

UNTERSUCHUNG DES TEMPERATUR- UND
FELDSTÄRKEABHÄNGIGEN RAUMLADUNGSVERHALTENS AN
EINER SCHICHTANORDNUNG AUS SILIKONFETT UND
SILIKONELASTOMER MITTELS AUTOMATISIERTER
LIPP-MESSUNGEN

vorgelegt von
Simon Spelzhausen
M.Sc.

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

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Julia Kowal

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ronald Plath

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reimund Gerhard

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Kalkner

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 12. Juli 2019

Berlin 2019

ABSTRACT

With the current expansion of the German transmission grid by DC-cables, new technical challenges arise due to the possibility of the formation of space charges in cable accessories, in which especially the dielectric interfaces pose a danger to operational safety. In order to provide a better understanding of this space charge behaviour, measurements have to be conducted. Currently, no method based on the Laser Induced Pressure Pulse (LIPP)-principle allows repeatable space charge measurements of dielectric layer arrangements over long periods.

The first part of this thesis presents the development of a method based on the LIPP-principle for repeatable space charge measurements of dielectric layer arrangements. In the second part, the developed method is applied to describe the space charge behaviour at the interface between silicone grease and silicone elastomer in cable accessories. Experiments are carried out with a model consisting of a layer arrangement of silicone grease and silicone elastomer enclosed by brass electrodes.

It was shown for the first time, that repeatable space charge measurements based on the LIPP-principle can be conducted on dielectric layer arrangements of silicone grease and silicone elastomer. The measurement signal consists of a complex pattern of reflections and is interpreted on the basis of calculations and experiments. The signal components are assigned to the individual dielectric interfaces in the model arrangement.

The space charge measurements with the developed method of the model consisting of silicone grease and silicone elastomer were able to show an increasing exponential charge build-up and charge decay with rising temperatures. It was shown that, independently of temperature and electric field strength, charge at the interface between silicone grease and silicone elastomer decays faster compared to charge within the volume of the model arrangement.

The developed method provides the basis for automatic and repeatable space charge measurements based on the LIPP-principle of dielectric layer arrangements in DC-cable accessories.

KURZFASSUNG

Mit dem momentanen Ausbau des Übertragungsnetzes durch Gleichspannungs-Erdkabel in Deutschland ergeben sich neue technische Herausforderungen, da es zur Ausbildung von Raumladungen in den Kabelgarnituren kommen kann, wobei hier vor allem die dielektrischen Grenzflächen eine Gefahr für die Betriebssicherheit darstellen. Für ein besseres Verständnis des Raumladungsverhaltens ist die Durchführung von Raumladungsmessungen unumgänglich. Derzeit gibt es dafür kein Verfahren auf Grundlage des Laser Induced Pressure Pulse (LIPP)-Prinzips, das wiederholbare Raumladungsmessungen an dielektrischen Schichtanordnungen ermöglicht.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird die Entwicklung einer Methode auf Grundlage des LIPP-Prinzips für wiederholbare Raumladungsmessungen an dielektrischen Schichtanordnungen vorgestellt. Im zweiten Teil wird die entwickelte Methode dazu verwendet, das Raumladungsverhalten an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer in Kabelgarnituren zu beschreiben. Dazu werden Versuche an einer Modellanordnung durchgeführt, welche aus einer von Messingelektroden umschlossenen Schichtanordnung aus Silikonfett und Silikonelastomer besteht.

Mit der entwickelten Methode konnte erstmals gezeigt werden, dass wiederholbare Raumladungsmessungen auf Grundlage des LIPP-Prinzips an dielektrischen Schichtanordnungen aus Silikonfett und Silikonelastomer durchgeführt werden können. Das Messsignal besteht dabei aus einem komplexen Reflexionsmuster und wird anhand von Berechnungen und Experimenten interpretiert. Die Komponenten des Signals werden den dielektrischen Grenzflächen in der Modellanordnung zugeordnet.

Die Durchführung von Raumladungsmessungen mit der entwickelten Methode an der Modellanordnung aus Silikonfett und Silikonelastomer konnte mit steigenden Temperaturen einen zunehmend exponentiellen Verlauf der Ladungsaufbau- und Ladungsabbauprozesse zeigen. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass sich Ladung an der Grenzfläche unabhängig von der Temperatur und elektrischen Feldstärke schneller abbaut als im Volumen der Schichtanordnung.

Durch die entwickelte Methode wurde die Grundlage für automatische und wiederholbare Raumladungsmessungen auf Basis des LIPP-Prinzips an dielektrischen Schichtanordnungen in DC-Kabelgarnituren geschaffen.

VERÖFFENTLICHUNGEN

Im Folgenden sind Veröffentlichungen des Autors dieser Dissertation aufgeführt, welche im Zusammenhang mit dem hier vorgestellten Thema stehen.

- [SIP18a] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Electrical Field-Strength Dependent Space Charge and Charge Decay Characteristics at Silicone Rubber / Silicone Grease Interfaces". In: *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. 2018, S. 66–69. ISBN: 978-1-5386-6192-5. DOI: [10.1109/CEIDP.2018.8544843](https://doi.org/10.1109/CEIDP.2018.8544843).
- [SIP18b] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Influence of Coupling Materials on Space Charge Measurements of Silicone Elastomers". In: *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. 2018. DOI: [10.1109/ICHVE.2018.8642225](https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642225).
- [SIP18c] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Parameter Optimization and Improvement of Space Charge Measurements with the Laser Induced Pressure Pulse Method". In: *ETG-Fb. 157: VDE-Hochspannungstechnik*. 2018. ISBN: 978-3-8007-4807-5.
- [SIP18d] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Temperature dependent space charge and charge decay characteristics at silicone rubber / silicone grease interfaces". In: *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2018. ISBN: 978-1-5386-6389-9. DOI: [10.1109/ICD.2018.8514592](https://doi.org/10.1109/ICD.2018.8514592).
- [SP17] S. Spelzhausen und R. Plath. "Test setup and advantages of parallel polarization and depolarization current measurements with space charge measurements by LIPP method". In: *20th International Symposium on High Voltage Engineering*. 2017.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Hochspannungstechnik an der Technischen Universität Berlin in der Zeit von 2015 bis 2019.

Mein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ronald Plath für die gute Betreuung und die Möglichkeit, ein äußerst interessantes Forschungsprojekt unter sehr guten Bedingungen durchführen zu können.

Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Reimund Gerhard möchte ich für seine Unterstützung im Vorfeld der Arbeit und die Übernahme der Gutachtertätigkeit danken. Genauso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Kalkner für die gute Betreuung im Vorfeld der Prüfung sowie seine Gutachtertätigkeit.

Ein großer Dank gilt weiterhin den studentischen Mitarbeitern für die Unterstützung in der Entwicklung des Versuchsaufbaus und vor allem Herrn Mario-Rafael Ionian für die tatkräftige Unterstützung und gute Zusammenarbeit.

Auch meinen Kollegen möchte ich für die Unterstützung in Teilaspekten des Versuchsstandes danken. Bei meinem Kollegen Herrn René Suchantke bedanke ich mich für die anregende Diskussion zu Teilaspekten der Dissertation.

Abschließend möchte ich meinen Eltern und vor allem meiner Schwester für ihre Unterstützung herzlich danken.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit	4
2	STAND DER TECHNIK SOWIE THEORETISCHE BETRACHTUNG DER MODELLANORDNUNG UND DES MESSPRINZIPS	7
2.1	Grundlagen zum Messprinzip	7
2.1.1	Messprinzip	7
2.1.2	Mathematische Beschreibung der Druckwelle	8
2.1.3	Mathematischer Zusammenhang zwischen Druckwelle und messbarem Strom	10
2.1.4	Stand der Technik von LIPP-Messsystemen	12
2.2	Verhalten der Modellanordnung bei Beaufschlagung mit Gleichspannung	14
2.2.1	Beschreibung der Modellanordnung	14
2.2.2	Verhalten der Modellanordnung unter Einfluss einer Spannung	14
2.2.3	Ausbildung von Grenzflächenladungen nach Maxwell-Wagner in der Modellanordnung	16
2.3	Raumladungen	19
3	MESSVERFAHREN FÜR AUTOMATISIERTE UND WIEDERHOLBARE RAUMLADUNGSMESSUNGEN NACH DEM LIPP-PRINZIP	23
3.1	Überblick zum entwickelten Messsystem	23
3.1.1	Aufbau der Prüfzelle	23
3.1.2	Beschreibung des Messsystems	24
3.1.3	Automatisierung der Messungen	27
3.2	Signalverarbeitung und Optimierung	32
3.2.1	Beschreibung der Rohdaten	32
3.2.2	Auslegung des Filters	33
3.3	Optimierung von Versuchsparametern	37
3.3.1	Einfluss des Beschichtungsmaterials	37
3.3.2	Einfluss der Pulsenergie und des Strahldurchmessers	38
3.3.3	Optimierte Versuchsparameter	39
4	INTERPRETATION DES LIPP-PROFILS	41
4.1	Reflexionsverhalten innerhalb der Modellanordnung	41
4.1.1	Berechnetes Reflexionsverhalten	41
4.1.2	Gemessenes Reflexionsverhalten	45
4.2	Experimente zur Interpretation der Signalform	48
4.2.1	Variation der Schichtdicke des Koppelmaterials	48
4.2.2	Vergleich der Polarisationsphase und der Kurzschlussphase	51

4.2.3	Signalform bei Polaritätswechsel	52
4.3	Zuordnung des Messsignals zum berechneten Reflexionsverhalten	53
4.3.1	Silikonfett als Koppelmaterial	53
4.3.2	Silikonöl als Koppelmaterial	54
5	WIEDERHOLBARKEIT	57
5.1	Definitionen	57
5.2	Prüfkörperanordnung	58
5.3	Fehlerbetrachtung einer Messung	60
5.4	Fehlerbetrachtung innerhalb einer Messserie bei unveränderter Prüfkörperanordnung	60
5.5	Fehlerbetrachtung zwischen Messserien bei unveränderter Prüfkörperanordnung	65
5.6	Fehlerbetrachtung zwischen Messungen nach erneuter Präparation der Prüfkörperanordnung	68
6	LIPP-MESSUNGEN ZUM RAUMLADUNGSVERHALTEN EINER SCHICHTANORDNUNG AUS SILIKONFETT UND SILIKONELASTOMER	71
6.1	Versuchsbeschreibung anhand einer Messserie bei Raumtemperatur	71
6.2	Einfluss der Temperatur	76
6.2.1	Einfluss der Temperatur auf die Raumladungsverteilung in der Modellanordnung	76
6.2.2	Analyse des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus in Abhängigkeit von der Temperatur	83
6.3	Einfluss der elektrischen Feldstärke	88
6.3.1	Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die Raumladungsverteilung innerhalb der Modellanordnung	88
6.3.2	Analyse des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke	93
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	97
	LITERATURVERZEICHNIS	101

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1	Skizze einer Muffe (nicht maßstabsgetreu) zur Verbindung von zwei Hochspannungskabeln .	2
Abbildung 2.1	Skizze zum LIPP-Prinzip mit HV-Elektrode, Koppelmaterial, Plattenprüfkörper und Erdelektrode sowie Ausbreitung der durch den Laserpuls angeregten Druckwelle	7
Abbildung 2.2	Verschiedene Kompressionszustände innerhalb der Prüfkörperanordnung	8
Abbildung 2.3	Druckprofil in Abhängigkeit von der Zeit an der Stelle x	9
Abbildung 2.4	Skizze einer Prüfkörperanordnung mit einer Flächenladungsdichte σ_s und daraus resultierenden elektrischen Feldstärken sowie auf den Elektrodenoberflächen influenzierten Ladungsdichten	10
Abbildung 2.5	Modellanordnung der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer	14
Abbildung 2.6	Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Modellanordnung unter Wechselstrom (AC)-Belastung (links) und Gleichstrom (DC)-Belastung (rechts)	15
Abbildung 2.7	Skizze zur Beschreibung des zeitdynamischen Verhaltens der elektrischen Feldstärke sowie der Grenzflächenladungsdichte in der Modellanordnung	17
Abbildung 2.8	Beispielhafter Verlauf der elektrischen Felder sowie der Grenzflächenladungsdichte σ_g in der Modellanordnung	18
Abbildung 2.9	Ausbildung von Homocharges und Heterocharges mit Darstellung der Raumladungsdichte sowie dem daraus resultierenden elektrischen Feld	19
Abbildung 3.1	Explosionszeichnung der Messzelle des entwickelten LIPP-Messsystems	23
Abbildung 3.2	Schematische Zeichnung des entwickelten LIPP-Messsystems mit automatischer Beschichtungseinrichtung sowie externem Messkreis und externer Beschaltung	25
Abbildung 3.3	Foto des Messaufbaus	26

Abbildung 3.4	Darstellung der Messzelle mit Umlenkspiegel, Beschichtungssystem, Elektrodenanordnung sowie Verstärker	27
Abbildung 3.5	Zeitablaufdiagramm der ersten Messung eines Versuchs mit Darstellung der einzelnen automatisch ablaufenden Prozessschritte	29
Abbildung 3.7	Rohdaten einer LIPP-Messung mit Reflexionsverhalten sowie Peak bei Grenzflächen zwischen HV-Elektrode und Silikonfett (A), Silikonfett und Silikonelastomer (B) und Silikonelastomer und Erdelektrode (C)	32
Abbildung 3.8	Arithmetischer Mittelwert von sechzig konsekutiv aufgenommenen Störsignalen sowie ein Signal im Original in grau hinterlegter Farbe .	34
Abbildung 3.9	Darstellung des arithmetischen Mittelwerts der Blitzlampenstörung im Frequenzbereich .	34
Abbildung 3.10	Darstellung des LIPP-Signals von 1,7 μ s bis 5 μ s im Frequenzbereich	35
Abbildung 3.11	Amplitudengang des verwendeten Butterworth-Filters dritter Ordnung mit der Grenzfrequenz von 25 MHz und einer Abtastrate von 2,5 GHz	35
Abbildung 3.12	Darstellung der Rohdaten vor und nach Anwendung des Tiefpassfilters	36
Abbildung 3.13	Resultierende Darstellung des Nutzsignals mit Anwendung des ausgelegten Tiefpassfilters . .	36
Abbildung 3.14	Einfluss des Beschichtungsmaterials auf die Signalstärke des LIPP-Profils	37
Abbildung 3.15	Einfluss der Pulsenergie des Lasers auf die Signalstärke	38
Abbildung 3.16	Einfluss des Strahldurchmessers des Lasers auf die Signalstärke	39
Abbildung 3.17	Beispielhaftes LIPP-Signal nach Optimierung der Versuchsparameter	40
Abbildung 4.1	Berechnetes Reflexionsverhalten der Druckzone in der Modellanordnung mit Kennzeichnung der von der Druckzone durchlaufenden Grenzflächen (A-Q)	45
Abbildung 4.2	Gemessene LIPP-Profile mit Silikonfett und Silikonöl als Koppelmaterial nach Polarisation mit 3 kV für 1 min	46
Abbildung 4.3	Nahansicht auf den Bereich des Nutzsignals der Messung mit Silikonfett und Silikonöl als Koppelmaterial bei einer Polarisationsspannung von jeweils 3 kV	48

Abbildung 4.4	LIPP-Signal bei verschiedenen Schichtdicken des Koppelmediums Silikonöl (M ₁ -M ₄) nach jeweiliger Beaufschlagung mit 3 kV für 1 min	49
Abbildung 4.5	LIPP-Signal mit Variation der Schichtdicke des Koppelmediums Silikonfett (M ₁ -M ₄) nach Beaufschlagung mit 3 kV für 1 min	50
Abbildung 4.6	LIPP-Signal bei Verwendung einer HV-Elektrode mit einer Höhe von 2 cm nach Polarisation mit 3 kV für 1 min sowie 1 min nach Kurzschluss der Anordnung	51
Abbildung 4.7	LIPP-Signal bei Polarisation mit 3 kV für 1 min sowie Polarisation mit -3 kV für 1 min	52
Abbildung 4.8	Reflexionsmuster der LIPP-Messung mit Silikonöl als Koppelmaterial mit Zuordnung der Peaks zu den Ereignissen (A-Q)	53
Abbildung 4.9	Reflexionsmuster der LIPP-Messung mit Silikonöl als Koppelmaterial mit Zuordnung der Peaks zu den berechneten Ereignissen (A-Q)	54
Abbildung 5.1	Prüfkörperpräparation mit der Erdelektrode (a), dem aufgelegten Silikonplattenprüfkörper (b), den aufgelegten Abstandshaltern (c), dem aufgetragenen Silikonfett (d) und der aufgesetzten HV-Elektrode (e)	59
Abbildung 5.2	LIPP-Profil der fünfzig Wiederholungen nach jeweiliger Beaufschlagung mit 3 kV für 5 s	62
Abbildung 5.3	LIPP-Profile der fünfzig Wiederholungen jeweils 14 min nach Kurzschluss des Prüfkörpers	62
Abbildung 5.4	Nahansicht der fünfzig Wiederholungen mit Darstellung des Peaks an der Grenzfläche zwischen HV-Elektrode und Silikonfett (A)	63
Abbildung 5.5	Maximalwert des ersten Peaks der fünfzig Wiederholungen	64
Abbildung 5.6	LIPP-Profil der Prüfkörperanordnung aus Silikonfett und Silikonelastomer von neun konsekutiv ablaufenden Messserien, wobei eine Messserie aus einer einstündigen Polarisationsphase mit 3 kV, einer einstündigen Kurzschlussphase sowie sich anschließender Wartezeit von einer Stunde besteht	66
Abbildung 5.7	Darstellung des Maximalwerts des ersten Peaks der fünfzehnten Messung der jeweils neun Wiederholungen	67
Abbildung 5.8	LIPP-Profil der zwölf Wiederholungen 14 min nach Kurzschluss der Prüfkörperanordnung	68

Abbildung 5.9	LIPP-Profil der insgesamt zwölf Wiederholungen nach jeweiliger Beaufschlagung mit 3 kV für 5 s	69
Abbildung 5.10	Maximalwert des ersten Peaks der LIPP-Profile der insgesamt zwölf Wiederholungen	69
Abbildung 5.11	Maximalwert des ersten Peaks der insgesamt zwölf Wiederholungen nach jeweiliger Polarisation mit 3 kV für 5 s	70
Abbildung 6.1	Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Polarisationsphase bei 3 kV und 20 °C	72
Abbildung 6.2	Letzte Messung der Polarisationsphase nach Beaufschlagung mit 3 kV für 60 min sowie erste Messung der Kurzschlussphase	73
Abbildung 6.3	Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Kurzschlussphase nach Polarisation mit 3 kV bei 20 °C	74
Abbildung 6.4	Erste Messung der Polarisationsphase bei $t=0$ min der jeweiligen Messserien mit 10, 20, 30 und 40 °C	76
Abbildung 6.5	Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Polarisationsphase bei 3 kV und 10 °C	77
Abbildung 6.6	Temperaturabhängiges Raumladungsverhalten der Modellanordnung bei Beaufschlagung mit einer Spannung von 3 kV für 60 min mit Darstellung der Messungen bei Minute 0 und nach 10, 20, 40 und 60 min	78
Abbildung 6.7	Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Polarisationsphase bei 3 kV und 30 °C	79
Abbildung 6.8	Temperaturabhängiges Raumladungsverhalten der Modellanordnung während der Kurzschlussphase nach vorheriger Polarisation mit 3 kV für 60 min	80
Abbildung 6.9	Vergleich des Ladungsabbaus der influenzierter Elektrodenladung (A) und des Betrags der Heterocharge in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort $t=0,05 \mu\text{s}$)	82
Abbildung 6.10	Temperaturabhängigkeit des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus der Elektrodenladung während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit jeweils 3 kV für 60 min sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen	83

Abbildung 6.11	Ladungsaufbau und Ladungsabbau in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05\ \mu\text{s}$) während der Polarisationsphasen mit jeweils 3 kV sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen	85
Abbildung 6.12	Temperaturabhängigkeit des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit jeweils 3 kV für 60 min sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen	86
Abbildung 6.13	Vergleich des Ladungsabbaus in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05\ \mu\text{s}$) sowie an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer nach Polarisierung mit 3 kV für jeweils 60 min	87
Abbildung 6.14	Erste Messung der Polarisationsphase bei $t=0\ \text{min}$ der jeweiligen Messserien mit 1, 2, 3 und 4 kV	88
Abbildung 6.15	Feldstärkeabhängiges Raumladungsverhalten der Modellanordnung bei 20 °C während der Polarisationsphase von 60 min	90
Abbildung 6.16	Darstellung der letzten Messung der Polarisationsphase nach Beaufschlagung mit 4 kV für 60 min sowie der ersten Messung der Kurzschlussphase	91
Abbildung 6.17	Feldstärkeabhängiges Raumladungsverhalten der Modellanordnung während der Kurzschlussphase nach Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV für jeweils 60 min bei 20 °C	92
Abbildung 6.18	Ladungsaufbau und Ladungsabbau der Elektrodenladung während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen	93
Abbildung 6.19	Ladungsaufbau und Ladungsabbau in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05\ \mu\text{s}$) während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen	94
Abbildung 6.20	Ladungsaufbau und Ladungsabbau an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen	95

Abbildung 6.21 Vergleich des Ladungsabbaus in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05 \mu\text{s}$) sowie an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer nach Polarisation mit 1, 2, 3 und 4 kV für jeweils 60 min 96

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1	Übersicht von Messsystemen auf Basis des LIPP-Prinzips sowie deren Anwendungszweck	13
Tabelle 4.1	Dichte und Schallgeschwindigkeit der einzelnen Schichten in der Modellanordnung; in fett hervorgehobene Werte wurden für die weiteren Berechnungen verwendet	42
Tabelle 4.2	Berechnete Schallimpedanzen einzelner Schichten der Modellanordnung und Laufzeiten der Schallwelle	43

AKRONYME UND ABKÜRZUNGEN

AC	Wechselstrom
DC	Gleichstrom
DSO	Digitales Speicheroszilloskop
PDC	Polarisationsstrom und Depolarisationsstrom
PEA	Pulsed Electro Acoustic
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
LIPP	Laser Induced Pressure Pulse
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk

SYMBOLE

SYMBOL	BESCHREIBUNG	EINHEIT
A	Fläche der Elektrode	m^2
d	Höhe des Prüfkörpers	m
d_x	Laufvariable für Höhenangabe zwischen $x = 0$ und $x = d$	m
d_a	Höhe Material a	m
d_b	Höhe Material b	m
D_a	Verschiebungsfeld Material a	As/m^2
D_b	Verschiebungsfeld Material b	As/m^2
$E_{A,s}$	Durch σ_s verursachte Feldstärke in Richtung der Anode	V/m
$E_{K,s}$	Durch σ_s verursachte Feldstärke in Richtung der Kathode	V/m
E_a	Elektrische Feldstärke in Material a	V/m
E_b	Elektrische Feldstärke in Material b	V/m
$i_s(t)$	Messbarer Strom aufgrund der Verschiebung einer Flächenladung	A
J_a	Stromdichte Material a	A/m^2
J_b	Stromdichte Material b	A/m^2
$P_x(t)$	Druckprofil an der Stelle x	N/m^2
R	Reflexionskoeffizient	
t	Zeit	s
T	Transmissionskoeffizient	
U_{DC}	Externe Spannung	V
v	Geschwindigkeit der Druckwelle	m/s
x	Ausdehnung in Höhe der Prüfkörperanordnung	m
Δx	Kompression entlang der x -Achse	m
y	Ausdehnung in Breite der Prüfkörperanordnung	m
z	Ausdehnung in Tiefe der Prüfkörperanordnung	m
Z	Akustische Impedanz	$kg/(m^2 s)$
$\delta_x(t)$	Verschiebung eines Flächenelementes zum Zeitpunkt t	m
$\delta_{x,max}$	Maximale Verschiebung eines Flächenelementes	m

ε	Permittivität	$\text{A s}/(\text{V m})$
ε_0	Permittivität im Vakuum	$\text{A s}/(\text{V m})$
ε_a	Permittivität in Material a	$\text{A s}/(\text{V m})$
ε_b	Permittivität in Material b	$\text{A s}/(\text{V m})$
κ_a	Leitfähigkeit in Material a	S/m
κ_b	Leitfähigkeit in Material b	S/m
$\rho(x)$	Raumladungsdichte in Richtung der x-Achse	As/m^3
σ_s	Flächenladungsdichte	$\text{A s}/\text{m}^2$
$\sigma_{A,s}$	Aufgrund von σ_s an der Anode influenzierte Ladungsdichte	$\text{A s}/\text{m}^2$
$\sigma_{K,s}$	Aufgrund von σ_s an der Kathode influenzierte Ladungsdichte	$\text{A s}/\text{m}^2$
σ_a	Flächenladungsdichte auf HV-Elektrode aufgrund externer Spannung	$\text{A s}/\text{m}^2$
σ_b	Flächenladungsdichte auf Erdelektrode aufgrund externer Spannung	$\text{A s}/\text{m}^2$
σ_g	Ladungsdichte an Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika	$\text{A s}/\text{m}^2$
χ	Kompressibilität	$1/\text{Pa}$

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Die Energiewende in Deutschland steht für eine Umstellung der Energieversorgung von fossilen und nuklearen auf erneuerbare Energieträger aus Sonne und Wind. Auch weltweit wird der Anteil der Erneuerbaren am Energiemix stetig gesteigert.

Durch diesen steigenden Anteil ergeben sich neue Herausforderungen für den Betrieb und Ausbau des Übertragungsnetzes. Ein signifikantes Problem ist dabei vor allem die ungleiche geografische Verteilung von Erzeugern und Verbrauchern. Die Erzeugung von Windstrom im Norden Deutschlands steht dabei im Gegensatz zu den großen industriellen Verbrauchern im Süden. Zusätzlich ist das Angebot von Wind und Sonne aufgrund der natürlichen Begebenheit dieser Energiequellen nicht zu jeder Zeit verfügbar.

Um weiterhin eine sichere Stromversorgung gewährleisten zu können, wurde der Bau von drei Verbindungsleitungen zwischen Nord- und Süddeutschland beschlossen, wie es im Netzentwicklungsplan [GGG17] beschrieben ist.

Bei der Übertragung hoher Energiemengen von den Produktionsstätten zu den Verbrauchern über einige hundert Kilometer ist die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) oft wirtschaftlicher als die Wechselstrom (AC)-Übertragung, weshalb die im Netzentwicklungsplan vorgesehenen Verbindungsleitungen in dieser Technik ausgeführt werden.

HGÜ-Leitungen können als Erdkabel oder Freileitungen ausgeführt werden. Da Freileitungen wirtschaftlicher sind, werden Erdkabel meist in Ballungsräumen eingesetzt, in denen keine Freileitungen errichtet werden können. Für große Distanzen hingegen kommen üblicherweise Freileitungen zum Einsatz.

In Deutschland wurde am 18.12.2015 durch den Bundesrat bestätigt, der Erdverkabelung bei Gleichstromleitungen Vorrang zu geben [Bes15], um in der Bevölkerung eine höhere Akzeptanz für den Netzausbau zu schaffen. Dies führt dazu, dass in Deutschland weltweit erstmalig HGÜ-Erdkabel über hunderte Kilometer mit der

Spannungsebene von 525 kV [Rap+15; ESD16] verlegt werden sollen.

Ein Kabelsystem besteht dabei aus dem Kabel sowie den Kabelmuffen¹. In **Abbildung 1.1** ist der schematische Querschnitt einer typischen Muffe dargestellt. Diese besteht aus einem Isolationsmaterial für das Volumen (Volumenmaterial) und Feldsteuerelementen².

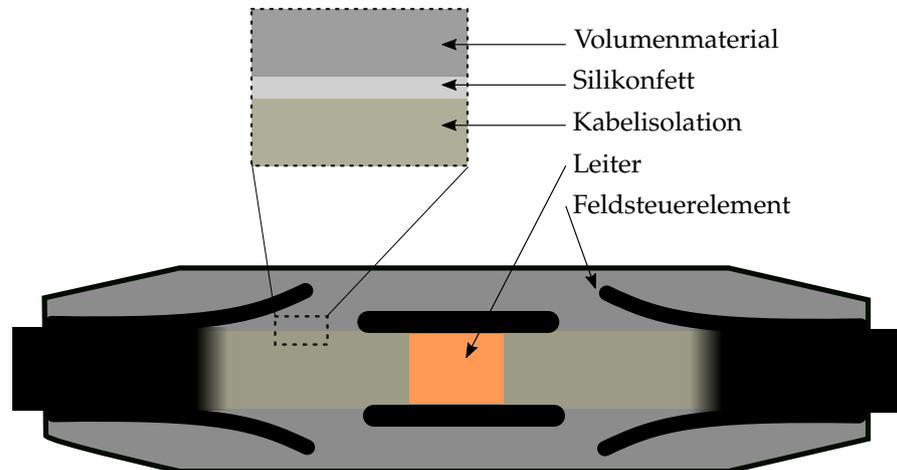


Abbildung 1.1: Skizze einer Muffe (nicht maßstabsgetreu) zur Verbindung von zwei Hochspannungskabeln mit Volumenmaterial, Silikonfettsschicht, Kabelisolation, Leiter und Feldsteuerlementen

Die Feldsteuerelemente sorgen beim Übergang von der Kabelgeometrie mit innerer Leitschicht, Kabelisolation und äußerer Leitschicht zur Muffe für die Reduzierung der Feldüberhöhung am Zwickel zwischen äußerer Leitschicht, Volumenmaterial und Kabelisolation.

Im Gegensatz zum Kabel ist in der Muffe eine Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika vorhanden, welche als problematisch zu betrachten gilt, da ein Unterschied in der Leitfähigkeit zur Ansammlung von Grenzflächenladungen führen kann [Fab+07; Del+08; LDX17].

Neben anderen Gründen für den Ausfall einer Muffe [Harg8], wie Feldüberhöhungen aufgrund von Montagefehlern [Elb+16] oder Alterungsmechanismen, kann diese Ansammlung von Grenzflächenladungen bzw. Raumladungen³ zu einer signifikanten Veränderung der elektrischen Feldstärke innerhalb der Muffe führen. Überschreitet die elektrische Feldstärke die Durchschlagfestigkeit des verwendeten

¹ Muffen (Oberbegriff: Garnituren) verbinden zwei Kabelabschnitte innerhalb eines Kabelsystems.

² Eine detailliertere Beschreibung, wie Muffen konzipiert sind und wie Feldsteuerungsmechanismen funktionieren, ist in [Küco9] zu finden.

³ In dieser Arbeit bezeichnet der Begriff Raumladung die Akkumulation von Ladung innerhalb eines dielektrischen Materials.

Isoliermediums, kann es zum Ausfall einer Kabelmuffe kommen.

Die elektrische Feldstärke in einer Kabelgarnitur hängt jedoch unter Wechselfeldspannung, Gleichspannung und in transienten Situationen von verschiedenen Mechanismen ab. In AC-Systemen kann die elektrische Feldverteilung bei Anordnungen mit und ohne Grenzflächen mittels Computersimulationen berechnet werden, da diese von der Permittivität der Isolierstoffe dominiert wird⁴. Diese kann im Labor für die betreffenden Isolierstoffe ermittelt werden und anschließende Computersimulationen der elektrischen Feldverteilung führen zu validen Ergebnissen.

Auch bei Gleichspannung liefern Simulationen erste Anhaltspunkte über die Verteilung der elektrischen Feldstärke in DC-Garnituren [MM13; MH17; Fro+18], wobei zumeist die temperatur- und feldstärkeabhängige Leitfähigkeit als Grundlage verwendet wird. Raumladungseffekte wie die Injektion von Ladungsträgern werden hierbei meist vernachlässigt.

In DC-Systemen herrschen jedoch weiterhin verschiedene Phänomene vor, die sich schwer in Computersimulationen integrieren lassen, was zu ungenauen und teilweise nicht validen Simulationsergebnissen führt. Eine Auflistung der aktuellen Probleme mit Gleichspannungsisoliersystemen ist in [Küc15, Seite 22-23] zu finden und wird im Folgenden teilweise zitiert:

1. Die Leitfähigkeiten und das Polarisationsverhalten der Isolierstoffe hängen von der Zeit, Feldstärke und Temperatur ab (vgl. [Küc15, S.23]).
2. *Vorhandene Ladungsträger, injizierte Ladungsträger und Ladungsträgerstau an Grenzflächen führen zum Aufbau von Raum- und Flächenladungen, die das elektrische Feld sehr stark und in oftmals kaum quantifizierbarer Weise verändern können.* (Direktes Zitat: [Küc15, S. 23]).
3. *Thermische Gradienten erzeugen Leitfähigkeitsgradienten, die zu einer starken temperatur-, zeit- und belastungsabhängigen Verschiebung elektrischer Feldverteilungen führen.* (Direktes Zitat: [Küc15, S. 23]).

Aufgrund der Problematik, dass vor allem Raumladungseffekte innerhalb der DC-Muffen nicht sinnvoll simuliert werden können, ist eine experimentelle Untersuchung des Raumladungsverhaltens der verwendeten Isoliersysteme nötig.

⁴ Eine detailliertere Erklärung der Feldverteilungen unter AC und DC wird in Kapitel 2 aufgeführt.

Zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit wird das Volumenmaterial von handelsüblichen DC-Garnituren zumeist in Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) ausgeführt [LDX17; Li+18]. Alternativ kann für das Volumenmaterial der Garnituren auch ein Silikonelastomer eingesetzt werden. Auch wenn dieses bei AC-Anwendungen [Vog+11] Stand der Technik ist, gibt es zunächst nur einzelne Veröffentlichungen zu DC-Garnituren mit Silikonelastomeren als Volumenmaterial [Zho+18]. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit sind keine DC-Garnituren mit Silikonelastomeren als Volumenmaterial auf dem Markt erhältlich.

Silikonelastomere weisen allerdings sehr gute elektrische Eigenschaften auf, weshalb diese verstärkt in den Fokus der Forschungsaktivitäten von Garniturenherstellern rücken. Unter vielen Vorteilen gegenüber EPDM soll an dieser Stelle der signifikant größere Temperaturbereich, langsames Alterungsverhalten und Feuerbeständigkeit genannt werden, wie in [LWGo3] und [Oes96] beschrieben ist.

Um eine bessere Montage der Muffe auf dem Kabel zu ermöglichen, wird Silikonfett auf die äußere Kabelisolierung aufgetragen, bevor die Muffe auf das Kabel geschoben wird. Dies führt zu einer dielektrischen Grenzfläche zwischen Kabelisolierung und dem Silikonfett sowie zwischen dem Silikonfett und dem Volumenmaterial.

