durchfeuchtung unter Einwirkung eines elektrischen Feldes stattfindet. Den aufgrund der kombinierten Einwirkung von Feuchtigkeit und elektrischem Feld hervorgerufenen Änderungen der mechanischen Materialeigenschaften ist bei der Auslegung von Isolierungen Rechnung zu tragen.

4.3.2 Elektrische Langzeitfestigkeit im stark inhomogenen Feld

Wie bereits in *Kapitel 4.2.2* gezeigt wurde, wird der elektrische Durchschlag von Silikongel im stark inhomogenen Feld von Teilentladungen eingeleitet. Allgemein bekannt ist, dass Teilentladungen polymere Isolierstoffe stark degradieren und deren Lebensdauer drastisch reduzieren [13;40], weshalb beispielsweise für VPE-isolierte Kabel Prüfvorschriften existieren, in denen maximal zulässige Grenzwerte für die scheinbare Ladung $q_{s,max}$ festgelegt sind. Dagegen werden andere Isolierstoffe, wie z.B. Glimmer, als beständig gegenüber Teilentladungen angesehen [63]. Vor diesem Hintergrund wurden Untersuchungen zur elektrischen Festigkeit von Silikongel bei Langzeitbelastungen durch hohe lokale Feldstärken durchgeführt. Insbesondere die Bewertung der schädigenden Wirkung von Teilentladungen auf den Isolierstoff machte einen wesentlichen Aspekt dieser Untersuchungen aus. Die Bewertung des elektrischen Alterungsverhaltens erfolgte auch hier u.a. mittels Spannungssteigerungsversuchen (Step-Tests), bei denen während der gesamten Prüfung die kontinuierliche Aufzeichnung der Teilentladungsaktivität erfolgte (4.3.2.1). Weiterhin wurden Konstantspannungsversuche durchgeführt, um Aussagen über statistisch abgesicherte Betriebsfeldstärken bei der Belastung des Isolierstoffes durch stark inhomogene Felder treffen zu können. Die Untersuchungen wurden ausschließlich unter Wechselfeldbelastung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen sowie unter dem Einfluss von Feuchtigkeit durchgeführt. Zur Nachbildung der Belastung von Silikongel durch hohe lokale Feldstärken wurden zwei verschiedene mit Silikongel umgossene Spitze-Platten-Elektrodenanordnungen eingesetzt (*siehe 3.1, Abb. 3.3*), deren Herstellung nach der in *Kapitel 4.1.6* beschriebenen Technologie erfolgte.

4.3.2.1 Lebensdauerabschätzung auf Basis von Kurzzeitversuchen ($1/\eta = 22$)

Für eine erste Abschätzung des elektrischen Alterungsverhaltens von Silikongel bei Belastung durch stark inhomogene Felder wurden Spannungssteigerungsversuche durchgeführt, bei denen die Prüfspannung ausgehend von einem Startwert stu-

4.3 Alterungsverhalten

fenförmig mit $\Delta U/\Delta t = 500 \text{ V}/30 \text{ min}$ bis zum Durchschlag der Isolierstrecke gesteigert wurde. Zur Analyse des elektrischen Alterungsverhaltens erfolgte während der gesamten Prüfung eine kontinuierliche Aufzeichnung der Teilentladungsaktivität. Die Untersuchung erfolgte bei Raumtemperatur und Normalbedingungen sowie unter dem Einfluss von Feuchtigkeit, wobei die dafür eingesetzten Proben vor Beginn der elektrischen Prüfung 1000 h bei 22°C in demineralisiertem Wasser gelagert wurden. Aufgrund der Notwendigkeit, die benötigten Versuchszeiten in einem angemessenen Rahmen zu halten, wurde basierend auf den im Rampentest ermittelten Teilentladungseinsetzspannungen (siehe 4.2.2), deren kleinster Wert 9 kV betrug, die Startspannung auf 8 kV festgelegt. Bei dieser Spannung wurden über einen Zeitraum von 24 h bei keinem der Prüflinge Teilentladungen registriert.

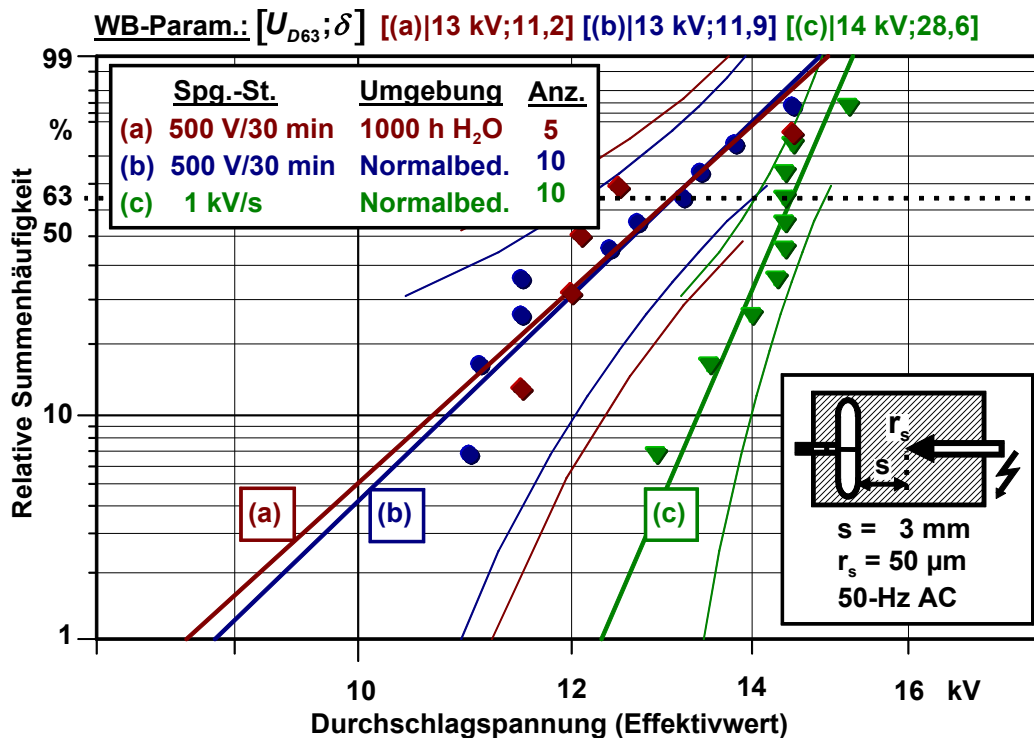


Abb. 4.54: Verteilungsfunktionen der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit und damit der Beanspruchungsdauer im stark inhomogenen elektrischen Feld ($1/\eta = 22$)

Die ermittelten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung (Abb. 4.54) zeigen deutlich, dass eine verringerte Spannungssteigerungsgeschwindigkeit und damit eine vergrößerte Beanspruchungsdauer sowohl bei Normalbedingungen (Versuchsreihe (b)) als auch unter dem Einfluss von Feuchtigkeit (Versuchsreihe (a)) zu einer 10-prozentigen Abnahme der 63%-Durchschlagsspannung sowie zu einer deutlichen Zunahme der Messwertstreuung führt.

Dieses Verhalten kann als deutliches Anzeichen für Alterungsprozesse, die in Anwesenheit des elektrischen Feldes im Isolierstoff ablaufen, angesehen werden. Ein statistischer Einfluss der Feuchtigkeit auf das Durchschlagverhalten konnte hier im Gegensatz zur Beanspruchung durch ein homogenes elektrisches Feld (*siehe 4.2.1.5*) nicht festgestellt werden.

Um eine Erklärung für die beobachtete Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit und damit von der Belastungsdauer zu finden, erfolgte die Bewertung des Teilentladungsverhaltens. Aus dem im Rampentest ($v_u = 1 \text{ kV/s}$) ermittelten Entladungsverhalten geht hervor, dass die Teilentladungseinsetzspannung in fast allen Fällen deutlich unterhalb der Durchschlagspannung liegt (*siehe 4.2.2, Abb. 4.49*). Da während des Rampentests das Einsetzen von Teilentladungen bei einer Vielzahl von Prüflingen nicht unmittelbar zum Durchschlag der Isolierung führte, ist davon auszugehen, dass nach dem Teilentladungseinsetz eine gewisse Anzahl an Teilentladungsimpulsen und damit eine gewisse Einwirkdauer notwendig ist, um eine ausreichend große Schädigung des Isolierstoffes herbeizuführen, die schließlich zum Durchschlag der Isolierung führt. Aufgrund der relativ hohen Spannungssteigerungsgeschwindigkeit im Rampentest, werden daher Durchschlagspannungen ermittelt, die deutlich oberhalb der jeweiligen Teilentladungseinsetzspannung liegen. Im Gegensatz dazu ergeben sich im Falle der stufenförmigen Spannungssteigerung wesentlich längere Beanspruchungszeiten je Spannungsstufe. Daher ist zu vermuten, dass es nach dem Teilentladungseinsetz aufgrund einer verlängerten Einwirkdauer bei konstantem Spannungspegel zu einer starken Degradation des Isolierstoffes kommt und auch ohne weitere Spannungssteigerung der elektrische Durchschlag der Isolierung eingeleitet wird.

Die Analyse der Teilentladungsaktivität bestätigt diese Annahme. Es zeigte sich, dass das Auftreten von Teilentladungen stets einen Durchschlag der gesamten Isolierstrecke zur Folge hat. Dieses Verhalten wird bei allen Prüflingen beobachtet. Dabei erfolgte der Teilentladungseinsetz nicht zwangsläufig zeitlich unmittelbar nach dem Erreichen der nächst höheren Spannungsstufe, sondern nahezu statistisch gleichverteilt innerhalb des jeweiligen Belastungsintervalls. Die Zeitintervalle zwischen dem Auftreten der ersten Teilentladungsimpulse (Teilentladungseinsetz) und dem elektrischen Durchschlag liegen dabei im Bereich einiger Sekunden. In einigen wenigen Fällen wurden auch längere Zeiträume bis zu 3 min unter der Einwirkung von Teilentladungen beobachtet, bevor es zum Durchschlag der Isolierstrecke kam. Das Auftreten permanenter Teilentladungen über einen längeren Zeitraum, das nicht zu einem Durchschlag der Isolierung führte, konnte bei

keinem Prüfling beobachtet werden. Die Tatsache, dass die im Spannungssteigerungsversuch mit $\Delta U / \Delta t = 500 \text{ V} / 30 \text{ min}$ (Versuchsreihe (a) und (b)) ermittelten Durchschlagspannungen stets den Teilentladungseinsetzspannungen entsprechen, erklärt die Abhängigkeit zwischen Durchschlagfeldstärke und Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von Silikongel bei stark inhomogener Feldbelastung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Silikongel bei der Belastung durch stark inhomogene Felder ($1/\eta = 22$) im Gegensatz zur Belastung durch homogene Felder (vgl. 4.3.1) eine Abhängigkeit zwischen der Durchschlagfeldspannung und der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit aufweist. Verantwortlich für dieses Verhalten sind Degradationsprozesse, die im stark inhomogenen Feld im Isolierstoff unter Einwirkung von Teilentladungen ablaufen und in kürzester Zeit zum Durchschlag der Isolierstrecke führen.

Aufgrund der Tatsache, dass nach Erreichen der Teilentladungseinsetzfeldstärke stets nach kurzer Einwirkdauer unter Teilentladungen der Durchschlag eintritt, wurden weitere Versuchsreihen mit veränderter Spannungssteigerungsgeschwindigkeit zur Ermittlung der Lebensdauerkenlinie (vgl. Abb. 4.51) nicht als erkenntniserweiternd angesehen. Stattdessen wurden auf der Basis der hier ermittelten Ergebnisse Konstantspannungsversuche mit langen Belastungszeiten durchgeführt, um statistisch gesicherte Aussagen Stehspannungspegel bzw. zulässige Betriebsfeldstärken treffen zu können.

4.3.2.2 Konstantspannungsversuche ($1/\eta = 22$)

Auch diese Untersuchungen wurden jeweils bei Raumtemperatur und Normalbedingungen sowie unter direkter Wasserexposition durchgeführt. Für jede Versuchsreihe wurden zur Gewährleistung der statistischen Unabhängigkeit Prüflinge im Neuzustand eingesetzt. Dies ist entscheidend, denn die Verwendung von Prüflingen, die aus Versuchsreihen stammen, bei denen diese einer geringeren Spannungsbelastung ausgesetzt wurden und keinen Durchschlag erlitten haben, könnte aufgrund potentieller Vorschädigungen oder aber eintretender Konditionierungseffekte zu einer starken Verfälschung der Untersuchungsergebnisse führen.

Abb. 4.55 zeigt den Lebensdauerprüfstand, der speziell für diese Art von Untersuchungen entwickelt wurde und eine gleichzeitige Prüfung von zwanzig Proben ermöglicht. Beim Versagen einer Probe wird diese automatisch von der Hochspannung getrennt und die Ausfallzeit registriert. Eine kontinuierliche Erfassung der Teilentladungsaktivität während der Belastung wurde aufgrund des hohen Grundstörpegels des Versuchsaufbaues, nicht als zweckmäßig angesehen.

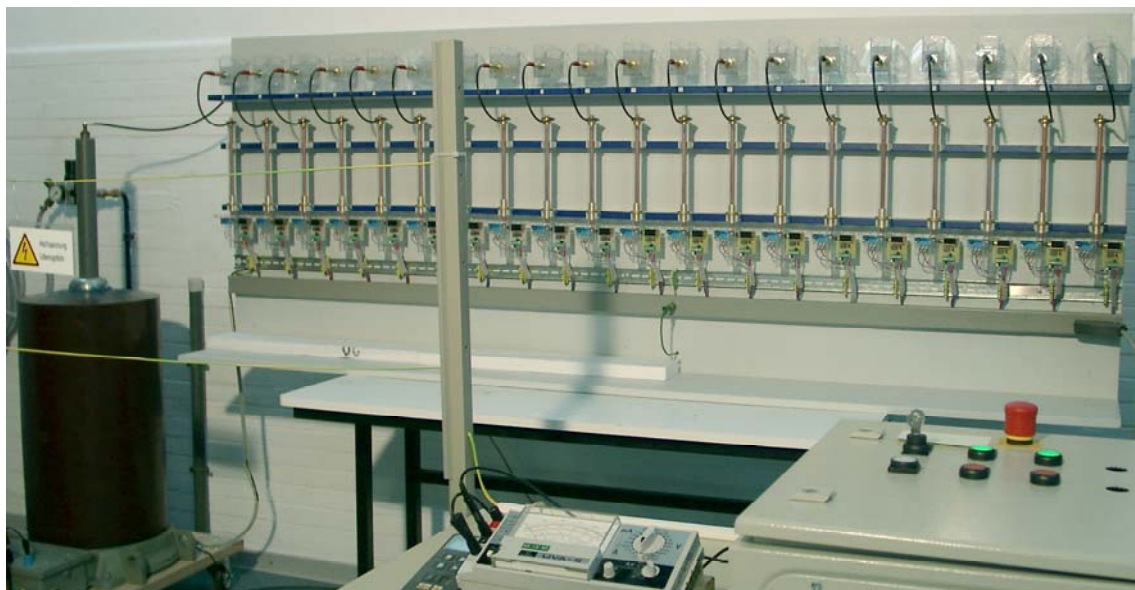


Abb. 4.55: Prüfstand zur Erfassung der Ausfallszeiten von unter elektrischer Beanspruchung stehenden Prüflingen im Parallelbetrieb

Die für diese Untersuchung relevanten Prüfspannungen ergaben sich aus den im Kurzzeitversuch (siehe 4.3.2.1, Abb. 4.54, Versuchsreihe (b)) ermittelten Durchschlagspannungen, die bei dieser Untersuchung stets den Teilentladungseinsetzspannungen entsprachen. Dabei beträgt die kleinste ermittelte Durchschlagspannung 11 kV , was einem maximalen Scheitelwert der Feldstärke an der Nadelspitze von $E_{max} = 114\text{ kV/mm}$ entspricht. Andererseits hielt keiner der Prüflinge einer Spannungsbeanspruchung von mehr als $14,5\text{ kV}$ ($E_{max} = 151\text{ kV/mm}$) stand. Basierend auf diesen Daten wurde die erste Prüfspannung zu 10 kV ($E_{max} = 100\text{ kV/mm}$) gewählt. Da dieser Spannungswert unterhalb der kleinsten im Kurzzeitversuch (siehe 4.3.2.1, Abb. 4.54, Versuchsreihe (a), (b)) ermittelten Durchschlagspannung liegt, wurden hier keine bzw. nur eine sehr geringe Anzahl von Ausfällen erwartet, sofern es zu keiner Änderung im Alterungsverhalten kommt. Erwartungsgemäß hielten alle Prüfkörper dieser Beanspruchung für mehr als 5000 h stand. Danach wurde der Versuch abgebrochen.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die nach Abbruch des Konstantspannungsversuches im Spannungssteigerungsversuch ($\Delta U / \Delta t = 1\text{ kV/s}$) ermittelten Durchschlagspannungen deutlich höher lagen, als die von Prüflingen im Neuzustand. Der erste Ausfall eines Prüflings wurde bei einer Spannung von 14 kV registriert. Die größte Anzahl von Ausfällen erfolgte bei 16 kV , was deutlich über den im Kurzzeitversuch sowie im Rampentest ermittelten Werten liegt (siehe 4.3.2.1, Abb. 4.54, Versuchsreihe (c)). Dieses Verhalten deutet auf einen Konditionierungseffekt hin, was die Notwendigkeit für jede Versuchsreihe, elektrisch unbelastete Silikongel-Proben im Neuzustand einzusetzen, unterstreicht.

Dieser Konditionierungseffekt könnte auf der Migration niedermolekularer Bestandteile aus dem Isolierstoffvolumen in den Bereich des elektrisch hoch beanspruchten Volumens vor der Nadelspitze beruhen. Besonders die Migration von unvernetztem Polydimethylsiloxan könnte zum Ausfüllen mikroskopischer Strukturinhomogenitäten im Werkstoff im Bereich der Nadelspitze sowie an der Grenzfläche zur Elektrode führen und damit eine Erhöhung der elektrischen Festigkeit in diesem Gebiet bewirken. Das Auftreten eines derartigen Konditionierungseffektes wird auch bei Silikongummi beobachtet [9].

Bei der nächsten Versuchsreihe erfolgte die Belastung mit einer Spannung von 12 kV ($E_{max} = 125\text{ kV/mm}$), wobei bereits nach kurzer Zeit das Versagen einzelner Prüflinge registriert wurde. Die Ausfallzeiten für die Prüflinge bei Raumtemperatur und Normalbedingungen betragen 1 min , 2 min , 5 min , 9 min sowie 270 h und im Falle der Wasserlagerung 1 min , 12 min , 246 h sowie 295 h . Nach einer weiteren Laufzeit von 5000 h wurde der Versuch abgebrochen, ohne dass es zuvor zu weiteren Ausfällen kam. Auffällig sind die großen Streuungen der Ausfallzeiten, die verdeutlichen, dass nicht nur mit sofortigen Ausfällen (Bereich von Sekunden bis Minuten), sondern auch noch nach längerer Belastungsdauer mit Ausfällen zu rechnen ist. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass zusätzliche äußere Einflüsse ursächlich für die gehäuft auftretenden Ausfälle von Prüflingen bei 246 h , 295 h sowie 270 h sind. Beispielsweise wäre es denkbar, dass diese Ausfälle durch Schwankungen der Netzspannung initiiert wurden. Eine Belastung von 15 kV ($E_{max} = 156\text{ kV/mm}$) führte erwartungsgemäß in kürzester Zeit (teilweise schon vor dem Erreichen des Prüfspannungspegels) zum Versagen aller Prüflinge.

Dieses Ergebnis zeigt, dass für die eingesetzte Elektrodengeometrie eine Spannung von 10 kV und damit verbunden eine Maximalfeldstärke an der Nadelspitze mit einem Scheitelwert von ca. 100 kV/mm existiert, bei der nicht mit einem Versagen der Isolierung zu rechnen ist. Es ist daher davon auszugehen, dass bei dieser Belastung keine bzw. nur geringe Alterungsprozesse ablaufen. Auch der im Kurzzeitversuch (siehe 4.3.2.1) gefundene Zusammenhang, nachdem die Durchschlagspannung stets der Teilentladungseinsetzspannung entspricht und die bei allen untersuchten Prüflingen mehr als 10 kV beträgt, stützt diese Aussage. Bei Überschreitung dieser Spannung ist jedoch in kürzester Zeit mit einem elektrischen Versagen der Isolierung zu rechnen. Ein Einfluss von Feuchtigkeit auf das Durchschlagverhalten von Silikongel im stark inhomogenen Feld ($1/\eta = 22$) konnte weder im Spannungssteigerungs- noch im Konstantspannungsversuch festgestellt werden.