1.2 ZIEL DER ARBEIT

Es konnte festgestellt werden, dass es noch keine Ergebnisse zum Raumladungsverhalten an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und dem Silikonelastomer gibt, und wenig Informationen zum Raumladungsverhalten an Grenzflächenanordnungen mit Silikonelastomeren. Ein Teilziel dieser Arbeit ist es deshalb, das Raumladungsverhalten beispielhaft in Abhängigkeit von der Temperatur und der elektrischen Feldstärke an einer Schichtanordnung aus Silikonfett und Silikonelastomer zu beschreiben. In realen Garnituren ist die Silikonfettschicht meist äußerst dünn und bildet das Bindeglied zwischen Volumenmaterial und Kabelisolation. Da in dieser Arbeit grundlegende Untersuchungen durchgeführt werden, wird eine Modellanordnung bestehend aus einem Plattenprüfkörper aus Silikonelastomer sowie einer Schicht Silikonfett verwendet.

Zur Durchführung von Raumladungsmessungen werden hauptsächlich zwei Messprinzipien verwendet, das Laser Induced Pressure Pulse (LIPP)-Prinzip und das Pulsed Electro Acoustic (PEA)-Prinzip. Für die Ermittlung des Raumladungsverhaltens in Isolierstoffen

kommt hauptsächlich das PEA-Prinzip zum Einsatz.

Obwohl das LIPP-Prinzip im Gegensatz zum PEA-Prinzip eine bessere örtliche Auflösung liefert und keine aufwendige mathematische Rückfaltung des Signals erfordert, wurde es bisher aufgrund des signifikant höheren gerätetechnischen Aufwands meist nur für die Aufnahme des momentanen Ladungsbilds verwendet, nicht jedoch für die Aufnahme des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus in Schichtanordnungen. In [Mal96; Maloo] wird gezeigt, dass ein signifikantes Problem der aktuell publizierten LIPP-Verfahren darin besteht, wiederholbare Messungen durchzuführen, da durch die Verwendung des am Messsystem beteiligten Lasers sowie des entstehenden Plasmas die Versuchsbedingungen schwer zu kontrollieren sind. Dem Autor ist kein weiteres Messverfahren auf Grundlage des LIPP-Prinzips bekannt, das wiederholbare Messungen und somit die Aufnahme des zeitlichen Raumladungsverhaltens an einer Grenzflächenanordnung mit Plattenprüfkörpern ermöglicht.

Das **erste Teilziel** und auch **Hauptziel** dieser Arbeit ist es deshalb, ein Verfahren auf Grundlage des LIPP-Prinzips aufzubauen, welches es ermöglicht, das Raumladungsverhalten an dielektrischen Grenzflächen über einen Zeitraum von mehreren Stunden wiederholbar messen zu können. Die Teilziele sind dabei:

1. Das Messsystem soll in der Lage sein, Raumladungsmessungen an einer Schichtanordnung aus Silikonfett und Silikonelastomer durchführen zu können.
2. Die Versuchsparameter des LIPP-Verfahrens sollen im Hinblick auf die Pulsenergie des Lasers, den Strahldurchmesser und das benötigte Beschichtungsmaterial optimiert werden.
3. Aufgrund der langsamen Vorgänge im Isolierstoff soll das Messsystem in der Lage sein, Daten über mehrere Stunden aufnehmen zu können. Aus dieser Anforderung ergibt sich ein hoher Anspruch an die Wiederholbarkeit der Messungen, die in bisherigen Veröffentlichungen nicht gegeben war. Zu Beginn der Arbeiten war es unklar, ob dieses Ziel aufgrund des zugrundeliegenden Messprinzips erreichbar ist.
4. Die Wiederholbarkeit der Messungen soll beschrieben werden und es soll gezeigt werden, welche Fehler bei der Nutzung des LIPP-Verfahrens für kontinuierliche Messungen entstehen.

Das **zweite Teilziel** besteht darin, mit dem entwickelten Messverfahren Raumladungsmessungen an der Grenzfläche von Silikonfett und

einem Plattenprüfkörper aus Silikonelastomer beispielhaft in Abhängigkeit von der Temperatur und Feldstärke durchzuführen sowie die zeitliche Entwicklung des Raumladungsverhaltens zu beschreiben.

1. In DC-Garnituren wird die Temperatur von 70 °C meist nicht überschritten [Liu+16; Fro+18; Hae+18]. Da die beteiligte Elektronik und die verwendeten Messkabel ausschließlich bis 60 °C ausgelegt sind, wird der Temperaturbereich hierdurch nach oben begrenzt, weshalb das Raumladungsverhalten an der betreffenden Anordnung in dieser Arbeit zunächst in einem Temperaturbereich von 10 °C bis 40 °C beschrieben werden soll.
2. Die Durchschlagsfestigkeit von Silikonelastomeren kann grob mit 100 kV/mm abgeschätzt werden [Oes96; Aga+16]. Reale DC-Garnituren werden auf eine signifikant geringere maximale Feldstärke ausgelegt. In dieser Arbeit soll deshalb zunächst das Raumladungsverhalten an der betreffenden Grenzfläche in einem Bereich⁵ von 1,25 kV/mm bis 5 kV/mm untersucht werden.

Zusammenfassend soll durch die Weiterentwicklung des Messverfahrens auf Grundlage des LIPP-Prinzips im ersten Teilziel vor allem die Voraussetzung dafür geschaffen werden, das Raumladungsverhalten an komplexen dielektrischen Strukturen, wie sie in Kabelgarnituren vorkommen, beschreiben zu können. Dazu wird im zweiten Teilziel dieser Arbeit beispielhaft das Raumladungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur und der elektrischen Feldstärke anhand einer Modellanordnung für eine der in Garnituren existenten Grenzflächen beschrieben.

⁵ In den später gezeigten Messungen wird eine externe Spannung von 1 kV bis 4 kV für die jeweiligen Messungen angegeben. Unter Berücksichtigung der später eingeführten Modellanordnung mit einer Höhe von 0,8 mm ergeben sich Feldstärken von 1,25 kV/mm bis 5 kV/mm.

STAND DER TECHNIK SOWIE THEORETISCHE BETRACHTUNG DER MODELLANORDNUNG UND DES MESSPRINZIPS

2.1 GRUNDLAGEN ZUM MESSPRINZIP

2.1.1 Messprinzip

Für die Untersuchung des Raumladungsverhaltens an der Grenzfläche zwischen Silikonelastomer und Silikonfett wird in dieser Arbeit das LIPP-Prinzip eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung dieser zerstörungsfreien Methode zur Messung von Raumladungen in dielektrischen Materialien ist in [Ses+82; Ger83; Fle05; Mar13] zu finden. Im Folgenden wird das Messprinzip kurz erläutert.

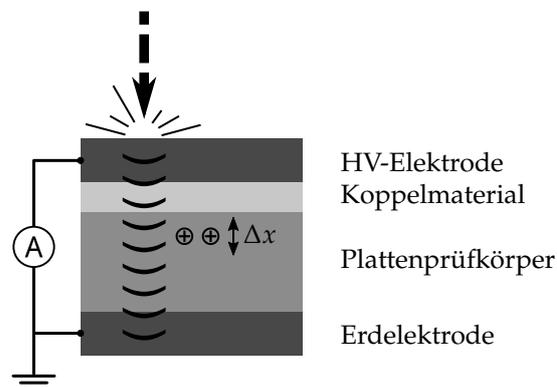


Abbildung 2.1: Skizze zum LIPP-Prinzip mit HV-Elektrode, Koppelmaterial, Plattenprüfkörper und Erdelektrode sowie Ausbreitung der durch den Laserpuls angeregten Druckwelle

Abbildung 2.1 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung des Messprinzips. Der zu untersuchende Plattenprüfkörper befindet sich zwischen der HV-Elektrode und der Erdelektrode. Um die akustische Kopplung zu verbessern, muss ein Koppelmaterial zwischen der HV-Elektrode und dem Plattenprüfkörper eingebracht werden. Bei Durchführung der Messung unter Spannungsbeanspruchung liegt an der HV-Elektrode eine Gleichspannung an, was zu Raumladungsansammlungen an den Grenzflächen führt sowie zur Ausbildung von Raumladungen innerhalb des Volumenmaterials führen kann. Da diese Raumladungen für das menschliche Auge nicht sichtbar sind und optisch nicht detektiert werden können, muss eine indirekte Methode gefunden werden, um die Ladungsverteilung innerhalb der Prüf-

anordnung zu visualisieren. Dazu wird nach dem LIPP-Prinzip ein Laserpuls verwendet, welcher beim Auftreffen auf der HV-Elektrode ein Plasma erzeugt und somit eine Druckwelle auslöst, die sich durch die Anordnung aus Elektroden und Prüfkörper bewegt. Diese Druckwelle dient im LIPP-Prinzip als Messsonde. Beim Durchlaufen des Prüfkörpers lenkt die Druckwelle etwaig vorhandene Ladungsträger aus, welche somit zu einem resultierenden Strom führen, der durch einen an die Elektroden angeschlossenen externen Messkreis aufgezeichnet wird. Aufgrund dieses messbaren Stroms kann anschließend auf die örtliche Ladungsverteilung innerhalb der Prüfanordnung geschlossen werden.

2.1.2 Mathematische Beschreibung der Druckwelle

In diesem Abschnitt wird die Druckwelle mathematisch beschrieben. Die ausgelöste Druckwelle hat eine sehr kurze Anstiegszeit im Verhältnis zur Laufzeit in den einzelnen Schichten der Prüfkörperanordnung, sodass die Anordnung nicht als Ganzes durch die Druckwelle komprimiert wird, sondern kleine Bereiche mit erhöhtem Druck in der Größenordnung von wenigen Mikrometern¹ innerhalb des Plattenprüflings erzeugt werden.

Da die Bereiche erhöhten Drucks im Vergleich zu den Elektrodenabmessungen und den Abmessungen der Plattenprüfkörper klein sind, ist es offensichtlich, warum nur ein Teil der Anordnung von Elektrode und Prüfkörper dem Einfluss der Druckwelle ausgesetzt ist. Diese Beziehung führt bei Vernachlässigung von Reflexionen zu drei verschiedenen übergeordneten Zuständen, die in [Abbildung 2.2](#) dargestellt werden.

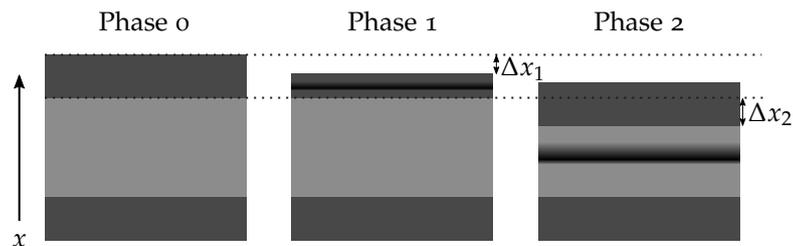


Abbildung 2.2: Kompressionszustände innerhalb der Prüfkörperanordnung ohne Druckwelle (Phase 0) sowie Zustand mit Druckwelle innerhalb der HV-Elektrode (Phase 1) und innerhalb des Plattenprüfkörpers (Phase 2), nach [\[Ren96\]](#)

¹ Später eingeführte Materialparameter: Schallgeschwindigkeit im Plattenprüfling (Silikonelastomer) 1000 m/s; angenommene Pulsbreite des Schallimpulses: 6 ns; Höhe des Prüfkörpers: 0,5 mm.

In [Ren96] wurde deshalb für die Beschreibung der Druckwelle das Wort Druckzone verwendet. Diese Druckzone durchläuft in Phase 1 zunächst die HV-Elektrode, was deren Höhe während des Durchlaufens um Δx_1 reduziert. In dieser Phase wird der Plattenprüfling zunächst nicht von der Druckzone beeinflusst. Wenn die Druckzone während der Phase 2 den Plattenprüfkörper durchläuft, wird die Anordnung um die Differenz Δx_2 komprimiert. Die Kompression ist sowohl im Messing als auch im Plattenprüfkörper abhängig von den jeweiligen Materialparametern.

Das Druckprofil an einer Stelle x zu einer Zeit t kann durch $P_x(t)$ beschrieben werden. Zur besseren Veranschaulichung zeigt **Abbildung 2.3** beispielhaft das Druckprofil an einer Stelle x in Abhängigkeit von der Zeit.

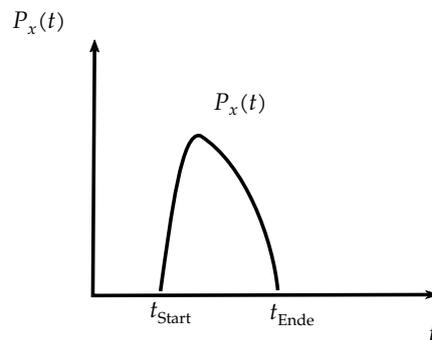


Abbildung 2.3: Druckprofil in Abhängigkeit von der Zeit an der Stelle x , nach [Ren96]

Die maximale Verschiebung eines Flächenelements $\delta_{x,\text{max}}$ an einem Ort x wird nach Durchlaufen des Druckprofils zum Zeitpunkt t_{Ende} erreicht, mit v als Geschwindigkeit der Druckzone und χ als Kompressibilität des betreffenden Materials [Ren96].

$$\delta_{x,\text{max}} = \chi \cdot v \int_0^{t_{\text{Ende}}} P_x(t) dt \quad (2.1)$$

Die Kompression des Flächenelements $\delta_x(t)$ zum Zeitpunkt t an der Stelle x kann wie folgt beschrieben werden:

$$\delta_x(t) = \chi \cdot v \int_0^t P_x(t) dt \quad (2.2)$$

2.1.3 Mathematischer Zusammenhang zwischen Druckwelle und messbarem Strom

Werden Raumladungen innerhalb der Prüfanordnung bewegt, führen diese zu einem messbaren Strom. Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen der Druckzone und dem messbaren Strom nach [Ren96] beschrieben. Dazu wird eine definierte Flächenladungsdichte σ_s in der Mitte des Plattenprüfkörpers in y - z -Ausdehnung angenommen, wie in **Abbildung 2.4** dargestellt. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass keine zusätzliche äußere Spannung an die Anordnung angelegt wird.

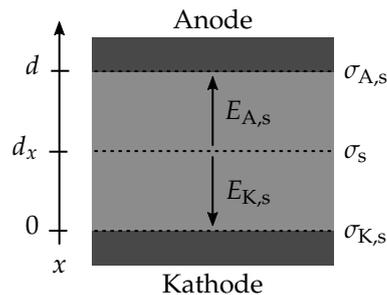


Abbildung 2.4: Skizze einer Prüfkörperanordnung mit einer Flächenladungsdichte σ_s und daraus resultierenden elektrischen Feldstärken sowie auf den Elektrodenoberflächen beeinflussten Ladungsdichten

Diese Flächenladung σ_s führt zur Ausbildung von Flächenladungen auf der Oberfläche der Anode und der Kathode, welche als $\sigma_{A,s}$ und $\sigma_{K,s}$ bezeichnet werden sollen. Zur Vereinfachung der Beschreibung werden folgende Symbole definiert:

1. Angenommene Flächenladungsdichte innerhalb des Plattenprüfkörpers: σ_s
2. Aufgrund der Flächenladungsdichte σ_s auf der Anode beeinflusste Ladungsdichte: $\sigma_{A,s}$
3. Aufgrund der Flächenladungsdichte σ_s auf der Kathode beeinflusste Ladungsdichte: $\sigma_{K,s}$
4. Durch σ_s verursachte Feldstärke in Richtung Anode: $E_{A,s}$
5. Durch σ_s verursachte Feldstärke in Richtung Kathode: $E_{K,s}$

Der mathematische Zusammenhang zwischen Flächenladung und beeinflusster Flächenladung auf den Elektroden kann berechnet werden. Zuerst wird dazu das Gaußsche Gesetz aufgeschrieben. Es soll weiter gelten: $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$.

$$E_{A,s} + E_{K,s} = \frac{\sigma_s}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Das externe Potential beträgt 0 V. Weiterhin wird die maximale Höhe der Prüfkörperanordnung in Ausdehnung der x -Achse mit $x = d$ und die Höhe zwischen $x = 0$ und $x = d$ mit der Laufvariablen d_x bezeichnet.

$$E_{A,s} \cdot d_x = E_{K,s} \cdot (d - d_x) \quad (2.4)$$

Durch Einfügen von **Gleichung (2.3)** in **Gleichung (2.4)** ergibt sich die Ladungsdichte auf der Anode und der Kathode zu:

$$\sigma_{A,s} = \left(1 - \frac{d_x}{d}\right) \sigma_s \quad (2.5)$$

$$\sigma_{K,s} = \frac{d_x}{d} \sigma_s \quad (2.6)$$

Gleichung (2.5) und **Gleichung (2.6)** beschreiben die Ladungsdichten an der Anode und der Kathode aufgrund der angenommenen Flächenladungsdichte σ_s .

Über die Fläche der Elektrode A kann zusammen mit der Flächenladungsdichte die Ladung auf der Oberfläche der Anode $A\sigma_{A,s}$ sowie der Kathode $A\sigma_{K,s}$ berechnet werden. Verändert sich diese Ladung mit der Zeit, fließt ein messbarer Strom $i_s(t)$.

$$i_s(t) = \frac{d}{dt} (A\sigma_{K,s}) \quad (2.7)$$

Durch Einsetzen von **Gleichung (2.6)** kann **Gleichung (2.7)** umgeschrieben werden:

$$i_s(t) = \frac{d}{dt} \left(A \frac{d_x}{d} \sigma_s \right) \quad (2.8)$$

Der zeitveränderliche Teil ist die Bewegung der Flächenladungsdichte σ_s an Stelle d_x entlang der x -Achse.

$$i_s(t) = \frac{A\sigma_s}{d} \frac{d}{dt} (d_x) \quad (2.9)$$

Diese Bewegung eines Flächenelements in Richtung der x -Achse wurde bereits in **Gleichung (2.2)** über die Relation für $\delta_x(t)$ beschrieben. Durch Einsetzen ergibt sich:

$$i_s(t) = \frac{A\sigma_s}{d} \frac{d}{dt} \delta_x(t) = \frac{A\sigma_s}{d} \frac{d}{dt} \left(\chi v \int_0^t P_x(t) dt \right) = \frac{A\sigma_s}{d} \chi v P_x(t) \quad (2.10)$$

Gleichung (2.10) beschreibt nach [Ren96] somit den resultierenden Strom, welcher aufgrund der von der Druckwelle $P_x(t)$ ausgelenkten Flächenladungsdichte σ_s entsteht. Da in der Realität nicht nur eine infinitesimale gleichmäßig verteilte Flächenladungsdichte, wie im Falle der angenommenen Flächenladungsdichte von σ_s , sondern vielmehr eine Raumladungsdichte $\rho(x)$ vorherrscht, wird der Strom $i(t)$ durch Integration über alle Flächenelemente berechnet.

$$i(t) = \frac{A}{d} \chi v \int_0^d \rho(x) P(x, t) dx \quad (2.11)$$

Soll zusätzlich eine an die Anordnung angelegte externe Spannung berücksichtigt werden, müssen neben der Raumladungsverteilung innerhalb des Prüfobjekts auch die Ladungsansammlungen aufgrund dieser externen Spannung berücksichtigt werden.

2.1.4 Stand der Technik von LIPP-Messsystemen

Neben dem bereits in den vorherigen Unterkapiteln vorgestellten LIPP-Prinzip gibt es noch weitere Raumladungsmessprinzipien, die überblickend in [Miz94; Ger87; Fle05] beschrieben werden. Hierbei wird neben der LIPP-Methode vor allem die PEA-Methode verwendet.

Das PEA-Prinzip [LYT94; MJ97] ist das am weitesten verbreitete Messsystem zur Bestimmung des Raumladungsverhaltens in Dielektrika. Dabei wird die zu untersuchende Anordnung mit einem steilen elektromagnetischen Puls beaufschlagt. Durch diesen Puls bewegen sich etwaig vorhandene Raumladungen innerhalb des Plattenprüfkörpers, welche durch die Bewegung wiederum eine Schallwelle auslösen, die durch einen Piezokristall detektiert wird.

Ein guter Vergleich zwischen dem PEA- und LIPP-Prinzip ist in [Tak+98] und [Ada+98] zu finden. Ein großer Vorteil des LIPP-Prinzips ist die direkte Messmethode, da das gemessene Signal bzw. der Strom direkt die Ladungsverteilung innerhalb des Prüfkörpers darstellt und keine Umrechnung notwendig ist. Nach dem PEA-Prinzip hingegen muss das gemessene Signal zunächst noch entfaltet werden, wozu Annahmen getroffen werden müssen, welche die Aussagekraft beeinflussen. Weiterhin steigt bei Verwendung des

PEA-Prinzips die Komplexität bei der Vermessung von Prüfkörperanordnungen aus mehreren Schichten [BMS06]. Der Vorteil des PEA-Prinzips ist neben dem wesentlich kostengünstigeren und gerätetechnisch einfacheren Messaufbau die größere Wiederholfrequenz und bessere zeitliche Auflösung des Raumladungsverhaltens.

In dieser Arbeit wird das LIPP-Prinzip verwendet. Die [Tabelle 2.1](#) veranschaulicht zur besseren Übersicht den Stand des Wissens über bereits entwickelte Messsysteme auf Basis des LIPP-Prinzips.

Tabelle 2.1: Übersicht von Messsystemen auf Basis des LIPP-Prinzips sowie deren Anwendungszweck

Quelle	Beschreibung
[Ses+82]	Sessler und Gerhard verwendeten die LIPP-Methode, um dünne Polymerfilme zu untersuchen, zeigten aber keine Entwicklung der Raumladungen über die Zeit innerhalb einer Messserie.
[Mal96]	Malec verwendet ein LIPP-System mit halbleitenden Elektroden. Es wurden mehrere LIPP-Messungen hintereinander durchgeführt. Da jedoch bei jedem Lasereinschlag ein Teil der halbleitenden Elektrode abgetragen wurde, war ein wiederholbares Messergebnis nicht möglich.
[Ren96]	Rengel verwendete die LIPP-Methode zur Messung von Raumladungen in Proben aus Polyethylen. Die Proben wurden von Elektroden aus einem halbleitenden Material umschlossen. Durch die Ablation dieser Schicht war keine detaillierte Aufnahme des zeitlichen Raumladungsverhaltens möglich.
[Rai+09]	Rain et al. verwendeten die LIPP-Methode, um Raumladungen in Silikonelastomeren zu untersuchen, zeigten aber keine zeitaufgelösten Messungen.

Trotz der naheliegenden Vorteile wurden die LIPP-Systeme meist nur zur Untersuchung einzelner Raumladungsverteilungen verwendet, aber nicht um das zeitliche Verhalten über mehrere Stunden zu untersuchen. Für das Ziel dieser Arbeit ist dies aber eine notwendige Voraussetzung.

Die Herausforderung in der Weiterentwicklung der LIPP-Methode liegt darin, die Wiederholbarkeit von Messungen zu ermöglichen, welche bei anderen Messsystemen oft nicht gegeben war [Mal96; Maloo], aber notwendig für die Vermessung des Raumladungsverhaltens an der Modellanordnung im zweiten Teil dieser Arbeit ist.

2.2 VERHALTEN DER MODELLANORDNUNG BEI BEAUFSCHLAGUNG MIT GLEICHSPANNUNG

2.2.1 Beschreibung der Modellanordnung

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, soll das Raumladungsverhalten der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer in Kabelgarnituren untersucht werden. Dazu wurde eine Modellanordnung entwickelt, welche in [Abbildung 2.5](#) dargestellt wird.

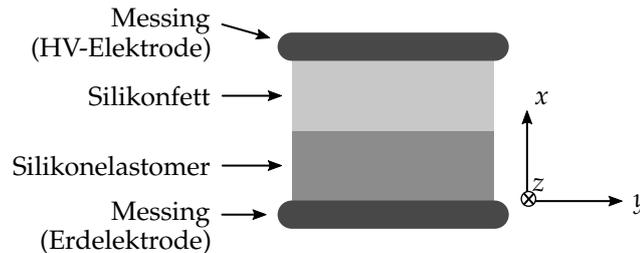


Abbildung 2.5: Modellanordnung der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer

Die Modellanordnung besteht aus einer HV-Elektrode aus Messing, einer Schicht Silikonfett, einem Plattenprüfkörper aus Silikonelastomer sowie einer Erdelektrode aus Messing. In späteren Messungen wird die HV-Elektrode mit einer positiven Spannung beaufschlagt. Obwohl in Garnituren an der betreffenden Grenzfläche sowohl Normal- als auch Tangentialkomponenten der elektrischen Feldstärke vorherrschen, können mit dem LIPP- und PEA-Prinzip ausschließlich Messungen mit der Normalkomponente durchgeführt werden.

Bei den verwendeten Materialien handelt es sich um einen Plattenprüfling aus Silikonelastomer, der von einem Kabel- und Garniturenhersteller zur Verfügung gestellt wurde und für die Herstellung von Garnituren eingesetzt wird. Das verwendete Silikonfett wird ebenfalls in der Industrie für die Montage von Muffen verwendet und wurde vom gleichen Hersteller geliefert. Aus Gründen der Geheimhaltung können an dieser Stelle keine ausführlicheren Angaben zu den verwendeten Materialien gemacht werden.

2.2.2 Verhalten der Modellanordnung unter Einfluss einer Spannung

Im Folgenden soll theoretisch betrachtet werden, wie sich das elektrische Feld in der Modellanordnung bei Beaufschlagung mit einer Gleichspannung und einer Wechselspannung verhält. Dazu wird in [Abbildung 2.6](#) die Modellanordnung mit dem bei Wechselspan-

nung vorherrschenden Verschiebungsfeld sowie mit dem bei reiner Gleichspannung vorherrschenden Strömungsfeld gezeigt. Im Verschiebungsfeld sollen dabei die Permittivitäten ε_b und ε_a und im Strömungsfeld die Leitfähigkeiten κ_a und κ_b angenommen werden. In der folgenden Beschreibung stellen alle Feldgrößen die Normalkomponente in Bezug auf die Grenzfläche dar. Aufgrund dieser eindeutigen Festlegung wird im Folgenden zur übersichtlicheren Darstellung auf die Vektorschreibweise der Feldgrößen verzichtet.

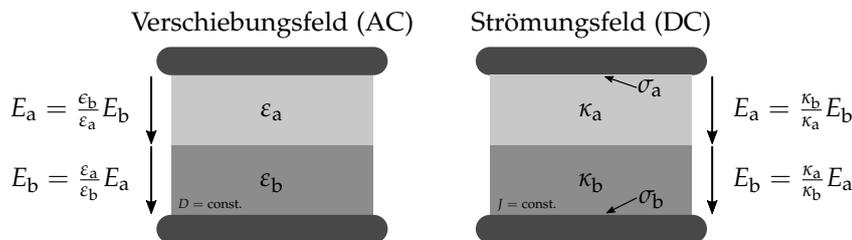


Abbildung 2.6: Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Modellanordnung unter AC-Belastung (links) und DC-Belastung (rechts)

Im Falle eines reinen Verschiebungsfeldes ist die Normalkomponente des Verschiebungsfeldes D konstant, bei einem reinen Strömungsfeld ist die Normalkomponente der Stromdichte J konstant, was zu unterschiedlichen Abhängigkeiten der elektrischen Feldverteilung von den Materialparametern führt. Das Silikonfett und Silikonelastomer sollen aufgrund der zunächst theoretischen Betrachtungen mit den Indizes a und b bezeichnet werden.

Im reinen Verschiebungsfeld ist die Normalkomponente des Verschiebungsfeldes D_a im Material a gleich dem Verschiebungsfeld D_b im Material b ($D_a = D_b$). Mit Hilfe der Beziehung $D_{a,b} = \varepsilon_{a,b} E_{a,b}$ lässt sich die Feldverteilung in Abhängigkeit der Permittivitäten aufschreiben.

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b} = \frac{E_b}{E_a} = \frac{U_b}{U_a} \quad (2.12)$$

Im Strömungsfeld hängt die Verteilung der elektrischen Feldstärke von der elektrischen Leitfähigkeit κ ab. In diesem Fall sind die Normalkomponenten der Stromdichte konstant:

$$J_a = J_b \quad (2.13)$$

Mit Hilfe der Beziehung $J_{a,b} = \kappa_{a,b} E_{a,b}$ folgt:

$$\frac{\kappa_a}{\kappa_b} = \frac{E_b}{E_a} = \frac{\frac{U_b}{d_b}}{\frac{U_a}{d_a}} \quad (2.14)$$

Im reinen Strömungsfeld hängt das elektrische Feld von den Leitfähigkeiten der jeweiligen Materialien ab. Als Beispiel soll die folgende Beziehung angenommen werden:

$$\frac{\kappa_a}{\kappa_b} = \frac{10}{1} = \frac{E_b}{E_a} \quad (2.15)$$

Ist die Leitfähigkeit κ_a im Material a um den Faktor zehn größer als die Leitfähigkeit κ_b im Material b, so gilt dies umgekehrt proportional für die elektrischen Feldstärken.

Neben der Betrachtung der Felder in den beiden Materialien der Schichtanordnung soll weiterhin die Flächenladungsdichte σ_a und σ_b an den Oberflächen der jeweiligen Elektroden im reinen Strömungsfeld beschrieben werden:

$$\sigma_a = \varepsilon_0 E_a \quad \sigma_b = -\varepsilon_0 E_b \quad (2.16)$$

Die Ladungen auf der unteren Elektrode σ_b sind von entgegengesetzter Polarität. Aus der **Gleichung (2.16)** ist ersichtlich, dass die Oberflächenladungsdichte proportional zur an der Oberfläche herrschenden elektrischen Feldstärke ansteigt.

2.2.3 Ausbildung von Grenzflächenladungen nach Maxwell-Wagner in der Modellanordnung

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen elektrostatischen Zusammenhänge bezogen sich ausschließlich auf stationäre Zustände des reinen Strömungs- und Verschiebungsfeldes. Bei Betrachtung des zeitlichen Verhaltens dieser Anordnung ab dem Anlegen der externen Spannung ergibt sich eine Feldverteilung, welche aus einer Überlagerung des Strömungs- und Verschiebungsfeldes resultiert.

Weiterhin bildet sich an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer aufgrund der unterschiedlichen Leitfähigkeiten eine Grenzflächenladung aus. Dieser Effekt wird als Maxwell-Wagner-Sillars-Polarisation bezeichnet. Zur Beschreibung dieses zeitdynamischen Verhaltens der Modellanordnung sollen die in **Abbildung 2.7** beschriebenen Größen gelten.

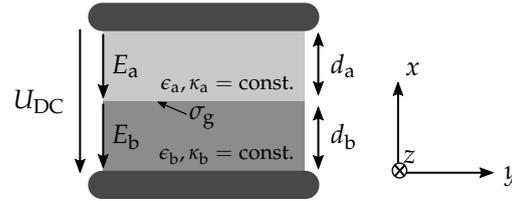


Abbildung 2.7: Skizze zur Beschreibung des zeitdynamischen Verhaltens der elektrischen Feldstärke sowie der Grenzflächenladungsdichte in der Modellordnung

Die Leitfähigkeit der Materialien κ_a und κ_b sowie die Permittivitäten ϵ_a und ϵ_b werden als konstant angenommen. An der HV-Elektrode wird eine Gleichspannung U_{DC} angelegt, welche die elektrischen Felder E_a und E_b innerhalb des oberen bzw. unteren Materials hervorruft.

Das elektrische Feld in den Schichten verändert sich nach Anlegen der externen Spannung mit der Zeit und soll deshalb in **Gleichung (2.17)** mit $E_a(t)$ beschrieben werden, eine Herleitung ist in [Kre92] zu finden.

$$E_a(t) = \frac{\kappa_b}{d_b \kappa_a + d_a \kappa_b} U_{DC} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \frac{\epsilon_b}{d_b \epsilon_a + d_a \epsilon_b} U_{DC} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.17)$$

Wobei für τ gilt:

$$\tau = \frac{d_b \epsilon_a + d_a \epsilon_b}{d_b \kappa_a + d_a \kappa_b} \quad (2.18)$$

Das Feld $E_b(t)$ lässt sich über die Beziehung in **Gleichung (2.19)** berechnen:

$$E_b(t) = \frac{U_{DC} - d_a E_a(t)}{d_b} \quad (2.19)$$

Da die Normalkomponente des elektrischen Feldes an der Grenzfläche nicht kontinuierlich ist, bildet sich eine Grenzflächenladungsdichte σ_g aus.

$$\sigma_g = D_a - D_b \quad (2.20)$$

$$\sigma_g(t) = \epsilon_a \cdot E_a(t) - \epsilon_b \cdot E_b(t) \quad (2.21)$$

Die daraus folgende zeitliche Veränderung der elektrischen Feldstärke sowie der Grenzflächenladungsdichte soll in **Abbildung 2.8** anhand von beispielhaften Parametern dargestellt werden.

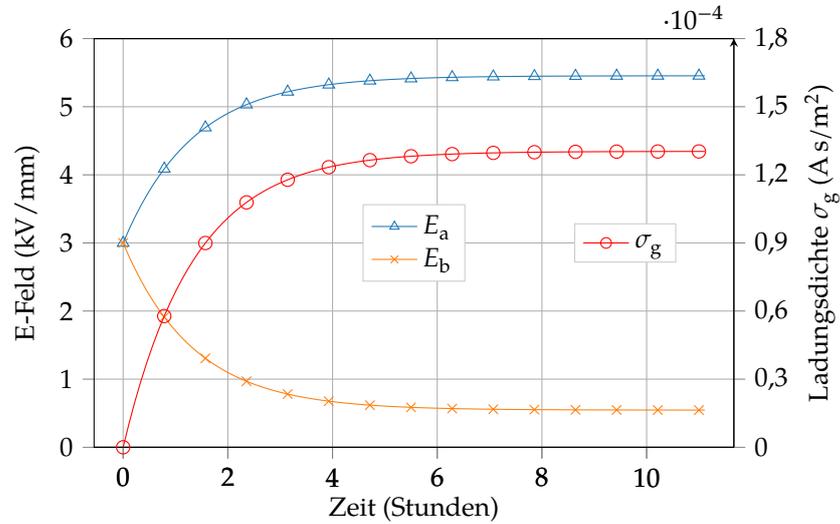


Abbildung 2.8: Beispielhafter Verlauf der elektrischen Felder sowie der Grenzflächenladungsdichte in der Modellanordnung mit folgenden Annahmen: $\epsilon_{r,a} = \epsilon_{r,b} = 3$, Polarisationsspannung $U_{DC} = 3$ kV, Abstand $d_a = d_b = 0,5$ mm und Leitfähigkeiten $\kappa_a = 1 \times 10^{-15}$ S/m und $\kappa_b = 10 \times 10^{-15}$ S/m

Für $t = 0$ ergibt sich für das elektrische Feld $E_a(t = 0)$ bei der Spannung U_{DC} :

$$E_a(t = 0) = \frac{\epsilon_b}{d_b \epsilon_a + d_a \epsilon_b} U_{DC} \quad (2.22)$$

Es herrscht folglich zum Zeitpunkt der Spannungsbeaufschlagung ein reines Verschiebungsfeld. Bei Betrachtung dieses Beispiels mit gleichen Permittivitäten in beiden Materialien ergibt sich zum Zeitpunkt $t=0$ jeweils eine Feldstärke von 3 kV/mm.

Für $t \rightarrow \infty$ vereinfacht sich die Beziehung für das elektrische Feld $E_a(t \rightarrow \infty)$ zu:

$$E_a(t \rightarrow \infty) = \frac{\kappa_b U_{DC}}{d_b \kappa_a + d_a \kappa_b} \quad (2.23)$$

Folglich verteilt sich das elektrische Feld bei Gleichspannung bei langer Betrachtungsdauer ausschließlich entsprechend der Leitfähigkeiten der beteiligten Materialien.

2.3 RAUMLADUNGEN

In den vorherigen Abschnitten wurde betrachtet, wie sich die Modellanordnung unter Gleichspannung verhält. Neben den beschriebenen makroskopischen Prozessen der Ladungsansammlung an den Elektroden und an den Grenzflächen kann es zu einer zusätzlichen Ladungsansammlung im Volumen des Isolierstoffs kommen. In diesem Zusammenhang sollen die Begriffe Heterocharge und Homocharge² definiert werden.

Befindet sich in der unmittelbaren Nähe einer mit positiver Spannung beaufschlagten Elektrode eine negative Raumladungsansammlung, wird diese als Heterocharge bezeichnet. Entsprechend bezeichnen Homocharges die Ansammlung positiver Ladung in der unmittelbaren Nähe einer mit positiver Spannung beaufschlagten Elektrode. Diese Raumladungen führen zu einer Veränderung des elektrischen Feldes, was in **Abbildung 2.9** beispielhaft an einem Plattenprüfkörper der Höhe d und der Annahme einer externen positiven Spannung U dargestellt werden soll.

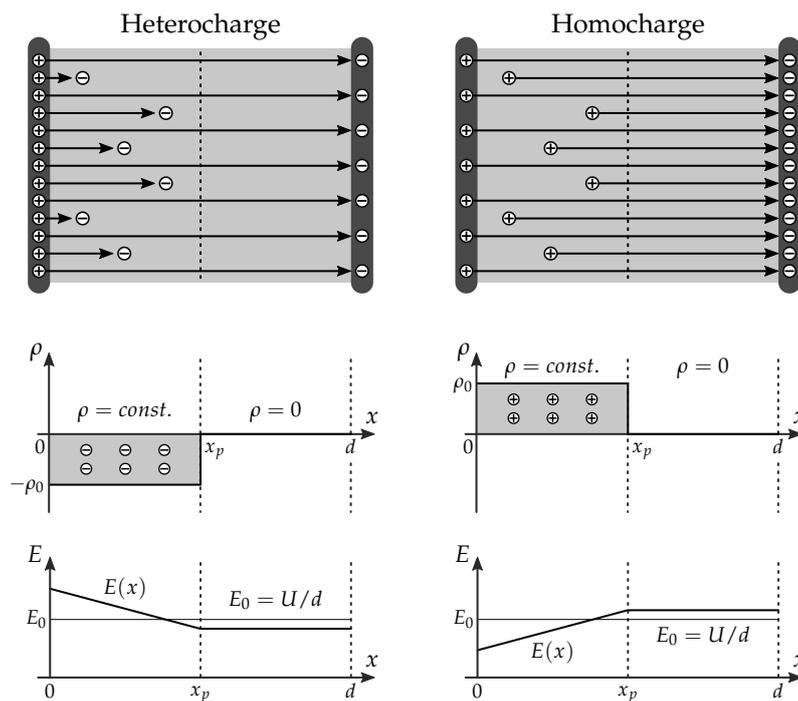


Abbildung 2.9: Ausbildung von Homocharges und Heterocharges mit Darstellung der Raumladungsdichte sowie dem daraus resultierenden elektrischen Feld, nach [Küc15]

² In dieser Arbeit werden die englischen Begriffe verwendet, da diese in der Fachsprache geläufiger sind.

Wie in der [Abbildung 2.9](#) gezeigt wird, führt eine konstante negative Raumladungsdichte $-\rho_0$ im Bereich von $x = 0$ bis $x = x_p$ zu einer Verstärkung des elektrischen Feldes E im Vergleich zur Feldstärke E_0 ohne Raumladungen. Kommt es im beschriebenen Bereich zu einer positiven Raumladungsansammlung, so wird das elektrische Feld abgeschwächt.

Die Ansammlung von Ladung in einem Flächenelement der Modellanordnung kommt zustande, wenn mehr Ladung hinzugefügt als abtransportiert wird. Folglich hängt das Raumladungsverhalten mit den Leitungsmechanismen in Dielektrika zusammen.

Im Gegensatz zu Metallen kann die Leitfähigkeit von Dielektrika nicht direkt bzw. ausschließlich unter vielen Annahmen berechnet werden. Dies liegt vor allem daran, dass in Dielektrika und elektrischen Isolierstoffen im Gegensatz zu Metallen meist keine geordnete Gitterstruktur vorliegt.

In dieser Arbeit soll das Raumladungsverhalten vor allem aus makroskopischer Sicht und nicht aus mikroskopischer Sicht betrachtet werden. Dennoch wird im Folgenden kurz auf die mikroskopischen Prozesse bzw. Leitungsmechanismen eingegangen, die zur Raumladungsansammlung führen können. Eine gute Übersicht zu Ladungstransportmechanismen ist in [[DF92](#); [Chi14](#); [Mol15](#)] zu finden.

Nach [[DF92](#); [MM13](#)] lassen sich die Leitfähigkeitsmechanismen in zwei Kategorien einteilen. Zum einen gibt es Mechanismen, die von der Grenzfläche zwischen der Elektrode und dem betrachteten Dielektrikum abhängen, und zum anderen Mechanismen, die im Volumen des Materials stattfinden.

Wird die Grenzfläche zwischen einer Elektrode und einem Dielektrikum betrachtet, so können Elektronen von der Elektrode in das Isoliermedium wandern, sofern die Potentialbarriere überwunden werden kann. Diese Potentialbarriere kann durch das Anlegen eines externen elektrischen Feldes gesenkt werden. Hier soll auf den Schottky-Effekt hingewiesen werden, welcher die temperaturunterstützte Injektion von Ladungsträgern bei einem externen elektrischen Feld beschreibt. Weiterhin soll der Fowler-Nordheim-Effekt erwähnt werden, bei dem die Injektionsprozesse vor allem vom elektrischen Feld gesteuert werden.

Einige Leitungsmechanismen sind in ihrer Beschreibung von der äußeren Grenzfläche zu den Elektroden losgelöst und beziehen sich auf das Volumen des Isolierstoffes. Die elektronische Haftstellenleitung (Hopping) basiert dabei auf der Theorie, dass Elektronen innerhalb

des Dielektrikums von Haftstelle zu Haftstelle springen. Dabei kommen die Haftstellen durch das ungleichmäßige Energiebandschema zustande, das in Isolierstoffen vorzufinden ist. Weiterhin soll an dieser Stelle der Poole-Frenkel-Mechanismus erwähnt werden, bei dem die Potentialbarriere durch ein externes elektrisches Feld gesenkt werden kann und es somit Elektronen ermöglicht wird, sich aus Haftstellen zu lösen und zum Ladungstransport beizutragen.

Für eine genauere Beschreibung der Leitungsmechanismen wird auf die in den obigen Abschnitten genannten Literaturquellen verwiesen, in welchen die Funktionsweise der Mechanismen umfangreich erläutert wird. Es erfolgte bewusst eine ausführlichere Beschreibung der makroskopischen Mechanismen in diesem Kapitel, da diese für das Anliegen dieser Arbeit bedeutender sind: Mit Hilfe der LIPP-Messungen soll in den folgenden Kapiteln durch die Beschreibung des Messsystems in **Kapitel 3**, die Evaluierung und Interpretation der Messdaten in **Kapitel 4** sowie die Beschreibung der Wiederholbarkeit in **Kapitel 5** das Messsystem charakterisiert werden. Zur Charakterisierung werden LIPP-Profile aufgezeichnet und verglichen. Da großer Wert auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gelegt wird, wurden die LIPP-Profile in diesen Kapiteln nach einer Polarisationsdauer im Bereich von Sekunden und Minuten aufgenommen, da hier angenommen werden kann, dass aufgrund der kurzen Polarisationsdauer zunächst noch keine Raumladungsansammlungen in der Modellanordnung vorhanden sind, sondern sich lediglich Flächenladungen an den Elektroden sowie Grenzflächen der Modellanordnung aufgebaut haben, wie es in diesem Kapitel anhand der Modellanordnung erläutert wurde. Lediglich im letzten Kapitel werden Raumladungsmessungen über einen längeren Zeitraum gezeigt und es kommt zur Ausbildung von Raumladungsansammlungen. Das Ziel dieser Arbeit besteht allerdings ausschließlich darin, das Verhalten der Modellanordnung unter Gleichspannung zu charakterisieren und nicht darin, einen Zusammenhang zu Leitfähigkeitsmechanismen herzustellen.

MESSVERFAHREN FÜR AUTOMATISIERTE UND WIEDERHOLBARE RAUMLADUNGSMESSUNGEN NACH DEM LIPP-PRINZIP

3.1 ÜBERBLICK ZUM ENTWICKELTEN MESSSYSTEM

3.1.1 Aufbau der Prü fzelle

In den vorigen Kapiteln wurde die Funktionsweise des Messprinzips sowie das theoretische Verhalten der Modellanordnung unter Gleichspannung beschrieben. Dieses Kapitel widmet sich dem Versuchsaufbau und beschreibt zunächst die Geometrie der Messzelle, welche in [Abbildung 3.1](#) dargestellt wird.

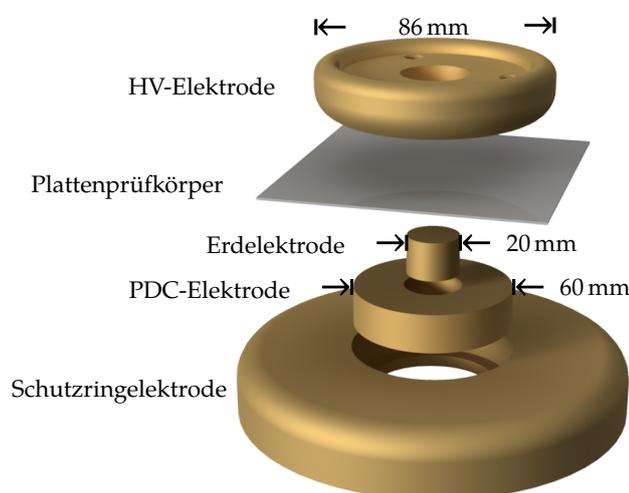


Abbildung 3.1: Explosionszeichnung der Messzelle des entwickelten LIPP-Messsystems, nach [SIP18c]

Die Messzelle besteht aus einer HV-Elektrode mit einem Durchmesser von 86 mm und einem Mittelteil mit einer reduzierten Höhe von 4 mm, welches als Zielbereich für den Laserimpuls dient. Alle Elektroden wurden aus Messing hergestellt. Die Abmessungen des Plattenprüfkörpers betragen $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0,05\text{ cm}$. Die untere Elektrodenanordnung besteht aus drei Teilen: der inneren Erdelektrode für die LIPP-Schaltung, der Polarisationsstrom und Depolarisationsstrom (PDC)-Elektrode und der äußeren Schutzringelektrode. Zwischen der Erdelektrode und der PDC-Elektrode befindet sich ein Luftspalt, der als elektrische Isolation dient. Die LIPP-Elektrode wird lediglich von zwei Stäben aus Plexiglas gehalten, welche zur vereinfachten Darstellung nicht abgebildet sind. Durch

die Luftisolation konnte die Kapazität der Erdelektrode gegenüber dem Erdpotential signifikant verringert werden, was zu einer größeren Bandbreite in der Messung führt, da der Verstärker direkt an die LIPP-Elektrode angeschlossen ist und eine größere Eingangskapazität die Bandbreite beschränken würde.

Für die Weiterentwicklung des Messsystems im Anschluss an diese Arbeit sind Experimente angedacht, bei denen PDC-Messungen parallel zu den LIPP-Messungen durchgeführt werden sollen. Aus diesem Grund wurde bereits eine PDC-Elektrode in die Elektrodenanordnung integriert. Zusätzlich dazu enthält die untere Elektrodenanordnung eine Schutzringelektrode, um etwaige Oberflächenströme im Falle von PDC-Messungen abführen zu können. In dieser Arbeit werden ausschließlich LIPP-Messungen durchgeführt.

3.1.2 Beschreibung des Messsystems

Wie bereits in [Tabelle 2.1](#) erwähnt, wurden LIPP-Systeme anderer Autoren meist für die Durchführung einzelner LIPP-Messungen, nicht aber für die fortlaufende Aufzeichnung über mehrere Stunden konzipiert. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, Raumladungsmessungen an Silikonplattenprüfkörpern durchzuführen. Da die Raumladungsprozesse hier meist in der Größenordnung von mehreren Stunden ablaufen, ist die fortlaufende Aufnahme von Messungen notwendig, um das zeitliche Raumladungsverhalten beobachten zu können. Aus diesem Grund wurde der Messaufbau mit großem Aufwand automatisiert und ein automatisches Beschichtungssystem eingeführt.

Um automatisierte LIPP-Messungen durchführen zu können, wurde ein externer Messkreis entwickelt, der in [Abbildung 3.2](#) schematisch dargestellt ist. Die bereits beschriebene Messzelle ist im linken Teil der Abbildung zu sehen. Um eine ausreichende akustische Kopplung zwischen der HV-Elektrode und dem Plattenprüfkörper zu erreichen, muss zwischen der HV-Elektrode und dem Plattenprüfkörper ein Koppelmaterial wie z.B. Silikonfett oder Silikonöl aufgebracht werden, wobei ersteres in dieser Arbeit gleichzeitig Teil des Untersuchungsgegenstandes ist.

Eine pneumatische Beschichtungsanlage wird verwendet, um vor dem Auftreffen jedes Laserpulses eine neue Schicht Material aufzutragen. Dies wird benötigt, um eine ausreichende Signalstärke zu erreichen, wie im [Abschnitt 3.3.1](#) erläutert wird. Die automatisierte Applikation des Beschichtungsmaterials ermöglicht eine gute Wiederholbarkeit der Messung, wie im späteren Verlauf der Arbeit gezeigt wird.

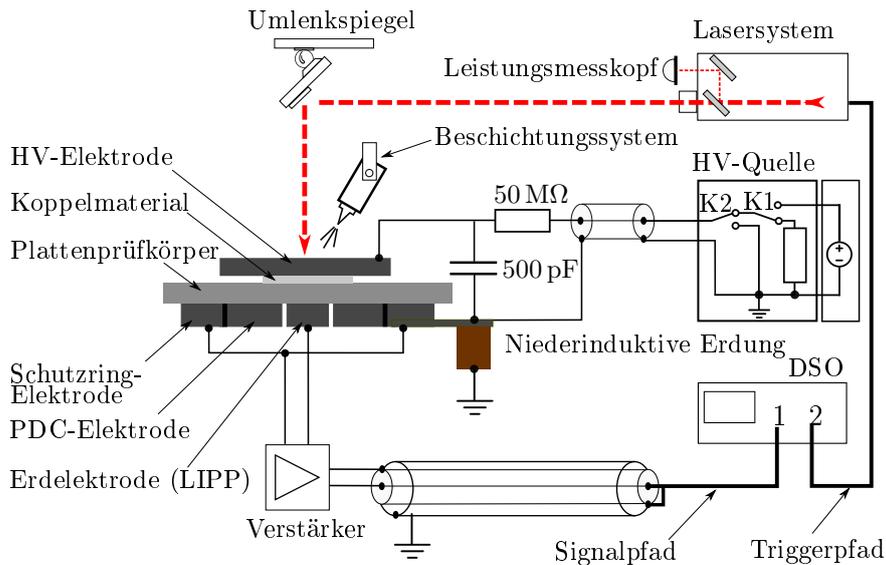


Abbildung 3.2: Schematische Zeichnung des entwickelten LIPP-Messsystems mit automatischer Beschichtungseinrichtung sowie externem Messkreis und externer Beschaltung, nach [SIP18c]

Es wird ein Quantel YG980 Pulslaser mit einer maximalen Pulsenergie von 1,2J, einer Wellenlänge von 1064 nm und einer festen Wiederholfrequenz von 1 Hz verwendet, um die akustische Anregung zu gewährleisten. Der Laser kann auch im Einzelschuss-Modus betrieben werden. Ein Spiegel lenkt den Laserpuls ab, um die HV-Elektrode von oben zu treffen. Am Zielort wird durch das Auftreffen des Laserpulses ein Plasma an der Oberfläche der Elektrode erzeugt, welches eine Druckwelle auslöst, die anschließend die Messzelle durchläuft. Zusätzlich gibt ein Leistungsmesskopf Informationen über die Pulsenergie eines jeden Schusses. Innerhalb der Einhausung des Lasers befindet sich eine optische Anordnung zur kontinuierlichen Reduzierung der Pulsenergie sowie eine Teleskopanordnung zur Einstellung des Strahldurchmessers auf der Elektrodenoberfläche im Bereich von 1 mm bis 15 mm.

Zur Bereitstellung der Polarisationsspannung wird eine DC-Quelle von Heinzinger (PNChp 30000 - 2 pos) verwendet. Aufgrund starker elektromagnetischer Störungen, welche durch die Blitzlampen im Lasersystem verursacht werden, sind dem Aufbau ein 50 MΩ Widerstand und eine 500 pF Kapazität vorgeschaltet, um den Polarisationsstrom zu filtern und das Rauschen zu reduzieren. Zwei Hochspannungsrelais K1 und K2 ermöglichen es der später beschriebenen Ablaufsteuerung automatisch eine Spannung an die

Prüfkörperanordnung anzulegen und diese automatisch zu erden.

Ein Stromverstärker von Femto (HCA-400M) mit einer Bandbreite von bis zu 400 MHz und einer festen Verstärkung von bis zu 5 kV/A wird als Vorverstärker für das LIPP-Signal verwendet. Eine niederinduktive Erdung der Schutzringelektrode und des Erdpotentials reduziert das Signalrauschen.

Ein Digitales Speicheroszilloskop (DSO) von LeCroy (Bandbreite: 1 GHz, Abtastrate: 2,5 GS/s, 12-Bit A/D-Wandler, Speichertiefe: 50 Mpts) wird verwendet, um das analoge Signal vom Hochgeschwindigkeitsverstärker zu digitalisieren. Die Messungen mit dem DSO wurden mit einer analogen Bandbreite von 200 MHz durchgeführt. Das DSO wird durch eine Fotodiode im Lasersystem getriggert.

Sensoren innerhalb des Temperaturschranks ermöglichen die Kontrolle der Umgebungsparameter. In das System sind drei Sensoren integriert: ein Temperatursensor für die Messung der Lufttemperatur im Temperaturschrank, ein Temperatursensor für die Messung der Elektrodentemperatur und ein Feuchtigkeitssensor.

In **Abbildung 3.3** ist der Messaufbau mit dem Puls laser auf der linken Seite, der Temperaturkammer mit der Messzelle in der Mitte und den Messgeräten auf der rechten Seite abgebildet.



Abbildung 3.3: Foto des Versuchsaufbaus mit Puls laser auf der linken Seite, Temperaturkammer mit Messzelle in der Mitte sowie Steuergeräten, Spannungsquelle und DSO auf der rechten Seite

Die Temperaturkammer ist mit einer Therme verbunden, welche es ermöglicht, die Lufttemperatur im Bereich von 10 °C bis 60 °C einzustellen. Die Prüfzelle einschließlich der Elektroden wird daher durch die gesteuerte Lufttemperatur indirekt erwärmt und somit auf Temperatur gebracht. Aus diesem Grund können im aktuellen Versuchsaufbau keine Temperaturen über 60 °C erreicht werden, da sowohl die elektronischen Komponenten im Verstärker als auch die Messkabel nicht für einen höheren Temperaturbereich ausgelegt sind. Zur besseren Veranschaulichung ist in [Abbildung 3.4](#) eine Nahaufnahme der Messzelle zu sehen.

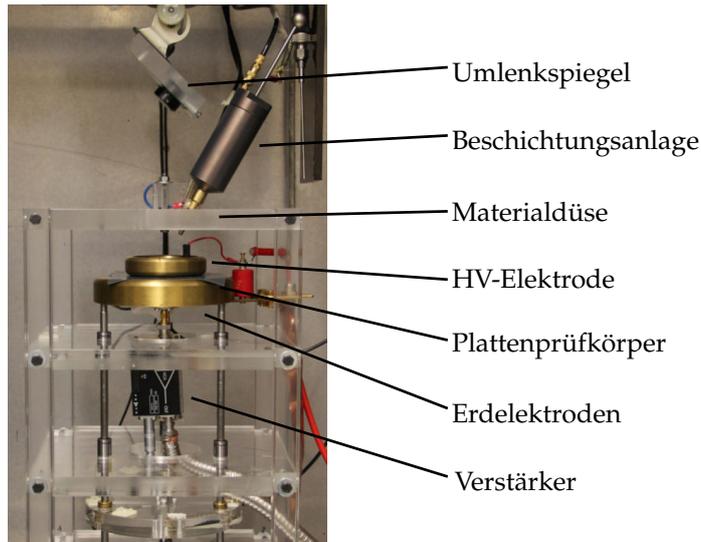


Abbildung 3.4: Darstellung der Messzelle mit Umlenkspiegel, Beschichtungssystem, Elektrodenanordnung sowie Verstärker

Die Messzelle befindet sich in einer tragenden Konstruktion aus Plexiglas. Der Umlenkspiegel ist in einem Winkel von 45° zur Strahlrichtung des Lasers angebracht, um die Elektrodenoberfläche in einem Winkel von 90° zu treffen. Das Beschichtungssystem trägt seitlich ein Material auf die Oberfläche der HV-Elektrode auf. Der Verstärker ist direkt an der Erdelektrode angeschlossen.

3.1.3 Automatisierung der Messungen

Aufgrund der im Rahmen von Stunden und Tagen ablaufenden Raumladungsprozesse in elektrischen Isolierstoffen wurde der Versuchsstand weitestmöglich automatisiert, um das Raumladungsverhalten auch in langen Betrachtungszeiträumen beobachten zu können.

An dieser Stelle sollen kurz die Begriffe **Messung**, **Datenpunkt**, **Messserie** und **Versuch** definiert werden:

1. Das Wort **Messung** wird in dieser Arbeit verwendet, um ein einzelnes LIPP-Profil zu beschreiben. Es ist das Messergebnis, welches sich aus dem einmaligen Auslösen des Lasers ergibt.
2. Eine Messung besteht aus mehreren tausend **Datenpunkten**.
3. Eine **Messserie** beschreibt mehrere Messungen, die innerhalb eines definierten Zeitraums ablaufen.
4. Ein **Versuch** umfasst alle Messungen bzw. Messserien und möglicherweise deren Wiederholung, die innerhalb eines definierten Versuchsprogramms vor Beginn des Versuches festgelegt wurden.

Wird beispielsweise das Raumladungsverhalten in einem Plattenprüfkörper unter einstündiger Spannungsbelastung untersucht, so wird in dieser Arbeit im Abstand von 2 Minuten ein LIPP-Profil bzw. eine **Messung** aufgenommen. Bei einer Stunde entstehen somit 30 Messungen, welche insgesamt eine **Messserie** bilden. Bei Wiederholung dieses Prozederes in gleicher Abfolge würde der **Versuch** somit aus zwei **Messserien** bestehen.

Weiterhin sollen einzelne Phasen des Versuches definiert werden. Die **Polarisationsphase** beschreibt dabei den Zeitraum, in welchem der Prüfkörper einer Spannungsbelastung ausgesetzt ist und in welchem Messungen aufgenommen werden. Die **Kurzschlussphase** wiederum beschreibt den Zeitraum nach Ablauf der Polarisationsphase, in welcher der Prüfkörper kurzgeschlossen ist und ebenfalls aktiv Messungen aufgenommen werden. Die **Wartezeit** beschreibt einen etwaig sich nach Abschluss der Kurzschlussphase anschließenden Zeitraum, in dem der Prüfkörper kurzgeschlossen ist, aber keine Messungen aufgenommen werden.

Um im späteren Verlauf der Arbeit mehrere Messserien miteinander vergleichen zu können, wurde ein fester Ablaufplan entwickelt, der für alle weiteren Messungen eingehalten wurde. Eine schematische Übersicht wird in **Abbildung 3.6** gezeigt.

Jeder Versuch wird dabei vom Computer gesteuert und folgt einem vordefinierten Zeitplan bzw. Ablaufplan. Dabei wird vor Beginn eines Versuches folgendes definiert:

1. Die Dauer der **Polarisationsphase**. Es wird festgelegt, wie viele Messungen innerhalb der Polarisationsphase durchgeführt werden. Die Zeitdauer zwischen zwei Messungen ergibt sich aus dem Quotienten aus Dauer der Polarisationsphase und Anzahl der definierten Messungen.

2. Die Dauer der **Kurzschlussphase** sowie die Anzahl der Messungen innerhalb dieser Phase.
3. Die **Wartezeit** zwischen zwei Messserien, falls mehrere Messserien hintereinander durchgeführt werden sollen.
4. Die Temperatur der Messung sowie die Feldstärke während der Polarisationsphase.
5. Nach Ablauf der Polarisationsphase und Kurzschlussphase ist eine Messserie beendet. Es besteht weiterhin eine Auswahlmöglichkeit zur mehrfachen automatischen Wiederholung einer Messserie in genau gleicher Abfolge.
6. Zur Dokumentation wird dem Datensatz in der Programmoberfläche eine kurze Beschreibung des Versuchs mit Bezeichnung des Prüfkörpers hinzugefügt.

Nach der Definition dieser Parameter kann ein **Versuch** gestartet werden. Dazu soll zunächst der Ablauf der ersten **Messung** einer **Messserie** in **Abbildung 3.5** beschrieben werden.

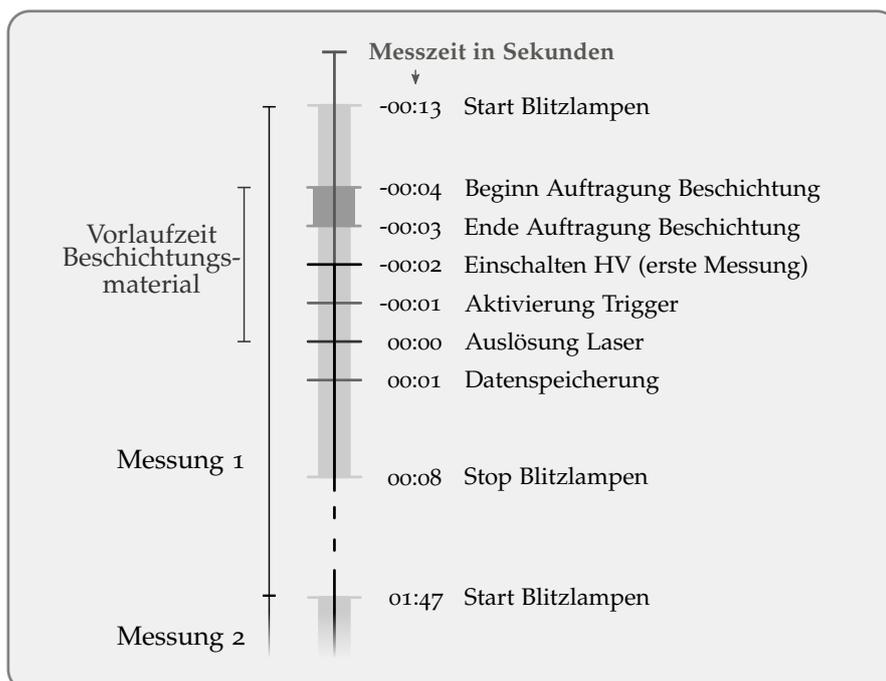


Abbildung 3.5: Zeitablaufdiagramm der ersten Messung eines Versuchs mit Darstellung der einzelnen automatisch ablaufenden Prozessschritte

Die erste Messung beginnt 13s vor Auslösung des Lasers mit dem Einschalten der Blitzlampen. Diese brauchen zehn Sekunden bevor ein Schuss ausgelöst werden kann. Daraufhin erfolgt im

Zeitraum von 4 s bis 3 s vor Auslösung des Lasers das Auftragen der Beschichtung auf der HV-Elektrode durch die pneumatische Beschichtungseinrichtung. Anschließend wird 2 s vor Auslösung des Lasers die Hochspannung eingeschaltet und eine Sekunde hiernach der Trigger im Oszilloskop aktiviert. Zum Zeitpunkt $t = 0$ s erfolgt schließlich die Auslösung des Lasers und die Daten werden gespeichert. 8 s nach Speicherung der Messdaten werden die Blitzlampen des Lasers ausgeschaltet, um Ressourcen zu sparen. Damit ist die erste Messung der Messserie abgeschlossen.

Nach der Beschreibung des Ablaufs der ersten Messung einer Messserie wird in **Abbildung 3.6** beschrieben, wie sich mehrere Messungen zu einer Messserie zusammensetzen und wie ein Versuch abläuft.

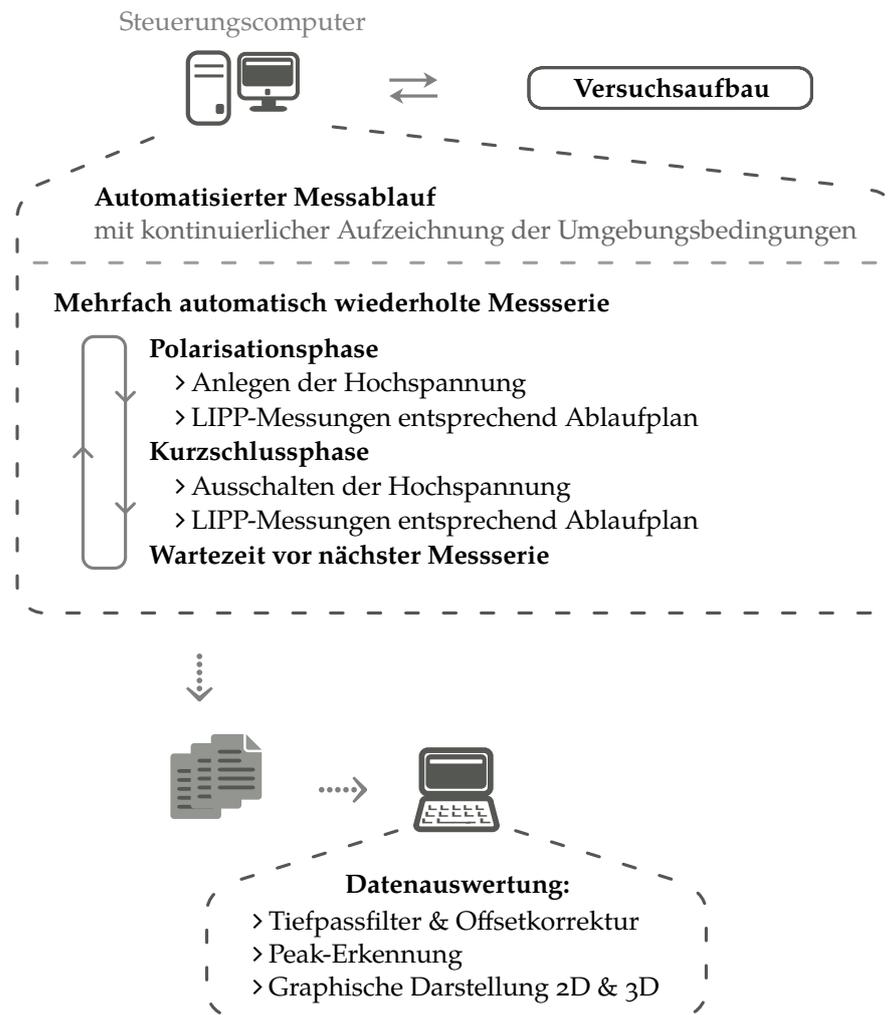


Abbildung 3.6: Schematischer Überblick des automatisierten Prozesses eines Versuchs mit dem aufgebauten Messsystem

Es wurde bereits erwähnt, dass vor Beginn des Versuchs die Zeitdauer der Polarisationsphase, der Kurzschlussphase und der Wartezeit sowie die Spannung definiert werden muss. Weiterhin

wird die Anzahl der Messungen innerhalb der Polarisationsphase und Kurzschlussphase festgelegt. Der Ablauf eines Versuchs gestaltet sich folgendermaßen: Zunächst beginnt der Versuch entsprechend dem in **Abbildung 3.5** beschriebenen Schema für die erste Messung innerhalb der Polarisationsphase. Anschließend wird der Ablauf für die insgesamt definierte Anzahl an Messungen wiederholt. Nach Ende der Polarisationsphase wird die Anordnung kurzgeschlossen und es folgt die im Versuchsprogramm definierte Kurzschlussphase mit der vorher definierten Anzahl an Messungen. Nach Ende der Kurzschlussphase schließt sich eine etwaig definierte Wartezeit und eine Wiederholung des insgesamt bereits beschriebenen Messablaufs an. So können innerhalb eines Versuchs mehrere Polarisations- und Kurzschlussphasen (Messserien) durchgeführt werden.

Zum Ende eines Versuchs werden die Daten automatisch auf die Festplatte geschrieben und anschließend ausgewertet. Das fest definierte Prozedere eines Versuchs ermöglicht es im weiteren Verlauf dieser Arbeit, eine gute Vergleichbarkeit zwischen Messungen und Messserien bei unterschiedlichen Parametern herzustellen.