4.3.2.3 Lebensdauerabschätzung auf Basis von Kurzzeitversuchen ($1/\eta = 154$)

Da sich die bisher getroffenen Aussagen über das elektrische Alterungsverhalten von Silikongel im stark inhomogenen elektrischen Feld ausschließlich auf die Verwendung einer Spitze-Platte-Anordnung mit einem Inhomogenitätsgrad von $1/\eta = 22$ bezogen, blieb festzustellen, inwieweit eine Erhöhung des Inhomogenitätsgrades das Alterungsverhalten beeinflusst. Dazu wurde bei unveränderter Schlagweite eine Nadel mit einem Rundungsradius der Nadelspitze von $r_s = 5 \mu\text{m}$ gewählt, woraus sich ein Inhomogenitätsgrad von $1/\eta = 154$ ergibt (siehe 3.1). Die Untersuchungen wurden bei Raumtemperatur und Normalbedingungen mit einer stufenförmigen Spannungsgeschwindigkeit von $\Delta U/\Delta t = 0,5 \text{ kV}/30 \text{ min}$ unter Verwendung von fünf Prüflingen durchgeführt.

Bei allen fünf Prüflingen setzen ab einer Spannung zwischen $8,5 \text{ kV}$ und $10,5 \text{ kV}$, was einem maximalen Scheitelwert der Feldstärke an der Nadelspitze zwischen $616 \text{ kV}/\text{mm}$ und $761 \text{ kV}/\text{mm}$ entspricht, über mehrere Minuten permanente Teilentladungen ein. Bei vier der fünf Prüflinge führten diese Teilentladungen nicht zum Durchschlag, sondern klangen nach einiger Zeit wieder vollständig ab. Lediglich ein Prüfling versagte nach dem erstmaligen Erreichen der Teilentladungseinsetzspannung von $10,5 \text{ kV}$ nach 29-minütiger Einwirkung von Teilentladungen. Danach erfolgte eine kontinuierliche Steigerung der Prüfspannung bis zum erneuten Teilentladungseinsatz, der bei zwei weiteren Prüflingen den Durchschlag bei 11 kV und $11,5 \text{ kV}$ einleitete. Bei den verbleibenden zwei Prüflingen kam es erneut zum Abklingen der Teilentladungsaktivität. Der Durchschlag dieser beiden Prüflinge erfolgte nach einer neuerlichen Spannungssteigerung unter der Einwirkung von Teilentladungen bei 11 kV und 13 kV .

Diese Untersuchung zeigt, dass es aufgrund des erhöhten Inhomogenitätsgrades zu einer Änderung im Durchschlagverhalten von Silikongel kommt. Im Gegensatz zu den Untersuchungen, bei denen eine Elektrodenanordnung mit einem Inhomogenitätsgrad von $1/\eta = 22$ eingesetzt wurde, treten hier erstmals permanente Teilentladungen auf, die keinen unmittelbaren Durchschlag zur Folge haben. Zudem zeigt sich, dass Silikongel mit steigendem Inhomogenitätsgrad der Beanspruchung immer höheren lokalen Feldbelastungen standhält.

Damit wird deutlich, dass das Durchschlagverhalten von Silikongel eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Inhomogenitätsgrad bzw. Homogenitätsgrad der feldprägenden Elektroden aufweist. Abb. 4.56 zeigt die 63%-Quantile der Durchschlagfeldstärke mit zugehörigen 95%-Konfidenzbereichen in Abhängigkeit des Homogenitätsgrades für $\eta = 0,0065$, $\eta = 0,0457$ (siehe 4.3.2.1) sowie $\eta = 0,907$ (vgl. 4.2.1.7, Abb. 4.36, $s = 3 \text{ mm}$).

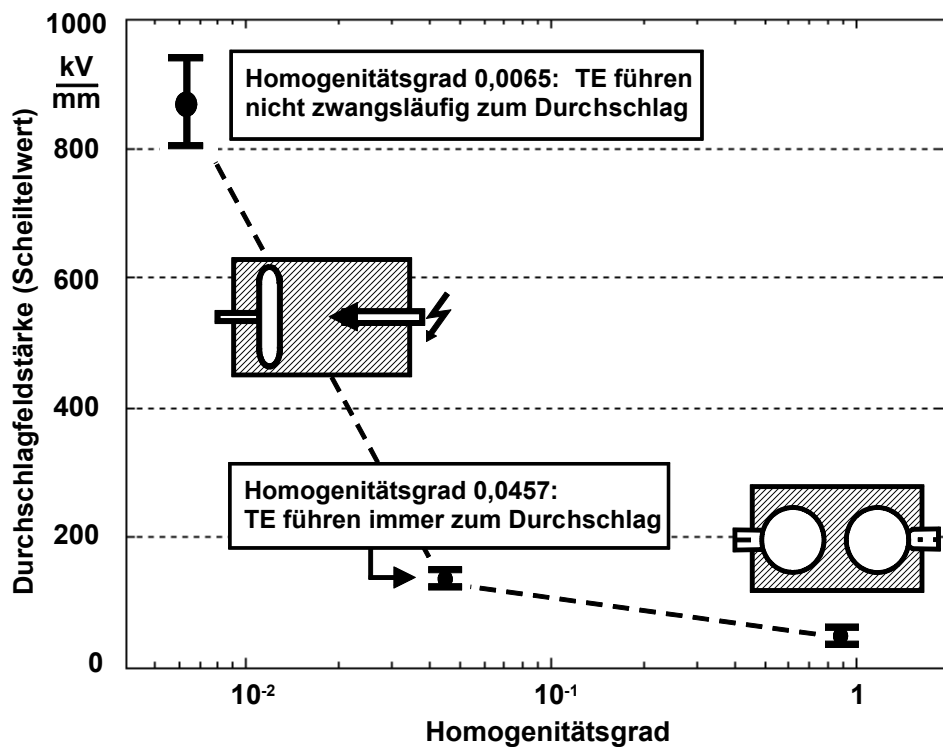


Abb. 4.56: 63%-Quantile der Durchschlagfeldstärke (Scheitelwert der maximalen Feldstärke) mit zugehörigen 95%-Konfidenzbereichen in Abhängigkeit des Homogenitätsgrades der feldprägenden Elektrodenanordnung

Obwohl der in Abb. 4.56 dargestellte Sachverhalt aufgrund von Unterschieden in der Versuchsdurchführung bei den einzelnen Versuchsreihen (Stichprobenumfang, Spannungssteigerungsgeschwindigkeit) nur eine eingeschränkte Aussagekraft besitzt, kommt dennoch die Signifikanz der beschriebenen Abhängigkeit qualitativ klar zum Ausdruck. Eine wesentliche Ursache für den Unterschied im Durchschlagverhalten bei homogener und stark inhomogener Feldbelastung ist in der verringerten statistischen Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Fehlstellen im Isolierstoff im elektrisch hoch belasteten Bereich vor der Nadelspitze (vgl. 4.2.2) zu sehen.

4.3.2.4 Konstantspannungsversuche ($1/\eta = 154$)

Wesentlich für das Materialverständnis ist der Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Teilentladungen und den daraus resultierenden Materialschädigungen sowie deren zeitliche Entwicklung ("Electrical-Treeing", Kanalaufbau) bei Verwendung der Elektrodenanordnung mit einem Inhomogenitätsgrad von $1/\eta = 154$. Dazu wurden Untersuchungen mit transparenten Silikongel-Proben (siehe 2.1) durchgeführt, was eine direkte Beobachtung der im Isolierstoff stattfindenden Vorgänge ermöglichte.

Teilentladungsaktivität und optische Beobachtung

Bei dieser Untersuchung wurde die Prüfwechselfspannung stetig bis zum Auftreten permanenter Teilentladungen gesteigert. Danach erfolgte bei konstanter Spannung eine kontinuierliche Aufzeichnung der Teilentladungsaktivität. Die Versuchsdurchführung erfolgte unter Verwendung von fünf Prüflingen bei Raumtemperatur und Normalbedingungen. *Abb. 4.57* zeigt beispielhaft anhand eines Prüflings das für diese Art von Belastung charakteristische Teilentladungsverhalten.

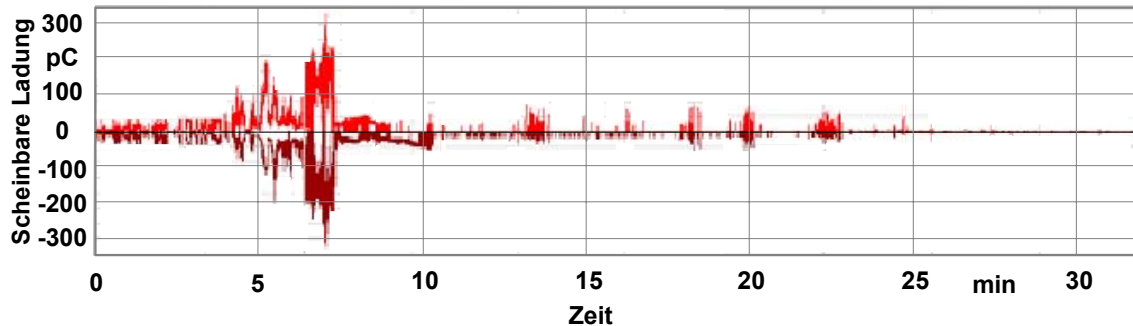


Abb. 4.57: *Teilentladungsaktivität (scheinbare Ladung über der Zeit) bei konstanter Prüfspannung nach Erreichen der Teilentladungseinsetzspannung (Inhomogenitätsgrad der Spitze-Platte-Anordnung $1/\eta = 154$)*

Die Teilentladungseinsetzspannung betrug bei diesem Prüfling 8 kV . Anfänglich wurden Teilentladungsimpulse mit Maximalwerten der scheinbaren Ladung von $q_s = 350\text{ pC}$ detektiert. Nach einigen Minuten sanken diese auf einen Pegel in der Größenordnung von $q_s = 50\text{ pC}$ und blieben schließlich nach einiger Zeit vollständig aus. Der Abbruch der Untersuchung erfolgte nach 220 h , ohne dass ein erneutes Auftreten von Teilentladungen registriert wurde. Die in *Abb. 4.58* dargestellte lichtmikroskopische Aufnahme, die im Anschluss an die Prüfung angefertigt wurde, lässt eine deutliche Degradation des Silikongels im Bereich der Nadelspitze erkennen. Weiterhin erkennbar ist die Bildung von Blasen (Bereich (a)) und die Ausbildung einer in Richtung der Gegenelektrode gerichteten Zerstörungserscheinung („Tree“, Bereich (b)).

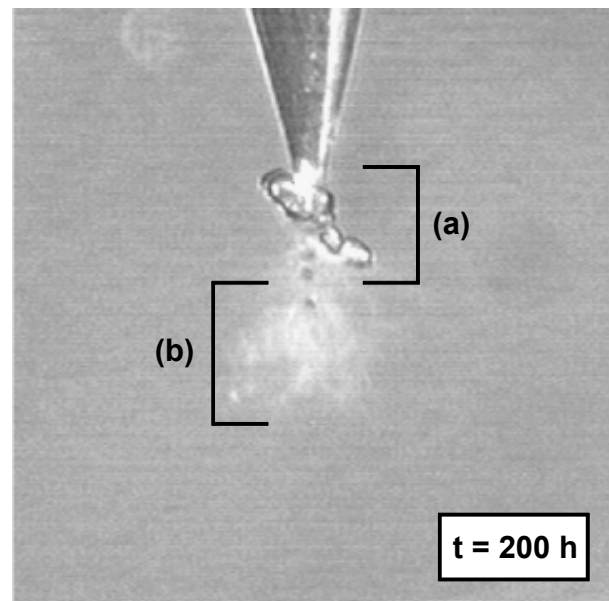


Abb. 4.58: *Zerstörungsstruktur an der Nadelspitze (60-fache Vergrößerung)*

Ein identisches Verhalten wurde an drei weiteren Prüflingen beobachtet, bei denen die Teilentladungseinsetzspannung $8,5\text{ kV}$, $8,9\text{ kV}$ sowie $9,2\text{ kV}$ betrug. Nach dem Abklingen der Teilentladungen, deren Einwirkdauer mehrere Minuten bis Stunden betrug, wurde das Material im Gebiet der Nadelspitze auf Schädigungen hin untersucht. Dabei wurden bei allen Prüflingen Schädigungsstrukturen ähnlich der in *Abb. 4.58* dargestellten gefunden. Nach erneuter elektrischer Belastung über einen Zeitraum von circa 200 h , bei der an keinem der Prüflinge erneute Teilentladungsimpulse detektiert wurden, erfolgte eine wiederholte Bewertung der Schädigungsstruktur. Hierbei wurden keine visuell wahrnehmbaren Veränderungen der Schädigungsbilder festgestellt.

Die Entstehung der Zerstörungsstrukturen ist darauf zurückzuführen, dass die elektrische Festigkeit des Isolierstoffes im Nahbereich der Nadelspitze überschritten wurde und es zum Aufbruch erster mit Zersetzungsgasen gefüllter Entladungskanäle kam. Die dabei in den Kanälen auftretenden Gasentladungen wurden extern als Teilentladungen detektiert. Aus der Korrelation zwischen der Teilentladungsaktivität und der Ausbildung der Zerstörungsstrukturen an der Nadelspitze geht hervor, dass die Ausbildung dieser Strukturen ausschließlich unter Einwirkung von Teilentladungen stattfindet. Dabei ist davon auszugehen, dass die beobachtete Blasenbildung (*Abb. 4.58, Bereich (a)*) von dem anfänglich hohen Energieeintrag (hohe Pegel der scheinbaren Ladung, *Abb. 4.57*) in den Werkstoff herrührt. In der Regel scheint nach dieser anfänglich starken Teilentladungsaktivität ein Stabilisierungsprozess im Isolierstoff stattzufinden, was durch ein dauerhaftes Ausbleiben der Teilentladungsaktivität zum Ausdruck kommt. Eine Erklärung für dieses Verhalten wird im nächste Abschnitt gegeben.

Lediglich bei einem Prüfling wurde ein abweichendes Verhalten beobachtet. Hier kam es nach dem Erreichen der Teilentladungseinsetzspannung von $9,5\text{ kV}$ und einer 16 -minütigen Einwirkung von Teilentladungsimpulsen mit schwankender Intensität ($q_s = 120\text{ pC}$ bis 450 pC) zum Durchschlag der Isolierstrecke.

Optische Beobachtung über große Zeiträume

Um Aussagen über sichere Stehspannungen für die Elektrodenanordnung mit einem Inhomogenitätsgrad von $1/\eta = 154$ treffen zu können und die zeitliche Entwicklung potentieller von der Nadelspitze ausgehender Zerstörungsstrukturen über ausgedehnte Zeiträume zu beobachten, wurden Konstantspannungsversuche durchgeführt. Zur Dokumentation von Alterungserscheinungen wurden nach ausgewählten Alterungsschritten mikroskopische Aufnahmen der Nadelspitze angefertigt, um aus deren Vergleich eine Abschätzung über die Zerstörungsgeschwin-

4.3 Alterungsverhalten

digkeit und damit über die Gefahr, die von potentiellen Zerstörungsstrukturen ausgeht, vornehmen zu können. Die Untersuchung wurde an jeweils fünf Prüflingen bei Raumtemperatur und Normalbedingungen sowie unter Einwirkung von Feuchtigkeit (Wasserexposition) durchgeführt.

Die Wechsellastspannung wurde zu 8 kV gewählt, was der für diese Elektrodengeometrie kleinsten bisher ermittelten Teilentladungseinsetzspannung entspricht. Daher war das Auftreten von Zerstörungserscheinungen sowie ein Durchschlag der Isolierung nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Nach 200 h kam es zu einem Ausfall eines unter Feuchtigkeitseinfluss stehenden Prüflings. Alle übrigen Prüflinge hielten bis zum Abbruch der Untersuchung nach 5000 h der elektrischen Belastung stand. Bei der nach 2500 h durchgeführten Untersuchung des Isolierstoffbereiches vor der Nadelspitze konnten bei den verbleibenden vier Prüflingen, die unter dem Einfluss von Feuchtigkeit standen, deutliche Zerstörungserscheinungen in diesem Bereich festgestellt werden.

Abb. 4.59a zeigt beispielhaft den Zustand nach 2500 h Belastung, *Abb. 4.59b* den nach 5000 h . Der visuelle Vergleich der Aufnahmen lässt keine Veränderung der Struktur an der Nadelspitze erkennen, was auf kein bzw. nur sehr geringes Fortschreiten der Zerstörung schließen lässt. Dieses Verhalten trifft in gleicher Weise auf die übrigen drei unter dem Einfluss von Feuchtigkeit stehenden Prüflinge zu. Dagegen wurden nach 2500 h Belastung der Prüflinge unter trockenen Bedingungen erwartungsgemäß keine bzw. nur in einem Fall sehr geringe Zerstörungserscheinungen im Bereich der Nadelspitze festgestellt. Auch hier kam es nach weiteren 2500 h elektrischer Belastung zu keiner Veränderung des Zustandes des Isolierstoffes im Bereich der Nadelspitze.

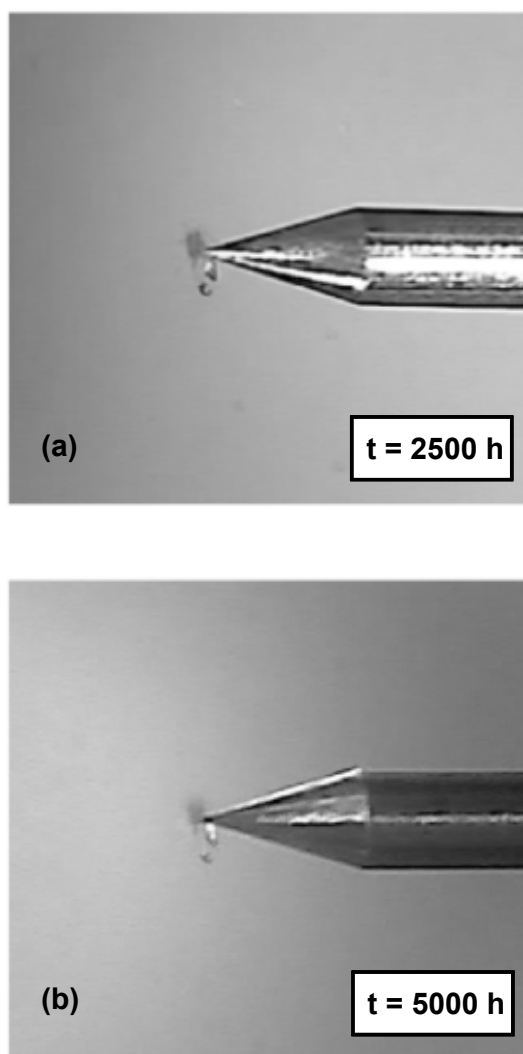


Abb. 4.59: Zerstörungsstrukturen an der Nadelspitze eines unter dem Einfluss von Feuchtigkeit stehenden Prüflings (25-fache Vergrößerung)

Dieses Ergebnis zeigt, dass bei Anwesenheit von Feuchtigkeit im gleichen Belastungszeitraum wesentlich ausgeprägtere Zerstörungsstrukturen entstehen als unter trockenen Bedingungen. Die Anwesenheit von Feuchtigkeit im stark inhomogenen Feld scheint die Zerstörungsprozesse zu begünstigen.

Diskussion

Im Folgenden sollen Ursachen, die für die festgestellte Resistenz des Silikongels gegen das Fortschreiten der Zerstörungsstrukturen ("Electrical Trees") verantwortlich sein könnten, dargestellt werden.

Die in *Abb. 4.58* dargestellte Struktur ("Electrical Tree") vor der Nadelspitze erscheint hell, besitzt jedoch vereinzelte dunkle Einschlüsse, bei denen es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um Kohlenstoff handelt (*vgl. 4.2.1.8*). Es ist jedoch davon auszugehen, dass es sich dabei um eine nicht leitfähige Struktur handelt. Diese Vermutung stützt sich auf die nachfolgend dargestellten Indizien.

Die Leitfähigkeit dieser Strukturen (Kanäle) ist entscheidend für deren Ausbreitungsgeschwindigkeit [63]. Würde es sich bei den im Silikongel gebildeten Kanälen um elektrisch leitfähige Strukturen handeln, so würden die Enden der Kanäle das Potential der Nadelspitze annehmen und damit wiederum Ausgangspunkte für die Entstehung von Teilentladungen darstellen. Der Mechanismus würde dazu führen, dass die leitfähigen Kanäle in Richtung Gegenelektrode fortwachsen und bei deren Erreichen den Durchschlag der gesamten Isolierstrecke zur Folge haben. Die Tatsache, dass die Ausbreitung der anfänglich entstandenen Strukturen zum Stillstand kommt, spricht daher gegen deren Leitfähigkeit. Darüber hinaus stützt der chemische Aufbau von Silikongel die Vermutung, dass es sich hierbei um nichtleitfähige Strukturen handelt. Silikongel besteht im Wesentlichen aus einem Silizium-Sauerstoff-Gerüst, das nur wenig Kohlenstoff in den umgebenden Methyl-Gruppen enthält (*siehe 2.1*). Daher kann aufgrund von Entladungen nur verhältnismäßig wenig Kohlenstoff von den Methyl-Gruppen im Silikon freigesetzt werden. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Silikongel und anderen Polymerwerkstoffen (z.B. Polyethylen), die ein Kohlenstoffgerüst besitzen und aufgrund der damit verbundenen größeren Menge an freisetzbarem Kohlenstoff leitfähige Strukturen ausbilden können, die nach dem oben beschriebenen Mechanismus in Richtung Gegenelektrode fortwachsen können. Zudem zeigten Widerstandsmessungen an Entladungskanälen nach einer Regenerationsphase, dass diese keine elektrische Leitfähigkeit besitzen und darüber hinaus sogar eine gewisse elektrische Durchschlagfestigkeit aufweisen (*vgl. 4.2.1.8*).