3.2 SIGNALVERARBEITUNG UND OPTIMIERUNG

Für alle in diesem Kapitel durchgeführten Versuche wurde ein Plattenprüfkörper aus $500\ \mu\text{m}$ Silikonelastomer sowie einer Silikonfett-schicht von $300\ \mu\text{m}$ verwendet.

3.2.1 Beschreibung der Rohdaten

Nach Beschreibung des Versuchsaufbaus im letzten Abschnitt wird in **Abbildung 3.7** das Rohsignal einer LIPP-Messung an der Modell-anordnung aus **Abschnitt 2.2.1** gezeigt. Für diese Messung wurde zu-nächst noch nicht das automatische Beschichtungssystem verwendet, sondern lediglich schwarze Markertinte manuell auf den Zielbereich der HV-Elektrode aufgebracht und Silikonfett als Koppelmaterial ver-wendet.

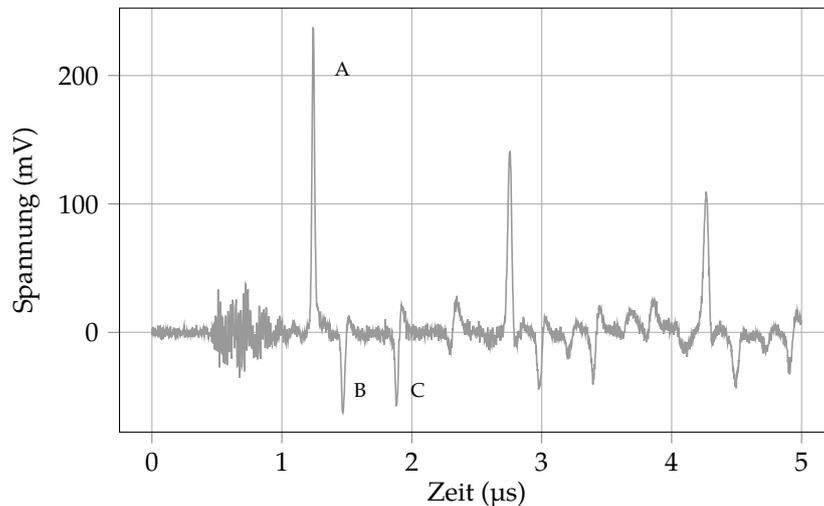


Abbildung 3.7: Rohdaten einer LIPP-Messung mit Reflexionsverhalten sowie Peak bei Grenzflächen zwischen HV-Elektrode und Silikonfett (A), Silikonfett und Silikonelastomer (B) und Silikonelastomer und Erdelektrode (C)

Die y-Achse wird in dieser Arbeit mit der Spannung in mV gezeigt, wobei die Spannung bzw. der messbare Strom linear mit der Raumladung korreliert (siehe **Gleichung (2.11)**) und somit die Ladungsverteilung innerhalb der Prüfkörperanordnung repräsentiert. Es wurde bewusst keine Umrechnung auf eine Ladung vorgenommen, da der Mehrwert des Messsystems vor allem in der Möglichkeit des Vergleichs zwischen Messserien liegt. Weiterhin entspricht die x-Achse in μs der Höhe der Prüfkörperanordnung und somit einem Ort. In dieser Arbeit wird nicht von der Zeit in μs in einen Ort umgerechnet und alle im Folgenden in μs angegebenen Werte entsprechen einem Ort innerhalb der Modellanordnung (später in der Arbeit wird hier auch von einem zeitäquivalenten Ort

gesprochen). Eine Umrechnung wurde bewusst nicht vorgenommen, da für die Prüfkörperanordnung aus mehreren Schichten die Schallgeschwindigkeiten, vor allem in Abhängigkeit der Temperatur, nicht exakt bekannt sind und somit das Ergebnis verfälscht werden könnte. Es kann aber aufgrund der später in der Arbeit¹ beschriebenen Interpretation des LIPP-Signals eine hinreichend genaue Zuordnung der Peaks zu den einzelnen Grenzflächen in der Modellanordnung vorgenommen werden.

Nachfolgend sollen die Rohdaten kurz beschrieben werden: Der erste Teil des Signals zwischen $0\ \mu\text{s}$ bis $1\ \mu\text{s}$ ist auf die elektromagnetische Störung durch die Blitzlampen im Lasersystem zurückzuführen. Im folgenden Signalabschnitt zwischen $1\ \mu\text{s}$ bis $2\ \mu\text{s}$ ist das Nutzschriftal zu finden. Eine genaue Analyse des Nutzschriftals und eine Erklärung des folgenden Reflexionsmusters von $2\ \mu\text{s}$ bis $5\ \mu\text{s}$ erfolgt in **Kapitel 4**. An dieser Stelle soll die Zuweisung der einzelnen Peaks des Nutzschriftals zu den Grenzflächen in der Modellanordnung dennoch vorweggenommen werden. Innerhalb des Nutzschriftals im Bereich von $1\ \mu\text{s}$ bis $2\ \mu\text{s}$ ist der erste positive Peak (A) der Grenzfläche zwischen der HV-Elektrode und dem Silikonfett zuzuordnen. Der zweite negative Peak (B) entspricht der Ladung an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer und der dritte negative Peak (C) dem Ladungsverhalten an der Grenzfläche zwischen dem Plattenprüfling und der Erdelektrode.

3.2.2 Auslegung des Filters

Um die aufgrund der Blitzlampen hervorgerufene Störung zu isolieren, wurde das Signal bei geschlossenen Blenden, sprich ohne Einwirkung eines Laserimpulses auf der HV-Elektrode, aufgezeichnet und in **Abbildung 3.8** dargestellt. Es zeigt sich, dass der Teil der Blitzlampenstörung vor allem im Bereich von $1\ \mu\text{s}$ bis $1,5\ \mu\text{s}$ einen festen sinusförmigen Bestandteil aufweist. Der zeitlich folgende Signalanteil hingegen ist dem Grundrauschen zuzuschreiben. Ähnliche Probleme mit der Einkopplung der Blitzlampen in das Messsignal wurden auch bei [Maloo] festgestellt.

¹ Im späteren Verlauf der Arbeit wird in **Tabelle 4.1** die Schallgeschwindigkeit auf Grundlage von Literaturangaben mit $1000\ \text{m/s}$ angenommen und die einzelnen Peaks des LIPP-Signals werden den Grenzflächen zugeordnet.

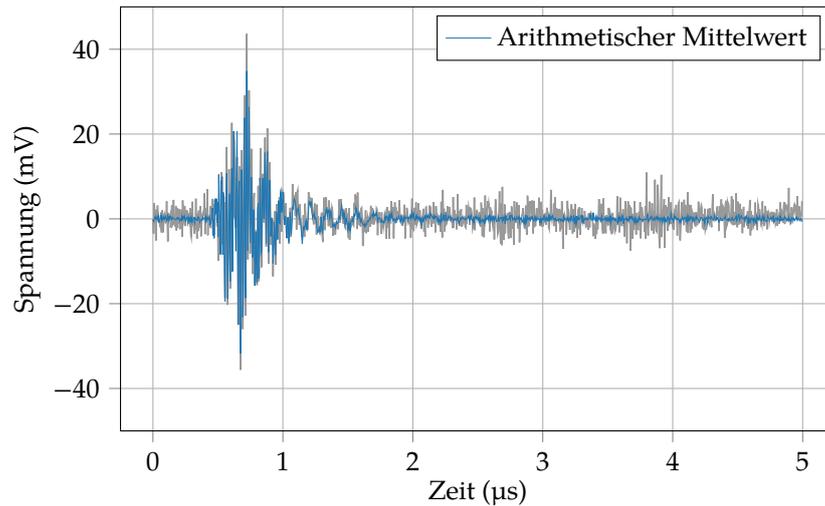


Abbildung 3.8: Arithmetischer Mittelwert von sechzig konsekutiv aufgenommenen Störsignalen sowie ein Signal im Original in grau hinterlegter Farbe, nach [SIP18c]

Zur Analyse der Störung ist der Frequenzgang des arithmetischen Mittelwerts der Störung in [Abbildung 3.9](#) dargestellt. Im Frequenzbereich lässt sich offensichtlich die sinusförmige Ausprägung im Bereich von 8 MHz erkennen, welche auf die Blitzlampen zurückzuführen ist. Weiterhin ist ein Störer im Bereich von 50 MHz bis 60 MHz zu finden.

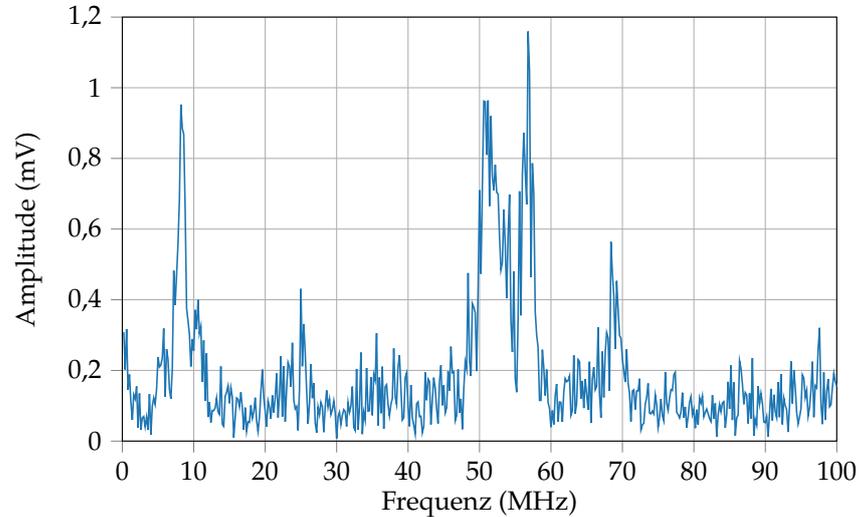


Abbildung 3.9: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der in [Abbildung 3.8](#) dargestellten Blitzlampenstörung im Frequenzbereich

In einem nächsten Schritt wird das LIPP-Signal im Frequenzbereich betrachtet. Da die Störung der Blitzlampen noch bis $1,7 \mu\text{s}$ messbar ist (siehe [Abbildung 3.8](#)), wird ausschließlich der Bereich von $1,7 \mu\text{s}$

bis $5\ \mu\text{s}$ im Frequenzbereich betrachtet. **Abbildung 3.10** zeigt deutlich, dass das Nutzsignal aus Frequenzanteilen bis ca. 25 MHz besteht.

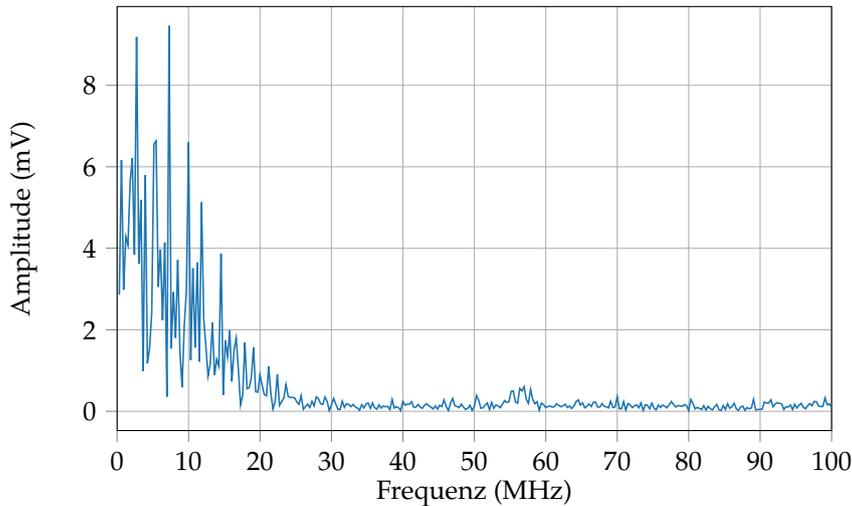


Abbildung 3.10: Darstellung des LIPP-Signals aus **Abbildung 3.7** von $1,7\ \mu\text{s}$ bis $5\ \mu\text{s}$ im Frequenzbereich

Aus diesem Grund wird ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 25 MHz angewendet. Wie schon erwähnt, wurden alle Messdaten in dieser Arbeit mit einer analogen Bandbreite von 200 MHz aufgezeichnet. Es wurde bewusst mit diesem zunächst für das Signal breit erscheinenden Frequenzband gemessen, da die nächstkleinere Stufe von 20 MHz das Signal nicht ausreichend aufgelöst hätte.

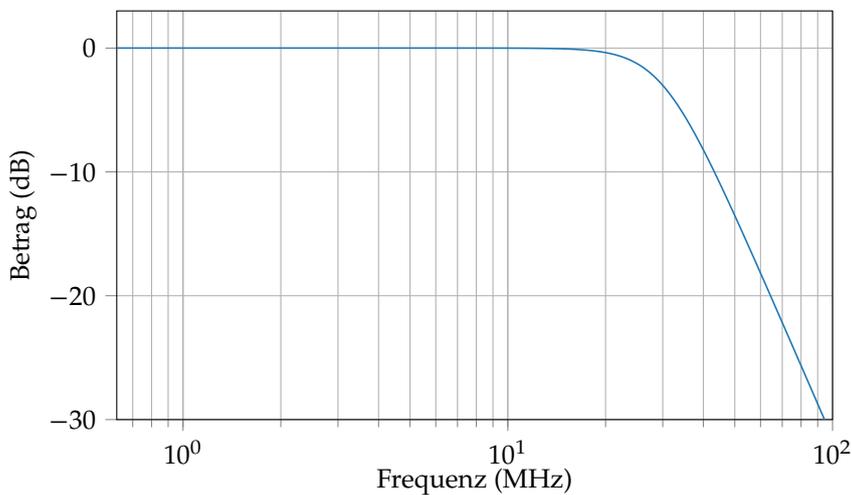


Abbildung 3.11: Amplitudengang des verwendeten Butterworth-Filters dritter Ordnung mit der Grenzfrequenz von 25 MHz und einer Abtastrate von 2,5 GHz

Es wurde ein Butterworth-Filter dritter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 25 MHz sowie einer Abtastrate von 2,5 GHz verwendet.

Der Amplitudengang ist in [Abbildung 3.11](#) abgebildet.

Diese Filtermethode wird anschließend auf die in [Abbildung 3.7](#) gezeigten Rohdaten angewendet und in [Abbildung 3.12](#) dargestellt.

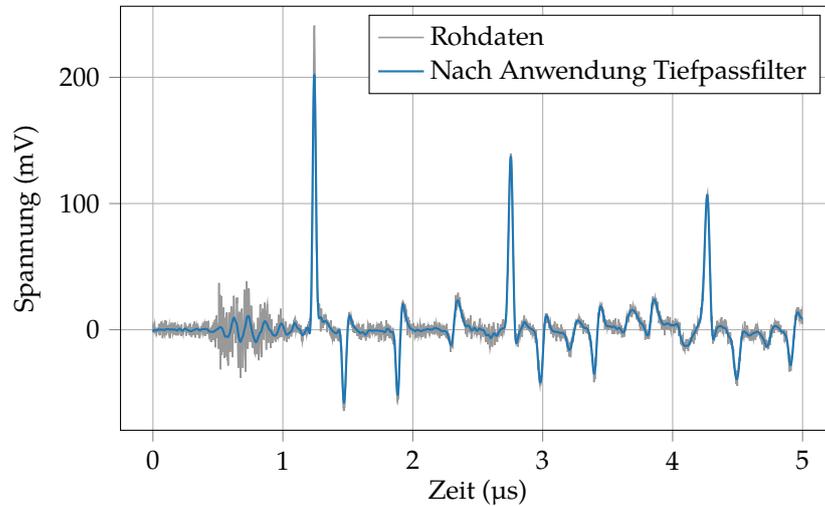


Abbildung 3.12: Darstellung der Rohdaten aus [Abbildung 3.7](#) vor und nach Anwendung des Tiefpassfilters

Da zu Beginn der Datenaufzeichnung ausschließlich die bereits beschriebene Störung vorherrscht, werden alle im weiteren Verlauf dieser Arbeit gezeigten LIPP-Profile bei $1,1\ \mu\text{s}$ abgeschnitten. Das resultierende Signal im Nutzbereich nach Anwendung des Filters wird in [Abbildung 3.13](#) dargestellt.

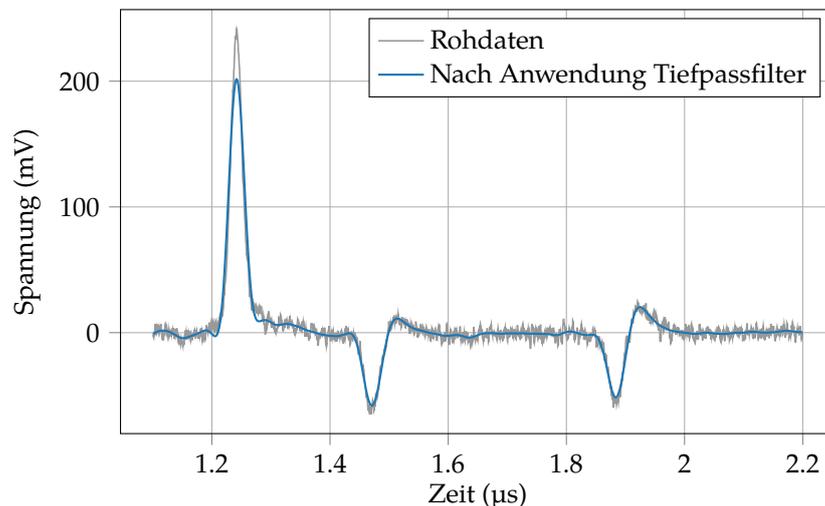


Abbildung 3.13: Resultierende Darstellung des Nutzsignals aus [Abbildung 3.7](#) mit Anwendung des ausgelegten Tiefpassfilters

3.3 OPTIMIERUNG VON VERSUCHSPARAMETERN

Die Signalstärke ist von verschiedenen Versuchsparametern abhängig. Dazu werden in diesem Kapitel Versuche zur Optimierung des Beschichtungsmaterials, der Pulsenergie und des Strahldurchmessers des Lasers gezeigt.

3.3.1 Einfluss des Beschichtungsmaterials

Wie bereits beschrieben, trägt die pneumatische Beschichtungsanlage in späteren Versuchen vor jedem Schuss des Lasers eine neue Schicht Material auf die HV-Elektrode auf. Ohne aufgetragenes Material trifft der Laser direkt auf die HV-Elektrode aus Messing und ein Großteil der Strahlung wird reflektiert, was dazu führt, dass das folgende Druckprofil keine ausreichende Amplitude erreicht. Bei Verwendung von Wasser oder schwarze Markertinte verdampft das aufgetragene Material, was zu einer Verstärkung der Druckwelle im Vergleich zum Entstehungsprozess ohne Beschichtungsmaterial führt.

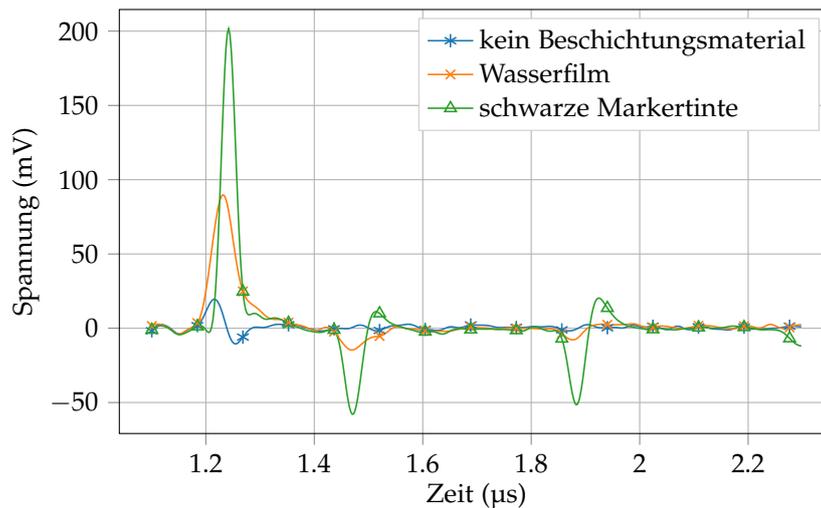


Abbildung 3.14: Einfluss des Beschichtungsmaterials auf die Signalstärke des LIPP-Profiles, nach [SIP18c]

Abbildung 3.14 zeigt dazu die Abhängigkeit der Signalamplitude vom Beschichtungsmaterial bei Verwendung von Wasser, Markertinte und ohne Beschichtungsmaterial. Eine deutliche Abhängigkeit der Signalstärke von der Art des Beschichtungsmaterials lässt sich feststellen, wobei schwarze Markertinte eine größere Amplitudenstärke als bei Verwendung eines Wasserfilmes aufweist. Ohne ein Beschichtungsmaterial ist die Signalstärke nicht ausreichend.

Ein analoges Verhalten wurde in [ZCC96] in einem LIPP-Versuch mit einer Aluminiumelektrode beobachtet. Es gab einen signifikanten Unterschied in der Signalstärke zwischen der Durchführung des Versuchs ohne und mit schwarzer Markertinte als Beschichtungsmaterial auf der Aluminiumelektrode.

3.3.2 Einfluss der Pulsenergie und des Strahldurchmessers

Neben dem Beschichtungsmaterial wird die Signalstärke weiterhin durch die Pulsenergie und den Strahldurchmesser des Lasers beeinflusst. Für die in den folgenden zwei Abbildungen gezeigten Messungen wurde manuell aufgetragene schwarze Markertinte als Beschichtungsmaterial verwendet, da diese nach [Abbildung 3.14](#) zur höchsten Signalstärke führte.

Zunächst wurde in einem Versuch die Pulsenergie des Lasers in einem Bereich von 0,63 J bis 1,12 J variiert. Die in [Abbildung 3.15](#) vorgestellten Messungen wurden durchgeführt, nachdem die Anordnung für 30 s mit 3 kV polarisiert wurde. Die Aufzeichnung der Pulsenergie erfolgte mit dem Leistungsmesskopf.

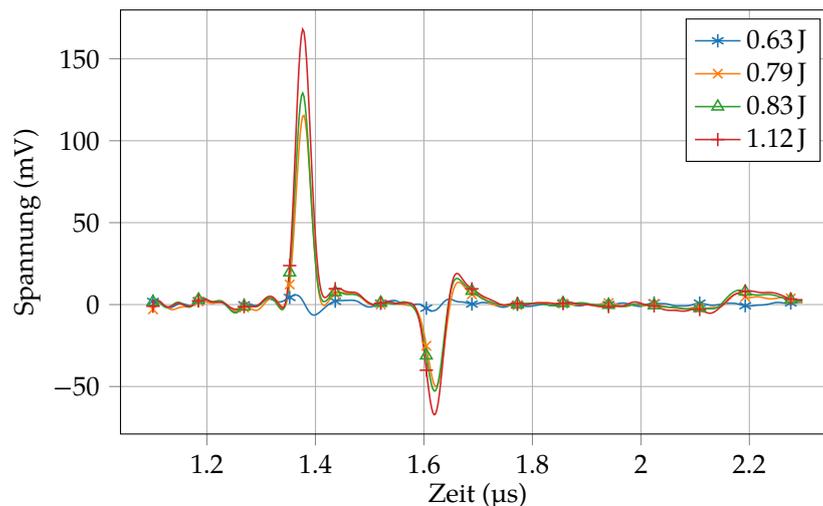


Abbildung 3.15: Einfluss der Pulsenergie des Lasers auf die Signalstärke, nach [SIP18c]

Bei Betrachtung der Ergebnisse in [Abbildung 3.15](#) kann festgestellt werden, dass es bei Verwendung einer Pulsenergie von 1,12 J einen zu den restlichen Werten leicht erhöhten Signalpegel gibt, aber alle getesteten Werte zu einem ausreichenden Pegel führen.

Eine ähnliche Korrelation wurde auch in [VAR10] beobachtet, wo eine weitgehend lineare Korrelation zwischen der Signalamplitude

und der Laserenergie gefunden wurde.

Es wurde weiterhin angenommen, dass der Strahldurchmesser die Signalstärke beeinflusst. Dazu wurde in einem Experiment der Strahldurchmesser von 4,5 mm bis 13 mm variiert. Die Maßangabe des Durchmessers bezieht sich auf den Durchmesser auf der Oberfläche der HV-Elektrode. Als Pulsenergie wurde der zuvor optimale Wert von 1,12 J verwendet sowie erneut Markertinte als Beschichtungsmaterial aufgetragen. Das Ergebnis dieses Versuchs ist in [Abbildung 3.16](#) dargestellt.

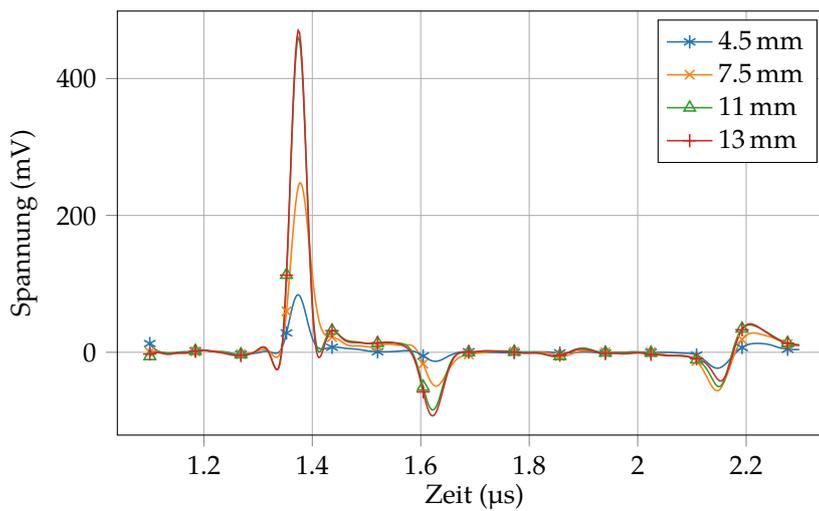


Abbildung 3.16: Einfluss des Strahldurchmessers des Lasers auf die Signalstärke, nach [SIP18c]

Die Ergebnisse zeigen, dass der Signalpegel mit steigendem Strahldurchmesser ansteigt, wobei eine Vergrößerung über 11 mm zu keinem weiteren Anstieg des Signalpegels führt.

3.3.3 Optimierte Versuchsparameter

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei Verwendung von schwarzer Markertinte, einer Pulsenergie von 1,12 J sowie einem Strahldurchmesser von 13 mm ein maximaler Pegel von 480 mV in der untersuchten Prüfkörperanordnung bei Polarisation für 30 s mit 3 kV erreicht werden konnte.

Es wurde deshalb angestrebt, diese Parameter für alle folgenden Versuche zu verwenden. Da es im Zusammenhang mit dem automatischen Auftragen der schwarzen Markertinte durch das pneumatische Beschichtungssystem wiederholt Probleme in längeren Versuchsreihen in Hinblick auf die Wiederholbarkeit gab, wurde Wasser als

Beschichtungsmaterial ausgewählt. Für die Pulsenergie sowie den Strahldurchmesser wurden die zuvor ermittelten Werte beibehalten.

Ein Beispiel für das resultierende Signal mit Wasser als Beschichtungsmaterial, einem Strahldurchmesser von 13 mm, einer Pulsenergie von 1,12 J sowie einer Polarisationsspannung von 3 kV bei Raumtemperatur und Anwendung des definierten digitalen Tiefpassfilters ist in [Abbildung 3.17](#) dargestellt.

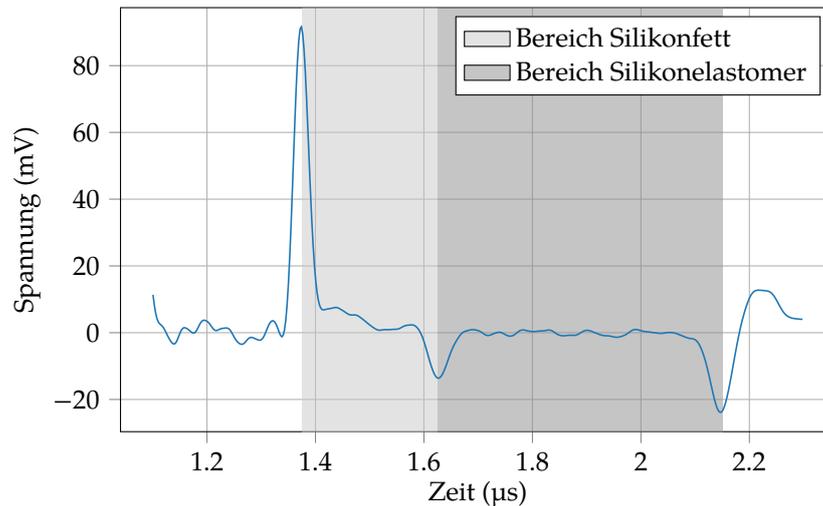


Abbildung 3.17: Beispielhaftes LIPP-Signal nach Optimierung der Versuchsparameter in Bezug auf die Pulsenergie, den Strahldurchmesser des Lasers, das Beschichtungsmaterial sowie nach Anwendung des definierten digitalen Tiefpassfilters

Die anhand von [Abbildung 3.17](#) gezeigten Versuchsparameter wurden für alle in [Kapitel 5](#) und [Kapitel 6](#) gezeigten Messungen verwendet. Lediglich im nächsten Kapitel kamen vereinzelt abweichende Versuchsparameter zur Anwendung.

INTERPRETATION DES LIPP-PROFILS

In der Literatur wird in anderen Messsystemen meist Silikonöl als Koppelmaterial benutzt, sofern keine aufgedampften Elektroden eingesetzt werden. Bei der Durchführung der ersten Messungen in dieser Arbeit mit Silikonfett als Koppelmaterial wurden signifikante Unterschiede in der Signalform zu den sonst in der Literatur mit Silikonöl durchgeführten Messungen gefunden. Ziel dieses Kapitels ist es deshalb, das bereits in [Abschnitt 3.2](#) vorgestellte LIPP-Profil zu interpretieren und die einzelnen Signalkomponenten den jeweiligen Grenzflächen innerhalb der Modellanordnung zuzuweisen.

4.1 REFLEXIONSVERHALTEN INNERHALB DER MODELLANORDNUNG

Das gemessene LIPP-Signal (siehe [Abbildung 3.7](#)) enthält neben dem Nutzsignal weitere Reflexionsanteile, welche sich an den nutzbaren Teil des Signals anschließen. In diesem Abschnitt wird dieses Reflexionsverhalten in der Modellanordnung zunächst berechnet. Anschließend soll eine Zuweisung des berechneten Reflexionsverhaltens zum gemessenen LIPP-Profil erfolgen.

4.1.1 *Berechnetes Reflexionsverhalten*

Wie bereits in [Kapitel 3](#) erwähnt wurde, schließen sich Reflexionen an das Nutzsignal an, die wertvolle Informationen zur Interpretation des Signals enthalten.

Trifft der Laserpuls auf die HV-Elektrode (siehe zunächst [Abbildung 2.1](#)), so wird eine Druckwelle ausgelöst, welche beginnend mit der HV-Elektrode durch die einzelnen Schichten der Modellanordnung läuft.

Nach Durchlaufen der HV-Elektrode erreicht die Druckzone die Grenzfläche zum Koppelmaterial. An dieser Stelle kommt die Frage nach der weiteren Fortpflanzung der Druckzone auf, da sich aufgrund der unterschiedlichen akustischen Parameter der Materialien an den Grenzflächen Reflexionen ergeben können. Um dies genauer zu analysieren, werden in [Tabelle 4.1](#) die Schallgeschwindigkeiten und Dichten der in der Modellanordnung verwendeten Materialien aufgeführt.

Tabelle 4.1: Dichte und Schallgeschwindigkeit der einzelnen Schichten in der Modellanordnung; in fett hervorgehobene Werte wurden für die weiteren Berechnungen verwendet

Material	Dichte in kg/m ³	Schall- geschwindigkeit in m/s	Quelle
Messing	8100	4430	[Ros14]
Silikonöl	1028	1019	[LSD14]
	965	1076-1119	[Len+12]
	1045	1020	[HJ74]
Annahme	1000	1000	
Silikon- elastomer	990-1500	959-1113	[Fol74]
		1008 +- 4.6	[Hac+92]
Annahme	1000	1000	
Silikonfett			
Annahme	1000	1000	
Luft bei 20 °C	1,2045	344	[Ben+02]

Die Schallgeschwindigkeiten und Dichten für Silikonöl, Silikonelastomer und Silikonfett wurden auf Basis der angegebenen Quellen geschätzt¹. Für Messing und Luft wurden die Angaben aus der Literatur direkt übernommen. Der bei der Schätzung entstandene Fehler im niedrigen einstelligen Prozentbereich ist für die weitere Betrachtung der Reflexionsparameter unkritisch. Die für folgende Rechnungen verwendeten Werte und Annahmen sind in der **Tabelle 4.1** durch fette Schrift hervorgehoben.

Es wird davon ausgegangen, dass die Schallwelle für die betreffende Anordnung im Fernfeld betrachtet werden kann, wonach sich die akustische Schallimpedanz aus dem Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte ergibt. Eine Übersicht zu den akustischen Schallimpedanzen der einzelnen Materialien der Modellanordnung ist in **Tabelle 4.2** angegeben. Dort sind weiterhin die Laufzeiten in den einzelnen Schichten der Modellanordnung aufgeführt.

¹ Die in **Tabelle 4.1** angegebenen Schallgeschwindigkeiten gelten für Raumtemperatur. Genauere Angaben werden nicht gemacht, da auch die genaue Zusammensetzung der verwendeten Materialien nicht bekannt ist, weshalb die Literaturangaben lediglich als Anhaltspunkt dienen sollen.

Tabelle 4.2: Berechnete Schallimpedanzen der einzelnen Schichten der Modellordnung und Laufzeiten der Schallwelle auf Grundlage der in [Tabelle 4.1](#) angegebenen Schallgeschwindigkeiten und Dichten

Material	Symbol	Schallimpedanz in $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})$	Höhe in mm	Laufzeit in μs
HV-Elektrode (Messing)	Z_M	$35,9 \times 10^6$	4 mm	0,90 μs
Silikonfett Silikonölschicht	Z_K	1×10^6	0,15 mm	0,15 μs
Plattenprüfling Silikonelastomer	Z_E	1×10^6	0,50 mm	0,50 μs
Luft	Z_L	$0,0004 \times 10^6$		

Auf Grundlage der Schallimpedanzen sollen mit Hilfe folgender Beziehung die Reflexions- sowie Transmissionskoeffizienten an den einzelnen Grenzschichten angegeben werden.

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad T_{12} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4.1)$$

Trifft die Druckzone oder ein reflektierter oder transmittierter Teil auf eine Grenzfläche in der betrachteten Modellordnung, wird dieses Ereignis mit einem Großbuchstaben² (A-Q) bezeichnet. Ein Ereignis beinhaltet damit zum einen die Information, zu welchem Zeitpunkt die Druckzone eine der Grenzflächen durchläuft und zum anderen die Information, um welche der Grenzflächen es sich handelt. Das Reflexionsverhalten wird im Folgenden hergeleitet und ist zusammenfassend in [Abbildung 4.1](#) dargestellt. Zunächst wird berechnet, welcher Anteil der Schallwelle $R_{M \rightarrow K}$ bei der Reflexion von der HV-Elektrode in das Koppelmaterial (A) reflektiert wird.

$$\begin{aligned} R_{M \rightarrow K} &= \frac{Z_K - Z_M}{Z_K + Z_M} = \frac{1 - 35,9}{1 + 35,9} = -0,95 \\ T_{M \rightarrow K} &= \frac{2 \cdot Z_K}{Z_K + Z_M} = \frac{2 \cdot 1,5}{40 + 1,5} = 0,05 \end{aligned} \quad (4.2)$$

² Zur besseren Hervorhebung der Ereignisse A-Q werden diese im weiteren Verlauf der Arbeit durch Klammern umschlossen (A-Q). Zur besseren Veranschaulichung der Problematik werden diese Großbuchstaben weiterhin zur Bezeichnung von Grenzflächen verwendet, ohne den Zeitpunkt explizit zu benennen, wobei dieser offensichtlich in Bezug auf [Abbildung 4.1](#) in der Information des Buchstabens enthalten ist.

Der Reflexionsfaktor $R_{M \rightarrow K}$ beträgt 95 %, womit ein Großteil der Schallwelle reflektiert wird und in Richtung der Oberseite der HV-Elektrode zurückläuft. Lediglich 5 % des Signals werden transmittiert und benötigen³ $0,15 \mu\text{s}$ (siehe [Tabelle 4.2](#)), um die Grenzfläche zwischen Koppelmedium und Plattenprüfkörper zu erreichen (B). An dieser Grenzfläche wird das Signal vollständig transmittiert⁴. Der transmittierte Teil der Druckzone erreicht nach einer Laufzeit von $0,5 \mu\text{s}$ ([Tabelle 4.2](#)) die Erdelektrode der Anordnung (C). Zwischen dem Plattenprüfkörper sowie der Erdelektrode wird kein Koppelmedium verwendet, weshalb die Druckzone hier das Medium Luft als Grenzfläche sieht. An dieser wird folgendermaßen reflektiert:

$$\begin{aligned} R_{E \rightarrow L} &= \frac{Z_L - Z_E}{Z_L + Z_E} = \frac{0,0004 - 1}{0,0004 + 1} = -0,999 \\ T_{E \rightarrow L} &= \frac{2 \cdot Z_L}{Z_L + Z_E} = \frac{2 \cdot 0,0004}{1 + 0,0004} = 0,0001 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Der Reflexionsfaktor $R_{E \rightarrow L}$ beträgt 0,999, womit die Schallwelle folglich fast vollständig reflektiert wird. Aus diesem Grund wird der hier transmittierte Teil in der weiteren Betrachtung des Reflexionsverhaltens vernachlässigt.

Die reflektierte Welle benötigt anschließend erneut $0,5 \mu\text{s}$, um die Grenzfläche zwischen dem Silikonelastomer und dem Koppelmaterial (D) zu erreichen, wo sie erneut vollständig transmittiert wird. Nach einer Laufzeit von $0,15 \mu\text{s}$ durch das Koppelmaterial wird die Grenzfläche zwischen dem Koppelmedium und der HV-Elektrode (E) erreicht und es findet eine Transmission und Reflexion entsprechend folgender Faktoren statt:

$$\begin{aligned} R_{K \rightarrow M} &= \frac{Z_M - Z_K}{Z_M + Z_K} = \frac{35,9 - 1}{35,9 + 1} = 0,95 \\ T_{K \rightarrow M} &= \frac{2 \cdot Z_K}{Z_M + Z_K} = \frac{2 \cdot 1}{35,9 + 1} = 0,05 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Insgesamt werden an der Grenzfläche (E) 95 % reflektiert und 5 % transmittiert. Der transmittierte Teil wird vernachlässigt, da die Signalamplitude durch das zweifache Durchlaufen des Plattenprüfkörpers zu diesem Zeitpunkt signifikant gedämpft wurde und dieser Teil bei erneuter Einkopplung in die Prüfkörperanordnung keinen messbaren Signalpegel hervorrufen würde. Der reflektierte Teil läuft anschließend in Richtung der Grenzfläche zwischen Koppel-

³ In diesem Kapitel wird zunächst noch eine Silikonfettschicht in Höhe von $0,15 \text{ mm}$ verwendet. In späteren Messungen wird eine Schicht von $0,3 \text{ mm}$ verwendet.

⁴ Da die akustische Impedanz des Koppelmaterials und Silikonelastomers in [Tabelle 4.2](#) mit dem gleichen Wert angenommen wurde, ergibt sich ein Transmissionsfaktor von $T = 1$.

material und Silikonelastomer (F). Das weitere Reflexionsverhalten (I,K,L,M,N) basiert auf den bereits zuvor beschriebenen Ereignissen und soll nicht weiter betrachtet werden.

In der Zwischenzeit erreicht der zuvor in der HV-Elektrode bei (A) reflektierte Teil der Druckzone nach $1,8\ \mu\text{s}$ die Grenzfläche mit dem Koppelmaterial (G) erneut und es werden entsprechend dem Faktor $T_{M \rightarrow K}$ wiederum 5% transmittiert. Das sich anschließende Reflexionsverhalten (H,J,O,P,Q) basiert wieder auf den zuvor beschriebenen Ereignissen und wird ebenfalls nicht noch einmal erläutert.

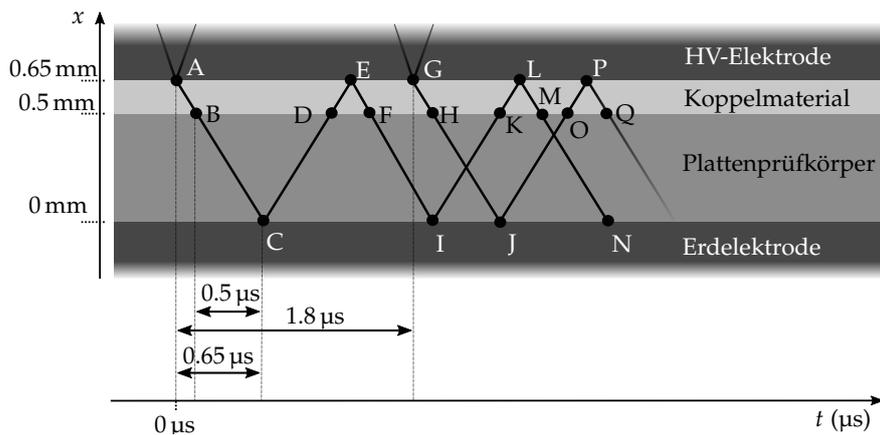


Abbildung 4.1: Berechnetes Reflexionsverhalten der Druckzone in der Modellordnung mit Kennzeichnung der von der Druckzone durchlaufenden Grenzflächen (A-Q), annähernd maßstabsgetreu

In **Abbildung 4.1** wird das Reflexionsverhalten der beschriebenen Ereignisse (A,B,C,D,E) und (G) grafisch dargestellt. Die weiterhin aufgeführten Ereignisse (F,H-Q) wurden nicht beschrieben, da sie eine Wiederholung der vorherigen darstellen. Dabei entsprechen die Ereignisketten (F,I,K,L,M,N) und (H,J,O,P,Q) den zuvor beschriebenen Ereignissen (B,C,D,E,F).

4.1.2 Gemessenes Reflexionsverhalten

Im Folgenden soll versucht werden, die Ereignisse (A-Q) des berechneten Reflexionsverhaltens dem gemessenen LIPP-Profil zuzuordnen. Dazu werden LIPP-Profile bei 3 kV nach einer Polarisationsdauer von 1 min jeweils mit einer Schicht von 0,15 mm Silikonöl bzw. Silikonfett als Koppelmaterial und einem Plattenprüfkörper aus Silikonelastomer mit einer Höhe von 0,5 mm aufgenommen und in **Abbildung 4.2** gezeigt. Für die Messungen wurde manuell aufgetragene schwarze Markertinte als Beschichtungsmaterial eingesetzt.

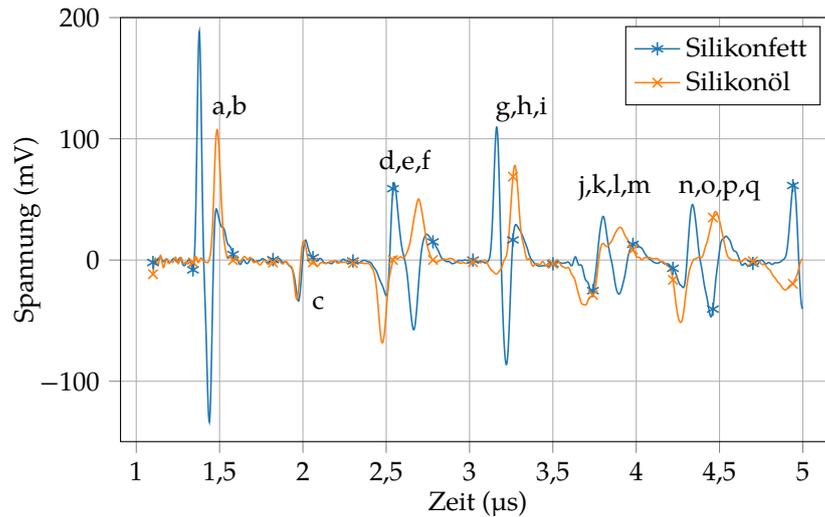


Abbildung 4.2: Gemessene LIPP-Profile mit Silikonfett und Silikonöl als Koppelmaterial nach Polarisation mit 3 kV für 1 min; die Kleinbuchstaben (a-q) markieren die vermutete Zuordnung zu den Ereignissen (A-Q) aus [Abbildung 4.1](#)

Aufgrund der kurzen Polarisationsdauer von 1 min wird angenommen, dass zunächst noch wenig Raumladungen im Volumenmaterial vorhanden sind, sodass sich die Peaks der gezeigten LIPP-Profile zum Großteil auf Ladungsansammlungen an den Grenzflächen der Modellanordnung beziehen. Diese Peaks sollen zunächst als Vermutung mit den Kleinbuchstaben (a-q) in die Abbildung eingetragen werden und anschließend den Ereignissen (A-Q) zugeordnet werden. Der nachfolgende Text stellt in diesem Zusammenhang die Beziehung zwischen [Abbildung 4.1](#) und [Abbildung 4.2](#) her.

Die Zeitspanne der gemessenen LIPP-Profile von $1,4 \mu\text{s}$ bis $2 \mu\text{s}$, welche mit den Peaks (a,b) beginnt und mit dem Peak (c) abschließt, ist gleich der berechneten Laufzeit der Druckzone von der HV-Elektrode (A,B) bis zur Grenzfläche des Plattenprüfkörpers mit der Erdelektrode (C) und entspricht dem Nutzsignal. Im Fall von Silikonöl als Koppelmaterial entspricht das gemessene Nutzsignal dem in der Literatur üblichen Signal, wie auch in [\[DLL16\]](#) oder [\[NFJ16\]](#) beschrieben wird. Weiterhin entsprechen die gemessenen Peaks (d,e,f) den berechneten Ereignissen (D,E,F), welche $0,5 \mu\text{s}$ nach der Reflexion an der unteren Erdelektrode auftreten. Die nachfolgenden Peaks (g,h,i) treten nach einer Laufzeit von $1,8 \mu\text{s}$ auf und entsprechen somit dem von der HV-Elektrode erneut einkoppelnden Druckimpuls (G), welcher nach Berechnung der Laufzeiten ebenfalls $1,8 \mu\text{s}$ benötigt. Der untere Teil des Nutzsignals (c) besteht aus einer negativen und einer positiven Komponente. Die negative Komponente stellt hier die Ladungsansammlung an der Erdelektrode dar. Aufgrund des

Reflexionsfaktors von $R_{E \rightarrow L}$ wird die Druckzone fast vollständig an dieser Erdelektrode reflektiert und läuft nach der Reflexion zurück in Richtung der HV-Elektrode. Hierbei werden die Ladungen an der Erdelektrode erneut ausgelenkt und es kommt zu einem positiven Peak.

Die gemessenen Peaks (j,k,l,m) entsprechen in ihrer Form den $1,3 \mu\text{s}$ vorher auftretenden Peaks (d,e,f). Auch im berechneten Reflexionsverhalten wiederholen sich die Ereignisse (D,E,F) nach $1,3 \mu\text{s}$ durch die Ereignisse (J,K,L,M). Weiterhin kann festgestellt werden, dass die Peaks (n,o,p,q) $1,2 \mu\text{s}$ nach den Peaks (g,h,i) auftreten und somit den berechneten Ereignissen (O,P,Q) entsprechen, welche $1,2 \mu\text{s}$ nach dem Ereignis (G) zu finden sind.

Auch wenn sich die beschriebenen Peakgruppen (a-q) den Ereignissen (A-Q) zuordnen lassen, sind doch Fragen aufgetaucht, welche nicht durch das berechnete Reflexionsverhalten erklärt werden können:

1. **Fragestellung 1:** Obwohl sich der Peak (c) des Nutzsignals an der unteren Elektrode bei Verwendung von Silikonöl und Silikonfett als Koppelmaterial gleicht, gibt es dennoch einen signifikanten Unterschied in der Peakgruppe (a,b). Hier wurde zunächst die Vermutung aufgestellt, dass es sich bei Silikonfett bei dem positiven Peak um das Ereignis (A) und bei dem negativen Peak um das Ereignis (B) handelt. Genauso könnte folglich vermutet werden, dass im Fall von Silikonöl der positive Peak entweder aufgrund der Grenzfläche (A) oder (B) zustande kommt.
2. **Fragestellung 2:** Die mit (d,e,f) markierten Peaks entstehen aufgrund einer Rückreflexion der Druckzone und entsprechen den Ereignissen (D,E,F). Da die Schallwelle im Fall der Ereignisse (D,E,F) zunächst in die entgegengesetzte Richtung läuft, muss auch die Polarität der gemessenen Peaks entgegengesetzt sein. Wird angenommen, dass der erste Peak im Fall von Silikonfett dem Ereignis (A) und der zweite negative Peak dem Ereignis (B) entspricht (dieser Sachverhalt aus Fragestellung 1 muss noch bewiesen werden), so müsste sich für die Zuordnung der Peaks (d,e,f) zu den Ereignissen (D,E,F) Folgendes ergeben: Die nach Ereignis (C) zurücklaufende Druckzone müsste bei Ereignis (D) einen positiven Peak, bei Ereignis (E) einen starken negativen Peak und bei Ereignis (F) einen erneut negativen Peak erzeugen. Bei Betrachtung der Peaks (d,e,f) stellt sich aber die Frage, warum zwar ein positiver Peak und ein negativer Peak, nicht aber ein zweiter negativer Peak vorhanden ist. (Der kleinere positive Peak bei (a,b) soll hier vernachlässigt werden.)

4.2 EXPERIMENTE ZUR INTERPRETATION DER SIGNALFORM

Um die offenen Fragen des vorherigen Abschnitts zu beantworten, wurden verschiedene Experimente durchgeführt, welche im Folgenden erläutert werden. Teilergebnisse dieses Abschnitts wurden bereits in [SIP18b] veröffentlicht.

4.2.1 Variation der Schichtdicke des Koppelmaterials

Zunächst sollen entsprechend der im vorherigen Abschnitt in Fragestellung 1 beschriebenen Thematik den Ereignissen (A) und (B) die Peaks (a,b) zugeordnet werden. Dazu wird in **Abbildung 4.3** das Nutzsignal als Ausschnitt von **Abbildung 4.2** gezeigt. Obwohl die mit (c) markierten Peaks bei der Verwendung von Silikonfett und Silikonöl als Koppelmaterial nicht signifikant voneinander abweichen, unterscheiden sich die mit (a,b) gekennzeichneten Peaks signifikant.

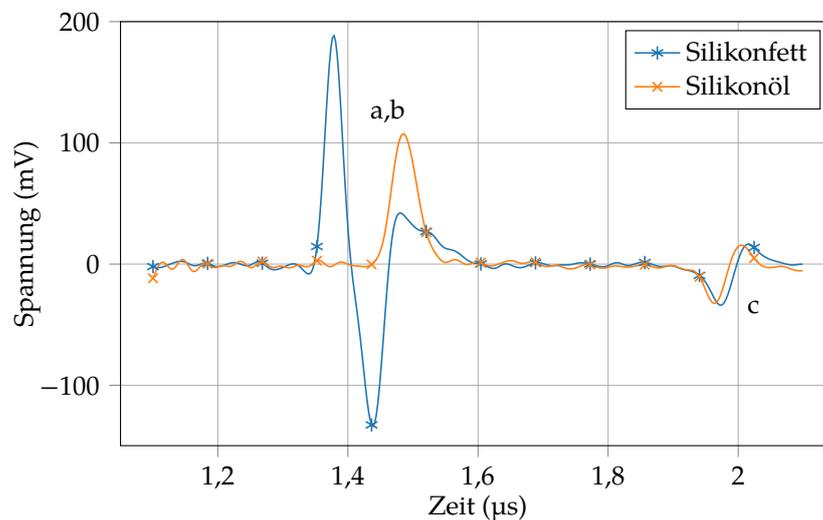


Abbildung 4.3: Nahansicht auf den in **Abbildung 4.2** dargestellten Bereich des Nutzsignals der Messung mit Silikonfett und Silikonöl als Koppelmaterial bei 3 kV Polarisationsspannung, nach [SIP18b]

Bei Betrachtung der Peaks (a,b) stellt sich die Frage, welchen Ereignissen (A,B) diese zugeordnet werden können. Der positive Peak (a) könnte bei Verwendung von Silikonöl zum einen aufgrund einer Ladungsansammlung an der Grenzfläche von der HV-Elektrode zum Silikonöl (A) oder zum anderen aufgrund einer Ladungsansammlung an der Grenzfläche vom Silikonöl zum Silikonelastomer (B) entstehen. Bei Benutzung von Silikonfett könnte der positive Peak bei (a,b) auf die Grenzfläche (A) und der negative Peak bei (a,b) auf die Grenzfläche (B) zurückzuführen sein. Alternativ kann der positive Peak bei (a,b) die Grenzfläche (A) und der negative Peak bei (a,b)

Heterocharges in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode darstellen.

Um diesen Sachverhalt zu überprüfen, wurde ein Experiment durchgeführt, in welchem die Schichtdicken des Koppelmaterials schrittweise reduziert wurden. Die Prüfanordnung besteht aus einem Plattenprüfkörper aus Silikonelastomer mit einer Höhe von 0,5 mm. Auf den Plattenprüfkörper wurde anschließend in zwei Versuchen einmal eine Schicht aus Silikonöl und einmal eine aus Silikonfett mit einer ungefähren Schichtdicke von jeweils 500 μm aufgebracht. Als nächstes wurde die Schichtdicke in vier Schritten (M₁-M₄) um den gleichen Höhenunterschied mit einer Mikrometerschraube reduziert.

Abbildung 4.4 zeigt die Messungen mit unterschiedlichen Schichtdicken bei Verwendung von Silikonöl. Bei sinkenden Schichtdicken (M₁>M₂>M₃>M₄) ist zu erkennen, dass sich sowohl der erste positive Peak (a,b) als auch der folgende negative Peak (c) der jeweiligen LIPP-Profile in gleichen Abständen nach links bewegen.

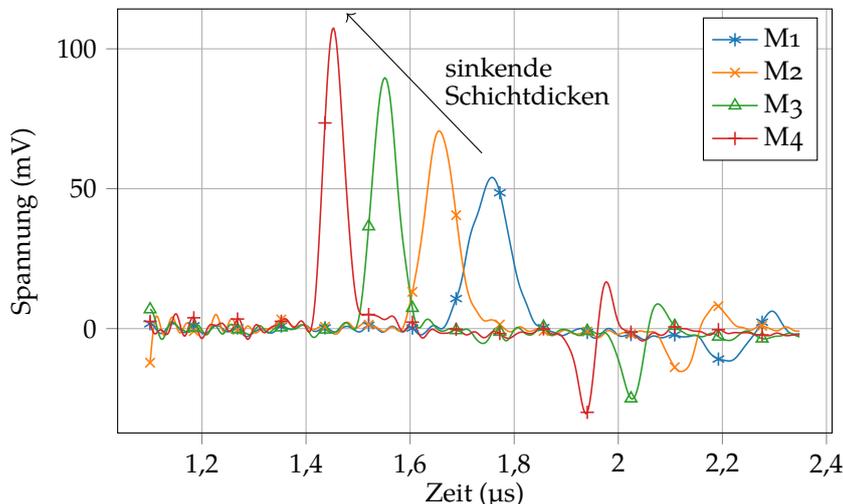


Abbildung 4.4: LIPP-Signal bei verschiedenen Schichtdicken des Koppelmediums Silikonöl (M₁-M₄) nach jeweiliger Beaufschlagung mit 3 kV für 1 min, nach [SIP18b]

In **Abbildung 4.5** wurde der Versuch mit Silikonfett als Koppelmaterial wiederholt. Hier tritt der erste positive Peak in allen Messungen (M₁-M₄) zur gleichen Zeit auf, obwohl sich der folgende negative Peak (ca. $t=1,4 \mu\text{s}$ bis $1,6 \mu\text{s}$) und der Peak an der Erdelektrode (c) (ca. $t=1,9 \mu\text{s}$ bis $2,2 \mu\text{s}$) ebenfalls in gleichen Anteilen wie in der Messung mit Silikonöl in **Abbildung 4.4** verschiebt.

Da das Oszilloskop über die Blitzlampen im Laser getriggert wird, erreicht die Druckzone die Grenzfläche zwischen HV-Elektrode und dem Koppelmaterial (A) bei jeder Messung zur gleichen Zeit. In diesem Zusammenhang lässt sich feststellen, dass der erste positive

Peak in [Abbildung 4.5](#) ebenfalls in allen Messungen (M1-M4) zur gleichen Zeit auftritt, der negative Peak demgegenüber aber mit wachsender Schichtdicke aus Silikonfett weiter nach rechts versetzt zu finden ist. Dies spricht dafür, dass der positive Peak im Fall von Silikonfett (a) der Grenzfläche zwischen HV-Elektrode und Koppelmaterial (A) zuzuordnen ist. Weiter lässt sich festhalten, dass der negative Peak (b) folglich der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer (B) entspricht und keine Heterocharges darstellt.

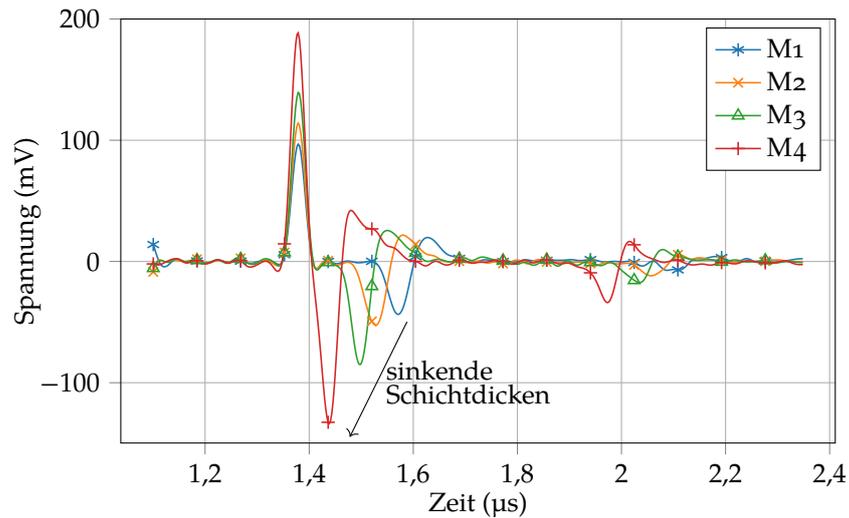


Abbildung 4.5: LIPP-Signal mit Variation der Schichtdicke des Koppelmediums Silikonfett (M1-M4) nach Beaufschlagung mit 3 kV für 1 min, nach [SIP18b]

Im Falle des Silikonöls (siehe Versuch zur Schichtdickenmessung in [Abbildung 4.4](#)) gehört der erste Peak zur Grenzfläche des Silikonöls mit dem Silikonelastomer (B), da dieser mit sinkenden Schichtdicken ($M_1 > M_2 > M_3 > M_4$) weiter nach links versetzt auftritt.

Die Erklärung für dieses unterschiedliche Verhalten ergibt sich aus einem Unterschied in den Leitfähigkeiten der beiden Koppelmaterialien. Messungen haben ergeben, dass das Silikonöl eine ca. 100-mal höhere Leitfähigkeit als das Silikonfett aufweist. Daher herrscht bei der Verwendung von Silikonöl eine deutlich geringere Feldstärke (vergleiche [Gleichung \(2.15\)](#)) in der Silikonölschicht, als es beim Silikonfett der Fall ist. Dies führt nach [Gleichung \(2.16\)](#) zu einer geringeren Ladung an der HV-Elektrode. Diese Ladung kann, wie in [Abbildung 4.4](#) gezeigt wird, offensichtlich nicht vom aufgebauten Messsystem aufgelöst werden.

4.2.2 Vergleich der Polarisationsphase und der Kurzschlussphase

In diesem Abschnitt sollen entsprechend der in Fragestellung 2 beschriebenen Thematik den Ereignissen (D,E,F) die Peaks (d,e,f) zugeordnet werden. Dazu wurde eine HV-Elektrode mit einer Höhe von 2 cm, eine Silikonfettschicht mit einer Höhe von 0,15 mm und ein Plattenprüfling aus Silikonelastomer mit einer Höhe von 0,5 mm gewählt. Durch die Verwendung einer höheren HV-Elektrode verlängert sich die Laufzeit der Druckwelle innerhalb des Messings und es kommt zu keiner Rückreflexion in die Prüfanordnung (Ereignis (G) in [Abbildung 4.1](#)) innerhalb des Betrachtungszeitraums. Dadurch fällt die Ereigniskette (G,H,I,O,P,Q) weg, was zu einer Vereinfachung des Reflexionsmusters führt.

Der Versuch⁵ wurde mit 3 kV und einer Polarisationszeit von 1 min durchgeführt. Anschließend wurde der Prüfkörper kurzgeschlossen und innerhalb von 1 min erneut eine Messung aufgenommen. [Abbildung 4.6](#) zeigt die resultierende Signalform in der Polarisationsphase und während der Kurzschlussphase.

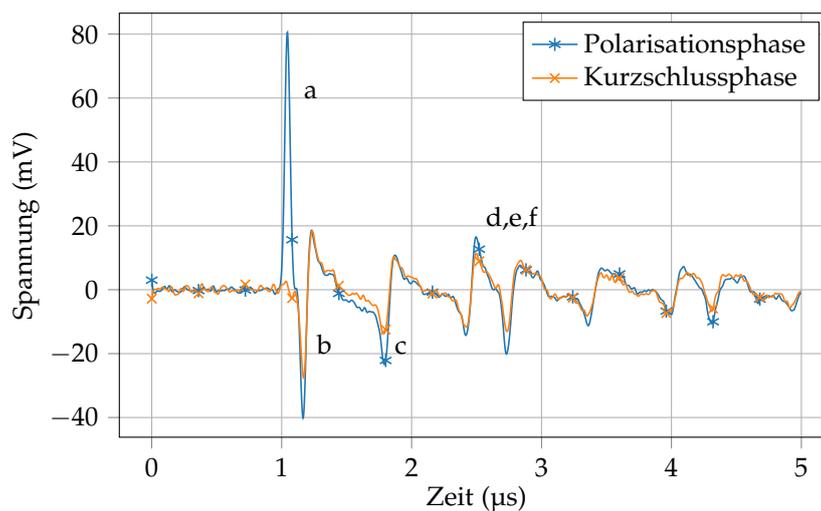


Abbildung 4.6: LIPP-Signal bei Verwendung einer HV-Elektrode mit einer Höhe von 2 cm nach Polarisation mit 3 kV für 1 min sowie 1 min nach Kurzschluss der Anordnung

Bei dem Vergleich der Polarisationsphase und der Kurzschlussphase wird deutlich, dass abgesehen vom Peak (a) das LIPP-Signal für beide Phasen identisch ist. Daraus lässt sich schließen, dass die Ladungsverteilung innerhalb des Silikonfetts und des Silikonelastomers direkt nach dem Kurzschluss der Anordnung weiterhin vorhanden ist und nur die Ladung direkt auf der Elektrodenoberfläche (A) instantan

⁵ Aufgrund der um den Faktor 5 höheren Elektrode und damit höheren Dispersion des Signals ergibt sich ein Signalverlauf, der von den im vorangegangenen Teil der Arbeit gezeigten LIPP-Profilen abweicht.

verschwindet. Das Ereignis (E) (siehe [Abbildung 4.1](#)) basiert ebenfalls auf dieser nach dem Kurzschluss nicht mehr vorhandenen Ladung auf der Oberfläche der HV-Elektrode. Da der restliche Signalverlauf in [Abbildung 4.6](#) in der Polarisationsphase und Kurzschlussphase identisch ist, kann daraus geschlossen werden, dass das Ereignis (E) und damit auch die Ereignisse (L,P) nicht durch das Messsystem aufgenommen werden können.

Es kann daher festgehalten werden, dass die Grenzfläche zwischen der Messingelektrode und dem Koppelmaterial (A,E,G,L,P) während der Polarisationsphase und Kurzschlussphase nur dann in den Messdaten zu sehen ist, wenn die Druckzone von der HV-Elektrode in Richtung des Koppelmaterials (A,G) läuft, nicht aber wenn eine Reflexion der Druckzone vom Koppelmedium in Richtung der HV-Elektrode stattfindet (E,L,P). Dadurch ist in der Peakgruppe (d,e,f) auch der Peak (e) nicht sichtbar und die beiden Peaks (d,f) entsprechen für Silikonöl und Silikonfett jeweils den Ereignissen (D) und (F).

4.2.3 Signalform bei Polaritätswechsel

Ein für die Erklärung der Signalform nicht notwendiges, aber interessantes Experiment ist die Umkehr der Polarität. Dazu wird in [Abbildung 4.7](#) eine Schichtanordnung aus 0,3 mm Silikonfett und ein Plattenprüfkörper aus 0,5 mm Silikonelastomer für 1 min mit 3 kV beaufschlagt. Anschließend wird die Anordnung geerdet und nach 25 min eine Messung mit umgekehrter Polarität und gleicher Spannung aufgenommen. Bei Umkehr der Polarität und sonst gleichbleibenden Versuchsparametern ergibt sich eine Spiegelung des LIPP-Profiles an der x-Achse.

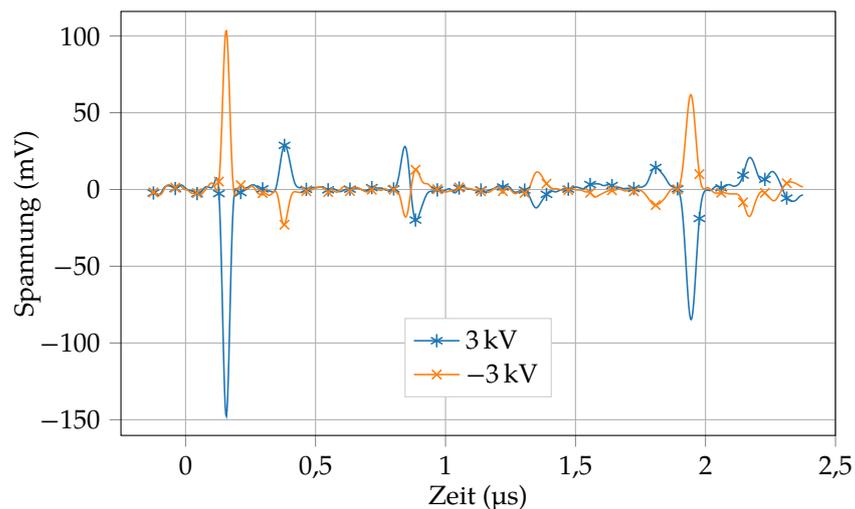


Abbildung 4.7: LIPP-Signal bei Polarisation mit 3 kV für 1 min sowie Polarisation mit -3 kV für 1 min

4.3 ZUORDNUNG DES MESSSIGNALS ZUM BERECHNETEN REFLEXIONSVERHALTEN

In diesem Unterkapitel soll auf Grundlage der in [Abschnitt 4.2](#) durchgeführten Experimente den in [Abbildung 4.2](#) mit (a-q) angenommenen Peaks eines der berechneten Ereignisse (A-Q) zugeordnet werden.

Im vorherigen Abschnitt wurde ermittelt, dass das Ereignis (A) der Grenzfläche zwischen der HV-Elektrode und dem Koppelmedium entspricht. Aus diesem Grund soll die x-Achse aller im restlichen Teil dieser Arbeit gezeigten LIPP-Profile so verschoben werden, dass dieses Ereignis dem Wert bei $t=0$ entspricht.

4.3.1 Silikonfett als Koppelmaterial

In [Abbildung 4.8](#) ist das LIPP-Profil aus [Abbildung 4.2](#) erneut mit verschobener x-Achse dargestellt. Nachfolgend sollen den einzelnen Peaks dieses LIPP-Profils die berechneten und in [Abbildung 4.1](#) dargestellten Ereignisse (A-Q) zugeordnet werden.