Daher ist anzunehmen, dass die Feldverhältnisse an den Kanalenden überwiegend von Raumladungen bestimmt werden, die sich durch Gasentladungsprozess im Kanal ansammeln. Es kann davon ausgegangen werden, dass an den Kanalenden geringere Feldstärken herrschen als bei vergleichbaren leitfähigen Kanalwänden, was durch das Nichtforschieben der Zerstörung dokumentiert wird. Das anfänglich beobachtete Kanalwachstum wird demnach durch die auf die Kanalwände auftreffenden, energiereichen Elektronen bestimmt. Dabei ist es vorstellbar, dass beim Auftreffen von energiereichen Ladungsträger auf den Werkstoff anorganische Zersetzungsprodukte entstehen, die ihrerseits eine gewisse Barrierewirkung gegenüber erneut auftreffenden Elektronen haben. Auch das Aufspalten von Silikonelastomeren in niedermolekulare Siloxane, die die Entladungsstrukturen wieder ausfüllen und so einer weiteren Zerstörung des Elastomers (Kanalwachstum) durch eine teilweise Absorption der Elektronen-Stoßenergie entgegenwirken, wäre ein weiterer denkbarer Effekt. Gestützt wird diese Hypothese durch, die von *OESTERHELD* durchgeführten chemischen Analysen von Material aus dem Bereich von Nadel-Elektroden von teilentladungsgealterten Silikongummi-Proben, bei denen im Unterschied zu unbelasteten Proben ein hoher Anteil an niedermolekularen Silikonen nachwiesen werden konnte [9].

Besonders der im Silikongel enthaltende hohe Anteil an unvernetzten Polydimethylsiloxan (*siehe 2.1*), der den Werkstoff von Silikongummi abgrenzt, könnte entstandene Entladungskanäle durch Migration wieder auffüllen. Der in *Kapitel 4.3.2.2* beschriebene Konditionierungseffekt, der sich im stark inhomogenen Feld nach einer längeren Beanspruchungsdauer einstellt und einen deutlichen Anstieg der Durchschlagfestigkeit des Silikongels herbeiführt, ist als Indiz dafür zu werten, dass es nach dem Abklingen der Teilentladungsaktivität im Werkstoff zu derartigen Prozessen kommen kann. Weiterhin kann die hohe Gasdurchlässigkeit von Silikongel (*siehe 4.4.1*), die für ein Entweichen entstandener gasförmiger Spaltprodukte aus den Entladungsstrukturen optimale Voraussetzungen bietet, als weiterer für die Verschließung von entstandenen Entladungsstrukturen begünstigender Faktor angesehen werden.

Wenngleich bei allen Untersuchungen, bei denen Silikongel stark inhomogenen Feldern ausgesetzt wurde, kein statistischer Unterschied zwischen den bei Normalbedingungen und den unter Einwirkung von Feuchtigkeit ermittelten Durchschlagspannungen festgestellt wurde, so deutet das im Konstantspannungsversuch beobachtete Verhalten dennoch Unterschiede an. Die Tatsache, dass die Prüflinge die in Kontakt zu Feuchtigkeit standen und einer Belastungsfeldstärke, die der kleinsten unter trockenen Bedingungen ermittelten Teilentladungseinsetzungsfeldstärke ent-

sprach, ausgesetzt wurden, im Gegensatz zu Prüflingen unter trockenen Bedingungen deutliche Degradationserscheinungen aufwiesen, zeigt offensichtlich, dass Feuchtigkeit die Zerstörungsprozesse begünstigt.

Dieses Verhalten könnte auf der Wirkung eines andersartigen Zerstörungsmechanismus, dem so genannten "Water-Treeing" beruhen. "Water-Trees" sind bisher an allen organischen Kabelisolierwerkstoffen einschließlich des öl- oder masseimpregnierten Papiers festgestellt worden [64]. Der Mechanismus des "Water-Treeings" unterscheidet sich grundlegend von dem des "Electrical-Treeings" insofern, als es sich dabei um einen elektrochemischen Zerstörungsmechanismus handelt. "Water-Trees" entstehen nach heutiger Vorstellung wenn Wassermoleküle durch Dielektrophorese (Kraftwirkung eines inhomogenen elektrischen Feldes auf polare Moleküle) im Kunststoff in Richtung steigender Feldstärke migrieren. Daraus resultiert eine Konzentration von Feuchtigkeit in der Umgebung feldstärkerhöherer Störstellen. Infolge zusätzlicher Alterungsprozesse in Form intensiver lokaler Oxidation kann es dann zur Bildung von "Water-Trees" kommen. Insbesondere die Tatsache, dass für die Bildung von "Water-Trees" im Vergleich zu "Electrical-Trees" wesentlich niedrigere Startfeldstärken notwendig sind, wie Untersuchungen an PE-/VPE-isolierten Kabeln gezeigt haben [58], würde für einen derartigen Mechanismus sprechen.

Allerdings lässt sich die aus *Abb. 4.59* ersichtliche zusätzliche Bildung von Blasen im Bereich der Nadelspitze, die jedoch in dieser Art nur an einem der unter Feuchtigkeit stehenden Prüflinge beobachtet wurde, nicht durch den Mechanismus des "Water-Treeings" erklären. Vielmehr ist auch hier davon auszugehen, dass diese Blasen unter Einwirkung von Teilentladungen entstanden sind (*vgl. Abb. 4.58*). Eine endgültige Aussage darüber, welche Mechanismen für die begünstigte Entstehung von Zerstörungsstrukturen im Silikongel unter dem zusätzlichen Einfluss von Feuchtigkeit letztlich verantwortlich sind, konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht erbracht werden, da dies sehr aufwendige Nachweismethoden (z.B. Konstantspannungsversuche mit Laufzeiten bis hin zu mehreren Jahren) erfordern würde, was im Rahmen dieser Arbeit nicht zu leisten war.

Eine Abschätzung der Gefahr für die Betriebssicherheit von Silikongel-Isolierungen, die von den unter Feuchtigkeitseinfluss entstandenen Strukturen ausgeht, kann daher nur anhand der Fortschrittsrate mit der sich die Struktur in Richtung Gegenelektrode ausbreitete, erfolgen. Die Bildung dieser Strukturen erfolgte ebenso wie unter trockenen Bedingungen in einem frühen Stadium der Alterung. Danach wurden über lange Zeiträume hinweg keine erkennbaren Veränderungen

der Schädigungsstrukturen festgestellt. Aufgrund dieser Tatsache kann man davon ausgehen, dass auch unter dem Einfluss von Feuchtigkeit keine weitere Zerstörung stattfindet bzw. potentielle Zerstörungsprozesse nur noch sehr langsam ablaufen.

Anwendungsbezogene Bewertung der Ergebnisse

Die Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Silikongel unter Normalbedingungen bei Belastung durch stark inhomogenen Felder zeigen, dass Teilentladungen zu einer starken Schädigung des Isolierstoffes führen. Bleibt die lokale elektrische Belastung des Materials dagegen unterhalb der Teilentladungseinsatzfeldstärke, so zeigt Silikongel keine nachweisbare elektrische Alterung. Daher ist die Auslegung von Isolierungen derart vorzunehmen, dass die lokale Feldbelastung des Silikongels unterhalb der Teilentladungseinsatzfeldstärke liegt, andernfalls ist mit einem sofortigen Ausfall der Isolierung zu rechnen.

Für eine Bauteilprüfung bedeutet dies: Zeigen Silikongel-Isolierungen unter trockenen Bedingungen in einer Teilentladungsprüfung bei einer Spannung größer als die maximale Betriebsspannung keine Entladungen bzw. klingen diese ab und bleiben über längere Zeit aus, so kann davon ausgegangen werden, dass im Betrieb selbst bei Vorhandensein feldstärkerhöhender Fehlstellen keine nennenswerte elektrische Alterung stattfindet. D.h. ebenso wie für Silikonelastomere in EHV-Kabelgarnituren gefordert [7], ist die Teilentladungsfreiheit eines Silikongel-isolierten Bauteils zu verlangen. Aufgrund der gefundenen Indizien, dass die Einwirkung von Feuchtigkeit bei stark inhomogener Feldbelastung eine zerstörungsbe günstige Wirkung besitzt, ist beim derzeitigen Stand des Wissens anzuraten, den Einfluss von Feuchtigkeit - soweit möglich - auszuschließen.

4.3.3 Alterungseffekte bei Einwirkung nichtelektrischer Größen

4.3.3.1 Temperatur

Zur Erkennung möglicher Alterungsprozesse aufgrund thermischer Langzeitbelastungen wurde Silikongel nach einer 5000-stündigen spannungslosen Lagerung bei 90°C auf verschiedene Alterungserscheinungen hin untersucht. Dabei konnte im visuellen Vergleich von thermisch belasteten mit thermisch unbelasteten Prüflingen eine Verfärbung des Silikongels festgestellt werden (*siehe Abb. 4.60*). Weiterhin ist nach der thermischen Belastung ein deutlicher Anstieg der Materialhärte sowie eine Abnahme der Adhäsionsfähigkeit feststellbar (*siehe 4.3.3.3*). Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass es im Material zu einer thermisch aktivierten chemischen Reaktion gekommen ist.

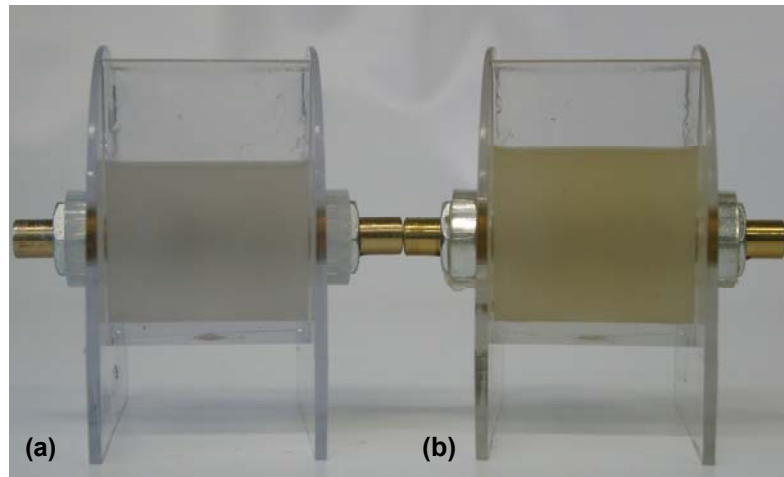


Abb. 4.60: *Silikongel nach 100-stündiger Lagerung bei 22°C und Normalbedingungen (a) sowie nach einer 5000-stündigen Lagerung im Wärmeschrank bei 90°C (b)*

Um mögliche Auswirkungen der beobachteten Alterungserscheinungen auf die elektrische Festigkeit von Silikongel festzustellen, wurden die Durchschlagspannungen von Prüflingen nach der thermischen Vorbelastung und einer sich daran anschließenden 24-stündigen Lagerung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen bestimmt und mit den Durchschlagspannungen von thermisch unbelasteten Prüflingen verglichen.

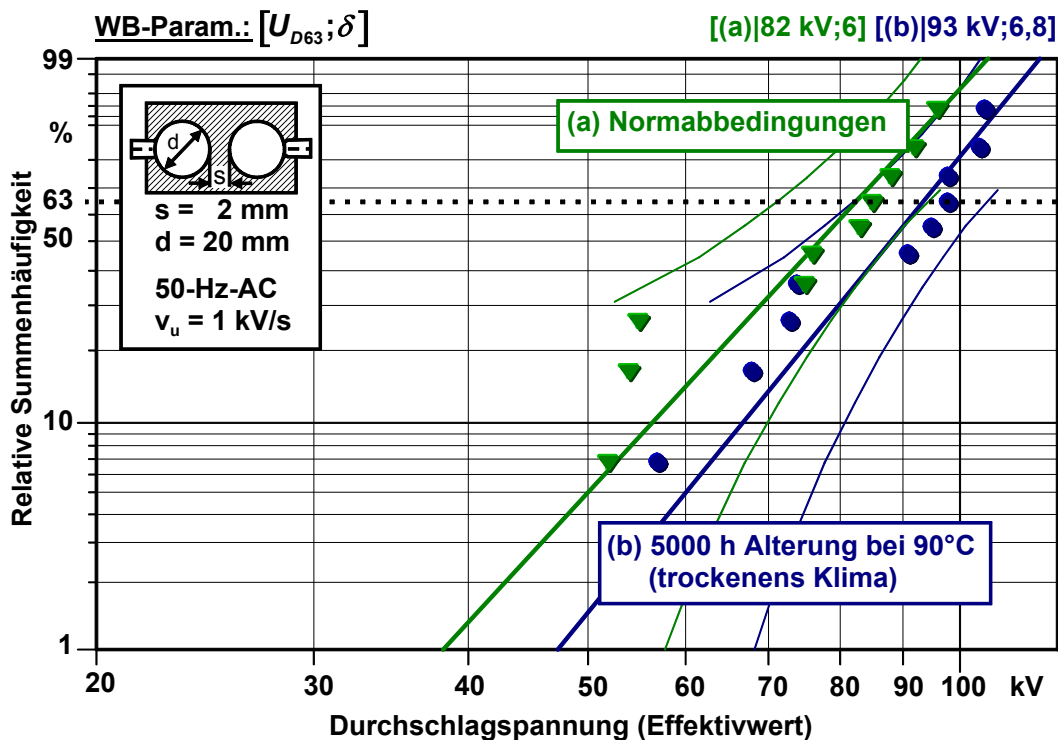


Abb. 4.61: *Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung von Silikongel nach 5000-stündiger thermischer Belastung bei 90°C sowie nach 100-stündiger Lagerung bei 22°C und Normalbedingungen*

Aus den in *Abb. 4.61* dargestellten Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung geht hervor, dass es aufgrund der thermischen Belastung und der damit verbundenen Materialveränderungen zu keiner Verminderung der Durchschlagspannung kommt. Vielmehr ist die 63-%-Durchschlagspannung des thermisch belasteten Silikongels gegenüber der des thermisch unbelasteten bei nahezu unveränderter Messwertstreuung um 13 % erhöht.

Die Ursache für die erhöhte Durchschlagspannung des thermisch belasteten Silikongels wird dabei im Wesentlichen auf zwei Effekte zurückgeführt. Einmal kann die Lagerung im trockenen Klima bei erhöhter Temperatur zu einer Verminderung des Feuchtigkeitsgehaltes im Silikongel führen. Ein direkter messtechnischer Nachweis hierfür konnte aufgrund von Unzulänglichkeiten in der Messtechnik bei der Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes von Silikongel nicht erbracht werden (*vgl. 4.2.1.5*). Allerdings konnte gezeigt werden, dass die elektrische Festigkeit von Silikongel, das in Kontakt zu Feuchtigkeit stand, durch Trocknung gesteigert werden kann (*siehe 4.2.1.5, Abb. 4.21*), was die hier geäußerte Vermutung stützt.

Zudem kann die erhöhte elektrische Festigkeit des Vulkanisates in dem aufgrund der thermischen Belastung stattfindenden Anstieg der Vernetzungsdichte (*siehe 4.3.3.3*) begründet sein. Untersuchungen zum Einfluss der Vernetzungsdichte auf die elektrische Festigkeit von Silikongel (*siehe 4.2.1.9*) zeigen, dass mit einem Anstieg der Vernetzungsdichte stets ein Anstieg der elektrischen Festigkeit verbunden ist. Eine detaillierte Aussage darüber, welcher der beiden Effekte das beschriebene Verhalten dominiert, würde weitergehende Untersuchungen erfordern, was jedoch den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde.

4.3.3.2 Feuchtigkeit

Eine 5000-stündige spannungslose Lagerung der Prüflinge in demineralisiertem Wasser führt zu einer Reduzierung der 63-%-Durchschlagspannung um 58 %. Die Darstellung der Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung findet sich in *Kapitel 4.2.1.5, Abb. 4.18*. Da jedoch ein signifikanter Festigkeitsverlust bereits nach wesentlich kürzeren Konditionierungszeiträumen auftritt, ist eine Unterscheidung zwischen einem Kurzzeit- und einem Langzeiteffekt nicht eindeutig möglich. Nach der Wasserlagerung kommt es auch hier zusätzlich zu einer deutlichen Veränderung der Adhäsionseigenschaften (*siehe 4.3.3.3*).

4.3.3.3 Härte und Adhäsionseigenschaften

Seine einzigartige Kombination aus elektrischen und mechanischen Eigenschaften grenzen den Werkstoff Silikongel deutlich von den meisten anderen Isolierstoffen

mit Festkörpercharakter ab. Insbesondere für Applikationen, bei denen neben einer hohen elektrischen Festigkeit und einer gewissen Formstabilität des Werkstoffes eine gute Anpassungsfähigkeit sowie Anhaftung an Oberflächen gefordert ist, sind Silikongele als besonders geeignet anzusehen. Daher sind neben den alterungsbedingten Änderungen der elektrischen auch zeit- und belastungsabhängige Änderungen der mechanischen Eigenschaften von Silikongel für die Auslegung von Isolierungen von großer Bedeutung. Da die Anpassungs- und Haftfähigkeit an Oberflächen durch die Materialhärte sowie die Adhäsionseigenschaften des Werkstoffes bestimmt werden, erfolgte zweckmäßigerweise die Bewertung des mechanischen Alterungsverhaltens anhand dieser beiden Größen.

(a), (b) Raumtemperatur und Normalbedingungen	Die Messung erfolgte nach einer 100-stündigen (a) sowie nach einer 5000-stündigen (b) Lagerung der Proben in einer staubfreien Umgebung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen.
(c) Thermische Belastung	Der Einfluss einer thermischen Belastung wurde durch eine 2500-stündige Lagerung der Proben im Wärmeschrank bei 90°C simuliert. Die Messung erfolgte bei Raumtemperatur.
(d) Feuchtigkeit	Die Messung erfolgte nach einer 1000-stündigen Lagerung der Proben in demineralisiertem Wasser bei 22°C. Nach Entnahme der Probe aus dem Wasserbad wurden die Proben 100 h staubfrei bei Raumtemperatur gelagert, um das Entweichen verbleibender Feuchtigkeit auf der Probenoberfläche zu gewährleisten.

Tab. 4.3: *Konditionierungs- und Prüfbedingungen zur Bewertung von zeit- und belastungsabhängigen Änderungen der mechanischen Eigenschaften von Silikongel*

Zur Erkennung von Alterungsprozessen wurden Härte sowie Adhäsionseigenschaften von Silikongel-Proben vor und nach der Alterung unter verschiedenen Umgebungsbedingungen bestimmt und bewertet. Der Ablauf der Untersuchungen ist in Tab. 4.3 zusammengefasst dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Messverfahrens und dessen Parametrierung findet sich in Kapitel 3.2.