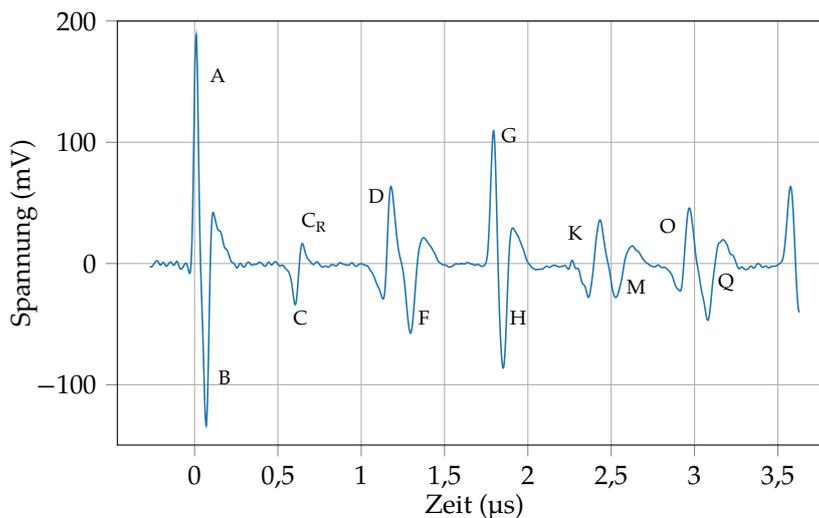


Abbildung 4.8: Reflexionsmuster der LIPP-Messung mit Silikonöl als Koppelmaterial mit Zuordnung der Peaks zu den Ereignissen (A-Q)

Die Peaks (A,G) entstehen, wenn die Druckzone die Grenzfläche von der HV-Elektrode in Richtung des Silikonfettes passiert. Der Peak (B) stellt die Grenzflächenladung zwischen dem Silikonfett und dem Silikonelastomer dar. Der Peak (C) kommt zustande, wenn die Druckzone erstmalig die Erdelektrode erreicht. Der Peak (C_R) geht aus der Reflexion der Druckzone an der Erdelektrode hervor.

Der Peak (D) entsteht, wenn die zurücklaufende Druckzone die Grenzfläche zwischen dem Silikonelastomer und dem Silikonfett passiert (Peak in umgekehrter Polarität aufgrund der Laufrichtung der Druckzone). Der Peak (F) ist auf die erneut reflektierte Druckwelle zurückzuführen und entspricht in seiner Form dem Peak (B). Wie bereits gezeigt wurde, ist das Ereignis (E) nicht im LIPP-Profil sichtbar.

Die Peaks (K,M) sowie (O,Q) ergeben sich aufgrund des gleichen Sachverhalts wie die zuvor beschriebenen Peaks (D,F). Die Peaks (G,H) sind analog auf die Erklärung zu den Peaks (A,B) zurückzuführen.

4.3.2 Silikonöl als Koppelmaterial

In **Abbildung 4.9** ist die Messung mit Silikonöl als Koppelmaterial dargestellt. Es soll eine zu **Abschnitt 4.3.1** analoge Erklärung erfolgen.

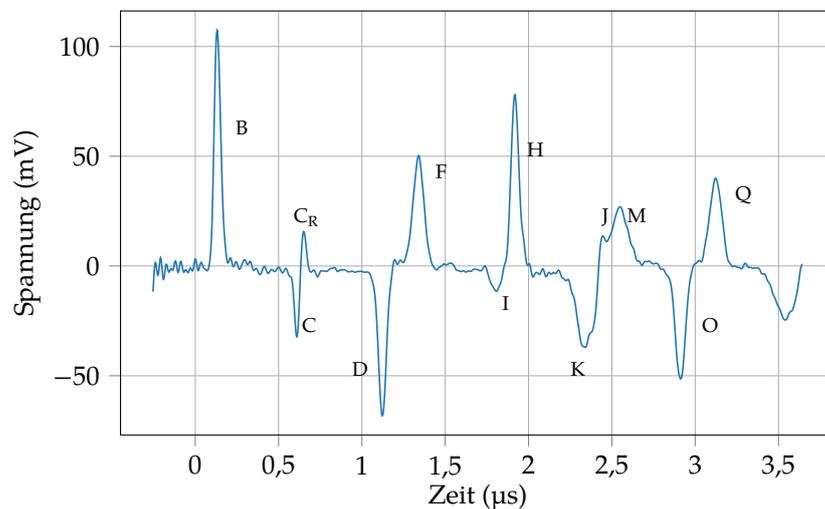


Abbildung 4.9: Reflexionsmuster der LIPP-Messung mit Silikonöl als Koppelmaterial mit Zuordnung der Peaks zu den berechneten Ereignissen (A-Q)

In den Messungen mit unterschiedlichen Schichtdicken wurde nachgewiesen, dass bei Verwendung von Silikonöl der erste Peak durch die Grenzflächenladung von Silikonöl mit dem Silikonelastomer (B) entsteht und die Ladung an der Grenzfläche der HV-Elektrode mit dem Koppelmaterial (A) nicht sichtbar ist.

Nachdem die Druckwelle an der unteren Elektrode (C) reflektiert wird, erzeugt der reflektierte Teil der Druckwelle den Peak (D), welcher genau wie Peak (B) an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer entsteht, aber aufgrund der umgekehrten Laufrichtung der Druckzone auch eine umgekehrte Polarität aufweist.

Peak (F) ist auf die erneut reflektierte Druckzone zurückzuführen.

Da in der Messung mit Silikonöl der Peak (G) im Gegensatz zur Messung mit Silikonfett nicht vorhanden ist, lässt sich der Peak (I) mit kleiner Amplitude erkennen. Nachfolgend erscheint Peak (H), welcher durch den zuvor in der Messingelektrode reflektierten Teil der Druckwelle entsteht und somit dem Ereignis (B) gleicht.

Das erneute Durchlaufen der Druckzone vom Prüfkörper Richtung Silikonöl (siehe [Abbildung 4.1](#)) führt zu den Peaks (K,M) sowie (O,Q). Obwohl Peak (J) und (K,M) zur gleichen Zeit auftreten, ist der Peak (J) als Überlagerung sichtbar.

WIEDERHOLBARKEIT

Nach Beschreibung des Versuchsaufbaus in **Kapitel 3** sowie Validierung und Interpretation des Messsignals in **Kapitel 4** soll in diesem Kapitel untersucht werden, ob wiederholbare Messungen und Messserien durchgeführt werden können. Dazu wird im Folgenden das Beschichtungssystem für die Auftragung des Materials auf der HV-Elektrode verwendet. Die Parameter für die Pulsenergie sowie den Strahldurchmesser und das Beschichtungsmaterial werden entsprechend der in **Abschnitt 3.3.3** optimierten Versuchsparameter eingestellt und für alle im restlichen Verlauf dieser Arbeit gezeigten Messungen entsprechend beibehalten.

5.1 DEFINITIONEN

Neben der Interpretation des Signals stellt sich weiterhin die Frage, inwiefern und in welchen Grenzen die Messungen wiederholbar sind. Dazu soll zunächst definiert werden:

1. Ein Versuch ist **reproduzierbar**, wenn eine andere Forschungsgruppe mit unterschiedlichen Geräten, Methoden sowie zu einer anderen Zeit und an anderen Orten die gleichen Ergebnisse erzielt.
2. Ein Versuch ist **wiederholbar**, wenn ein Ergebnis von der selben Forschungsgruppe mit denselben Geräten, Methoden und innerhalb kurzer Zeit wiederholt werden kann.

Da im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Messungen innerhalb einer Forschungsgruppe durchgeführt werden, soll im Folgenden auf die Wiederholbarkeit eingegangen werden. Dazu werden mögliche Fehlerquellen benannt und Messungen zur Evaluierung durchgeführt.

An dieser Stelle sollen weiterhin kurz die Definitionen für die Begriffe **Messung**, **Datenpunkt**, **Messserie** und **Versuch** entsprechend **Abschnitt 3.1.3** wiederholt werden:

1. Das Wort **Messung** wird verwendet, um ein einzelnes LIPP-Profil zu beschreiben und ist das Messergebnis, welches sich aus dem einmaligen Auslösen des Lasers ergibt.
2. Eine Messung besteht aus mehreren tausend **Datenpunkten**.

3. Eine **Messserie** beschreibt mehrere Messungen, die innerhalb eines definierten Zeitraums ablaufen.
4. Ein **Versuch** umfasst alle Messungen bzw. Messserien und möglicherweise deren Wiederholung, die innerhalb eines definierten Versuchsprogramms vor Beginn des Versuchs festgelegt wurden.

Ziel dieses Kapitels ist die Ermittlung des Fehlers bei Wiederholung von einzelnen **Messungen** und **Messserien** sowie die Beschreibung des Einflusses der Präparation des Prüfkörpers auf die Wiederholbarkeit.

5.2 PRÜFKÖRPERANORDNUNG

In den Versuchen der vorherigen Kapitel wurden unterschiedliche Prüfkörperanordnungen verwendet, um das Signal und dessen Bedeutung erklären zu können. Weiterhin wurden zum einen Silikonöl und zum anderen Silikonfett als Koppelmedium eingesetzt sowie unterschiedliche Beschichtungsmaterialien verwendet. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu ermöglichen, werden alle im Folgenden gezeigten Versuche mit einer gleichbleibenden Prüfkörperanordnung durchgeführt. Weiterhin wird für alle Versuche Wasser als Beschichtungsmaterial verwendet.

Für jeden Versuch in diesem Kapitel wurde ein Prüfkörper mit den Außenmaßen von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ und einer Höhe von $0,5\text{ mm}$ verwendet. Die Prüfkörperanordnung entspricht dabei der in **Abschnitt 2.2.1** beschriebenen Modellanordnung.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den in den nachfolgenden Kapiteln gezeigten Datensätzen sicherstellen zu können, erfolgt die Präparation der Prüfkörperanordnung in allen Versuchen nach einem fest definierten Prozess, der in **Abbildung 5.1** dargestellt ist. Dieser bildlich dargestellte Prozess zur Präparation einer Prüfkörperanordnung, bestehend aus einem Plattenprüfling aus Silikonelastomer und einer Silikonfettschicht, gestaltet sich wie folgt: Zunächst ist in **Abbildung 5.1a** die Erdelektrode dargestellt. In einem nächsten Schritt wird der Silikonprüfkörper mit Einmalhandschuhen aus Latex auf die Erdelektrode aufgelegt, wie in **Abbildung 5.1b** zu sehen ist. Weiterhin werden sich etwaig zwischen Erdelektrode und Plattenprüfkörper gebildete Luftblasen mit der Hand weggestrichen. In **Abbildung 5.1c** wird gezeigt, wie die Abstandshalter auf den Plattenprüfkörper aufgelegt werden, um eine wiederholbare Schichtdicke des Silikonfettes zu erreichen. Die Abstandshalter befinden sich außerhalb des Durchmessers der Erdelektrode und haben somit keinen Einfluss auf die Raumladungsmessung, da die

als planar angenommene Druckwelle mit einem Durchmesser von schätzungsweise 1 cm in diesem Bereich nicht zur Wirkung kommt. Im Anschluss an das Auflegen der Abstandshalter zeigt die **Abbildung 5.1d** das Aufbringen des Silikonfetts auf die Oberfläche des Silikonprüfkörpers. Zum Schluss wird die HV-Elektrode langsam aufgesetzt. In diesem Prozess wird das Silikonfett zur Seite verdrängt bis die HV-Elektrode auf den vier Abstandshaltern aufliegt. Der Zustand nach Abschluss der Präparation ist in **Abbildung 5.1e** abgebildet.

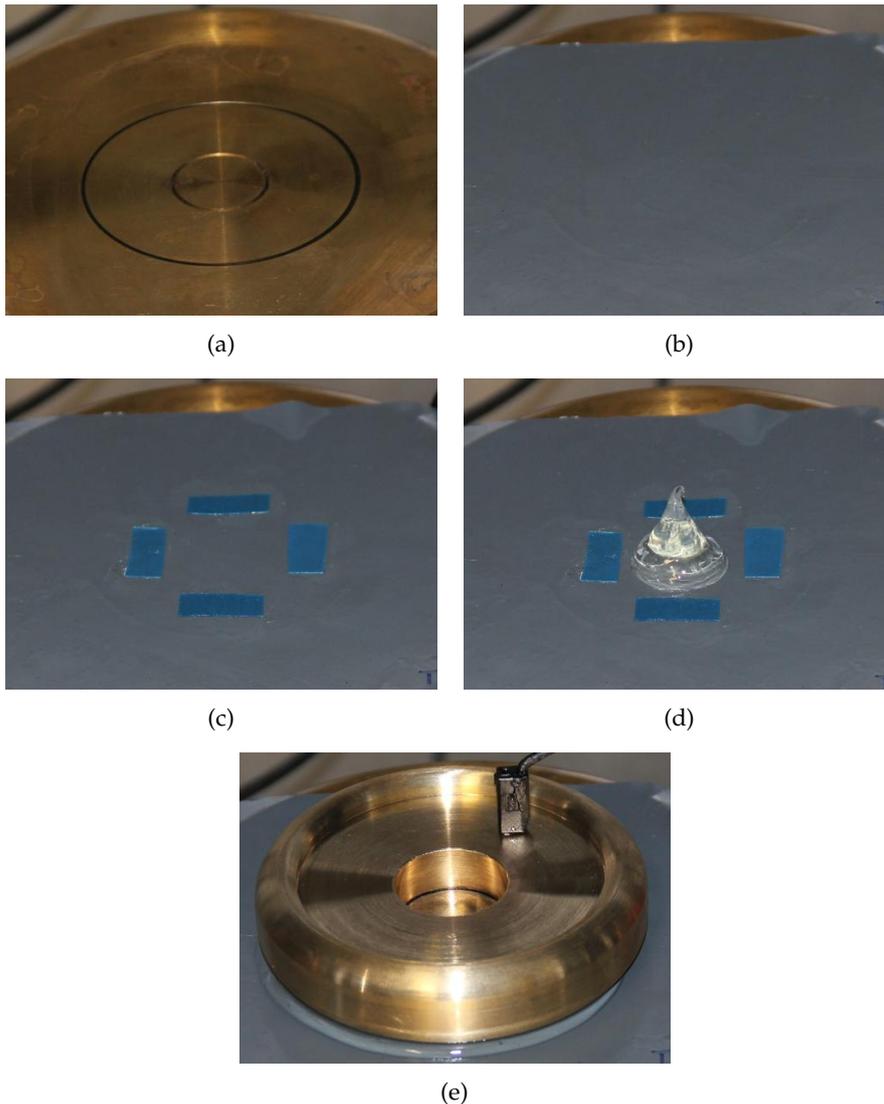


Abbildung 5.1: Prüfkörperpräparation mit der Erdelektrode (a), dem aufgelegten Silikonplattenprüfkörper (b), den aufgelegten Abstandshaltern (c), dem aufgetragenen Silikonfett (d) und der aufgesetzten HV-Elektrode (e)

5.3 FEHLERBETRACHTUNG EINER MESSUNG

Innerhalb einer einzigen Messung können verschiedene Fehler auftreten, wobei die elektromagnetischen Störungen das Signal am signifikantesten beeinflussen. Diese Störungen der Blitzlampen führen zu einer Einkopplung in den Messkreis. Nach ausführlicher Ausbesserung der elektromagnetischen Schirmung konnte eine Reduzierung des Störeinflusses durch die Anpassung der Materialstärke der HV-Elektrode erreicht werden. Die Materialstärke der oberen HV-Elektrode wurde dabei so gewählt, dass das Störsignal bereits abgeklungen ist, wenn das Nutzsinal beginnt.

Das Signal wird weiterhin durch die Kopplung mit der Stromversorgung und dem Erdpotential des Gebäudes gestört. Diese Störquellen wurden durch die Einführung einer niederinduktiven Kopplung der Schutzringelektrode und durch den Einsatz eines Kopplungstransformators minimiert. Nach dieser Minimierung der oben beschriebenen Fehlerquellen sind das Signal-Rausch-Verhältnis und die Datenqualität zufriedenstellend.

Durch die Kopplung mit der Energieversorgung des Laborraumes treten weiterhin vereinzelt unbekannte Störer auf, welche sich auf das Messsignal überlagern. Da diese Störer meist höherfrequent sind, werden sie durch den auf alle Daten angewendeten Tiefpassfilter (siehe [Abbildung 3.11](#)) weitgehend beseitigt.

5.4 FEHLERBETRACHTUNG INNERHALB EINER MESSSERIE BEI UNVERÄNDERTER PRÜFKÖRPERANORDNUNG

Innerhalb einer Messserie werden mehrere Messungen in fest definierten Zeitabständen durchgeführt, wobei jede Messung von einem Laserpuls getriggert wird. Der Fehler innerhalb einer Messserie soll im Folgenden genauer betrachtet werden. Hierbei wird der Aufbau der Prüfkörperanordnung zwischen den einzelnen Messungen nicht verändert, also wird kein neuer Prüfkörper aufgelegt und kein neues Silikonfett aufgetragen.

Im LIPP-Verfahren stellt die durch die Prüfkörperanordnung laufende Druckzone die Messsonde dar. Für vergleichbare und wiederholbare Messungen ist folglich ein gleichbleibendes Druckprofil von besonderer Wichtigkeit. Die Stärke der Druckwelle wiederum hängt von mehreren Parametern ab: der Pulsenergie des Lasers, der Entstehung des Plasmas auf der Oberfläche der HV-Elektrode und der Auftragung des Beschichtungsmaterials auf die Elektrodenoberfläche. Mögliche Fehler im Zusammenhang mit diesen Parametern werden in folgender Aufzählung beschrieben:

1. Die Bildung des Plasmas auf der Oberfläche der HV-Elektrode ist mit einem schwer zu quantifizierenden Fehler behaftet, welcher sich direkt auf das entstehende Druckprofil überträgt.
2. Das Auftragen des Beschichtungsmaterials kann zu einem zusätzlichen Fehler führen. Veränderungen im Spritzbild sowie in der Menge des aufgetragenen Materials beeinflussen das Druckprofil.
3. Eine sich zeitlich verändernde Oberflächenbeschaffenheit der HV-Elektrode kann zu einem Fehler innerhalb einer Messserie führen.
4. Eine stückweise verlaufende Verunreinigung im Verlauf einer Messserie kann die Energie des reflektierten Laserpulses minimieren.

Da der Signalpegel linear mit der Druckwelle ansteigt, wie in [Gleichung \(2.11\)](#) beschrieben, soll der gemessene Signalverlauf in mV als Vergleichsparameter für die Stärke der Druckwelle herangezogen und die Abweichung von einem Schuss auf den nächsten mit einem kurzen Versuch ermittelt werden.

Dazu wird die Prüfkörperanordnung für 25 s mit 3 kV beaufschlagt. Es wird davon ausgegangen, dass nach dieser kurzen Polarisationsdauer zunächst noch wenig bis keine Raumladungen in der Prüfanordnung vorhanden sind, weshalb etwaig festgestellte Abweichungen auf die in der Aufzählung beschriebenen Fehlereinflüsse zurückgeführt werden sollen. Die Prüfkörperanordnung wurde entsprechend des in [Abschnitt 5.2](#) beschriebenen Prozesses vorbereitet.

Während der Polarisationsphase wird jeweils eine Messung nach 5 s durchgeführt. Anschließend wird die Anordnung für 15 min kurzgeschlossen, wobei nach 14 min eine weitere Messung durchgeführt wird, um zu überprüfen, ob noch Restladungen im System vorhanden sind. Der beschriebene Messvorgang wird automatisch fünfzigmal wiederholt, wodurch sich eine Gesamtmessdauer von ca. 13 h ergibt.

Zunächst zeigt [Abbildung 5.2](#) das LIPP-Profil der fünfzig Wiederholungen nach einer jeweiligen Polarisationszeit von 5 s. Dabei fällt auf, dass lediglich das LIPP-Profil einer einzelnen Messung stark abweicht. Diese Abweichung ist nicht auf einen physikalischen Effekt innerhalb der Prüfkörperanordnung, sondern auf das Nichtauslösen des Beschichtungssystems und somit auf das Nichtvorhandensein des Beschichtungsmaterials zurückzuführen.

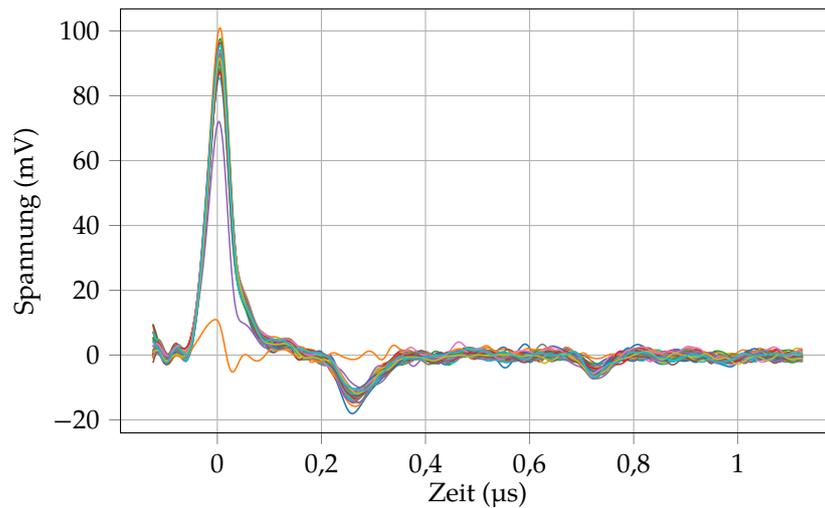


Abbildung 5.2: LIPP-Profil der fünfzig Wiederholungen nach jeweiliger Beaufschlagung mit 3 kV für 5 s

In **Abbildung 5.3** werden zunächst die LIPP-Profile der fünfzig Wiederholungen 14 min nach Beginn der Kurzschlussphase und 1 min vor Beginn der nächsten Polarisationsphase gezeigt.

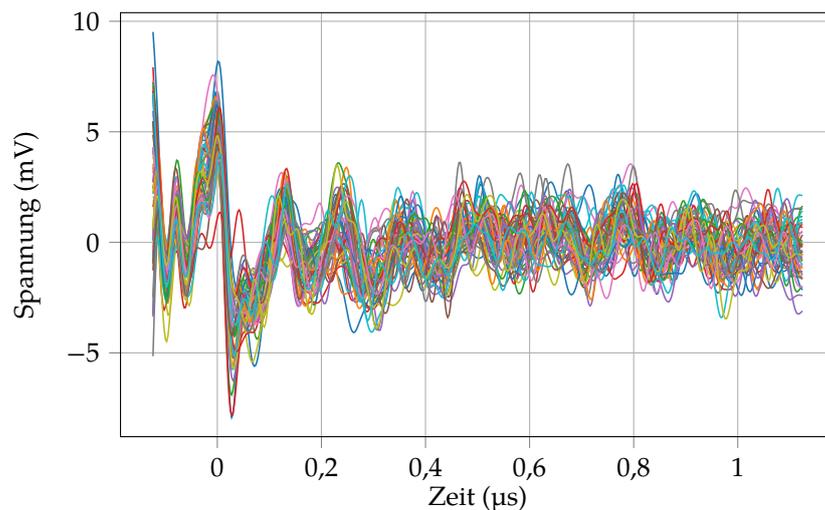


Abbildung 5.3: LIPP-Profile der fünfzig Wiederholungen jeweils 14 min nach Kurzschluss des Prüfkörpers

Es kann festgestellt werden, dass hier keine weiteren Ladungen in der Prüfkörperanordnung vorhanden sind, und somit vor Beginn der nächsten Wiederholung die Prüfkörperanordnung als vollständig entladen betrachtet werden kann. Es können deshalb gleiche Anfangsbedingungen angenommen werden.

Zur genaueren Analyse der Wiederholbarkeit der einzelnen Messungen innerhalb einer Messserie soll der Maximalwert des ersten Peaks

ausgewertet werden. Dazu zeigt [Abbildung 5.4](#) einen Ausschnitt der bereits in [Abbildung 5.2](#) gezeigten Messserie.

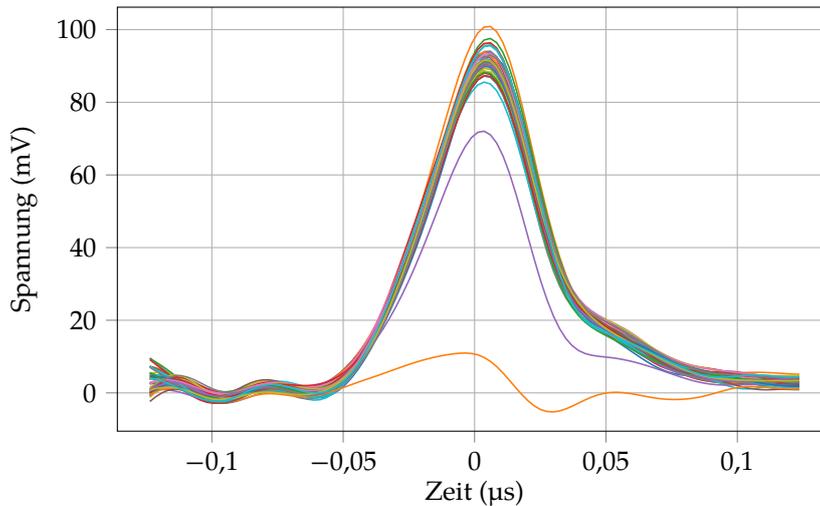


Abbildung 5.4: Nahansicht der in [Abbildung 5.2](#) präsentierten fünfzig Wiederholungen mit Darstellung des Peaks an der Grenzfläche zwischen HV-Elektrode und Silikonfett (A)

Um den Fehler aufgrund der abweichenden Pulsenergie zu bestimmen, soll zunächst das Maximum des ersten Peaks (siehe [Abbildung 5.4](#)) betrachtet werden. Dazu zeigt [Abbildung 5.5](#) den Maximalwert des ersten Peaks der jeweiligen Messung. Es wurde parallel außerdem versucht, anstatt des Maximums des ersten Peaks die Fläche des Peaks als Vergleichsparameter heranzuziehen. Die Fläche korrelierte allerdings für alle Kurven mit dem Peak. Aus diesem Grund wird im späteren Verlauf der Arbeit der Maximalwert des Peaks genutzt, um das Ladungsaufbau- und Ladungsabbauverhalten an bestimmten Orten innerhalb einer Messserie zu beschreiben.

In [Abbildung 5.5](#) werden die Maximalwerte des ersten Peaks der insgesamt 50 Wiederholungen dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass der Maximalwert der 42. Messung mit 11 mV signifikant abweicht, was auf den bereits beschriebenen kurzzeitigen Ausfall des Beschichtungssystems zurückzuführen ist. Da ein solcher Ausreißer bei der Analyse der Daten nicht berücksichtigt wird, ist dieser Datenpunkt nicht in die folgende Fehlerberechnung eingeflossen.

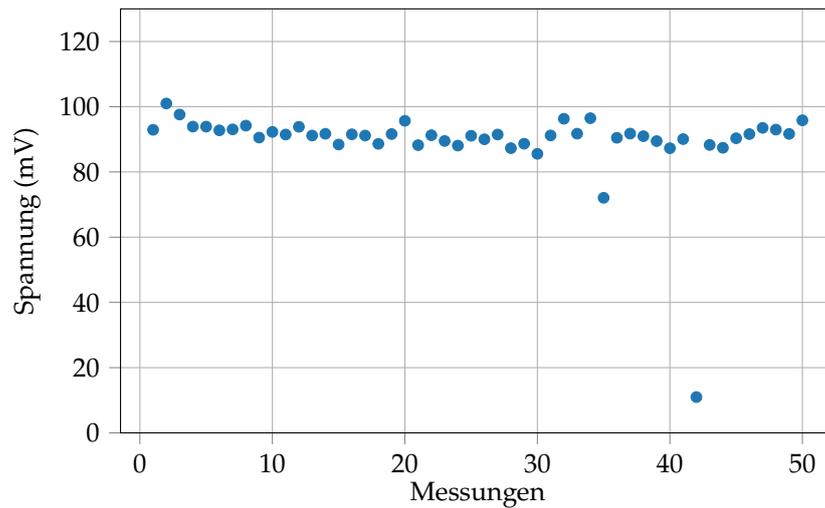


Abbildung 5.5: Maximalwert des ersten Peaks (siehe [Abbildung 5.4](#)) der fünfzig Wiederholungen

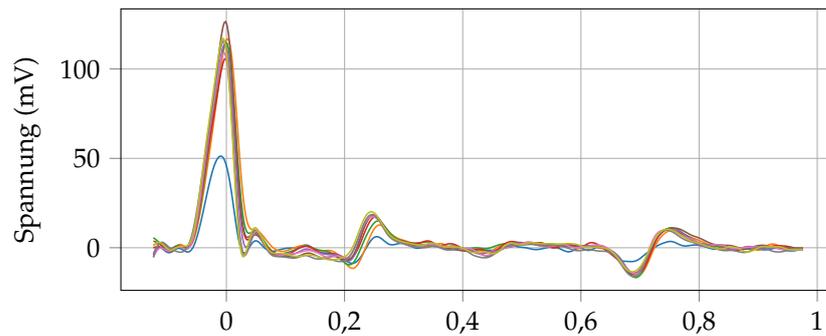
Der arithmetische Mittelwert des Maximums liegt bei 91 mV und die Standardabweichung bei 4 mV. Es kann somit gezeigt werden, dass durch den Prozess des automatischen Auftragens eines Beschichtungsmaterials gleichbleibende Bedingungen auf der Oberfläche geschaffen werden können, was die Wiederholbarkeit von Messungen ermöglicht. Dies ist eine signifikante Voraussetzung, um im späteren Verlauf der Arbeit das Ladungsaufbau- und Abbauverhalten an einzelnen Punkten innerhalb der Modellanordnung untersuchen zu können.

5.5 FEHLERBETRACHTUNG ZWISCHEN MESSSERIEN BEI UNVERÄNDERTER PRÜFKÖRPERANORDNUNG

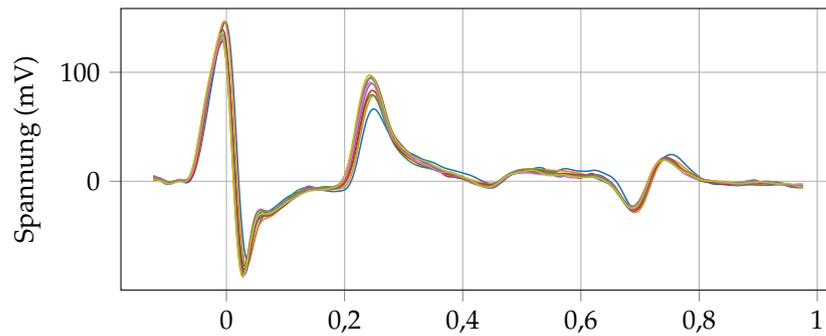
Nach Einschätzung des Fehlers zwischen einzelnen Messungen in [Abschnitt 5.4](#) soll nachfolgend der Fehler für die Wiederholbarkeit von ganzen Messserien (bestehend aus mehreren Messungen) bei gleicher Prüfkörperanordnung beschrieben werden.

Der Messablauf zur Ermittlung des Fehlers gestaltet sich wie folgt: Die Anordnung wird zunächst 3 h kurzgeschlossen. Anschließend wird die Anordnung für 1 h mit einer Spannung von 3 kV beaufschlagt. In diesem Zeitraum wird im Abstand von 2 min eine Messung durchgeführt, was zu insgesamt 30 LIPP-Messungen während der Polarisationsphase führt. Nach Ende der Polarisationsphase wird der Prüfkörper kurzgeschlossen und es werden während der Kurzschlussphase erneut 30 Messungen im Abstand von 2 min aufgenommen. Nach Ablauf der Kurzschlussphase bleibt der Prüfkörper für eine weitere Stunde ohne Durchführung von Messungen im Kurzschluss (Wartezeit). Anschließend wird der beschriebene Zyklus von Polarisationsphase, Kurzschlussphase und Wartezeit insgesamt neunmal wiederholt, was zu einer gesamten Messzeit von 27 h führt.

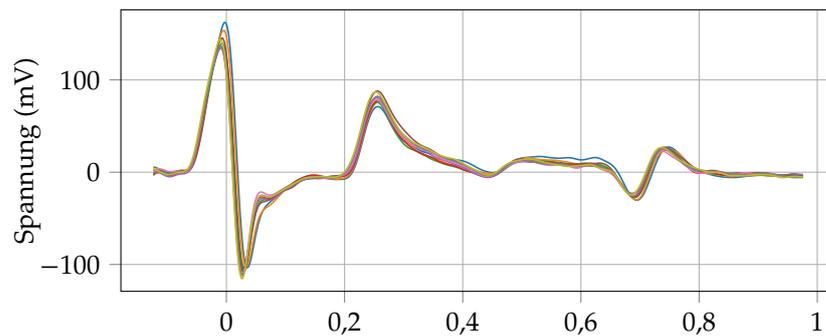
Die Ergebnisse dieses Versuchs werden auszugsweise in [Abbildung 5.6](#) dargestellt. [Abbildung 5.6a](#) zeigt dabei die jeweils erste Messung während der Polarisationsphase der neun Messserien. Zwischen jedem der hier gezeigten neun LIPP-Profilen liegt somit eine Zeitdauer von 3 h. Außer einem Ausreißer kann gezeigt werden, dass jede Messserie kurz nach Beaufschlagung mit einer externen Spannung die gleiche Raumladungsverteilung aufweist. Um zu überprüfen, ob auch die zeitliche Entwicklung der Raumladungsbildung in jeder Messserie das gleiche Verhalten zeigt, wird weiterhin die jeweils fünfzehnte und dreißigste Messung, das heißt die Messung nach 30 min und 60 min, während der Polarisationsphase verglichen. In [Abbildung 5.6b](#) ist zu sehen, dass dreißig Minuten nach Beginn der Polarisationsphase in jeder der neun Messserien die gleiche Raumladungsverteilung entsteht. Es kommt in jeder Wiederholung zu einer positiven Ladungsansammlung an der Grenzfläche sowie zu einer Ansammlung von Heterocharges an der HV-Elektrode. Auch die Raumladungsverteilung zum Ende der Polarisationsphase in [Abbildung 5.6c](#) ist in jeder der neun Messserien identisch.