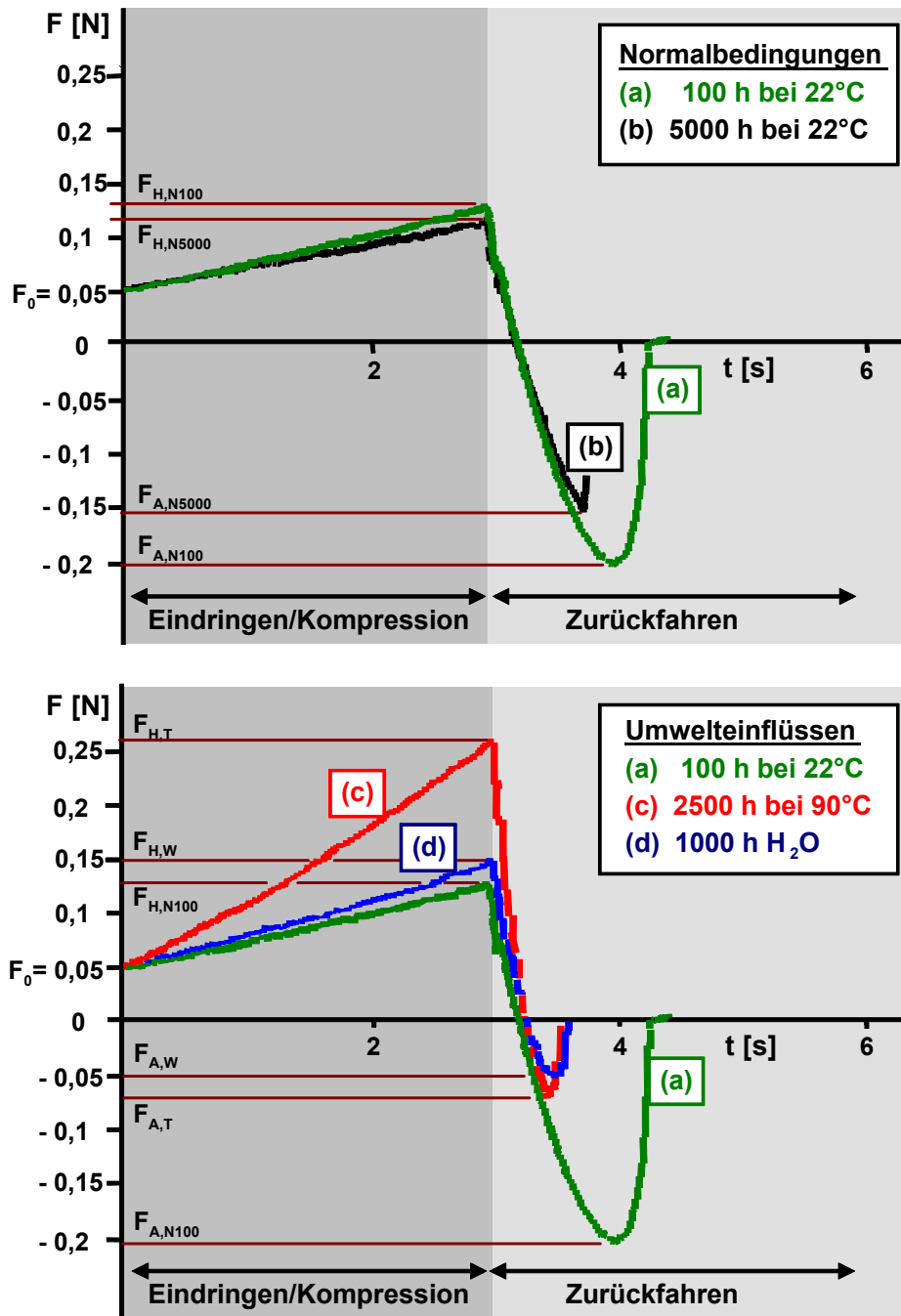


Abb. 4.62: *Ermittelte Kraft-Zeit-Kennlinien mit den charakteristischen Kräften zur Beschreibung der Härte ($F_{H,i}$) und der Adhäsionseigenschaften ($F_{A,i}$) von Silikongel in Abhängigkeit verschiedener Vorbelastungen*

Die aus den entsprechenden Kraft-Zeit-Kennlinien (Abb. 4.62) ermittelten charakteristischen Kräfte $F_{H,i}$ bzw. $F_{A,i}$, die die Härte bzw. die Adhäsionseigenschaften sowie deren Änderungen kennzeichnen, sind in Tab. 4.4 zusammengestellt. Dabei lässt der Vergleich der vor und nach den jeweiligen Vorbelastungen ermittelten charakteristischen Kräfte teilweise deutliche Änderungen der mechanischen Eigenschaften erkennen.

<i>Probe i</i>	<i>Härte</i>		<i>Klebrigkeit</i>	
	$F_{H,i}$	$\Delta F_{H,i}$	$F_{A,i}$	$\Delta F_{A,i}$
<i>(a) 100 h bei 22°C</i>	$F_{H,N100}$ 0,12 N	-----	$F_{A,N100}$ 0,2 N	-----
<i>(b) 5000 h bei 22°C</i>	$F_{H,N5000}$ 0,11 N	$\Delta F_{H,N5000}$ - 8 %	$F_{A,N5000}$ 0,15 N	$\Delta F_{A,N5000}$ -25 %
<i>(c) 2500 h bei 90°C</i>	$F_{H,T}$ 0,26 N	$\Delta F_{H,T}$ 117 %	$F_{A,T}$ 0,07 N	$\Delta F_{A,T}$ - 65 %
<i>(d) 1000 h Wasserlagerung</i>	$F_{H,W}$ 0,14 N	$\Delta F_{H,W}$ 17 %	$F_{A,W}$ 0,05 N	$\Delta F_{A,W}$ -75 %

Tab. 4.4: *Kräfte zur Charakterisierung der Härte ($F_{H,i}$) und Adhäsionseigenschaften ($F_{A,i}$) von Silikongel sowie deren prozentuale Abweichung von den an ungealtertem Silikongel bei Raumtemperatur und Normalbedingungen ermittelten Werten $F_{H,N100}$ und $F_{A,N100}$ (Referenz)*

Ein signifikanter Einfluss der 5000-stündigen Lagerung bei 22°C und Normalbedingungen auf die Härte von Silikongel ist nicht feststellbar. Lediglich eine leichte Abnahme der Adhäsionsfähigkeit ist festzustellen, was auf das Vorhandensein von Fremdschichten (Schmutzablagerungen) auf der Probenoberfläche zurückzuführen sein kann. Eine Änderung der Härte findet auch durch die Wasserlagerung nicht statt. Jedoch ist hier eine deutliche Abnahme der Adhäsionsfähigkeit zu verzeichnen, wobei dieser Zustand auch nach längerer Lagerung in einer trockenen Umgebung erhalten bleibt. Da die Adhäsionseigenschaften wesentlich von dem Vorhandensein von Polydimethylsiloxan auf der Probenoberfläche beeinflusst werden [1], ist davon auszugehen, dass es aufgrund der Wasserlagerung zu einem Auslösen von unvernetztem Polydimethylsiloxan aus dem Bereich der Probenoberfläche gekommen ist.

Verglichen damit bewirkt die thermische Belastung neben einer Abnahme der Adhäsionsfähigkeit zusätzlich einen deutlichen Anstieg der Materialhärte. Insbesondere letzteres ist ein Indiz dafür, dass die thermische Belastung zu einer Zunahme der Vernetzungsdichte geführt haben muss. Um dies zu belegen wurde die Vernetzungsdichte einer thermisch unbelasteten sowie einer thermisch belasteten Probe (5000 h bei 90°C) bestimmt. Die Bestimmung der Vernetzungsdichte erfolgte nach ASTM D2765-95 durch Quellung in Decan (Quellmittel). Die Auswertung basiert auf der Theorie von Flory und Rehner [47]. Tab. 4.5 fasst das Ergebnis dieser Untersuchung zusammen.

	<i>unbehandelte Probe</i>	<i>thermisch belastete Probe</i>
<i>Vernetzungsdichte</i>	$7,00 \cdot 10^{-6} \text{ mol NB/ml}$ $4,22 \cdot 10^{18} \text{ NB/ml}$	$3,55 \cdot 10^{-5} \text{ mol NB/ml}$ $2,13 \cdot 10^{19} \text{ NB/ml}$
<i>Monomereinheiten pro Netzbogen</i>	1900	371
<i>Molekulargewichte pro Netzbogen</i>	140000 g/mol	27000 g/mol

Tab. 4.4: *Vernetzungsdichte einer unbelasteten sowie einer thermisch belasteten Silikongel-Probe (nach ASTM D2765-95 durch Quellung in Decan) [47]*

Wie bereits durch die veränderte Härte der Proben angedeutet, ist die Vernetzungsdichte der thermisch belasteten Probe deutlich höher als die der unbelasteten Probe. Dies ist vor allem an der Abnahme der Monomereinheiten pro Netzbogen ersichtlich, wobei unter dem Begriff Netzbogen (NB) die Polymerkette zwischen zwei Vernetzungspunkten verstanden wird. Die thermische Nachbehandlung führt demnach zu einer Nachvernetzung, was sich in der höheren mechanischen Festigkeit der Probe widerspiegelt. Auch die verringerte Adhäsionsfähigkeit, die eine Abhängigkeit von der Materialhärte und dem Anteil an unvernetztem Polydimethylsiloxan besitzt, lässt sich über die Zunahme der Vernetzungsdichte erklären.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die dem Silikongel zugesprochenen mechanischen Materialeigenschaften entscheidend von den Umgebungsbedingungen beeinflusst werden. Daher sind bei der Auslegung von Silikongel-Isolierungen, insbesondere an Grenzflächen (vgl. 4.4), thermisch sowie feuchtigkeitsbedingte Änderungen der mechanischen Materialeigenschaften zu berücksichtigen.

4.4 Elektrische Festigkeit an Grenzflächen

Für den praktischen Einsatz von Silikongel als Isolierstoff in der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik ist neben der elektrischen Festigkeit des Isolierstoffes selbst die elektrische Festigkeit konstruktiv bedingter Grenzflächen für die Zuverlässigkeit der Gesamtisolierung funktionsbestimmend. Die Einteilung technisch relevanter Grenzflächen erfolgt nach Anzahl der beteiligten Materialien in Ein- und Mehrstoffsysteme sowie nach Richtung der elektrischen Beanspruchung (Feldstärke) in Längs- und Quergrenzflächen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen unter Einstoffsystemen Silikongel/Silikongel-Grenzflächen verstanden werden, die durch direkten Anguss oder durch das Zusammenfügen zweier separat vernetzter Silikongel-Isolierelemente gebildet werden und durch mechanische Andruckkräfte in Kontakt zueinander stehen. Dagegen werden unter Mehrstoffsystemen Isolierungen mit Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien verstanden. Typischerweise ist die elektrische Festigkeit der Grenzfläche zwischen zwei Festkörpern deutlich geringer als diejenige der jeweiligen Festkörper selbst. Im Wesentlichen sind mikroskopische Fehlstellen, mechanische Ablösungen sowie Gebiete geringerer Isolierstoffdichte entlang der Grenzfläche, die allesamt bevorzugte Ausgangspunkte für den Start einer elektrischen Entladung bzw. bevorzugte Wege für die Ausbreitung eines Entladungskanals darstellen, Ursachen für die verminderte elektrische Festigkeit von Grenzflächen. Nachfolgend werden relevante Einflussgrößen auf die elektrische Festigkeit von Grenzflächen vorgestellt und deren Bedeutung im Hinblick auf den Einsatz von Silikongel als Isolierstoff an Grenzflächen diskutiert.

Einflussgrößen auf die elektrische Festigkeit von Silikongel-Grenzflächen

- ***Oberflächenunebenheiten:*** Grenzflächen zwischen zwei festen Dielektrika ohne mikroskopische Hohlräume und Unebenheiten sind praktisch nicht existent. Derartige Fehlstellen können beispielsweise Ausgangspunkte für eine teilentladungsbedingte Materialzerstörung darstellen und so zu einer dauerhaften Schädigung der Isolierung führen. Die von derartigen Strukturfehlern und Unebenheiten ausgehende die elektrische Festigkeit der Grenzfläche mindernde Wirkung ist im Wesentlichen abhängig vom mechanischen Anpressdruck auf die Grenzfläche sowie der Fähigkeit der eingesetzten Werkstoffkombination einen hohlraumfreien Verbund im Bereich der Grenzfläche zu erreichen (Anpassungsfähigkeit). Eine Erhöhung des Druckes auf Grenzflächen ist in der Regel mit einem Anstieg der elektrischen Festigkeit verbunden. Die Erzeugung von mechanischen Druckeinwirkungen erfolgt in der Praxis beispielsweise durch extern aufgebrachte mechanische Kräfte, die über Federsysteme oder unter Einsatz von unter mechanischer Spannung stehenden elastischen Materialien erzeugt werden [1;65]. Insbesondere in der Fähigkeit, eine optimale Anpassung an beliebige Oberflächenstrukturen zu erreichen, sind Silikongele fast allen anderen Isolierstoffen mit Festkörpercharakter überlegen.

- ***Elektrische Feldverteilung:*** Zur Bewertung der elektrischen Belastung einer Grenzschicht erfolgt eine Unterscheidung zwischen der Richtung, der Stärke sowie der Verteilung der elektrischen Feldstärke entlang der Grenzschicht. Dabei wird die Feldstärkekomponente entlang der Grenzfläche (Längsgrenzfläche) in der

Regel als kritischer eingestuft als die quer zur Grenzfläche gerichtete Komponente [65]. Bei der Auslegung von Isolierungen besteht die Forderung, elektrisch hoch belastete Bereiche von Längsgrenzflächen stets mit einer maximal möglichen Anpresskraft zu versehen.

- **Temperatur und Temperaturänderungen** haben einen signifikanten Einfluss auf die elektrische Festigkeit von Isolierungen. Die Wirkung auf die elektrische Festigkeit von Grenzflächen ist dabei noch wesentlich ausgeprägter als die auf die eingesetzten Isolierstoffe selbst. Thermische Belastungen können aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Isolierstoffe zu Relativbewegungen und damit verbundenen zu Verschiebungen sowie mechanischen Ablösungen an Grenzschichten führen. Temperaturzyklen sind diesbezüglich als noch kritischer einzustufen. Bei der Auslegung von Silikongel-Isolierungen ist besonders dem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silikongel (*siehe 2.2*) Beachtung zu schenken.

- **Kompatibilität zu anderen Stoffen und Materialien:** Ein weiterer Aspekt, der beim Entwurf von Isolierungen mit konstruktiv bedingten Grenzflächen zwischen zwei unterschiedlichen Materialien zu beachten ist, ist die Kompatibilität der Materialien zueinander. In [1] wird über eine Zersetzung verschiedener Silikongele, die unter der Einwirkung höherer Temperaturen in Kontakt zu bestimmten Kabelmantelwerkstoffen stehen, berichtet. Zurückgeführt wird dies auf die Zerstörung der Polymermatrix durch bestimmte Substanzen, die aus dem Kabelmantel in das Silikongel diffundieren. Spezielle Additive, die der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Silikongel-Formulierung zugefügt wurden, können einer derartigen Zersetzung entgegenwirken und damit die Langzeitstabilität des Silikongels entscheidend verbessern [1]. Weiterhin kann die Vulkanisation des unvernetzten Silikongels durch bestimmte Substanzen gestört werden (*siehe 4.1*). Daher ist über entsprechende Vorversuche abzusichern, dass sowohl die mit dem unvernetzten als auch die mit dem vernetzten Silikongel in Berührung kommenden Materialien keine derartigen Schädigungen hervorrufen. Besonders vorteilhaft für den Einsatz von Silikongel in der Isolations- und Verbindungstechnik ist die Tatsache, dass aus dem Vulkanisat ausgesondertes unvernetztes Polydimethylsiloxan - im Gegensatz zu Isolierölen auf Mineralölbasis (d.h. Gemische unterschiedlicher Kohlenwasserstoffe) - keine Quellvorgänge an Kabelmantelwerkstoffen bewirkt [1;4].

- **Langzeiteffekte:** Erfahrungsgemäß dominieren an Grenzflächen Alterungseffekte aufgrund thermischer und mechanischer Belastungen über die rein elektrische Alterung [65]. Beispielsweise können hier thermo-mechanische Belastungen

zu einer Vielzahl unterschiedlicher Fehlstellen, insbesondere zu Rissbildungen und zu der Entstehung makroskopischer Hohlräume im Bereich von Grenzflächen, führen. Bei Silikongel würden mechanische Eigenschaftsänderungen, wie beispielsweise ein Anstieg der Materialhärte, eine Abnahme der Adhäsionsfähigkeit (*siehe 4.3.3.3*) sowie eine Abnahme des Isolierstoffvolumens aufgrund einer Aussonderung unvernetzter Bestandteile aus dem Vulkanisat (*siehe 4.2.1.6*), die Entstehung derartiger Fehlstellen begünstigen. Diese Effekte sind zwingend bei der Auslegung von Silikongel-Isolationen zu berücksichtigen.

Potential von Silikongel als Isolierwerkstoff an Grenzflächen

In der einzigartigen Kombination aus den mechanischen und elektrischen Werkstoffeigenschaften von Silikongel ist dessen Einsatzpotential als Isolierstoff im Bereich elektrisch hoch belasteter Grenzflächen zu sehen. In [1;4] wird bereits auf die hohe elektrische Festigkeit der Silikongel/Silikongel-Grenzfläche hingewiesen, jedoch fehlen hier detaillierte Angaben zu der verwendeten Versuchsanordnung und den Prüfbedingungen. Darüber hinaus finden sich in der Literatur nur sehr wenige Hinweise bezüglich des Verhaltens von Silikongel an elektrisch belasteten Grenzflächen. Daher erschien es zwingend notwendig, ausgewählte Silikongel-Grenzflächenmodelle hinsichtlich ihres Durchschlagverhaltens zu untersuchen. Die Auswahl der untersuchten Grenzflächen ergab sich aus der technischen Relevanz.

4.4.1 Silikongel/Silikongel-Längsgrenzflächen

Silikongel/Silikongel-Grenzflächen mit einer Feldbelastung senkrecht zur Richtung der Grenzfläche (Quergrenzfläche) sind in der Regel als unkritisch anzusehen, und es ist nicht zu erwarten, dass derartige Grenzflächen einen Einfluss auf das Durchschlagverhalten von Silikongel-Isolierungen haben. Ein Einfluss einer derartigen Grenzfläche auf das Durchschlagverhalten einer Isolierung wäre nur dann zu erwarten, wenn sich diese Grenzschicht zwischen zwei Stoffen mit unterschiedlich großen Dielektrizitätszahlen und möglicherweise auch Unterschieden in der elektrischen Festigkeit befinden würde. Auch eine elektrische Leitfähigkeit der Grenzflächen, durch die eine Homogenisierung des elektrischen Feldes stattfinden würde, sowie Luftspalte, deren Entstehung in einem unzureichenden Verbund zwischen den die Grenzfläche bildenden Werkstoffen zu sehen ist, könnten Einfluss auf das Durchschlagverhalten haben. Da aber keine dieser Voraussetzungen für die Silikongel/Silikongel-Quergrenzfläche gegeben ist, ist eine signifikante Änderung des Durchschlagverhaltens gegenüber Silikongel ohne eine derartige Grenzfläche nicht zu erwarten.

4.4 Elektrische Festigkeit an Grenzflächen

Im Gegensatz zur Quergrenzfläche sind Längsgrenzflächen als kritisch anzusehen. Beispielsweise ist die Durchschlagfeldstärke einer trockenen EPDM/EPDM-Längsgrenzfläche mit 800 hPa Anpressdruck sechsfach niedriger, als die des EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) ohne Grenzfläche [1]. Die Ursache hierfür ist im Wesentlichen im Vorhandensein von makroskopischen sowie mikroskopischen Fehlstellen mit verminderter elektrischer Festigkeit zu sehen. Dabei stellen Hohlräume, mechanische Ablösungen oder Zonen geringerer Isolierstoffdichte entlang der Grenzfläche bevorzugte Gebiete für elektrische Entladungen dar [9;65]. *Abb. 4.63* zeigt die schematische Darstellung einer Längsgrenzfläche.

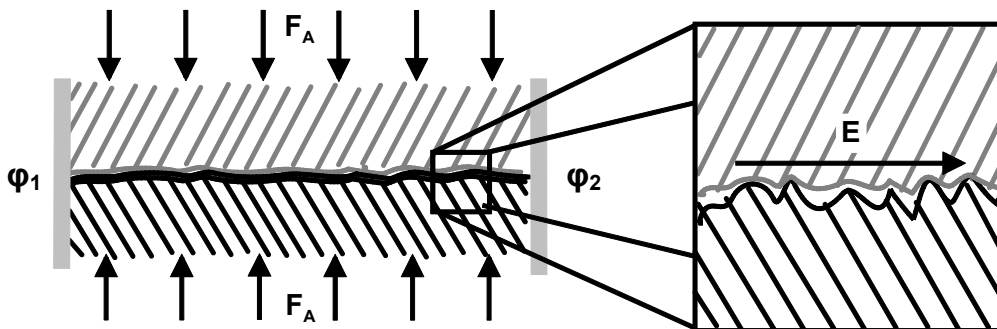


Abb. 4.63: Grenzfläche in Richtung des elektrischen Feldes (Längsgrenzfläche)

Wie bereits dargelegt, ist aufgrund der mechanischen Eigenschaften (Eigenklebrigkeit, Anpassungsfähigkeit) von Silikongel ein gutes Verhalten an Längsgrenzflächen zu erwarten.