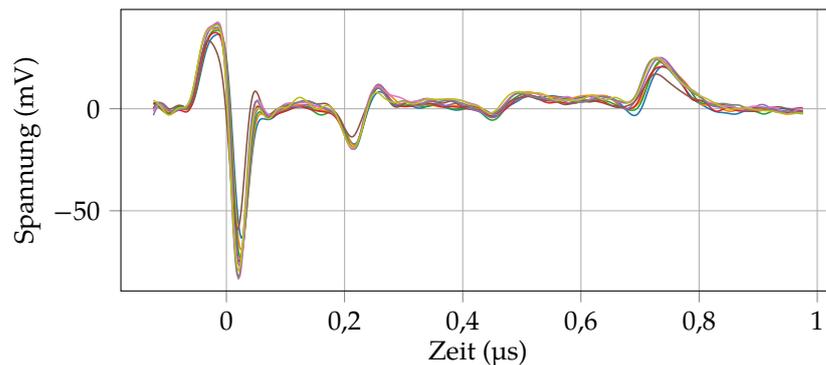
(a) Erste Messung in der Polarisationsphase der 9 Messserien



(b) Fünfzehnte Messung in der Polarisationsphase der 9 Messserien



(c) Dreißigste Messung in der Polarisationsphase der 9 Messserien



(d) Fünfzehnte Messung in der Kurzschlussphase der 9 Messserien

Abbildung 5.6: LIPP-Profil der Prüfkörperanordnung aus Silikonfett und Silikonelastomer von neun konsekutiv ablaufenden Messserien, wobei eine Messserie aus einer einstündigen Polarisationsphase mit 3 kV, einer einstündigen Kurzschlussphase sowie sich anschließender Wartezeit von einer Stunde besteht

Weiterhin wird durch die Darstellung der fünfzehnten Messung der Kurzschlussphase (siehe [Abbildung 5.6d](#)) gezeigt, dass 30 min nach Kurzschluss in jeder der neun Wiederholungen das gleiche Raumladungsverhalten zu finden ist.

Obwohl gezeigt werden kann, dass sich die Raumladungsverteilung offensichtlich bei der mehrfachen Wiederholung gleicht, soll zur weiteren Auswertung in [Abbildung 5.7](#) beispielhaft von jeder Messserie der Maximalwert der fünfzehnten Messung während der Polarisationsphase (erster Peak in [Abbildung 5.6b](#)) gezeigt werden. Der Verlauf des Peaks der anderen Messserien verhält sich ähnlich und wird deshalb hier nicht zusätzlich dargestellt.

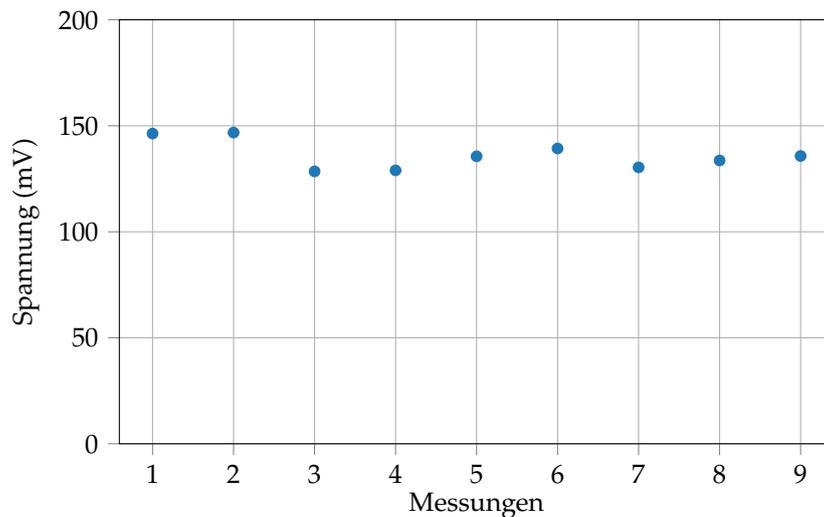


Abbildung 5.7: Darstellung des Maximalwerts des ersten Peaks der fünfzehnten Messung der jeweils neun Wiederholungen (erster Peak in [Abbildung 5.6b](#))

Die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts ergibt 136 mV und die Standardabweichung beläuft sich auf 6 mV. Es konnte folglich gezeigt werden, dass es mit dem Messsystem möglich ist, bei unveränderter Prüfkörperanordnung Messserien wiederholbar durchzuführen.

5.6 FEHLERBETRACHTUNG ZWISCHEN MESSUNGEN NACH ERNEUTER PRÄPARATION DER PRÜFKÖRPERANORDNUNG

Es konnte in den vorherigen Experimenten und Fehlerbetrachtungen gezeigt werden, dass die Wiederholbarkeit bei Messungen und Messserien mit unveränderter Prüfkörperanordnung gegeben ist. Im Folgenden soll untersucht werden, ob die in [Abschnitt 5.2](#) gezeigte Vorgehensweise für die Präparation des Prüfkörpers einen Einfluss auf die Wiederholbarkeit hat und ob Messungen auch nach erneuter Präparation des Prüfkörpers wiederholt werden können. Dazu wird ein Versuch mit den gleichen Versuchsbedingungen wie in [Abschnitt 5.4](#) durchgeführt. Die einzige Änderung besteht darin, dass der Prüfkörper zwischen jeder Messung erneut präpariert wird. Der Messablauf des Experiments mit insgesamt zwölf Wiederholungen gestaltet sich wie folgt: Zu Beginn jeder Messserie wird die Prüfkörperanordnung für eine Zeit von 30 s mit 3 kV polarisiert, wobei ein LIPP-Profil nach 5 s aufgenommen wird. Anschließend erfolgt eine Kurzschlussphase von 15 min. Dieser Ablauf wird insgesamt zwölfmal wiederholt.

Innerhalb der Kurzschlussphase wird der Plattenprüfling nach 5 min entnommen, das Silikonfett mit einem in Aceton getränkten Papiertuch entfernt und erneut entsprechend der in [Abbildung 5.1](#) dargestellten Prozedur auf die Erdelektrode aufgelegt und präpariert. Anschließend erfolgt in Minute vierzehn eine weitere Messung, um sicherzustellen, dass keine Restladungen vorhanden sind, wie in [Abbildung 5.8](#) dargestellt wird. Es lässt sich offensichtlich erkennen, dass nach erneuter Präparation des Prüfkörpers keine Restladung in der Anordnung vorhanden ist.

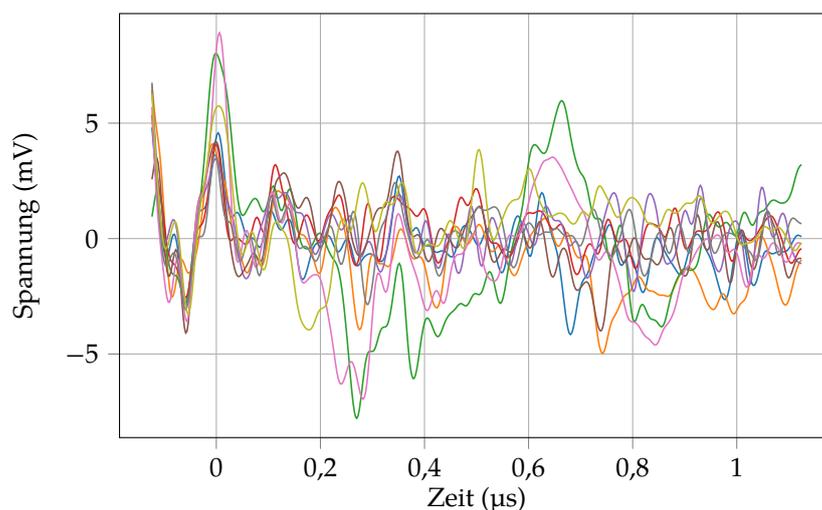


Abbildung 5.8: LIPP-Profil der zwölf Wiederholungen 14 min nach Kurzschluss der Prüfkörperanordnung

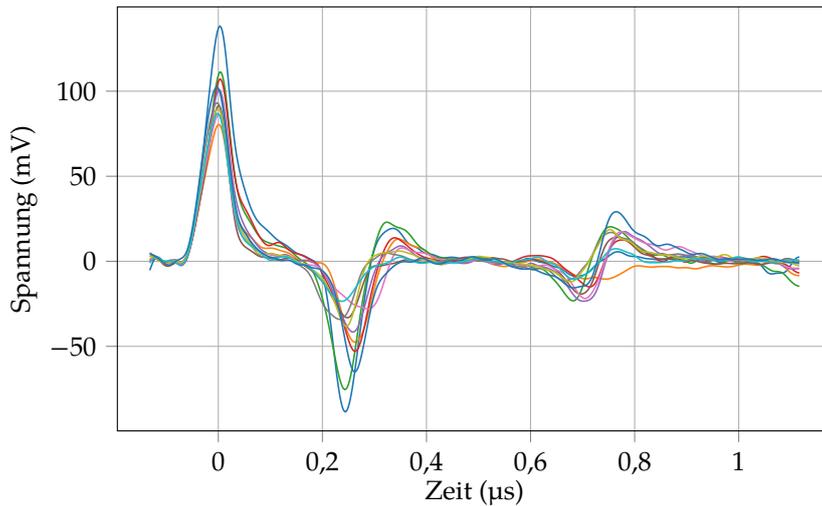


Abbildung 5.9: LIPP-Profil der insgesamt zwölf Wiederholungen nach jeweiliger Beaufschlagung mit 3 kV für 5 s

Das LIPP-Profil der insgesamt zwölf Wiederholungen nach einer jeweiligen Polarisationsdauer von 5 s ist in [Abbildung 5.9](#) dargestellt. Die grundlegende Form des LIPP-Profiles scheint in allen Messserien vorhanden zu sein. Allerdings weichen die Messungen in der Amplitude signifikant voneinander ab. Vor allem ist im Vergleich zum Experiment aus [Abschnitt 5.4](#), welches ohne Veränderungen im Prüfkörperaufbau durchgeführt wurde, die Abweichung offensichtlich.

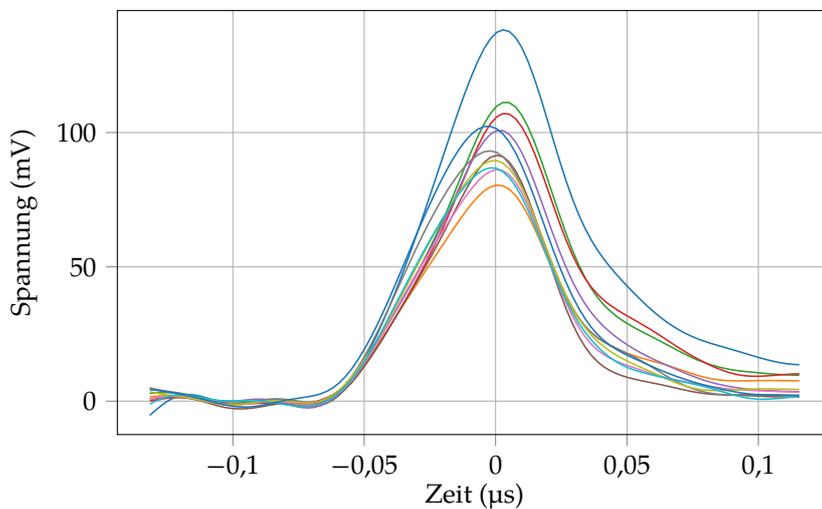


Abbildung 5.10: Maximalwert des ersten Peaks der in [Abbildung 5.9](#) dargestellten LIPP-Profile

Für eine weitergehende Auswertung zeigt [Abbildung 5.10](#) das LIPP-Profil der zwölf Wiederholungen nach der Polarisation für 5 s in der Nahansicht. Zur Auswertung und Quantifizierung des Fehlers wird der Maximalwert des Peaks berechnet und in [Abbildung 5.11](#) dar-

gestellt. Hieraus ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert von 99 mV und eine Standardabweichung von 15 mV.

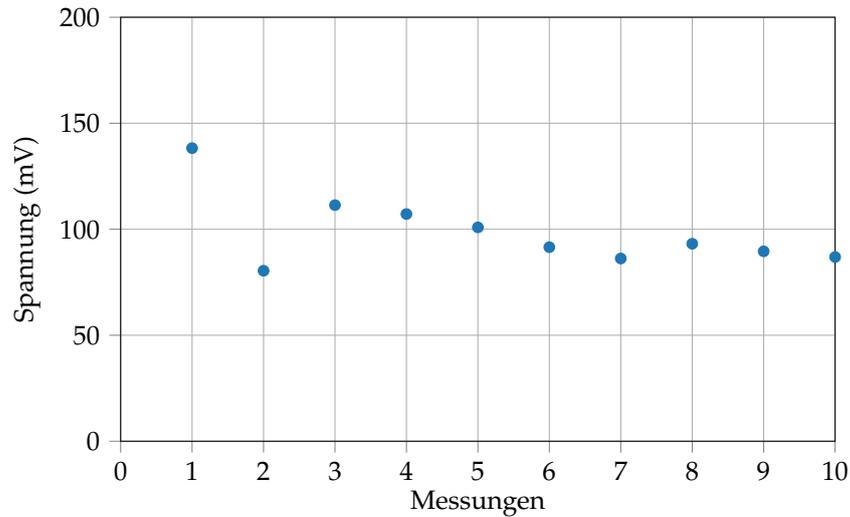


Abbildung 5.11: Maximalwert des in [Abbildung 5.10](#) dargestellten Peaks der insgesamt zwölf Wiederholungen nach jeweiliger Polarisation mit 3 kV für 5 s

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Wiederholbarkeit der Messungen und Messserien des entwickelten Prüfaufbaus bei unveränderter Prüfanordnung gegeben ist. Werden Messungen bzw. Messserien verglichen, bei denen der Prüfkörper jeweils neu präpariert wird, so muss die definierte Abweichung berücksichtigt werden.

LIPP-MESSUNGEN ZUM RAUMLADUNGSVERHALTEN EINER SCHICHTANORDNUNG AUS SILIKONFETT UND SILIKONELASTOMER

6.1 VERSUCHSBESCHREIBUNG ANHAND EINER MESSERIE BEI RAUMTEMPERATUR

In diesem Kapitel wird das temperatur- und feldstärkeabhängige Raumladungsverhalten der Modellanordnung beschrieben. Dazu werden alle Versuche mit der in [Abschnitt 5.2](#) beschriebenen Modellanordnung sowie dem ebenfalls gezeigten Vorgehen zur Präparation eines Prüfkörpers durchgeführt. Für jeden Versuch wurde ein neuer Prüfkörper eingesetzt sowie neues Silikonfett aufgetragen.

Um den Einfluss der Temperatur sowie der Feldstärke auf das Raumladungsverhalten der Modellanordnung zu untersuchen, wurden insgesamt acht Versuche durchgeführt. Für die Untersuchung des feldstärkeabhängigen Raumladungsverhaltens werden die Spannungen von 1, 2, 3 und 4 kV bei einer festen Temperatur von 20 °C untersucht und zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit Versuche mit einer Spannung von 3 kV und Temperaturen von 10, 20, 30 und 40 °C durchgeführt.

Jeder Versuch verläuft nach dem gleichen fest definierten Ablauf: Zunächst wird die Prüfkörperanordnung auf die gewünschte Temperatur gebracht. Anschließend werden die Versuchsparameter in der Ablaufsteuerung definiert und die automatische Messung wird gestartet. Zu Beginn der Messserie wird die jeweils definierte Spannung angelegt und anschließend im Abstand von zwei Minuten ein LIPP-Profil aufgenommen, was insgesamt 30 Messungen während der Polarisationsphase entspricht. Nach Ablauf der Polarisationsphase schließt das Messsystem die Anordnung kurz und das Ladungsabbauverhalten im Kurzschluss wird untersucht, wobei erneut 30 Messungen in dieser Kurzschlussphase durchgeführt werden.

In diesem Abschnitt wird zunächst ausschließlich der Datensatz bei 3 kV und 20 °C betrachtet und anhand diesem die Versuchsdurchführung sowie erste Beobachtungen erläutert. Das feldstärkeabhängige und temperaturabhängige Raumladungsverhalten wird in den nächsten Abschnitten gezeigt.

Abbildung 6.1 zeigt zunächst das Raumladungsverhalten der Modellanordnung bei 20 °C und einer externen Spannung von 3 kV während der Polarisationsphase von 60 min.

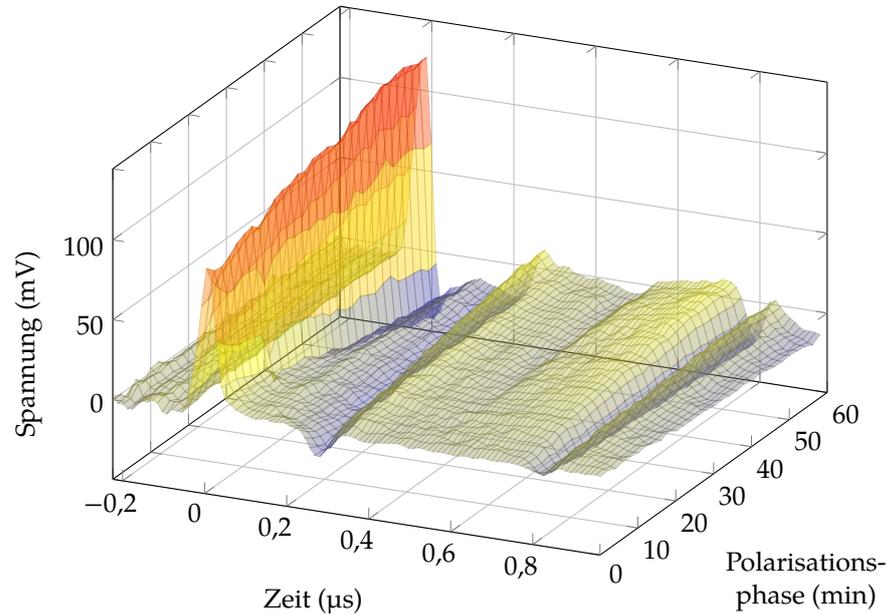


Abbildung 6.1: Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Polarisationsphase von 60 min bei 3 kV und 20 °C

In **Abbildung 6.1** wird die zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung während der Polarisationsphase dreidimensional dargestellt. Dabei entspricht die Zeitachse in μs dem Ort innerhalb der Prüfkörperanordnung, wobei $t=0\mu\text{s}$ für die Grenzfläche zwischen der HV-Elektrode und dem Silikonfett (A), $t=0,3\mu\text{s}$ für die Grenzfläche zwischen dem Silikonfett und dem Plattenprüfkörper (B) und $t=0,8\mu\text{s}$ für die Grenzfläche zwischen Plattenprüfkörper und Erdelektrode (C) steht. Die Polarisationsphase wird in Minuten (min) angegeben und beträgt 60 min, wobei Messungen im Abstand von zwei Minuten aufgenommen werden. Die Angabe der Spannung in mV entspricht der Ladung, wie in **Gleichung (2.11)** erklärt wurde.

Anhand der dreidimensionalen Abbildung lässt sich die Entwicklung des Raumladungsverhaltens während der Polarisationsphase beobachten: Zu Beginn der Polarisationsphase bei $t=0\text{ min}$ ist das übliche LIPP-Profil mit einem positiven Peak an der Grenzfläche zwischen HV-Elektrode und Silikonfett (A) und einem negativen Peak an der Grenzfläche zwischen dem Silikonfett und Silikonelastomer (B) zu sehen. Ein geringer negativer Peak ist an der unteren Elektrode (C) erkennbar. Im zeitlichen Verlauf der Polarisationsphase lassen sich signifikante Ladungsbewegungen beobachten. Zunächst fällt auf, dass die Elektrodenladung der HV-Elektrode (A) im Verlauf

des Versuchs deutlich ansteigt. Auch die Ladungsverhältnisse im Silikonfett in unmittelbarer Nähe der Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05\ \mu\text{s}$) ändern sich während des Versuchs. Zu Beginn scheint hier keine Ladung vorhanden zu sein, wobei sich im Verlauf der Messserie eine signifikante negative Ladung, in diesem Fall Heterocharge genannt, ausbildet. An der Grenzfläche zwischen Silikonfett und dem Silikonelastomer (B) bei $t=0,3\ \mu\text{s}$ ergeben sich weiterhin Änderungen der Ladungsverhältnisse: Zu Beginn ist ausschließlich eine negative Ladung messbar, wobei sich im Verlauf des Versuchs eine positive Ladung herausbildet. Weiterhin kann die zeitliche Veränderung der Ladungsverhältnisse im Silikonelastomer (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,3\ \mu\text{s}$ bis $0,8\ \mu\text{s}$) beschrieben werden. Zu Beginn scheinen hier keine Ladungen vorhanden zu sein, wobei sich mit fortschreitender Versuchsdauer positive Ladungen ausbilden.

Nach Beendigung der einstündigen Polarisationsphase erfolgt eine automatische Erdung der Modellanordnung und die Raumladungsverteilung während der Kurzschlussphase wird in einem Zeitraum von 60 min aufgenommen. Zunächst soll die letzte Messung der Polarisationsphase und die erste Messung der Kurzschlussphase in **Abbildung 6.2** verglichen werden.

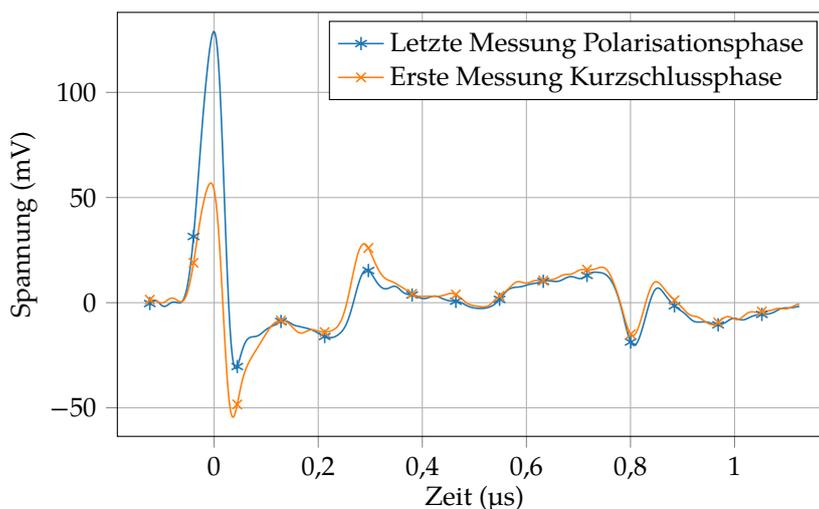


Abbildung 6.2: Letzte Messung der Polarisationsphase nach Beaufschlagung mit 3 kV für 60 min sowie erste Messung der Kurzschlussphase

Die beiden in **Abbildung 6.2** gezeigten Messungen zeigen geringe Abweichungen innerhalb der Prüfanordnung (zeitäquivalenter Ort von $0,1\ \mu\text{s}$ bis $0,8\ \mu\text{s}$). Es kann somit aufgrund der kleinen Differenz davon ausgegangen werden, dass die Raumladungsverteilung zu Beginn der Kurzschlussphase in diesem Bereich der Ladungsverteilung zum Ende der Polarisationsphase entspricht und noch kein signifikanter Ladungsabbau stattgefunden hat. Es ergibt sich allerdings ei-

ne deutliche Differenz an der HV-Elektrode (A) (zeitäquivalenter Ort $t=0\ \mu\text{s}$). Dieser Unterschied lässt sich folgendermaßen erklären: Zu Beginn der Polarisationsphase kommt es auf der HV-Elektrode zu einer instantanen Ausbildung einer Oberflächenladungsdichte, da das hier herrschende elektrische Feld in einem linearen Zusammenhang mit der Oberflächenladungsdichte steht wie in [Gleichung \(2.16\)](#) beschrieben wurde. Diese Elektrodenladung ist allerdings keine Raumladung im klassischen Sinn, da sie nicht in das Material eindringt und ausschließlich auf der Oberfläche der HV-Elektrode vorhanden ist. Im Laufe der Polarisationsphase sammeln sich anschließend Heterocharges in der Nähe der HV-Elektrode an, wie in der letzten Messung der Polarisationsphase in [Abbildung 6.2](#) dargestellt ist. Sobald die Modellanordnung kurzgeschlossen wird, verschwindet das überlagerte elektrische Feld sowie dessen Anteil zur Elektrodenladung instantan. Wie in der ersten Messung der Kurzschlussphase gezeigt wird, ist allerdings weiterhin eine Elektrodenladung zu Beginn der Kurzschlussphase vorhanden. Dies ist damit zu begründen, dass die sich angesammelten Heterocharges auch zu Beginn der Kurzschlussphase, wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, weiterhin im Material vorhanden sind und somit eine Ladung auf der HV-Elektrode influenzieren. Dieser Zusammenhang zwischen einer Flächenladungsdichte innerhalb der Modellanordnung und einer influenzierten Oberflächenladungsdichte an den Elektroden bei Abwesenheit eines externen Feldes wurde bereits in [Gleichung \(2.5\)](#) beschrieben.

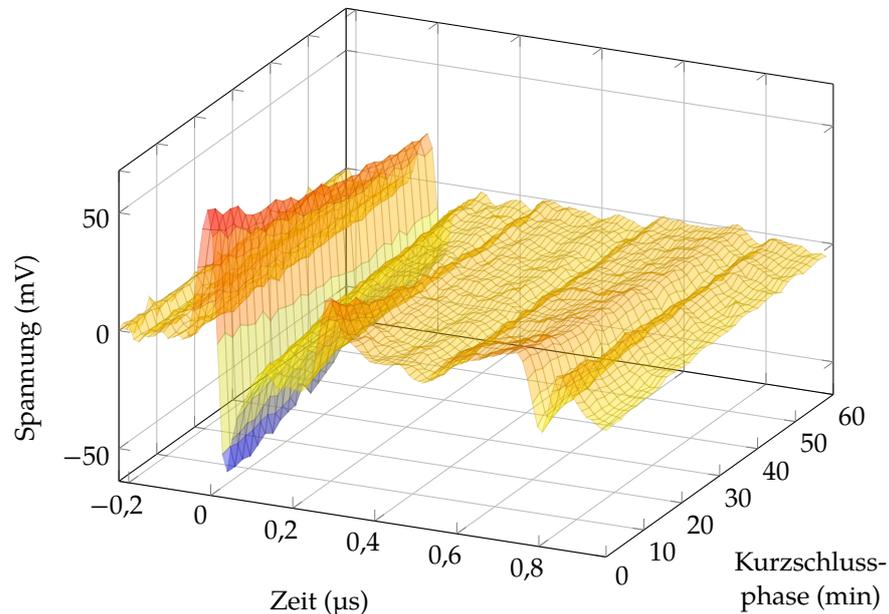


Abbildung 6.3: Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Kurzschlussphase nach Polarisation mit 3 kV für 60 min bei 20 °C

Die erste Messung der Kurzschlussphase ist erneut in **Abbildung 6.3** zu finden, in welcher das zeitliche Raumladungsverhalten während der Kurzschlussphase dargestellt ist. Hier fällt auf, dass zunächst ein schneller Ladungsabbau an der Grenzfläche (B) ($t=0,3\ \mu\text{s}$) stattfindet und sich die Ladung innerhalb des Silikonelastomers ($t=0,3\ \mu\text{s}$ bis $0,8\ \mu\text{s}$) während der Kurzschlussphase bei Minute 60 fast vollständig abgebaut hat. Eine genauere Analyse des zeitlichen Aufbauverhaltens und Abbauverhaltens an den einzelnen Orten erfolgt im nächsten Kapitel.

6.2 EINFLUSS DER TEMPERATUR

Nach Beschreibung einer beispielhaften Messserie mit Polarisationsphase und Kurzschlussphase wird im Folgenden gezeigt, welchen zusätzlichen Einfluss die Temperatur auf das zeitliche Raumladungsverhalten der Modellanordnung hat.

6.2.1 Einfluss der Temperatur auf die Raumladungsverteilung in der Modellanordnung

In einer dieser Arbeit vorausgehenden Veröffentlichung wurde das Raumladungsverhalten in der Modellanordnung während der Kurzschlussphase bereits in einem Vorversuch [SIP18d] beschrieben. Allerdings erfolgten die Messungen hier nicht automatisch, da das Beschichtungsmaterial manuell aufgetragen wurde. Dies führte auch dazu, dass mit dem zum Zeitpunkt der Veröffentlichung verfügbaren Stand des Messsystems keine Messungen während der Polarisationsphase durchgeführt werden konnten.

Im Folgenden wird das Raumladungsverhalten sowohl während der Kurzschlussphase als auch während der Polarisationsphase bei Temperaturen von 10, 20, 30 und 40 °C beschrieben. Zunächst soll hierzu das LIPP-Profil in der Polarisationsphase direkt nach Anlegen der Spannung bei Versuchsdauer $t=0$ min verglichen werden. Zur besseren Veranschaulichung zeigt [Abbildung 6.4](#) dazu die erste Messung der vier Polarisationsphasen.

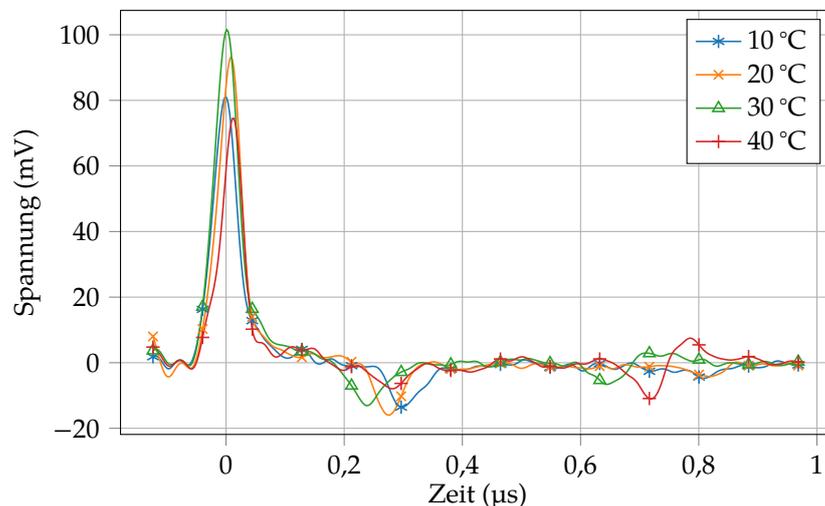


Abbildung 6.4: Erste Messung der Polarisationsphase bei $t=0$ min der jeweiligen Messserien mit 10, 20, 30 und 40 °C

Es fällt auf, dass sich diese LIPP-Profile in ihrer Form stark ähneln, was darauf zurückzuführen ist, dass zu Beginn einer Messserie

zunächst noch wenig Ladungstransport stattgefunden hat. Es wird vermutet, dass die Raumladungsverteilung zu Beginn der Messung vor allem von den Permittivitäten der verwendeten Materialien abhängt, da dies der einzige Parameter ist, der instantan nach Anlegen einer Spannung die Ladungsverhältnisse auf den Elektroden beeinflusst, wie in [Abbildung 2.8](#) anhand eines Beispiels gezeigt und in [Gleichung \(2.17\)](#) beschrieben worden ist. Die Abweichung der in [Abbildung 6.4](#) gezeigten Messungen ist auf den Fehler durch die Präparation der Prüfkörper zurückzuführen. Die Standardabweichung der Maxima der ersten Peaks beträgt hier 13 mV und liegt somit in der gleichen Größenordnung wie der Fehler, der bereits in [Abschnitt 5.6](#) ausführlich beschrieben und mit 15 mV berechnet wurde.

Trotz der annähernd gleichen Ausgangszustände der Messserien mit 10, 20, 30 und 40 °C verändert sich das Raumladungsverhalten innerhalb der Polarisationsphase von 60 min signifikant, wie in [Abbildung 6.6](#) dargestellt wird. Um die Visualisierung zu vereinfachen, wurden von den dreißig durchgeführten Messungen jeder Polarisationsphase in dieser überblickenden Darstellung erneut das LIPP-Profil bei $t=0$ min sowie die Messungen bei Minute 10, 20, 40 und 60 dargestellt.

Zunächst soll die vollständige Messserie mit dreißig Messungen bei einer Temperatur von 10 °C in [Abbildung 6.5](#) näher betrachtet werden.