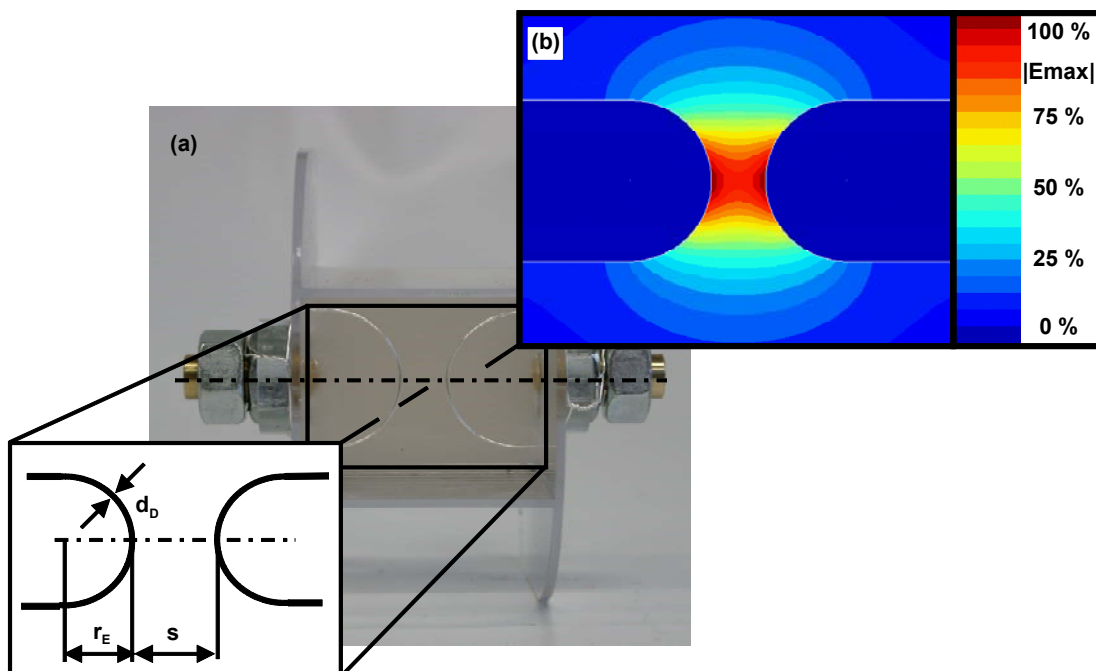


Abb. 4.64: Anordnung zur Untersuchung der elektrischen Festigkeit von Grenzflächen mit tangentialer Feldbelastung (a), elektrische Feldverteilung (Betrag der elektrischen Feldstärke) in der Grenzschicht (b)

Die durchgeführten Untersuchungen zum Durchschlagverhalten verschiedenartiger Modellisolierungen mit einer elektrisch belasteten Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche werden im Folgenden vorgestellt. Es kam eine Elektrodenanordnung aus versilbertem Draht zum Einsatz, die definiert zwischen den beiden die Längsgrenzfläche bildenden Isolierelementen eingebettet wurde. *Abb. 4.64a* zeigt die Elektrodenanordnung nach dem Aufbringen auf ein Silikongel-Isolierelement. Der Drahtdurchmesser d_D beträgt $0,5\text{ mm}$, der Radius r_E der Elektrode wurde zu 15 mm und die Schlagweite s zu 10 mm gewählt. Die Reinigung des Drahtes erfolgte mit Isopropanol bevor dieser unter Verwendung einer Biegelehre in Form gebracht und auf das erste Isolierelement aufgebracht wurde. Das Aufbringen eines zweiten Isolierelementes schloss den Fertigungsvorgang ab. Aus der berechneten Feldverteilung (*Abb. 4.64b*) wird deutlich, dass die elektrische Belastung entlang der Grenzfläche inhomogen ist, wobei die rotgefärbten Gebiete den Bereichen der höchsten elektrischen Feldstärke entsprechen. In diesen Bereichen ist aufgrund der hohen elektrischen Belastung die Wahrscheinlichkeit für den Start einer zum Durchschlag führenden Entladung deutlich erhöht. Dies müsste sich im Entladungsverhalten widerspiegeln, sofern nicht andere Effekte, wie beispielsweise das Vorhandensein von Fehlstellen, in den Vordergrund treten.

Durch Anguss hergestellte Längsgrenzfläche

Diese Art von Grenzfläche wurde durch zwei getrennte Gießvorgänge mit zwischenzeitlicher Vernetzung des ersten Gießteils erzeugt. Dabei wurde das erste Gießteil nach der Entgasung und Vernetzung vor dem Aufbringen der Drahtelektroden einer 24-stündigen Lagerung (t_L) in einer staubgeschützten Umgebung unterzogen. Im Anschluss daran erfolgte der Anguss des zweiten Isolierelementes sowie dessen Entgasung (10 min bei 100 hPa) und Vernetzung. Die elektrische Prüfung erfolgte nach einer 24-stündigen Konditionierung der Modellisolierung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen (*Versuchsreihe (a)*). Bei einer weiteren Versuchsreihe wurde der Zeitraum, der zwischen der Vernetzung des ersten Isolierelementes und dem Anguss des zweiten Elementes auf $t_L = 1000\text{ h}$ ausgedehnt (*Versuchsreihe (b)*). Dies ermöglichte die Erfassung und Bewertung potentieller zeitabhängiger Veränderungen der Oberflächeneigenschaften des ersten Gießteils (z.B. Abnahme der chemischen Reaktionsfähigkeit) vor dem Anguss des zweiten Elementes. *Abb. 4.65* zeigt das zugehörige Fertigungs- und Prüfschema.

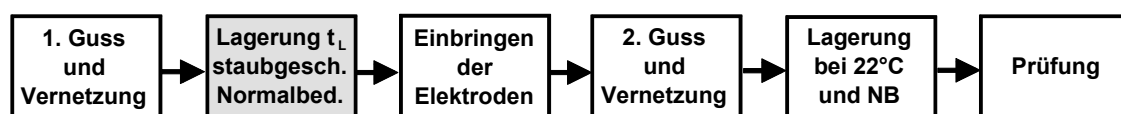


Abb. 4.65: *Fertigungs- und Prüfschema für die durch Anguss hergestellte Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche (Versuchsreihe (a) und (b))*

Längsgrenzfläche zwischen zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen

Weiterhin wurde eine technisch bedeutsame Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche, wie sie bereits in zahlreichen Produkten der Niederspannungsverbindungstechnik (Betriebsspannungen $\leq 1000\text{ V}$) [1;4;5] auftritt, auf ihre elektrische Festigkeit hin untersucht. Hierbei handelt es sich um eine tangential beanspruchte Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche, bestehend aus zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen, die durch einen definierten mechanischen Anpressdruck in Kontakt zueinander stehen.

Bei der Fertigung dieser Art von Grenzfläche erfolgte zunächst eine separate Entgasung und Vernetzung der einzelnen Silikongel-Isolierelemente, der sich eine 24-stündige Konditionierung (t_L) in einer staubgeschützten Umgebung bei Raumtemperatur und Normalbedingungen anschloss. Das Einbringen der Drahtelektroden und das Zusammenfügen beider Elemente schloss den Fertigungsprozess ab. Die elektrische Prüfung erfolgte nach einer 24-stündigen Einwirkung (t_p) eines Überdruckes von 100 hPa auf die Grenzfläche (*Versuchsreihe (c)*). Für diese Art von Grenzfläche ist eine Druckeinwirkung auf die Isolierelemente zwingend notwendig, um einen optimalen Kontakt zwischen ihnen herzustellen. Die Beschreibung der Vorrichtung, die zur Einprägung des Druckes auf die Grenzfläche vor und während der elektrischen Prüfung eingesetzt wurde, findet sich in *Kapitel 4.2.1.6*. Um auch hier potentielle zeitliche Veränderungen der Oberflächeneigenschaften der Isolierelemente zu berücksichtigen, wurde die Lagerungsdauer t_L bei einer weiteren Versuchsreihe (*Versuchsreihe (d)*) auf $t_L = 1000\text{ h}$ ausgedehnt. Die Kenntnis einer potentiellen Abhängigkeit zwischen der Lagerungsdauer t_L und der elektrischen Festigkeit der Grenzfläche ist insbesondere dann von hohem praktischen Wert, wenn es beispielsweise darum geht zulässige Lagerungszeiten von Produkten (z.B. Gel-Verbindungsmuffen [4;5]) festzulegen, deren Funktion im Wesentlichen auf der hohen elektrischen Festigkeit einer derartigen Grenzfläche beruht. Das Fertigungs- und Prüfschema für diese Modellgrenzfläche ist in *Abb. 4.66* dargestellt.

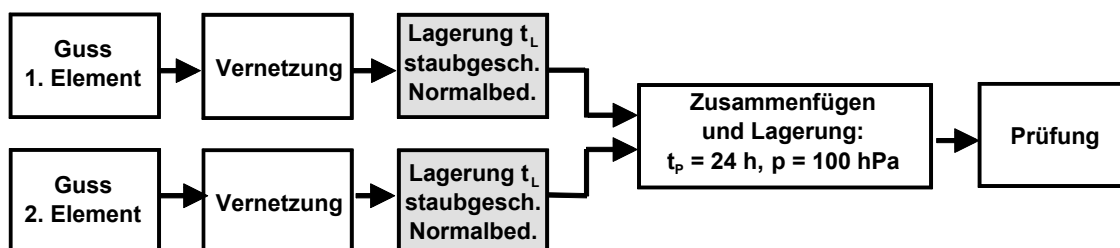


Abb. 4.66: Fertigungs- und Prüfschema für die Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche bestehend aus zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen (*Versuchsreihe (c) und (d)*)

4.4 Elektrische Festigkeit an Grenzflächen

Aufgrund der Tatsache, dass nur Durchschlagfestigkeiten, die unter identischen Prüfbedingungen, insbesondere unter Verwendung der gleichen Elektrodengeometrie, ermittelt wurden, direkt miteinander vergleichbar sind, wurde zusätzlich die Durchschlagfestigkeit von Prüflingen, bei denen die Drahtelektroden vollständig mit Silikongel vergossen wurden (Herstellungparameter nach *Kapitel 4.1.6*), bestimmt (*Versuchsreihe (e)*) und als Referenz für die Beurteilung der elektrischen Qualität der Modellgrenzflächen herangezogen. Die elektrische Prüfung erfolgte für alle im Rahmen dieses Kapitels beschriebenen Untersuchungen bei Raumtemperatur mit Wechselspannung und einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von 1 kV/s . Aus der Gegenüberstellung der Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung (*Abb. 4.67*) der Modellgrenzflächen (*Versuchsreihe (a)* bis *(d)*) mit der des Silikongels ohne Grenzfläche (*Versuchsreihe (e)*) wird die hohe elektrische Festigkeit der Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche deutlich.

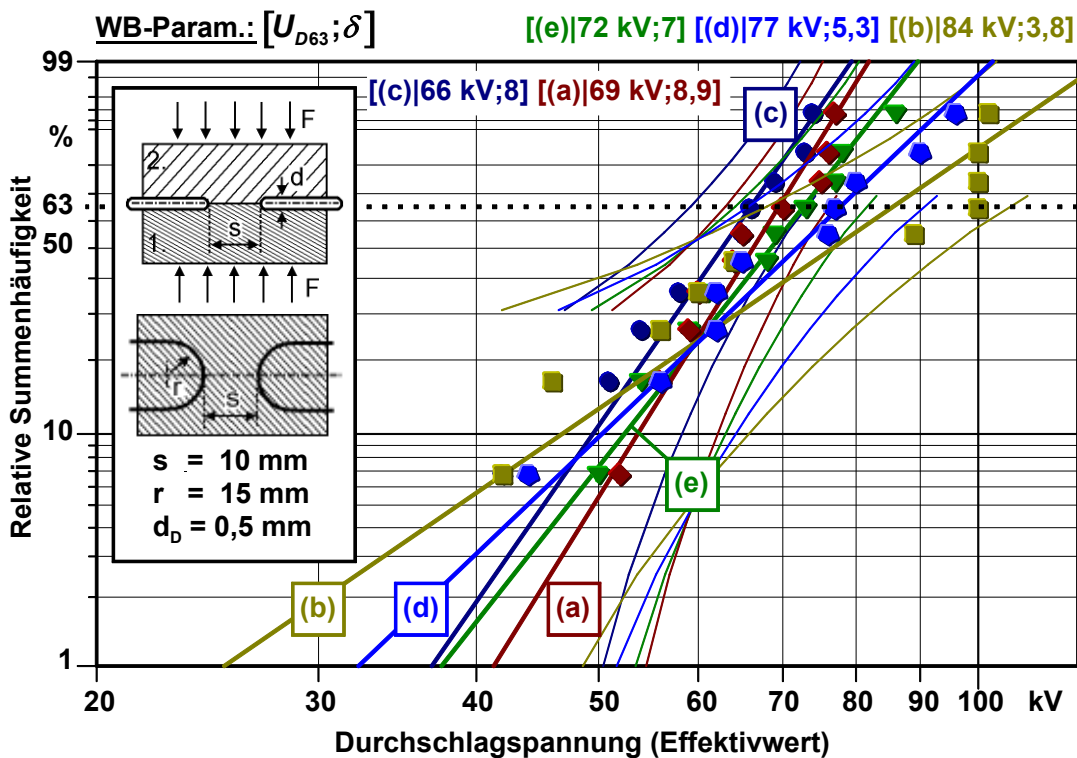


Abb. 4.67: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung für verschiedene Silikongel/Sili-kongel-Längsgrenzfläche; (a) Anguss nach 24 h, (b) Anguss nach 1000 h, (c) separat vernetzte Elemente mit $t_L = 24 \text{ h}$, (d) separat vernetzte Elemente mit $t_L = 1000 \text{ h}$, (e) Silikongel ohne Grenzfläche

Eine statistische Unterscheidung der Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung der Versuchsreihen (a), (c) und (e) ist aufgrund der großen Überlappung der 95%-Konfidenzbereiche nicht möglich. D.h. die elektrische Festigkeit der durch Anguss (*Versuchsreihe (a)*) sowie der aus zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen (*Versuchsreihe (c)*) bestehenden Längsgrenzfläche unterscheidet sich nicht

von der elektrischen Festigkeit des Silikongels ohne Grenzfläche. Dies gilt aber nur für den Fall, dass bei der Fertigung der Isolierung keine große Zeitspanne t_L zwischen dem zweiten Anguss (*siehe Abb. 4.65*) bzw. dem Zusammenfügen der separat vernetzten und gelagerten Silikongel-Elemente (*siehe Abb. 4.66*) liegt. Betrachtet man den aus fertigungstechnischer Sicht relevanten Einfluss der Lagerungsdauer t_L , so ist hier ein systematischer Einfluss auf die Durchschlagspannung feststellbar. Mit Vergrößerung der Lagerungsdauer t_L ist für beide Grenzflächenmodelle eine leichte Erhöhung der 63-%-Durchschlagspannung verbunden mit einer wesentlich größeren Messwertstreuung feststellbar (*Versuchsreihe (b)* und (*d*)). Die erhöhte Messwertstreuung könnte dabei durch Schmutzablagerungen auf der Oberfläche hervorgerufen werden. Eine mögliche Ursache für die leicht erhöhte 63-%-Durchschlagspannungen können Schwankungen in den klimatischen Umgebungsbedingungen während der 1000-stündigen Lagerung sein. Diese könnten beispielsweise zu einer Verminderung des Feuchtigkeitsgehaltes im Silikongel geführt haben, was in diesem Fall die leicht erhöhte 63-%-Durchschlagspannung erklären würde. Für die praktische Auslegung von Isolierungen stellt diese jedoch keinen Vorteil dar, da sie mit einer wesentlich höheren Messwertstreuung verbunden ist, was in beiden Fällen (*Versuchsreihe (b)* und (*d*)) zu einer deutlichen Verminderung der für die Auslegung von Isolationen bedeutsamen niedrigeren Quantile der Durchschlagspannung führt.

Diese besonderen Grenzflächeneigenschaften grenzen den Werkstoff Silikongel deutlich von Silikonkautschuk und allen übrigen in der Isoliertechnik eingesetzten polymeren Kunststoffen mit Festkörpercharakter ab. Beispielsweise weisen nach [9] Silikonkautschuk/Silikonkautschuk-Längsgrenzflächen, die durch Anguss nach Abschluss des Vernetzungsvorganges der ersten Prüfkörperhälfte hergestellt wurden, eine deutlich niedrigere Durchschlagfestigkeit auf als Silikonkautschuk ohne Grenzfläche.

Obwohl alle hier vorgestellten Silikongel/Silikongel-Längsgrenzflächen eine hohe elektrische Festigkeit besitzen, stellen diese mechanisch eine Schwachstelle dar. Trennversuche, die im Anschluss an die elektrische Prüfung an den durch Anguss erzeugten Grenzflächen (*Versuchsreihe (a)* und (*b*)) durchgeführt wurden, zeigten, dass die Einwirkung einer Zugkraft quer zur Grenzfläche stets zum Zerreißen entlang der Grenzfläche führt. Daraus lässt sich schließen, dass es hier nur zu geringen Vernetzungsreaktionen zwischen der Oberfläche des ersten Gießteils und dem später angegossenen unernetzten Silikongel kommt. Das geschilderte im Trennversuch ermittelte Verhalten trifft in gleicher Weise auf die mechanische Festigkeit der aus zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen gefertigten Grenzflä-

chen (*Versuchsreihe (c)* und (*d*)) zu, zu deren Trennung noch deutlich geringere Kräfte erforderlich sind. Hier ist davon auszugehen, dass die Haftung zwischen den Elementen nahezu vollständig oder sogar ausschließlich durch physikalische Kräfte (Kohäsion) bestimmt wird.

Analyse der Entladungskanäle

Für eine weitergehende Analyse des Durchschlagverhaltens der elektrisch belasteten Längsgrenzfläche, bestehend aus zwei separat vernetzten Silikongel-Isolier-elementen (*Versuchsreihe (c)*), erfolgte die Analyse der Entladungskanäle im Hinblick auf deren räumliche Lage.

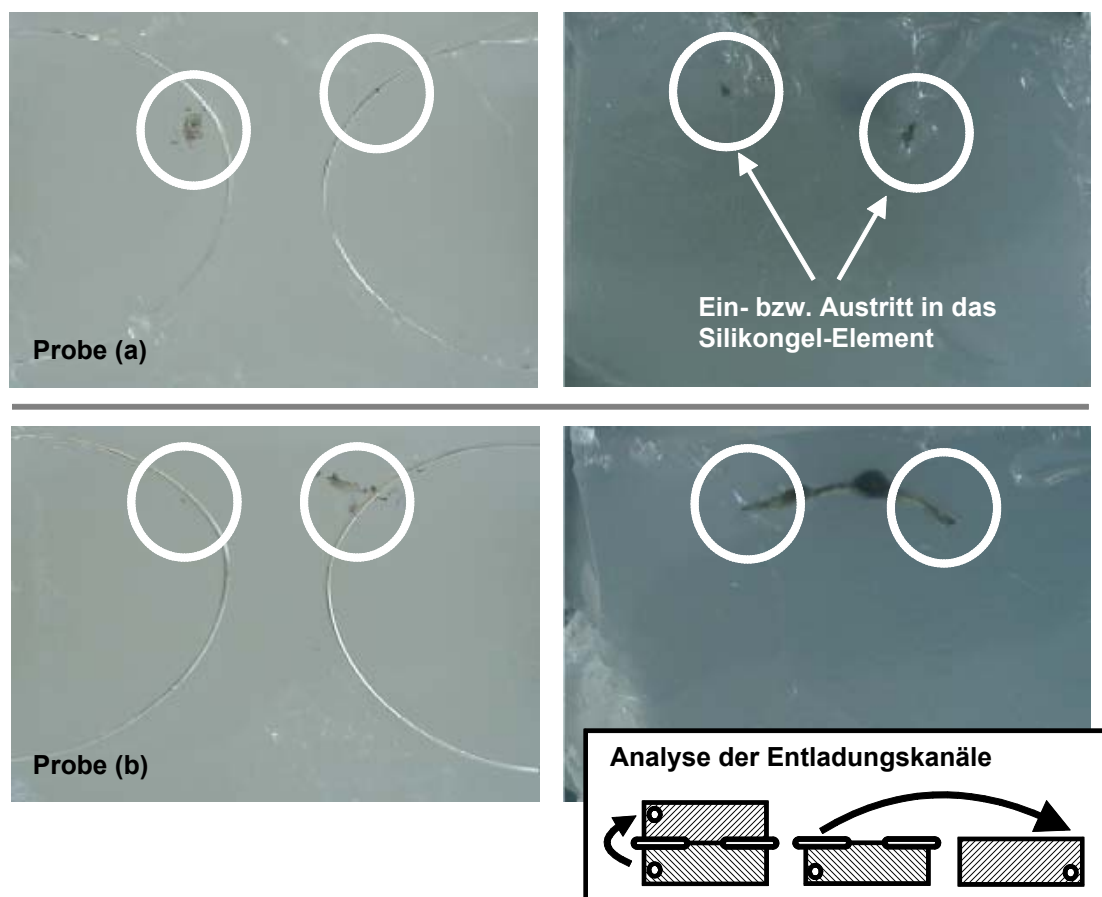


Abb. 4.68: *Typische Lage von Entladungskanälen in einer Silikongel-Modellisierung mit Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche bestehend aus zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen (Versuchsreihe (c))*

Dabei konnte festgestellt werden, dass bei der Mehrzahl der untersuchten Proben (neun von zehn) die elektrische Entladung nicht ausschließlich entlang der Grenzfläche, sondern ausgehend von den Drahtelektroden zum größten Teil durch eines der Silikongel-Elemente erfolgte (*Abb. 4.68*). Nur in einem Fall erfolgte die Entladung vollständig entlang der Grenzfläche. Weiterhin konnte auch hier festgestellt

werden, dass die Entladung nicht immer im elektrisch am stärksten belasteten Bereich der Isolierung erfolgte (vgl. *Abb. 4.64b*), was auf das Vorhandensein von Fehlstellen mit verminderter elektrischer Festigkeit im Isolierstoff hindeutet (vgl. *4.2.1.1*). Das beobachtete Entladungsverhalten dokumentiert, dass die Längsgrenzfläche zwischen den separat vernetzten Isolierstoffhälften keine geringere elektrische Festigkeit besitzt als Silikongel ohne Grenzfläche (*Versuchsreihe (e)*) und unterstreicht damit die einzigartigen isoliertechnischen Eigenschaften der Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche.

Vorgänge in der Grenzschicht nach dem Zusammenfügen der Isolierelemente

Die notwendige Voraussetzung für die hohe elektrische Festigkeit der Grenzschicht, bestehend aus zwei separat vernetzten Silikongel-Isolierelementen mit darin eingebetteten Drahtelektroden (Fertigungsschema nach *Abb. 4.66*), ist ein hohlraumfreier Verbund zwischen den beiden Isolierelementen sowie zwischen dem Silikongel und der Oberfläche der Drahtelektroden. Ansonsten wäre eine derart hohe elektrische Festigkeit aufgrund des Fehlstellencharakters von Hohlräumen und Gaseinschlüssen nicht zu erzielen. Um dies zu erreichen, ist ein gewisser Anpressdruck auf die Grenzfläche notwendig, der zum einen einen optimalen Kontakt zwischen den Elementen der Grenzfläche herstellt und darüber hinaus ein Entweichen von Lufteinschlüssen, die beim Zusammenfügen der Elemente unvermeidbar in der Grenzschicht entstehen, ermöglicht.

Um die Vorgänge, die nach dem Zusammenfügen der Isolierelemente unter der Einwirkung mechanischer Kräfte in der Grenzschicht ablaufen, näher zu beleuchten, wurde eine aus transparentem Silikongel (*siehe 2.1*) bestehende Modellisolierung, deren Herstellung nach dem in *Abb. 4.66* dargestellten Schema erfolgte, angefertigt und damit die Vorgänge in der Grenzschicht der direkten Beobachtung zugänglich gemacht. *Abb. 4.69a* zeigt das Modell der Grenzfläche. Den Zustand der Grenzfläche unmittelbar nach dem Zusammenfügen der Silikongel-Isolierelemente zeigt *Abb. 4.69b*. Deutlich sichtbar ist es zu Lufteinschlüssen in der Grenzschicht gekommen. Die Einwirkung eines mechanischen Überdruckes von *100 hPa* bewirkt bereits nach kurzer Zeit das Verschwinden dieser Lufteinschlüsse aus dem Bereich der Grenzschicht. *Abb. 4.69c* zeigt den Zustand nach einer 24-stündigen Druckeinwirkung. Alle visuell wahrnehmbaren Lufteinschlüsse sind aus der Grenzschicht verschwunden. Diese kehrten auch unter Normaldruck nicht wieder, d.h. es handelt sich hierbei nicht um eine Kompression der Gaseinschlüsse aufgrund der erhöhten Druckeinwirkung, sondern um einen bleibenden Zustand. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt im hohen Permeationsvermögen von Silikongel begründet.

4.4 Elektrische Festigkeit an Grenzflächen

Unter dem Begriff Permeation versteht man den Durchtritt gasförmiger oder flüssiger Stoffe durch einen nicht porösen Festkörper [66].

Der eigentliche Vorgang gliedert sich dabei in drei Teilschritte: das Lösen des Mediums im Werkstoff, die Diffusion des Mediums durch den Werkstoff und die Desorption des Mediums aus dem Werkstoff heraus. Die kennzeichnende Stoffkonstante für diesen Vorgang ist der Permeationskoeffizient, der angibt, welches Gasvolumen im stationären Zustand bei einer gegebenen Druckdifferenz in einer bestimmten Zeit durch einen Probekörper bekannter Fläche und Dicke hindurchtritt [67].

Für Polydimethylsiloxan (PDMS), welches der Hauptbestandteil von Silikongel ist, beträgt der Permeationskoeffizient $4050 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ und ist damit 500-mal größer als der von Polyisobutylene bei gleicher Vernetzungsdichte. Die hohe Gasdurchlässigkeit ist im Wesentlichen auf den chemischen Aufbau der Polysiloxane zurückzuführen. Die helixartige Struktur der *Si-O*-Kette führt zu einer "offenen" Struktur mit einem großen Anteil an "mikrostrukturellen Hohlräumen". Dies hat zur Folge, dass Silikone im Vergleich zu anderen Polymeren weit- aus höhere Gasdurchlässigkeiten aufweisen [68].

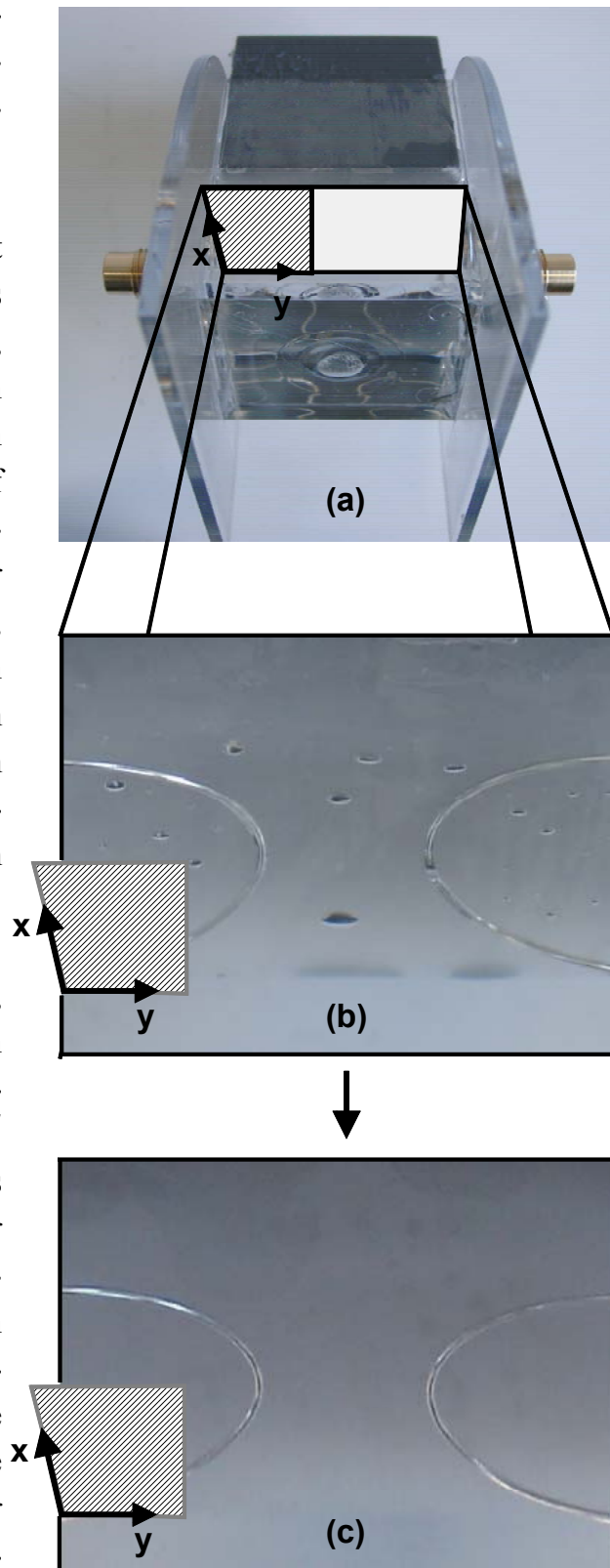


Abb. 4.69: (a) Modell der Längsgrenzfläche bestehend aus zwei separaten Silikongel-Elementen, (b) Zustand nach dem Zusammenfügen, (c) Zustand nach 24-stündiger Druckeinwirkung

Dieses Experiment dokumentiert, dass Gaseinschlüsse, die beim Zusammenfügen der Silikongel-Isolierelemente zwischen diesen eingeschlossen wurden, mittels mechanischer Druckeinwirkung effektiv entfernt werden können und dadurch eine Grenzfläche mit einer hohen elektrischen Festigkeit entsteht. Bei der Auslegung von Isolationen, deren Funktion einen derartigen Effekt voraussetzt, muss jedoch konstruktiv die Möglichkeit für ein Entweichen von Gaseinschlüssen aus dem gesamten elektrisch belasteten Bereich der Isolierung gegeben sein.

Silikongel-Längsgrenzflächen unter der Einwirkung von Feuchtigkeit

Die Einwirkung von Feuchtigkeit auf Silikongel-Modellisolierungen mit umgossenen Elektroden führt zu einer Verminderung der elektrischen Festigkeit um mehr als 50 % (siehe 4.2.1.5) und ist daher als entscheidende Einflussgröße bei der Auslegung von Isolationen zu berücksichtigen. Daher wurde auch der Einfluss von Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit der Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche, bestehend aus zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen, untersucht. Die Fertigung der Modellisolierung erfolgte nach dem in *Abb. 4.66* dargestellten Schema mit $t_L = 24 h$. Erweiternd dazu wurden die Wandungen der Modellisolierung mit Bohrungen versehen, um einen direkten Kontakt zu dem umgebenden Medium zu ermöglichen. Anschließend wurde die gesamte Isolierung spannungslos unter der Einwirkung eines mechanischen Überdruckes von $100 hPa$ über einen Zeitraum von $1000 h$ in demineralisiertem Wasser gelagert. Die elektrische Prüfung erfolgte unter Druckeinwirkung unmittelbar nach Entnahme aus dem Wasserbad. Dabei wurde gegenüber den Ergebnissen, die mittels gleicher Anordnung unter Normalbedingungen ermittelt wurden (*Versuchsreihe (c)*), ebenfalls eine um circa 50 % reduzierte 63-%-Durchschlagspannung bestimmt. Aufgrund der Tatsache, dass Silikongel, das spannungslos in Kontakt zu Feuchtigkeit stand, ebenfalls eine um 50 % verminderte Durchschlagspannung aufweist, konnte bei Anwesenheit von Feuchtigkeit keine zusätzliche von der Grenzfläche ausgehende festigkeitsmindernde Wirkung nachgewiesen werden.

4.4.2 Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche

Exemplarisch wurde das Durchschlagverhalten einer Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzflächen untersucht. Der Aufbau dieser Grenzfläche entspricht im Wesentlichen dem bereits beschriebenen Grenzflächenmodell, bei dem die Grenzfläche aus zwei separat vernetzten Silikongel-Elementen besteht, die durch eine definierte mechanische Anpresskraft in Kontakt zueinander stehen (*Abb. 4.66*). Bei der Herstellung dieser Grenzfläche wurde lediglich ein Silikongel-Element gegen ein Polypropylen-Element ausgetauscht. *Abb. 4.70* zeigt das zugehörige Fertigungs- und Prüfschema, wobei t_L zu $24 h$ gewählt wurde.

4.4 Elektrische Festigkeit an Grenzflächen

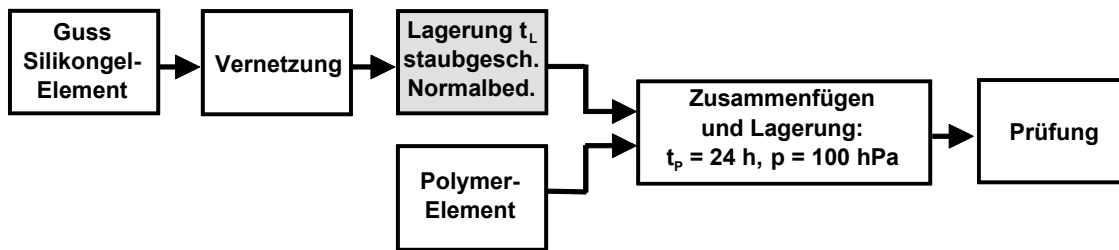


Abb. 4.70: Fertigungs- und Prüfschema für die Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche

Das Ergebnis der Untersuchung ist in *Abb. 4.71* dargestellt. Zusätzlich zu der ermittelten Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche ist als Referenz die Verteilungsfunktion der entsprechenden Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche (*Versuchsreihe (c)*) sowie die von Silikongel ohne Grenzfläche (umgossene Drahtelektroden, *Versuchsreihe (e)*) dargestellt.

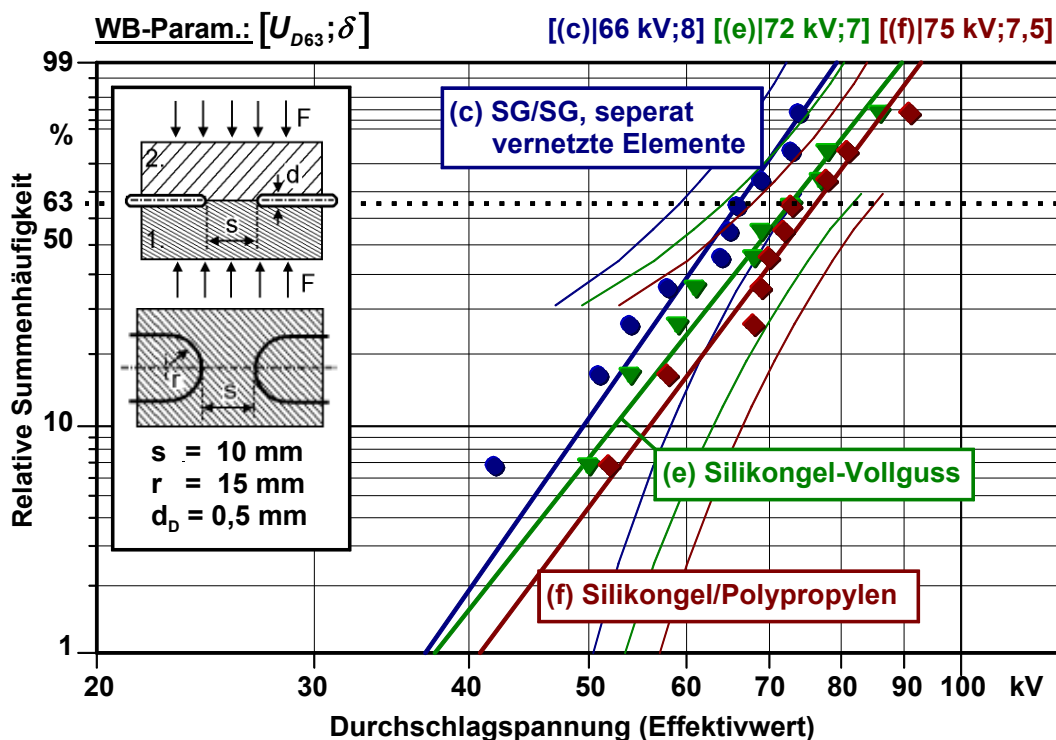


Abb. 4.71: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung für die Silikongel/Polypropylen-, die Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche sowie für die von Silikongel ohne Grenzfläche (Referenz)

Auch durch dieses Ergebnis ist das einzigartige Grenzflächenverhalten von Silikongel dokumentiert. Bei nahezu gleich großer Messwertstreuung ist die 63%-Durchschlagspannung der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche (*Versuchsreihe (f)*) gegenüber der der Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche (*Versuchsreihe (c)*) sogar um 14 % erhöht.

Analyse der Entladungskanäle

Die Analyse der Entladungskanäle zeigte, dass die Entladung statistisch etwa gleichverteilt im Bereich der Grenzschicht (Abb. 4.72a) sowie ausschließlich im Silikongel-Isolierelement (Abb. 4.72b) erfolgte.

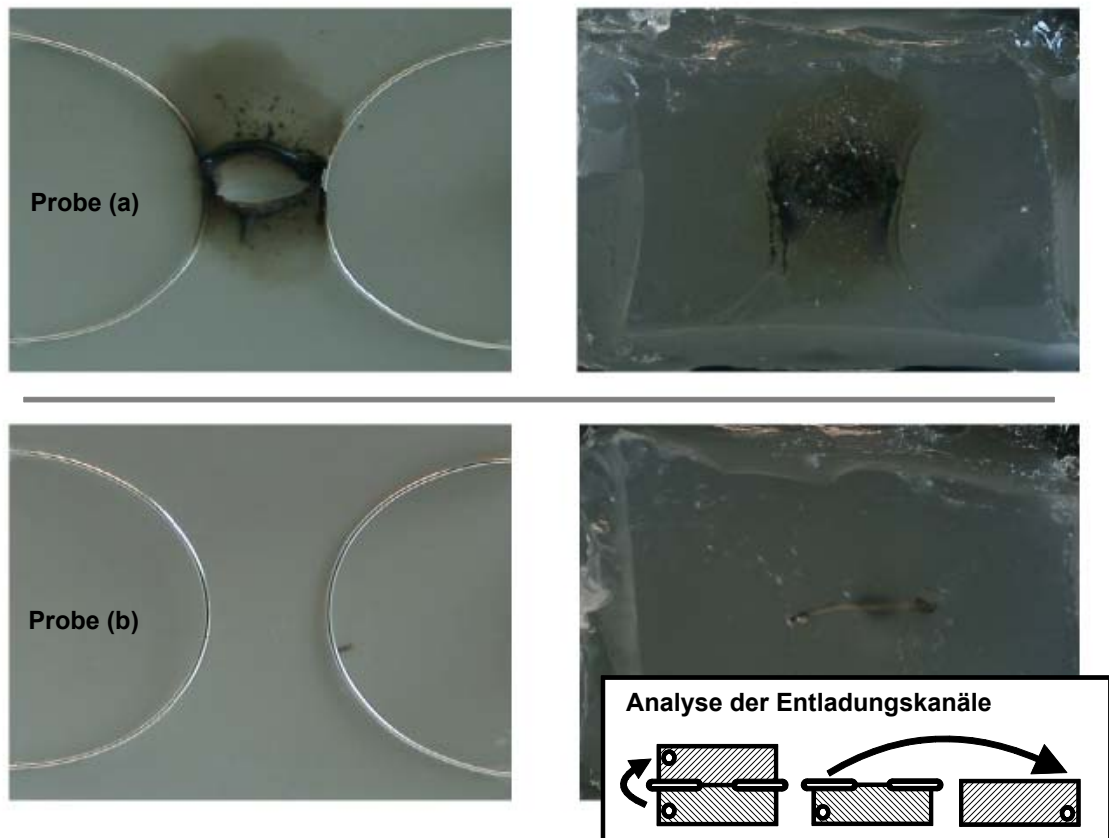


Abb. 4.72: *Ausbildung von Entladungskanälen an elektrisch belasteten Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzflächen; Entladung entlang der Grenzfläche (Probe (a)), Entladung ausschließlich im Silikongel-Element (Probe (b))*

Die Ursache für die erhöhte Durchschlagspannung der Silikongel/Polypropylen- (Versuchsreihe (f)) gegenüber der Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche (Versuchsreihe (b)) wird aus der Analyse des Durchschlagverhaltens ersichtlich. Aufgrund der gegenüber Silikongel wesentlich höheren elektrischen Festigkeit des Polypropylens [69] erfolgte die elektrische Entladung ausschließlich entlang der Grenzfläche oder durch das Silikongel-Element. Gegenüber der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche ist das elektrisch belastete Silikongel-Volumen der Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche aufgrund des Vorhandenseins zweier Silikongel-Isolierelemente verdoppelt. Geht man davon aus, dass Silikongel makroskopische Bereiche unterschiedlicher elektrischer Festigkeit aufweist, so existiert in einem Silikongel-Element nicht immer ein Bereich der absolut gesehen geringsten Festigkeit, sondern es existiert immer nur ein lokales Minimum der Festigkeit. Durch die Vergrößerung des Isolierstoffvolumens steigt die Wahr-

scheinlichkeit, dass ein makroskopischer Bereich mit noch geringerer elektrischer Festigkeit belastet wird (Volumeneffekt), von dem aus die zum Durchschlag der Isolierung führende Entladung eingeleitet wird. Dieser Umstand erklärt die gegenüber der Silikongel/Silikongel- leicht erhöhte Durchschlagspannung der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche.

Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzflächen mit thermischer Belastung

Um den Einfluss einer zyklisch thermischen Belastung auf die elektrische Festigkeit der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche zu simulieren, wurden diese einer 1000-stündigen zyklischen Belastung (Zyklus 12 h bei 20°C gefolgt von 12 h bei 90°C) ausgesetzt. Während der gesamten Belastung wirkte ein mechanischer Überdruck von 100 hPa auf die Grenzfläche. Die elektrische Prüfung erfolgte nach einer 24-stündigen Konditionierung der Modellisolierung unter Druckeinwirkung bei Raumtemperatur. Diese Untersuchung ist insofern von hohem praktischen Interesse, als es aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silikongel ($\alpha \approx 300 \cdot 10^{-6}/K$) und Polypropylen ($\alpha = 160 \cdot 10^{-6}/K$ [69]) zu Relativbewegungen im Bereich der Grenzfläche kommen kann, was zu Ablösungen und damit zur Entstehung festigkeitsmindernder Fehlstellen führen könnte. Weiterhin ist davon auszugehen, dass eine in der erhöhten thermischen Belastung begründete Zunahme der Härte sowie Abnahme der Adhäsionsfähigkeit des Silikongels (siehe 4.3.3.3) derartige Effekte zusätzlich begünstigen.

Die ermittelte Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche nach der thermischen Vorbelastung (*Versuchsreihe (g)*) weist gegenüber derjenigen der thermisch unbelasteten Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche (*Versuchsreihe (f)*) eine leicht erhöhte 63-%-Durchschlagspannung auf, was jedoch mit einer erhöhten Messwertstreuung einhergeht (*Abb. 4.73*). Ein direkter Vergleich der ermittelten Verteilungsfunktionen ist jedoch nicht statthaft, da für die elektrische Prüfung der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche nach der thermischen Vorbelastung nur ein verminderter Stichprobenumfang von acht Proben zur Verfügung stand. Zwei der Prüflinge wurden durch die thermische Belastung mechanisch zerstört, so dass eine elektrische Prüfung nicht mehr möglich war. Allerdings bietet dieser Sachverhalt einen Erklärungsansatz für das veränderten Durchschlagverhalten - insbesondere die erhöhte Messwertstreuung - der verbleibenden acht Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzflächenmodelle nach der thermischen Vorbelastung. Demnach ist zu erwarten, dass es bei den verbleibenden acht Prüflingen aufgrund der thermischen Belastung zu starken mechanischen Spannungen im Bereich der Grenzfläche kommt, die zu einer Verschiebung der Elektroden geführt haben könnten, was sowohl zu

4.4 Elektrische Festigkeit an Grenzflächen

einer Steigerung der elektrischen Festigkeit als auch zu deren Minderung führen kann und damit die erhöhte Messwertstreuung erklären könnte. Weiterhin könnte die thermische Vorbelastung (vgl. 4.2.1.5, "Trocknung") zu einem verminderten Feuchtigkeitsgehalt in der Modellisolierung führen, was einen zusätzlichen Einfluss auf die Durchschlagspannung der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche haben könnte.

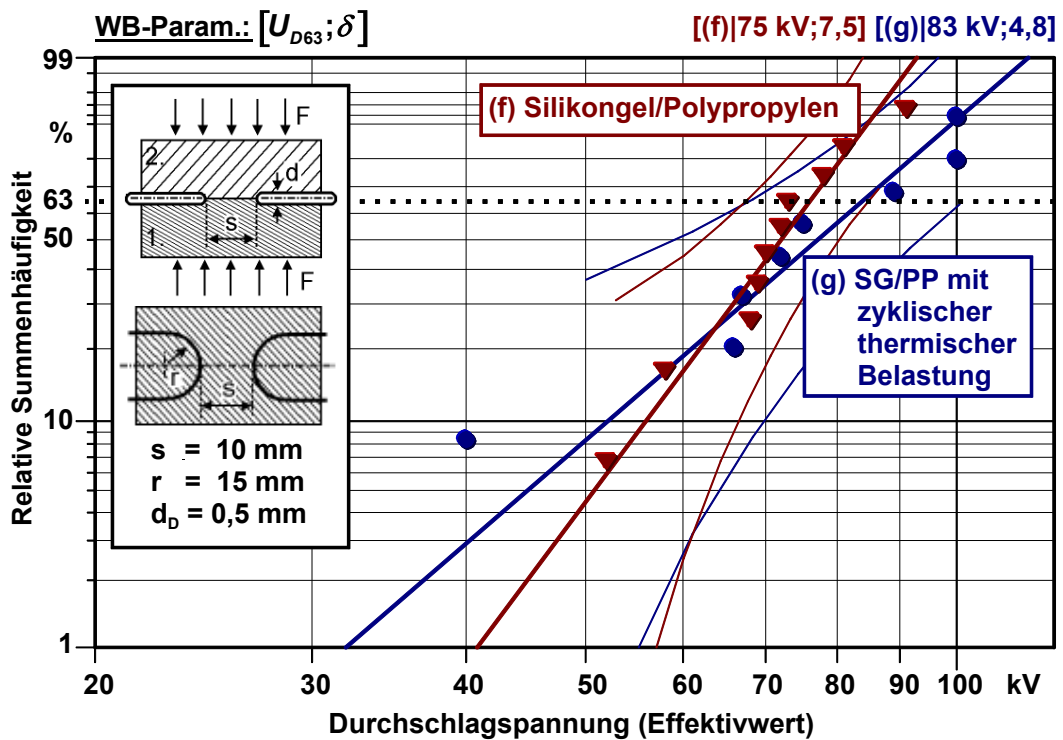


Abb. 4.73: Verteilungsfunktionen der Durchschlagspannung der Silikongel/Polypropylen-Längsgrenzfläche mit und ohne zyklisch thermischer Vorbelastung

Dieses Ergebnis dokumentiert wiederum die guten elektrischen Grenzflächeneigenschaften von Silikongel, zeigt jedoch zugleich die Notwendigkeit auf, die durch thermische Beanspruchungen hervorgerufenen Effekte, die zu einer Minderung der elektrischen Festigkeit führen können, bei der Auslegung der Isolierung konstruktiv auszuschließen.

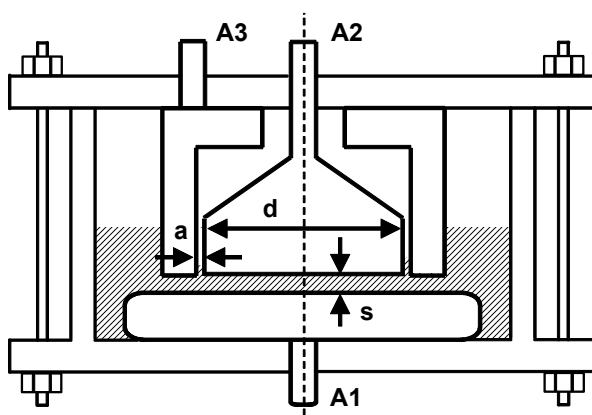
4.5 Dielektrizitätszahl und Verlustfaktor

Neben der Durchschlagfestigkeit ist auch die Kenntnis der Dielektrizitätszahl ϵ_r und des Verlustfaktors $\tan\delta$ sowie deren Abhängigkeiten von äußeren physikalischen Einflüssen (z.B. Temperatur, elektrische Feldstärke) für eine beanspruchungsgerechte Auslegung von Isolierungen von entscheidender Bedeutung. Beispielsweise kann die Veränderung der Dielektrizitätszahl eines Isolierstoffes bei einem Mischdielektrikum zu unerwünschten Änderungen der elektrischen Feldverteilung führen. Weiterhin kann ein hoher Verlustfaktor eine kritische Erwärmung und die damit verbundene thermische Zerstörung des Isolierstoffes zur Folge haben (Wärmedurchschlag). Die dielektrischen Eigenschaften von Silikonflüssigkeiten und Silikongummi sowie deren Abhängigkeiten von Temperatur, Feldstärke, Feuchtigkeitsgehalt etc. sind in einer Vielzahl von Untersuchungen ermittelt worden [9;56;59;70]. Dagegen finden sich in der Literatur nur unzureichende Angaben über die dielektrischen Eigenschaften von Silikongel. Daher wurden hier die Dielektrizitätszahl und der Verlustfaktor sowie deren Abhängigkeiten von der Feldstärke und der Temperatur untersucht.

Die Dielektrizitätszahl ϵ_r ist definiert als Quotient aus der Kapazität C_X eines Kondensators, bei dem der Raum zwischen den Elektroden völlig mit dem betreffenden Isolierstoff ausgefüllt ist, und der Kapazität C_0 der leeren Elektrodenanordnung im Vakuum. Die geometrischen Abmessungen des Kondensators sind dabei derart zu wählen, dass diese klein gegenüber der Messwellenlänge des elektromagnetischen Feldes innerhalb der Probe sind, bei der die Messung durchgeführt wird [71]. Als dielektrischer Verlustfaktor $\tan\delta$ eines Isolierstoffes gilt der Tangens des Fehlerwinkels (Verlustwinkels) δ , um den die Phase zwischen Strom und Spannung (sinusförmig) im Kondensator von $\pi/2$ abweicht, wenn das Dielektrikum ausschließlich aus dem Isolierstoff besteht [71]. Der Verlustfaktor wird als Maß für die dielektrischen Verluste und die damit verbundene Erwärmung des Isolierstoffes herangezogen [13].

Zur Bestimmung der dielektrischen Kenngrößen dient eine Anordnung aus zwei kreisförmigen Plattenelektroden, die mit einem Schutzring umgeben ist (siehe Abb. 4.74). Der Schutzring eliminiert den Einfluss des Randfeldes, so dass das Feld zwischen den Elektroden als homogen angesehen werden kann. Die Messelektrode besitzt einen Durchmesser von $d = 49,5 \text{ mm}$, die Breite des Schutzspaltes beträgt $a = 1 \text{ mm}$ und der Elektrodenabstand wurde zu $s = 2 \text{ mm}$ gewählt. Das Einbringen des Silikongels erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurde die Hochspannungselektrode 3 mm hoch mit unvernetztem Silikongel übergossen und

eine Entgasung durchgeführt. Anschließend wurden die Messelektrode und der Schutzring aufgebracht und eine erneute Entgasung zur Entfernung potentieller Lufteinschlüsse zwischen den Plattenelektroden durchgeführt. Die Vulkanisation erfolgte bei 90°C . Abschließend wurde die Anordnung nochmals einige Millimeter mit Silikongel umgossen. Die Anordnung ist derart ausgelegt, dass thermisch bedingte Ausdehnungen des Silikongels keine nachweisbare Änderung des Abstandes s der Plattenelektroden bewirken. Das sich aufgrund thermischer Einwirkung ausdehnende Silikongel kann aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften seitlich aus der Plattenanordnung entweichen, so dass nur geringe mechanische Spannungen zwischen den Plattenelektroden zu erwarten sind.



- A1: Hochspannungselektrode**
- A2: Messelektrode**
- A3: Schutzring**

Abb. 4.74: Elektrodenanordnung mit Schutzring in Anlehnung an VDE 0303 Teil 4 zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften von Silikongel

Zur Bestimmung der Dielektrizitätszahl ϵ_r und des Verlustfaktors $\tan\delta$ wurde eine Schering-Messbrücke mit oszillographischem Nullindikator eingesetzt; das Messprinzip ist ausführlich in der Literatur beschrieben [72]. Die Messungen erfolgten mit 50-Hz -Wechselspannung bei verschiedenen Feldstärken im Bereich von $2,8\text{ kV/mm}$ bis 28 kV/mm (Scheitelwerte) jeweils bei den Temperaturen 22°C und 90°C . Die Untersuchung wurde mittels zweier unter identischen Bedingungen gefertigter Elektrodenanordnungen durchgeführt, wobei die dabei ermittelten Messwerte keinen signifikanten Unterschied erkennen ließen.

Die Dielektrizitätszahl des Silikongels beträgt bei Raumtemperatur $\epsilon_r|_{22^{\circ}\text{C}} = 2,8$, der Verlustfaktor $\tan\delta|_{22^{\circ}\text{C}} = 2 \cdot 10^{-3}$. Mit steigender Temperatur findet eine geringfügige Abnahme der Dielektrizitätszahl sowie ein Anstieg des Verlustfaktors statt. Bei einer Temperatur von 90°C wurde eine Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r|_{90^{\circ}\text{C}} = 2,65$ ermittelt. Der Verlustfaktor ist auf ca. den dreifachen Wert gegenüber dem bei Raumtemperatur ermittelten angestiegen. Eine Abhängigkeit des Verlustfaktors sowie der Dielektrizitätszahl von der Feldstärke konnte im untersuchten Bereich von $2,8\text{ kV/mm}$ bis 28 kV/mm (Scheitelwerte) nicht nachgewiesen werden.

Zunächst zeigen die bei Raumtemperatur ermittelten Werte der Dielektrizitätszahl und des Verlustfaktors, dass das hier untersuchte Silikongel hinsichtlich dieser Werte durchaus mit den Silikongelen anderer Hersteller vergleichbar ist (vgl. 2.2). Wie aufgrund des chemischen Aufbaus von Silikongel (vgl. 2.1) zu erwarten ist, gleicht das dielektrische Verhalten von Silikongel dem von Silikongummi und Silikonflüssigkeit. Beide Isolierstoffe weisen ebenfalls die beschriebenen Abhängigkeiten auf, wenn auch in unterschiedlichen Ausprägungen [9;70;73].

Die mit steigender Temperatur einhergehende Abnahme der Dielektrizitätszahl ist typisch für einen sich vermindernenden Beitrag der Orientierungspolarisation zur Polarisation des Isolierstoffes. Die mit steigender Temperatur zunehmende ungeordnete Wärmebewegung der Moleküle behindert eine vollständige Orientierung der Dipole, was zu einer Abnahme der Dielektrizitätszahl führt [13;23]. Nach [9] kann zusätzlich eine temperaturbedingte Aufweitung der Makromoleküle dieses Verhalten begünstigen.

Die Abhängigkeit des Verlustfaktors bzw. der entstehenden Verlustleistung von der Temperatur begründet sich durch die im Dielektrikum entstehenden Polarisations- und Stromwärmeverluste. Dabei ist davon auszugehen, dass bei höheren Temperaturen die Stromwärmeverluste aufgrund der starken Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit gegenüber den Polarisationsverlusten dominieren [23]. Orientierende Messungen zeigten erwartungsgemäß, dass die elektrische Leitfähigkeit von Silikongel bei einer Erwärmung von 22°C auf 90°C um mehr als das 5-fache zunimmt. Bezüglich der Absolutwerte des Verlustfaktors sowie der Ausprägung seiner Abhängigkeit von der Temperatur, nimmt Silikongel eine Mittelstellung zwischen Silikongummi und Silikonflüssigkeit ein. Dabei zeigt der Verlustfaktor von Silikonflüssigkeiten im Vergleich zu Silikonelastomeren eine noch stärkere Zunahme mit der Temperatur, was charakteristisch für einen ionischen Leitfähigkeits-Mechanismus ist [70].

Im Vergleich zu einem Öl-Papier-Dielektrikum kann nach [9] für praktische Silikongummi-Isolierungen die Gefahr hinsichtlich einer kritischen Erwärmung mit einem eventuell resultierenden Wärmedurchschlag als gering eingeschätzt werden. Diese Aussage ist aufgrund der nahezu identischen dielektrischen Eigenschaften von Silikongummi und Silikongel auf Silikongel-Isolierungen übertragbar. Überdies wurde bei orientierenden Untersuchungen an Silikongel-Modellisolierungen, bei denen der Isolierstoff einer elektrischen Belastung von 15 kV/mm (Scheitelwert) ausgesetzt wurde, keine Erwärmung des elektrisch belasteten Isolierstoffbereiches über die Umgebungstemperatur hinaus festgestellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Silikongele, die zur Gruppe der kaltvulkanisierenden 2-Komponenten-Silikonelastomere zählen, sind vergleichsweise neue Isolierstoffe, die sich neben einer guten thermischen Stabilität, durch eine hohe Elastizität, geringe Härte sowie eine ausgeprägte Eigenklebrigkeit auszeichnen. Dieses einzigartige Eigenschaftsprofil lässt den Einsatz von Silikongelen als Isolierstoff für ausgewählte Anwendungen im Bereich der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik als vielversprechend erscheinen. Um fundierte Aussagen über die Einsetzbarkeit von Silikongelen für dieses Anwendungsfeld treffen zu können und Richtlinien für eine beanspruchungsgerechte Auslegung von Silikongel-Isolierungen zu schaffen, ist es zwingend erforderlich, die dafür relevanten Eigenschaften sowie deren Abhängigkeit von den unter den zu erwartenden Einsatzbedingungen auftretenden Einflüssen zu bestimmen.

Zu diesem Zweck wurde in der vorliegenden Arbeit die Wirkung verschiedener Vorbelastungen und Betriebsbedingungen auf das Kurz- und Langzeitverhalten von Silikongel-Modellisolierungen bei Beanspruchung durch hohe elektrische Felder untersucht. Standardmäßig wurde bei der Herstellung der Isolierungen mit umgossenen Elektrodenanordnungen zur Prägung quasihomogener Feldverteilungen und netzfrequenter Prüfwechselspannung gearbeitet. Aufgrund der Tatsache, dass sich die auf dem Markt befindlichen Silikongele teilweise in ihrer chemischen Zusammensetzung und damit verbunden in ihren Materialeigenschaften unterscheiden, kam im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich ein speziell für den Einsatz im Bereich der Garniturentechnik formuliertes Silikongel zum Einsatz. Die wichtigsten auf der Basis von Experimenten an mehr als 1200 Modellisolierungen gewonnenen Erkenntnisse sind im Folgenden zusammengefasst.

- **Fertigungsrelevante Einflüsse:** Gaseinschlüsse im Silikongel sind Fehlstellen, die bevorzugte Ausgangspunkte für eine zum Durchschlag der Isolierung führende Entladung darstellen. Daher ist eine Entgasung des Silikongels vor Abschluss der Vernetzungsreaktion eine notwendige Voraussetzung zur Erzeugung von Vulkanisaten mit hoher elektrischer Festigkeit. Ein Einfluss der Vernetzungstemperatur (22°C und 90°C) auf die Durchschlagfestigkeit von Silikongel-Isolierungen konnte nicht nachgewiesen werden. Fremdschichten auf den Elektrodenoberflächen führen dagegen zu einer signifikanten Herabsetzung der elektrischen Festigkeit. Dabei konnte eine vom Elektrodenmaterial (Stahl, Messing, Aluminium) ausgehende Beeinflussung des Durchschlagverhaltens nicht festgestellt werden.

Ferner zeigte sich, dass die Durchschlagfestigkeit von Silikongel geringfügigen chargenabhängigen Schwankungen unterworfen ist sowie durch die Lagerungsbedingungen der Komponenten vor der Verarbeitung beeinflusst wird.

- **Einfluss der Spannungsform:** Das Silikongel weist ebenso wie die meisten Isolierstoffe bei Blitzstoßbelastung die höchste Durchschlagfestigkeit auf, was auf die sehr kurze Beanspruchungsdauer zurückzuführen ist. Die bei Wechselspannungs- und Schaltstoßbelastung ermittelten Festigkeitswerte sind miteinander vergleichbar. Diesen Werten gegenüber ist die Gleichspannungsfestigkeit um 25 % herabgesetzt. Die Höhe der Messwertstreuung ist weitgehend unabhängig von der Prüfspannungsform.
- **Einfluss der geometrischen Ausdehnung der Isolierung:** Die Durchschlagfestigkeit von Silikongel weist eine ausgeprägte Abhängigkeit von der geometrischen Ausdehnung der Isolierung auf. Dies ist in erster Linie auf statistische Einflüsse, d.h. auf die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von festigkeitsmindernden Fehlstellen im Isolierstoff bzw. an den Grenzflächen zwischen Isolierstoff und Elektrode zurückzuführen. Mit zunehmender Vergrößerung der Isolierung nimmt diese Abhängigkeit signifikant ab und strebt auf einen Grenzwert zu. Beträgt der mittels Kugel-Kugel-Anordnung (Kugeldurchmesser 20 mm, Abstand 2 mm) ermittelte Scheitelwert der 63%-Durchschlagfeldstärke 63 kV/mm, so ergibt sich bei Verwendung einer Platte-Platte-Anordnung (Plattendurchmesser 29 mm, Abstand 2 mm) bei leicht erhöhter Messwertstreuung ein Wert von 32 kV/mm. Mit weiterer Vergrößerung der Plattenfläche sowie des Abstandes findet bei nahezu unveränderter Messwertstreuung nur noch eine vergleichsweise geringfügige Abnahme der Durchschlagfeldstärke statt.
- **Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur:** Silikongel-Isolierungen, die vor der Durchschlagprüfung spannungslos in Kontakt zu einer Umgebung mit hohem Feuchtigkeitsgehalt standen, weisen eine um mehr als 50 % reduzierte Durchschlagfestigkeit sowie eine erhöhte Messwertstreuung auf. Dieses Verhalten ist nahezu unabhängig davon, ob es sich bei der Feuchtigkeitsexposition um den direkten Kontakt zu demineralisiertem Wasser (22°C) oder um eine Konditionierung im Feuchtklima (20°C bis 80°C und 90 % relativer Feuchte) handelt. Darüber hinaus führt die Abkühlung von durchfeuchtetem Silikongel auf eine Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes (-2°C) zu einer weiteren Verminderung der Durchschlagfestigkeit um nahezu 10 %. Durch Trocknung kann die von einer Feuchtigkeitsexposition ausgehende festigkeitsmindernde Wirkung aufgehoben werden.

Thermische Langzeitbelastungen (22°C bis 100°C über 5000 h) führen zu keiner Verminderung der Durchschlagfestigkeit von Silikongel-Isolierungen. Dagegen bewirken bereits Temperaturen in Gefrierpunktnähe eine Abnahme der Durchschlagfestigkeit um bis zu 50% . Isolierungen, die bei erhöhter Temperatur einer Trocknung unterzogen wurden, zeigen diesen Festigkeitsverlust nach der Abkühlung nicht – ein Phänomen, das auf einen verringerten Feuchtigkeitsgehalt im Material zurückzuführen ist. Zusammenfassend zeigen diese Untersuchungen, dass Silikongel keine Feuchtigkeitsbarriere darstellt. Vielmehr weist das Durchschlagverhalten bei Anwesenheit von Feuchtigkeit deutliche Analogien zu dem von Isolierölen und Silikonflüssigkeiten her bekannten Verhalten auf. Dabei sind die unter identischen Prüfbedingungen ermittelten Durchschlagfestigkeiten von Silikongel um mehr als den Faktor 2,5 größer als diejenigen handelsüblicher Silikonflüssigkeiten.

- **Alterung im homogenen elektrischen Feld bei Wechselspannungsbelastung:** Eine Langzeitbelastung von Silikongel durch quasihomogene elektrische Felder führt zu keiner nachweisbaren elektrischen Alterung des Isolierstoffes. Bemerkenswert ist, dass die nach einer Wasserlagerung (5000 h bei 22°C) unter elektrischer Belastung (15 kV/mm) ermittelte Durchschlagfestigkeit deutlich über der von spannungslos wassergelagertem Silikongel liegt. Es wurden Indizien dafür gefunden, dass diese Eigenschaft durch chemische Reaktionen im Material hervorgerufen wird, deren Zustandekommen auf der speziellen Formulierung des hier eingesetzten Silikongels beruht.

- **Vorhandensein von feldstärkeerhöhenden Fehlstellen:** Silikongel hält bei der Belastung durch räumlich stark begrenzte elektrische Felder deutlich höheren Feldstärken stand als bei einer Belastung durch homogene Felder. An potentialführenden feldstärkeerhöhenden Fehlstellen kann es zum Auftreten von Teilentladungen (TE) und infolge dessen zu einer starken Degradation des Isolierstoffes kommen, was den unmittelbaren Durchschlag der Isolierung zur Folge haben kann. Liegt dagegen die Beanspruchung unterhalb der TE-Einsatzfeldstärke, so zeigt Silikongel auch bei Belastung durch räumlich stark begrenzte Felder keine nachweisbare elektrische Alterung, was u.a. in Standzeitversuchen mit Laufzeiten von bis zu 5000 h nachgewiesen wurde. Bemerkenswert ist, dass es an potentialführenden Fehlstellen mit sehr hohem Inhomogenitätsgrad nach einem anfänglichen TE-Einsatz häufig zu einem dauerhaften Ausbleiben der TE-Aktivität und einem damit verbundenen Stillstand der Zerstörungsprozesse kommt, was im Wesentlichen auf die Nichtleitfähigkeit der sich im Silikongel bildenden Entladungskanäle zurückzuführen ist. Ein Einfluss von Feuchtigkeit auf die Langzeitfestigkeit von Silikongel an feldstärkeerhöhenden Fehlstellen konnte statistisch nicht nachgewiesen werden. Jedoch wurden Indizien dafür gefunden, dass die

Anwesenheit von Feuchtigkeit eine zerstörungsbegünstigende Wirkung besitzt. Die Tatsache, dass es im durchfeuchteten Silikongel - verglichen mit dem unter Normalbedingungen konditionierten Material - schon bei geringeren Belastungsfeldstärken zur Entstehung von Degradationserscheinungen kommt, deutete darauf hin. Um letztendlich zu Aussagen betreffend der von diesem Phänomen ausgehenden Gefährdung zu gelangen bzw. auf den hierbei wirksamen Zerstörungsmechanismus schließen zu können, sind weiterführende Untersuchungen über große Zeiträume ($>> 5000 h$) notwendig, was jedoch aufgrund der zur Verfügung stehenden Zeit im Rahmen dieser Arbeit nicht zu leisten war.

- **Längsgrenzflächen:** Neben der Durchschlagfestigkeit des Isolierstoffes selbst wurden ausgewählte Längsgrenzflächen auf ihr Durchschlagverhalten hin untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Durchschlagfestigkeit der Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche, die durch zwei getrennte Gießvorgänge mit zwischenzeitlicher Vernetzung des ersten Gießteils erzeugt wurde, mit der von Silikongel ohne Grenzfläche vergleichbar ist. Dies trifft gleichermaßen für die aus zwei separat vernetzten Silikongel-Isolierelementen sowie für die aus einem Silikongel- und einem Polypropylen-Isolierelement bestehende Längsgrenzfläche zu, bei denen die Isolierelemente jeweils unter einem definierten Anpressdruck zueinander stehen. Dieses einzigartige Grenzflächenverhalten begründet sich im Wesentlichen aus der hohen Anpassungsfähigkeit des Silikongels an beliebig strukturierte Oberflächen sowie der hohen Gasdurchlässigkeit des Materials, die ein effektives Entweichen von Lufteinschlüssen, die sich beim Zusammenfügen der Isolierelemente in der Grenzschicht gebildet haben, ermöglicht. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen, dass die Silikongel/Silikongel-Längsgrenzfläche auch bei Anwesenheit von Feuchtigkeit keine nennenswerte Schwachstelle darstellt.

- **Variation der Silikongel-Formulierung:** Durch Variation der Vernetzungsdichte - was beispielsweise über die Änderung des Mischungsverhältnisses, in dem die Komponenten zueinander stehen, erreicht werden kann - lassen sich Vulkanisate erzeugen, deren mechanische Eigenschaften in einem gewissen Bereich einstellbar sind. Dabei ist mit einer steigenden Vernetzungsdichte ein Anstieg der mechanischen Härte sowie der Durchschlagfestigkeit verbunden.

- **Dielektrizitätszahl und Verlustfaktor:** Die Dielektrizitätszahl des Silikongels wurde bei $22^{\circ}C$ zu $\epsilon_r = 2,8$ bestimmt, der Verlustfaktor zu $\tan\delta = 2 \cdot 10^{-3}$. Eine Abhängigkeit beider Größen von der Feldstärke konnte nicht festgestellt werden. Mit steigender Temperatur findet eine geringfügige Abnahme der Dielektrizitätszahl sowie ein leichter Anstieg des Verlustfaktors statt, was dem von Silikongummi und -flüssigkeiten her bekannten Verhalten entspricht.

- **Mechanische Eigenschaftsänderungen:** Thermische Langzeitbeanspruchungen (90°C) führen zu einer deutlichen Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Vulkanisates, was durch einen Anstieg der Härte sowie durch eine Abnahme der Adhäsionsfähigkeit zum Ausdruck kommt. Diese Eigenschaftsänderungen lassen sich auf einen thermisch bedingten Anstieg der Vernetzungsdichte zurückführen. Eine Verminderung der elektrischen Festigkeit findet dabei nicht statt. Silikongel-Oberflächen, die in Kontakt zu Feuchtigkeit standen, zeigen zudem einen deutlichen Verlust der Adhäsionsfähigkeit, der auf eine Auslösung von unvernetzten Bestandteilen aus dem Vulkanisat zurückzuführen ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen deutlich, dass Silikongel als Isolationsmaterial für ausgewählte Anwendungen im Bereich der Hoch- und Mittelspannungsisolations- und -verbindungstechnik im Vergleich zu anderen Isolierstoffen deutlich überlegene Eigenschaften besitzt. Insbesondere die hohe elektrische Festigkeit an Grenzflächen hebt den Werkstoff von allen übrigen Isolierstoffen mit Festkörpercharakter ab. Aufgrund der ausgeprägten Eigenklebrigkeit, der geringen Härte und der hohen Elastizität können betriebsbedingt auftretende mechanische Spannungen im Isolierstoff und an Grenzflächen zu anderen Werkstoffen kompensiert und somit Rissbildungen, die in der Regel zu einer Herabsetzung der Lebensdauer einer Isolierung führen, vermieden werden - eine Eigenschaft, in der Silikongel beispielsweise Gießharzen deutlich überlegen ist. Darüber hinaus ist im Vergleich zu Polymeren, deren Hauptkette aus Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen besteht (z.B. Polyethylen), die Isolierfähigkeit von Silikongel an feldstärkeerhöhenden Fehlstellen als vorteilhaft zu bewerten, was im Wesentlichen auf der Nichtausbildung von elektrisch leitfähigen Strukturen im Silikongel unter TE-Einwirkung beruht.

Aufgrund der Fließfähigkeit des Materials im unvernetzten Zustand sowie der vergleichsweise hohen elektrischen Festigkeit ist im Einsatz von Silikongel als Substitut für Isolierflüssigkeiten (z.B. in Durchführungen, Wandlern, Kondensatoren) Einsatzpotential zu sehen, sofern nicht zusätzlich die Aufgabe der konvektiven Wärmeabfuhr besteht. Der Einsatz von Silikongel könnte den Verzicht auf eine auslaufsichere Kapselung ermöglichen, was aus umweltschutzrechtlichen und wirtschaftlichen Gründen für bestimmte Anwendungen interessant sein könnte. Des Weiteren ist bei einem derartigen Einsatz aufgrund der Festkörperstruktur des Silikongels die Gefahr des für Isolierflüssigkeiten typischen auf Verschmutzungen beruhenden Durchschlagmechanismus des Faserbrückendurchschlages ausgeschlossen.

Die Auslegung von Silikongel-Isolierungen verlangt jedoch die Berücksichtigung spezieller Werkstoffeigenschaften im Isolationsdesign. Insbesondere dem verhältnismäßig hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silikongel sowie einer Veränderung der mechanischen Werkstoffeigenschaften bei thermischer Beanspruchung ist Beachtung zu schenken. Weiterhin sollte der Kontakt mit Feuchtigkeit ausgeschlossen werden, was sich durch den Einsatz von Dampfsperren erreichen lässt. Ansonsten hat die Auslegung der Isolierung mit deutlich geringeren Belastungsfeldstärken zu erfolgen.

Der erarbeitete Wissensstand kann zudem als Ausgangspunkt für eine gezielte Weiterentwicklung und Optimierung der hochspannungstechnischen Eigenschaften des Werkstoffes Silikongel dienen. Diesbezüglich sollte der Möglichkeit nachgegangen werden, inwieweit sich das hochspannungstechnische Wissen über chemisch verwandte und derzeit wesentlich umfassender erforschte Isolierstoffe, wie z.B. Silikon-gummi oder -flüssigkeit inklusive der diesen Werkstoffen zugesetzten Additive, auf den Werkstoff Silikongel übertragen lässt.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Yaworski, H. G.; Bukovnik, R.: Silicone gel technology for power cable accessories. IEEE Transmission and Distribution conference, Atlanta Nov. 2001, 1TD051
- [2] Wacker-Chemie: Wacker RTV-2 Siliconkautschuke – Klebstoffe, Schäume, Vergussmassen. Firmeninformationsschrift Nr.: 5188 4.00, München, 2000
- [3] Ruemenapp, T.: Untersuchung der elektrischen Festigkeit des Packagings von Hochleistungs-IGBT-Modulen. Dissertation Univ. Dortmund, Shaker Verlag, Aachen, 2002
- [4] Yaworski, H. G.; Craig, G.; Roberts, D.: The Use of Silicone Gels for Jointing Power Cables. IEEE Transmission and Distribution conference, Los Angeles, Sept. 1996, 0-7803-3522-8/96
- [5] Strobel, R.; Graf, R.; Raßer, S.: PowerGel – Neue Technologie für Niederspannungsmuffen. Energiewirtschaft Jg.101 (2002), Heft 1-2, S. 58-61
- [6] McLaughlin, L.: How Reliable Are Your Secondary UG Circuits? Transmission & Distribution World, Sept. 2003
- [7] Weißenberg, W.: Langzeiterfahrungen mit Silikonelastomeren in EHV-Kabelgarnituren. ETG-Fachbericht Nr. 93 Silikonelastomere -Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, Berlin 2003
- [8] Fournier, D.; Dang C.: A Study of Silicone Grease Characteristics Used in Power Cable Accessories. Power Tech Conference, Stockholm, Sweden, 1995
- [9] Oesterheld, J.: Dielektrisches Verhalten von Silikonelastomer-Isolierungen bei hohen elektrischen Feldstärken. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 196, Düsseldorf VDI Verlag, 1996
- [10] Wacker-Chemie: Silicone – Verbindungen und Eigenschaften. Firmeninformationsschrift Nr.: 4945 07.01, München, 2001
- [11] Noll, W.: Chemie und Technologie der Silicone, Weinheim/Bergstr.: Verl. Chemie, 1960

- [12] Hechtel, W.: Chemistry and Technology of Room-Temperature-Vulcanizable Silicone Rubber. Silicones Chemistry and Technology, Vulkan-Verlag, Essen, 1991
- [13] Beyer, M.; Boeck, W.; Möller, K.; Zaengl, W: Hochspannungstechnik - Theoretische und praktische Grundlagen. Springer-Verlag, 1992
- [14] Wewers, D.: Reaktive Silicones. Silicones Chemistry and Technology, Vulkan-Verlag, Essen, 1991
- [15] Wacker-Chemie: Datenblatt Wacker SilGel[®] 612
- [16] Ruemenapp, T.: Zur Alterung von Aluminiumnitrid und Silikonweichvergußmassen in Hochleistungs-IGBT-Modulen. ETG-Fachbericht Einfluss von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen, Bad Nauheim, 1999
- [17] Wacker-Chemie: Wacker Silikonöle AK. Firmeninformationsschrift Nr.: 4405 1.02, München, 2001
- [18] Fasching, G.: Die Werkstoffe für die Elektrotechnik – Mikrophysik, Struktur, Eigenschaften. Springer, Wien/New York, 1987
- [19] Straßberger, W.; Winter, H.-J.: Siliconeelastomere in der Mittel- und Hochspannungstechnik. ETG-Fachbericht Nr. 68 Silikonelastomere - Innovative Isolierwerkstoffe für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik. VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1997
- [20] Firmeninformationsschrift Polytec: Silikone für Medizintechnik, technische Silikone, Silikone für die Luft- und Raumfahrttechnik. 5. Auflage, Silikone 07-02-4.1/d
- [21] Forster, E. O.: In the Search for Universal Features of Electrical Breakdown in Solids, Liquids and Gases. IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Massachusetts, 1982
- [22] Prinz, H.: Hochspannungsfelder. R. Oldenbourg Verlag, München, 1969
- [23] Kuchler, A.: Hochspannungstechnik. Grundlagen - Technologie - Anwendungen. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [24] IEC 60243-1: Electrical strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies, (IEC 60243-1:1998)

- [25] Schwaiger, A.: Elektrische Festigkeitslehre.
Verlag von Julius Springer; Berlin, 1925
- [26] Hilgarth, G.: Hochspannungstechnik. Teubner, Stuttgart, 1997
- [27] Lindwedel, E.: Auswirkungen innerer Teilentladungen auf das elektrische Alterungsverhalten eines gefüllten Epoxidharzformstoffes.
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 71, Düsseldorf VDI Verlag, 1990
- [28] Döppert, H.: Modellierung des Raumladungseinflusses auf die elektrische Feldstärke innerhalb einer Nadel-Platte-Anordnung in festen Isolierstoffen.
Dissertation, RWTH Aachen, 1988
- [29] Ebke, T.; Khaddour, A.; Peier, D.: Degradation of Silicone Gel by Partial Discharge due to Different Defects. Eight International Conference Dielectric Materials, Measurement and Applications,
Edinburgh, Great Britain, 2000
- [30] Schiller, G.: Das Durchschlagverhalten von vernetztem Polyethylen (VPE) bei unterschiedlichen Spannungsformen und Vorbeanspruchungen.
Dissertation, Universität Hannover, 1996
- [31] Anwendungstechnische Information,
Makrolon 22xx. Typenreihe, Bayer AG, 2002
- [32] IEC 60270: Partial Discharge Measurement, (IEC EN 60270: 1999)
- [33] Schon, K.: Grundlagen der Teilentladungsmesstechnik, in:
König, D.; Rao, N.: Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik.
VDE-Verlag, Berlin, 1993
- [34] Ebke, T.: Untersuchungen an IGBT-Modulen zur Reduktion von Degradationsprozessen im Packaging von Leistungshalbleitern.
Dissertation Univ. Dortmund, Shaker Verlag, Aachen, 2003
- [35] Firma Lemke Diagnostics GmbH: Teilentladungsmeßsystem LDS-6 zur Detektion der TE-Kenngröße "scheinbare Ladung",
Benutzerhandbuch, 1999
- [36] Blasius, P; Weck, K.-H.: Bewertung von Teilentladungen, in: König, D.; Rao, N.: Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik.
VDE-Verlag, Berlin, 1993
- [37] Hausschild, W.; Mosch, W.: Statistik für Elektrotechniker.
VEB Verlag Technik, Berlin, 1984

- [38] Szczesniak, A. S.: Classification of Textural Characteristics. Journal of Food Science, Band 28, S. 385-386, 1963
- [39] Bourne, M. C.: Texture Profile Analysis. Food Technology, Band 32, Heft 7, S. 62-72, 1978
- [40] Kahle, M.: Elektrische Isoliertechnik. Springer-Verlag, 1989
- [41] Bronstein, I. N; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart/Leipzig, 1991
- [42] Dokumentation Visual-XSel 2000, Firma CRGRAPH, München, Internet: www.crgraph.de, www.weibull.de
- [43] Feser, K.; Kind, D.: Hochspannungs-Versuchstechnik. Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1995
- [44] Wacker RTV-2 Siliconkautschuk Verarbeitung Firmeninformationsschrift, München, 2000
- [45] Reuter, M.: Elektrische Untersuchungen an Silikongel. Jahresbericht 2001 Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik Fachgebiet Hochspannungstechnik -Schering-Institut-, Univ. Hannover, 2002
- [46] Küpfmüller, K.; Kohn, G.: Theoretische Elektrotechnik und Elektronik. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1993
- [47] Bericht zur Untersuchung an vernetzten Poly(dimethylsiloxan) Polymeren Angefertigt im Deutschen Wollforschungsinstitut an der RWTH Aachen, 2004
- [48] IEC 60060-1: High voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, (IEC 60060-1: 1989)
- [49] IEC 60243-3: Electrical strength of insulating materials - Test methods - Part 3: Additional requirements for 1,2/50 μ s impulse tests
- [50] IEC 60243-2: Electrical strength of insulating materials - Test methods - Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage
- [51] Dokopoulos, P.: Wachstumsgesetze der Durchschlagwahrscheinlichkeit von Hochspannungsisolierungen, Dissertation, TH Braunschweig, 1967
- [52] DIN VDE 0263: Kabel mit Isolierungen aus vernetztem Polyethylen und ihre Garnituren. Nennspannungen $U_0/U > 18/30$ kV bis 87/150 kV

- [53] DIN VDE 0298-1: Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen. Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln mit Nennspannungen U_0/U bis 18/30 kV.
- [54] Ruemenapp, T.; Ebke, T.; Peier, D.: Investigation of the Aging Performance of Silicone Gel used in High-Power-Semiconductors. 12th International Symposium On High Voltage Engineering (ISH 2001), Bangalore (India), 2001
- [55] Oesterheld, J.: Silikonelastomere unter hohen elektrischen Beanspruchungen. ETG Fachbericht 68 Silikonelastomere - Innovative Isolierwerkstoffe für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1997
- [56] Karius, V.; Olshausen, R. v.; Einfluss des Wassergehaltes auf das dielektrische Verhalten und die Durchschlagsfestigkeit von Silikonöl. ETG Fachbericht Band 2, Dauerverhalten von Isolierstoffen und Isoliersystemen, Vorträge der ETG-Fachtagung, Baden-Baden, VDE-Verlag, 1977
- [57] Kind, D.; Kärner, H.: Hochspannungs-Isoliertechnik. Vieweg, Braunschweig, 1982
- [58] Heinhold, L.; Stubbe, R.: Kabel und Leitungen für Starkstrom - Grundlagen und das Produkt-Kow-how für das Projektieren von Kabelanlagen. Publics-MCD-Verlag, Erlagen, 1999
- [59] Homburg, V.: Makroskopische Grenzflächen zwischen festen Isolierstoffen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 178, Düsseldorf VDI Verlag, 1995
- [60] Danikas, M. G.: On the Breakdown Strength of Silicone Rubber. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1 No. 6, December 1994
- [61] DIN 50035-1: Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien; Grundbegriffe. Ausgabe 1989-03
- [62] Patsch R.; Kindersberger J.; König D.: Alterung von Betriebsmitteln – ein Überblick. ETG-Fachbericht Nr. 87 Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin 2002
- [63] Möller, K., Meurer, D.: Auswirkung von Teilentladungen auf elektrische Isolierstoffe, in: König, D.; Rao, N.: Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik. VDE-Verlag, Berlin, 1993

- [64] Blechschmitt, H.; Wanser, G.: Erfahrungen mit neueren Kabelisolerstoffen; Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H. VWEW, ISBN 3-8022-0022-5, 1980
- [65] Joint Task Force 21/15: Interfaces in accessories for extruded HV an EHV cables, ELECTRA Nr. 203 , August 2003
- [66] Kreiselmaier, R.: Permeationsverhalten von Elastomerwerkstoffen, Zeitschriftenaufsatz: Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, Band 55, Heft 6, 2002
- [67] DIN 53536: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Bestimmung der Gasdurchlässigkeit. Ausgabe: 1992-10
- [68] Lambrecht, J.: Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren. ETG-Fachbericht Nr. 93 Silikonelastomere -Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, Berlin 2003
- [69] Anwendungstechnische Information, Polypropylen (PP), Thyssen Schulte GmbH
- [70] Winter, H.-J.: Dielektrische Eigenschaften von Silikonelastomeren als Isolierstoffe. ETG-Fachbericht Nr. 93 Silikonelastomere -Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, Berlin 2003
- [71] VDE 0303-4: Bestimmung für elektrische Prüfungen von Isolierstoffen - Teil 4: Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften. VDE Verlag, 1969
- [72] Schwab, A. J.: Hochspannungsmesstechnik. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1981
- [73] Hippel, A. v.: Dielectric Materials and Applications, Technology Press of MIT, Cambridge, 1954
- [74] Arndt, K.-F.; Müller, G.: Polymer Charakterisierung. Carl Hanser Verlag München/Wien, 1996