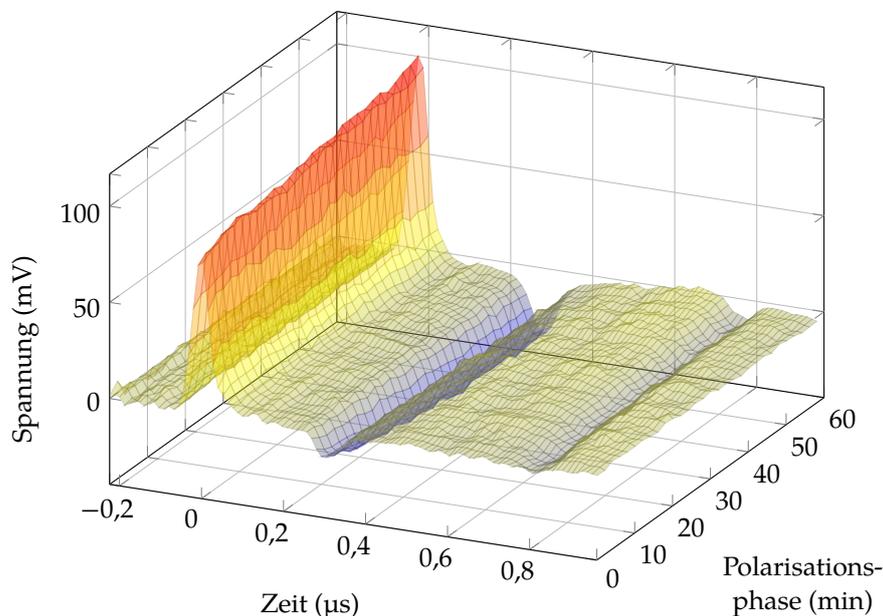


Abbildung 6.5: Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Polarisationsphase von 60 min bei 3 kV und 10 °C

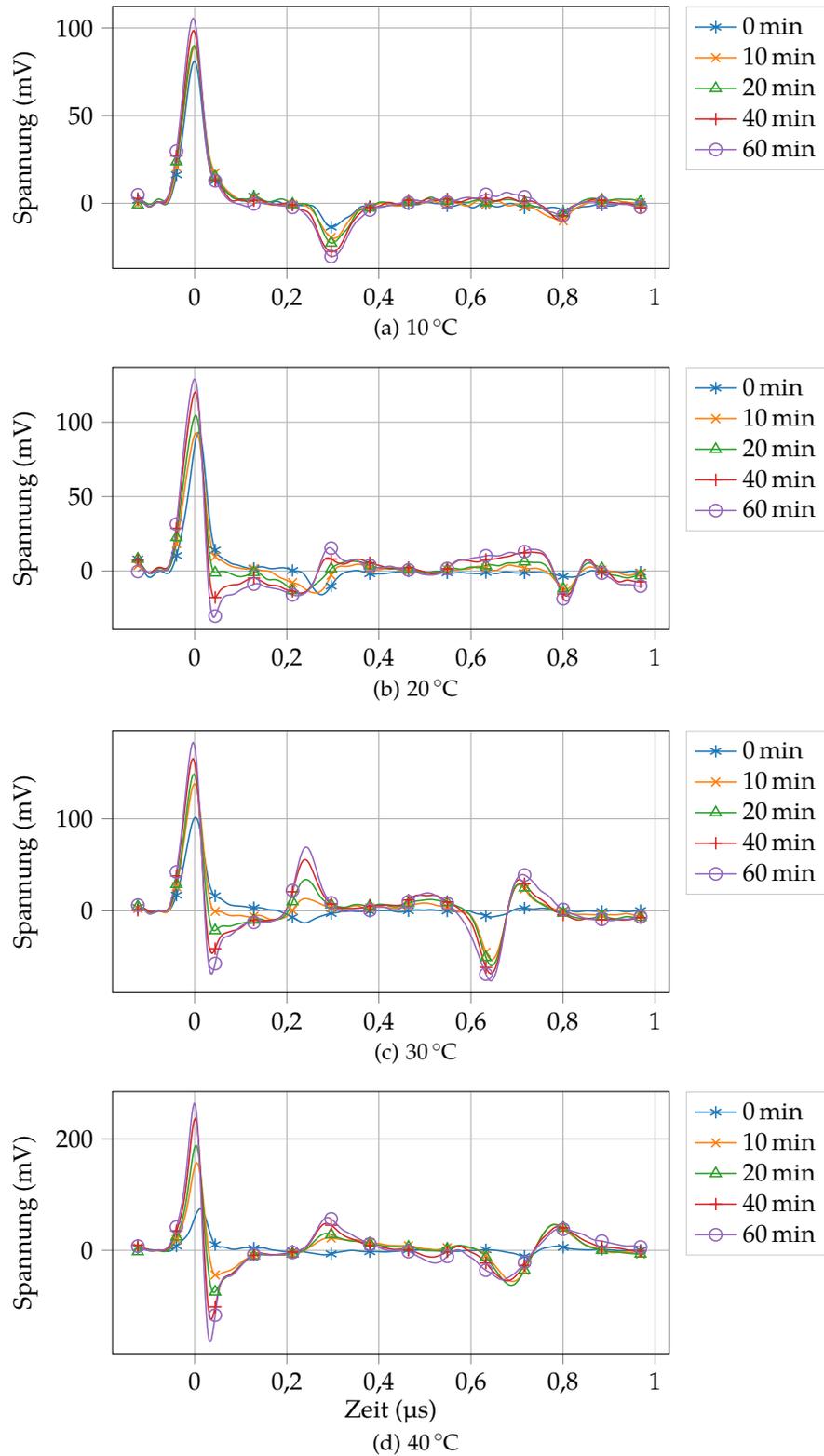


Abbildung 6.6: Temperaturabhängiges Raumladungsverhalten der Modellordnung bei Beaufschlagung mit einer Spannung von 3 kV für 60 min mit Darstellung der Messungen bei Minute 0 und nach 10, 20, 40 und 60 min

Das Raumladungsverhalten in [Abbildung 6.5](#) zeigt bei einer Temperatur von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ keine auffälligen Veränderungen während der einstündigen Polarisationsphase. Zwar ändert sich die Ladung an der Grenzfläche zwischen der HV-Elektrode und dem Silikonfett (A) und an der Grenzfläche zwischen dem Silikonfett und dem Silikonelastomer (B) im Verlauf der Messserie in der Amplitude, die grundlegende Form der Ladungsverteilung bleibt jedoch erhalten. Bei höheren Temperaturen verändert sich die Raumladungsverteilung dagegen signifikant. Es lassen sich bei Betrachtung von [Abbildung 6.6](#) zwei Trends beobachten: Mit steigenden Temperaturen sammeln sich in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode zunehmend Heterocharges an. An der Grenzfläche (B) kommt es bei einer Temperatur von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zum Aufbau einer negativen Ladung. Bei ansteigenden Temperaturen ändert sich die Ladung an dieser Grenzfläche von einer negativen Ladung zu einer positiven, wobei sich diese Änderung mit zunehmenden Temperaturen schneller vollzieht. Zur genaueren Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Ladungsverteilung bei höheren Temperaturen ist in [Abbildung 6.7](#) das Raumladungsverhalten bei $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf Grundlage des vollständigen Datensatzes mit dreißig Messungen dargestellt. Auch hier ist erneut der in [Abbildung 6.4](#) beschriebene Ausgangszustand bei $t=0\text{ min}$ ersichtlich. Bereits nach einigen Minuten verändert sich das Ladungsbild an der Grenzfläche vom Silikonfett zum Silikonelastomer (B) von einer negativen zu einer positiven Ladung.

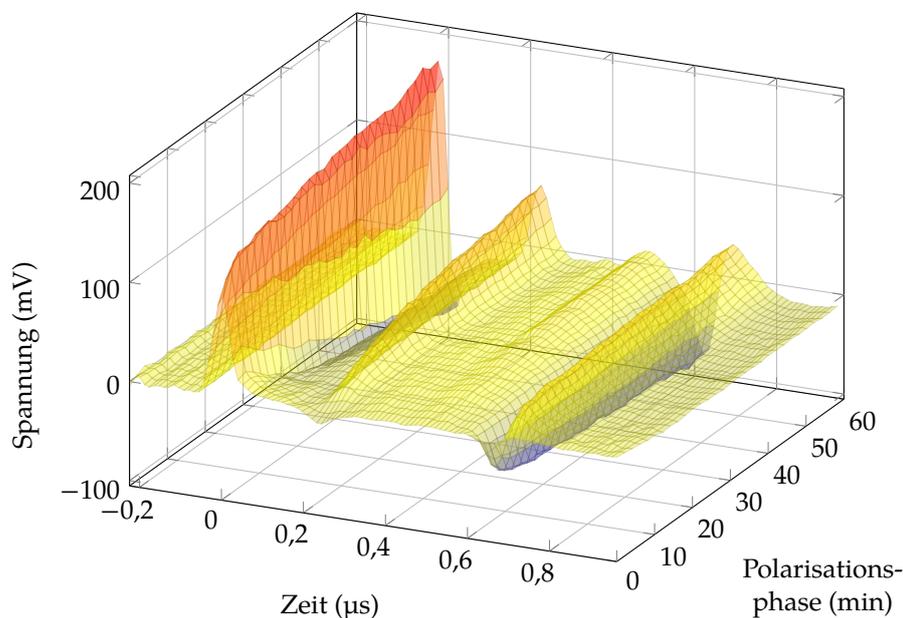


Abbildung 6.7: Zeitliche Entwicklung der Raumladungsverteilung in der Modellanordnung während der Polarisationsphase von 60 min bei 3 kV und $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

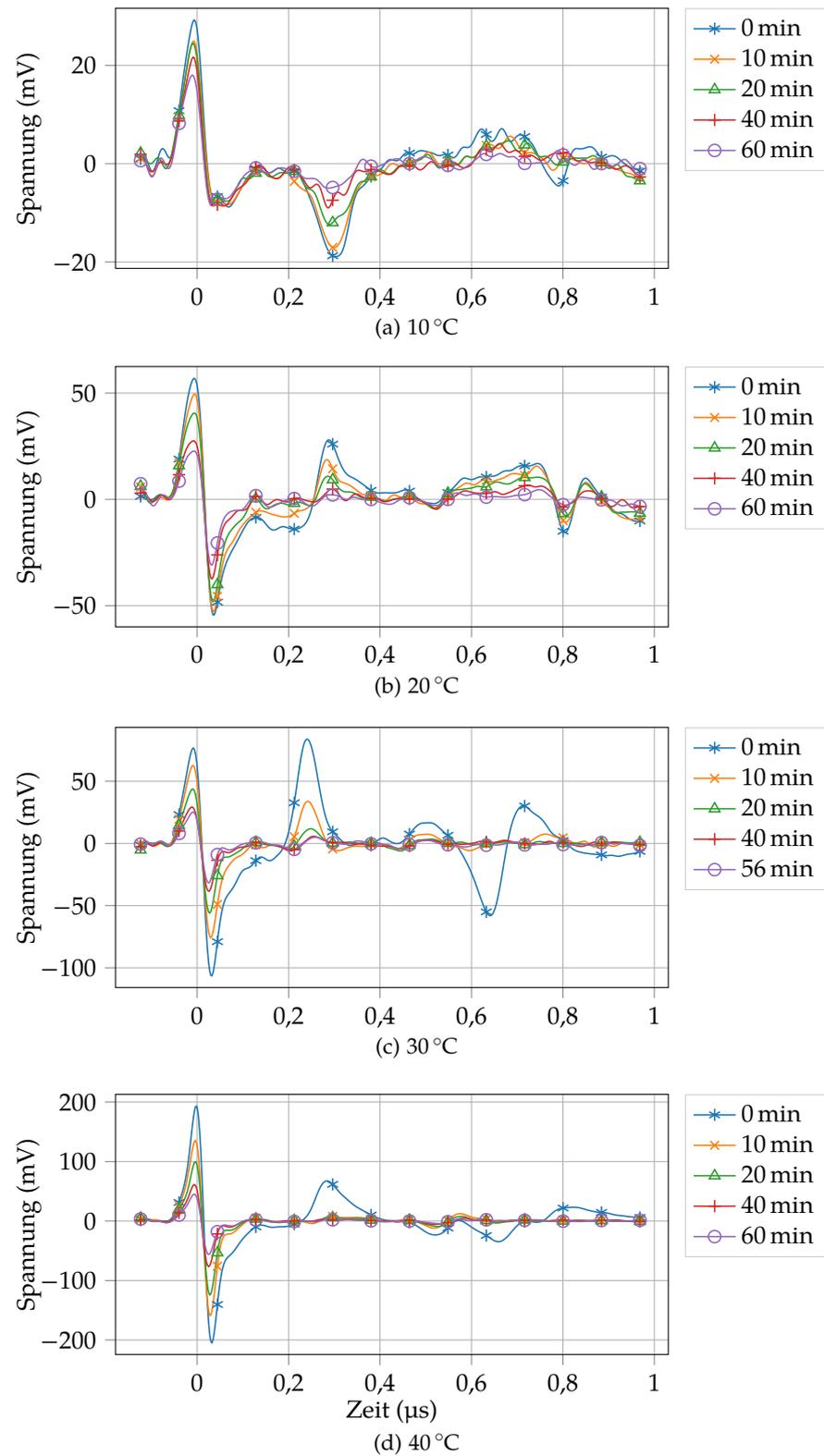


Abbildung 6.8: Temperaturabhängiges Raumladungsverhalten der Modellanordnung während der Kurzschlussphase nach vorheriger Polarisation mit 3 kV für 60 min

Ein ähnliches Verhalten wurde in [Miy+03] bei der Untersuchung des Raumladungsverhaltens an der Grenzfläche zwischen Epoxidharz und XLPE gefunden: Zu Beginn der Raumladungsmessung zeigte sich eine negative Ladung an der Grenzfläche und im Laufe der Messung änderte sich diese zu einer positiven Ladung.

Auch der Ladungsabbau während der Kurzschlussphase soll in gleicher Weise wie der Ladungsaufbau während der Polarisationsphase dargestellt werden. Dazu werden in [Abbildung 6.8](#) die Kurzschlussphasen der vier untersuchten Temperaturen dargestellt, wobei für eine vereinfachte Darstellung erneut ausschließlich fünf der insgesamt 30 aufgenommenen Messungen gezeigt werden. Eine genauere Beschreibung und Analyse des Ladungsabbaus an den einzelnen Orten der Modellanordnung während der Kurzschlussphase erfolgt im nächsten Abschnitt.

Nach Präsentation des Raumladungsverhaltens in der Kurzschlussphase soll im Folgenden noch einmal der Unterschied zwischen der jeweils letzten Messung der Polarisationsphase und der ersten Messung der Kurzschlussphase aufgegriffen werden. Hierzu wurde bereits anhand der [Abbildung 6.2](#) beschrieben, dass sich das Ladungsbild bis auf den Bereich der HV-Elektrode im Volumen der Prüfkörperanordnung direkt vor und nach dem Kurzschluss gleicht. Der signifikante Unterschied an der HV-Elektrode (siehe erneut [Abbildung 6.2](#)) wurde bereits damit erklärt, dass nach dem Kurzschluss der Anteil der Elektrodenladung (A) aufgrund der externen Spannung instantan verschwindet, aber weiterhin eine Spiegelladung aufgrund der in der unmittelbaren Nähe der HV-Elektrode angesammelten Heterocharges zu sehen ist. Dieser Erklärungsansatz kann außerdem dadurch belegt werden, dass sich der zeitliche Verlauf der Elektrodenladung sowie der negativen Heterocharge der Messserien in [Abbildung 6.8c](#) und [Abbildung 6.8d](#) während der Kurzschlussphase zu gleichen scheinen.

Zur weiteren Beschreibung dieses Effekts wird in [Abbildung 6.9](#) das Abbauverhalten dieser Elektrodenladung (A) sowie dieser Heterocharge in unmittelbarer Nähe der HV-Elektrode für die Temperaturen von 30 und 40 °C gezeigt. Diese beiden Verläufe entsprechen somit jeweils dem Maximalwert des ersten positiven Peaks und dem Maximalwert des ersten negativen Peaks aus [Abbildung 6.8c](#) und [Abbildung 6.8d](#).

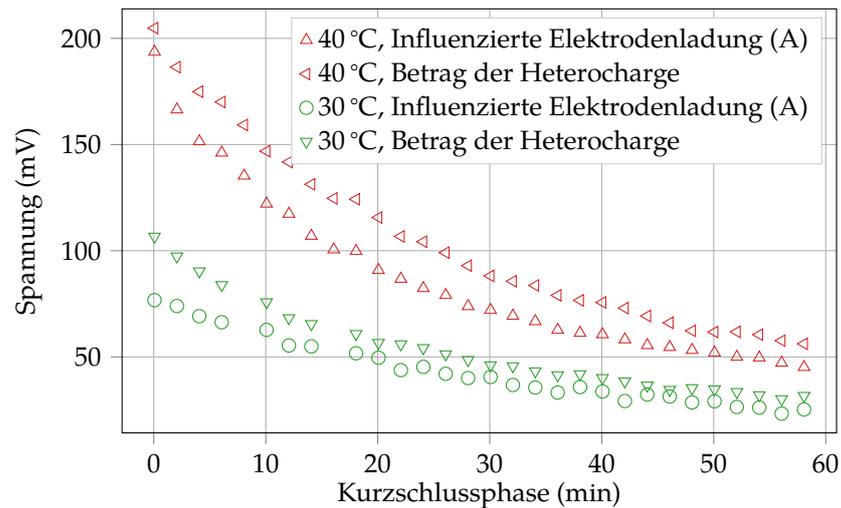


Abbildung 6.9: Vergleich des Ladungsabbaus der influenzierten Elektrodenladung (A) und des Betrags der Heterocharge in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort $t=0,05 \mu\text{s}$)

Aus [Abbildung 6.9](#) wird deutlich, dass der Abbau der Elektrodenladung und Heterocharge bei den Messserien mit 30 und 40 °C während der Kurzschlussphase in den ersten 10 bis 20 min noch einen Unterschied aufweist, aber im Zeitraum von 20 bis 60 min ein fast gleiches Abklingverhalten zu beobachten ist. Die Differenz lässt sich damit begründen, dass zu Beginn der Kurzschlussphase in den Messserien bei 30 und 40 °C zunächst noch positive Ladungsansammlungen an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer (B) ($t=0,3 \mu\text{s}$ in [Abbildung 6.8](#)) vorhanden sind, welche ebenfalls eine Spiegelladung an der HV-Elektrode hervorrufen. Nachdem diese Ladungen (B) in Minute 20 vollständig abgebaut sind, hängt die influenzierte Elektrodenladung im restlichen Betrachtungszeitraum ausschließlich von den Heterocharges in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode ab und es ergibt sich ein gleiches Abklingverhalten.

Dieser Effekt ist weiterhin in [Abbildung 6.8a](#) in der Messserie mit 10 °C zu sehen. Hier lässt sich beobachten, dass sich die Heterocharges während der Kurzschlussphase von einer Stunde nicht abzubauen scheinen, die Elektrodenladung (A) allerdings in der Amplitude sinkt. Dies ist auf den Abbau der Grenzflächenladung zwischen Silikonfett und Silikonelastomer (B) zurückzuführen, welcher den Anteil der Spiegelladung an der HV-Elektrode (A) minimiert.

6.2.2 Analyse des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus in Abhängigkeit von der Temperatur

In diesem Abschnitt wird die zeitliche Entwicklung des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus an unterschiedlichen Orten in der Modellanordnung in Abhängigkeit der Temperatur auf Basis desselben Datensatzes analysiert.

Dazu wird in **Abbildung 6.10** zunächst die zeitliche Entwicklung der Elektrodenladung, also die Ladung zwischen HV-Elektrode und dem Silikonfett (A), während der Polarisationsphase und Kurzschlussphase dargestellt.

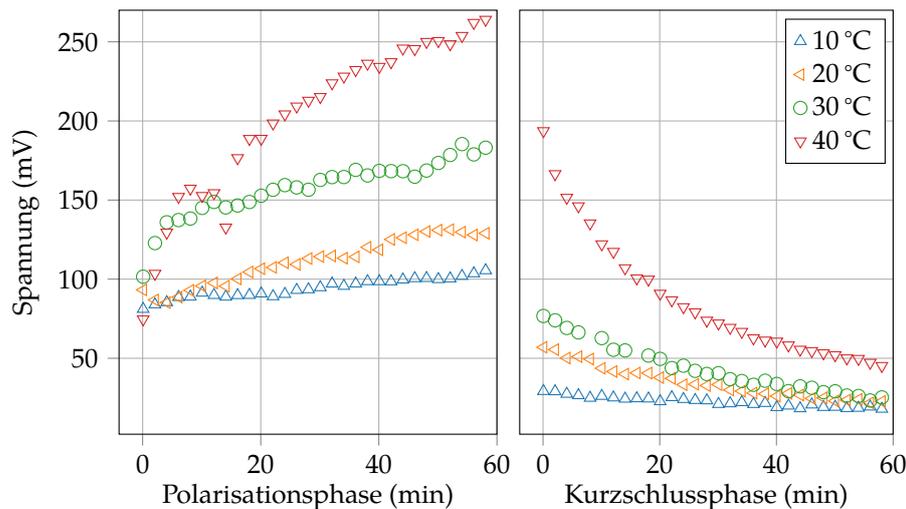


Abbildung 6.10: Temperaturabhängigkeit des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus der Elektrodenladung während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit jeweils 3 kV für 60 min (links) sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen (rechts)

Für die Darstellung wird der Maximalwert des ersten Peaks während der Polarisationsphase (zeitäquivalenter Ort bei $t=0\mu\text{s}$ in **Abbildung 6.6**) sowie der Kurzschlussphase (zeitäquivalenter Ort bei $t=0\mu\text{s}$ in **Abbildung 6.8**) über der Zeit aufgetragen. Jede Markierung entspricht dabei einem Datenpunkt innerhalb einer aufgenommenen LIPP-Messung, womit die Polarisations- und Kurzschlussphase folglich auf jeweils dreißig LIPP-Profilen basiert. Bei Betrachtung der Messserien zeigt sich für jede Temperatur ein Anstieg der Elektrodenladung während der Polarisationsphase, wobei sich mit steigenden Temperaturen eine zunehmend größere Ladungsmenge aufbaut.

Die Elektrodenladung hängt direkt mit dem elektrischen Feld zusammen, welches an der Oberfläche der HV-Elektrode herrscht,

wie es in [Gleichung \(2.16\)](#) beschrieben wurde. Es lässt sich deshalb indirekt aus dieser Abbildung ableiten, dass bei einem Anstieg der Elektrodenladung eine höhere elektrische Feldstärke an der Oberfläche der HV-Elektrode herrschen muss. Dies ist vor allem im Hinblick darauf offensichtlich, dass sich bei höheren Temperaturen, wie in [Abbildung 6.8d](#) für 40 °C gezeigt, signifikante Heterocharges ansammeln. Eine Ansammlung von Heterocharges in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode führt wiederum zu einer Feldüberhöhung in diesem Bereich und somit auch zu einer größeren Feldstärke an der Oberfläche der HV-Elektrode, was weiterhin in [Abbildung 2.9](#) schematisch dargestellt wurde.

Nach Abschluss der einstündigen Polarisationsphase folgt der Ladungsabbau der Elektrodenladung während der Kurzschlussphase (siehe [Abbildung 6.10](#)). Hier ist der Abbauprozess in der Messserie mit 40 °C aufgrund der größeren Ladungsmenge im Betrachtungszeitraum noch nicht abgeschlossen, wohingegen in den Messserien mit 10, 20 und 30 °C nach 60 min eine wesentlich geringere Ladungsmenge vorhanden ist. Weiterhin ist ein signifikanter Sprung von der letzten Messung der Polarisationsphase zur ersten Messung der Kurzschlussphase zu beobachten. Dies liegt daran, dass der Anteil der externen Spannung zur Ladungsansammlung an der HV-Elektrode instantan verschwindet, wie bereits in den vorherigen Abschnitten erklärt wurde. Die Elektrodenladung während der Kurzschlussphase besteht folglich ausschließlich aus einer von der im Volumen der Prüfkörperanordnung vorherrschenden Raumladungsverteilung influenzierten Spiegelladung.

Nachdem der Ladungsaufbau und Ladungsabbau der Elektrodenladung beschrieben wurde, wird in den folgenden Abbildungen das Verhalten innerhalb der Modellanordnung betrachtet. Hierzu zeigt [Abbildung 6.11](#) den Ladungsaufbau und Ladungsabbau im Silikonfett in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort innerhalb der Prüfkörperanordnung bei $t=0,05\ \mu\text{s}$ in [Abbildung 6.6](#) bzw. [Abbildung 6.8](#)). Wie in der Abbildung zu sehen ist, beginnen alle Messserien der Polarisationsphase mit einem leicht positiven Wert. In der Messserie mit 10 °C kommt es zu einem geringen Ladungsaufbau. Bei Betrachtung der Messserien mit 20, 30 und 40 °C hingegen baut sich eine deutliche negative Ladung auf (Heterocharge). Weiterhin fällt auf, dass die Zeitkonstanten der vier untersuchten Temperaturen deutlich voneinander abweichen. Die Messung mit 40 °C zeigt eine zunächst stark ansteigende negative Ladung, bevor sie ihr Plateau bei ca. $-50\ \text{mV}$ erreicht. In der Messung mit 30 °C ist der Ladungsaufbau geringer und das Plateau bildet sich später aus. Die Messserie mit 20 °C zeigt hingegen keine Ausbildung eines Plateaus im Betrachtungszeitraum.

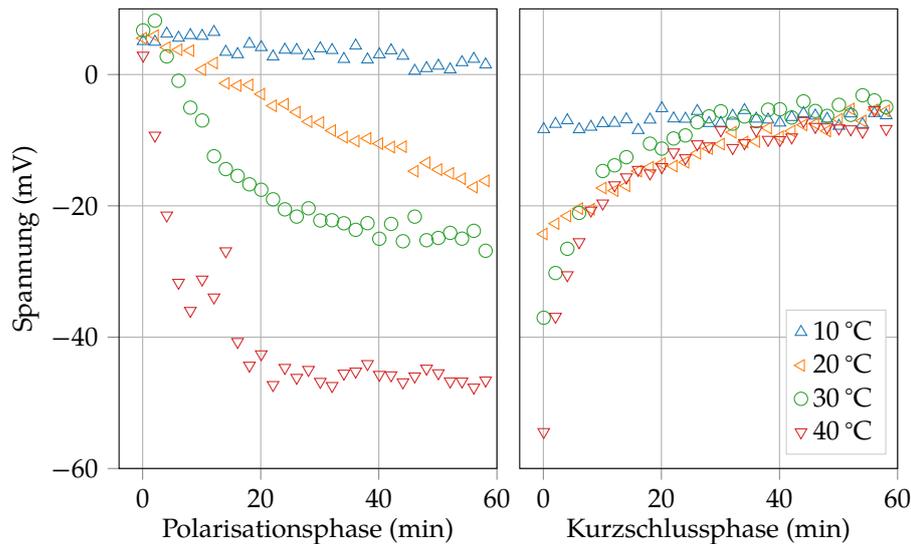


Abbildung 6.11: Ladungsaufbau und Ladungsabbau in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05\ \mu\text{s}$) während der Polarisationsphasen mit jeweils 3 kV (links) sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen (rechts)

In [Abbildung 6.11](#) wird weiterhin das Abbauverhalten in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode gezeigt (zeitäquivalenter Ort innerhalb der Prüfkörperanordnung bei $t=0,05\ \mu\text{s}$ in [Abbildung 6.8](#)). Zunächst fällt auf, dass der Ladungswert der ersten Messung der Kurzschlussphase bei allen Temperaturen höher ist als der Wert der letzten Messung der Polarisationsphase. Dies ist erneut damit zu erklären, dass nach dem Kurzschluss das von der externen Spannung überlagerte positive elektrische Feld nicht mehr vorhanden ist. Außerdem lässt sich beobachten, dass das Ladungsniveau gegen Ende der einstündigen Kurzschlussphase für die vier untersuchten Temperaturen gleich ist, wobei weiterhin Restladungen vorhanden sind. Zu Beginn der Kurzschlussphase ändert sich der Abbau analog zum Verhalten in der Polarisationsphase mit unterschiedlichen Zeitkonstanten, wobei sich die Heterocharges in der Messung mit $40\ ^\circ\text{C}$ wesentlich schneller abbauen als im Fall von 20 oder $30\ ^\circ\text{C}$.

Abschließend soll das temperaturabhängige Ladungsaufbauverhalten und Ladungsabbauverhalten an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und dem Silikonprüfkörper (B) untersucht werden. Hierzu wird zunächst die zusammenfassende Darstellung aus [Abbildung 6.6](#) betrachtet: Die bereits beschriebene Elektrodenladung (zeitäquivalenter Ort in der Prüfkörperanordnung bei $t=0\ \mu\text{s}$) und die Ladung in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort in der Prüfkörperanordnung bei $t=0,05\ \mu\text{s}$) treten aufgrund der gleichbleibenden Triggerung des Oszilloskops durch den Laser stets zur gleichen Zeit auf. Aufgrund des sich durch die Prüfkörperpräparation

ergebenden Fehlers, welcher in [Abschnitt 5.6](#) beschrieben ist, tritt das Signal an der Grenzfläche (B) bei den untersuchten Temperaturen an unterschiedlichen zeitäquivalenten Orten auf ($t=0,25 \mu\text{s}$ bis $0,3 \mu\text{s}$). Deshalb wird für diese Grenzfläche der zeitäquivalente Ort des Minimums der ersten Messung einer Messserie als Betrachtungsort für die jeweilige Messserie verwendet. Das resultierende Aufbauverhalten am definierten Ort während der Polarisationsphase und Kurzschlussphase ist in [Abbildung 6.12](#) dargestellt.

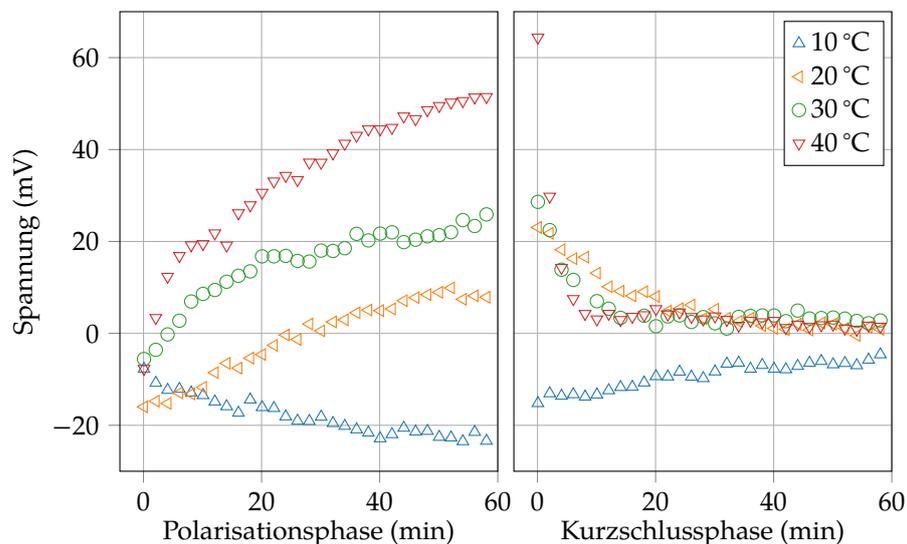


Abbildung 6.12: Temperaturabhängigkeit des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit jeweils 3 kV für 60 min (links) sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen (rechts)

Der Ausgangswert der Grenzflächenladung (B) während der Polarisationsphase ist für die vier untersuchten Temperaturen leicht negativ. Es kommt im weiteren Verlauf allerdings zu einer signifikant unterschiedlichen Entwicklung der Raumladungsansammlung an dieser Grenzfläche. Bei einer Temperatur von 10 °C bauen sich vermehrt negative Ladungen an der Grenzfläche auf. Im Gegensatz dazu findet für die Temperaturen von 20 , 30 und 40 °C im Verlauf der Polarisationsphase ein Wechsel von einer negativen zu einer positiven Ladung statt, wobei sich dieser für höhere Temperaturen schneller vollzieht.

Auch in [\[Yin+11\]](#) wurde zwischen LDPE und EPDM beobachtet, dass sich an der Grenzfläche bei niedrigen Temperaturen negative Ladung und bei höheren Temperaturen positive Ladung ansammelt.

In **Abbildung 6.12** zeigt sich im anschließenden Abbauverhalten während der Kurzschlussphase, dass es in der Messserie mit 10 °C im Betrachtungszeitraum zu keinem vollständigen Abbau der Grenzflächenladung (B) kommt, wobei bei 20, 30 und 40 °C bereits nach ca. 20 min der gemessene Ladungswert im Bereich des Grundrauschens liegt. Wie bereits in vorherigen Messungen gezeigt wurde, baut sich die Grenzflächenladung (B) bei höheren Temperaturen (40 °C) schneller ab als bei 30 oder 20 °C.

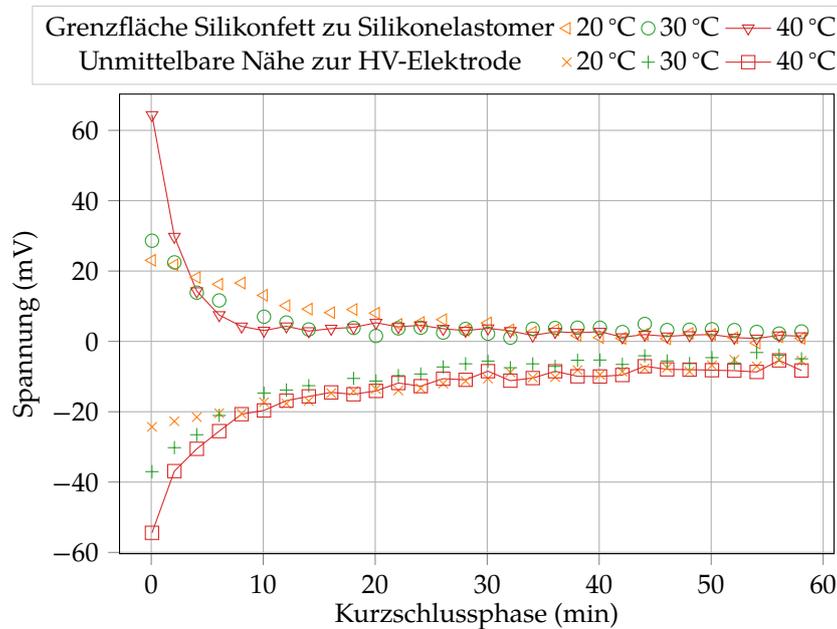


Abbildung 6.13: Vergleich des Ladungsabbaus in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05 \mu\text{s}$) sowie an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer nach Polarisierung mit 3 kV für jeweils 60 min

Abschließend wird in **Abbildung 6.13** das temperaturabhängige Abbauverhalten der Heterocharges sowie der Ladungen an der Grenzfläche verglichen. In den Messserien mit 40 °C zeigt sich, dass es an der Grenzfläche vom Silikonfett zum Silikonelastomer zu einem wesentlich schnelleren Abbau der Raumladung kommt als innerhalb des Silikonfetts in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode. Der gleiche Trend ist auch für die Temperaturen von 20 und 30 °C zu beobachten.

6.3 EINFLUSS DER ELEKTRISCHEN FELDSTÄRKE

In einer Veröffentlichung im Vorfeld dieser Arbeit wurde der Einfluss der elektrischen Feldstärke auf das Raumladungsverhalten in der Modellanordnung bereits anhand einer Vorstudie teilweise beschrieben [SIP18a]. Da zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung das automatische Beschichtungssystem noch nicht einsatzbereit war, konnten ausschließlich Messungen während der Kurzschlussphase, aber nicht während der Polarisationsphase durchgeführt werden. Im Gegensatz dazu wird im folgenden Abschnitt das feldstärkeabhängige Raumladungsverhalten bei 20 °C während der Polarisations- und Kurzschlussphase mit dem entwickelten automatisierten LIPP-Messsystem gezeigt.

6.3.1 Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die Raumladungsverteilung innerhalb der Modellanordnung

In diesem Abschnitt werden Versuche mit 1, 2, 3 und 4 kV bei 20 °C durchgeführt. Die Versuchsdurchführung entspricht hierbei dem bereits in Abschnitt 6.1 beschriebenen Vorgehen. Dabei wird für jede Spannung eine Polarisationsphase von 60 min mit Aufnahme von 30 Messungen sowie eine sich unmittelbar anschließende Kurzschlussphase von ebenfalls 60 min und Aufnahme von 30 Messungen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe während der Polarisationsphase ist in Abbildung 6.15 (Seite 90) dargestellt. Für eine übersichtlichere Präsentation der Daten wurden ausschließlich fünf ($t=0, 10, 20, 40$ und 60 min) der dreißig aufgenommenen LIPP-Profile während der Polarisationsphase dargestellt.

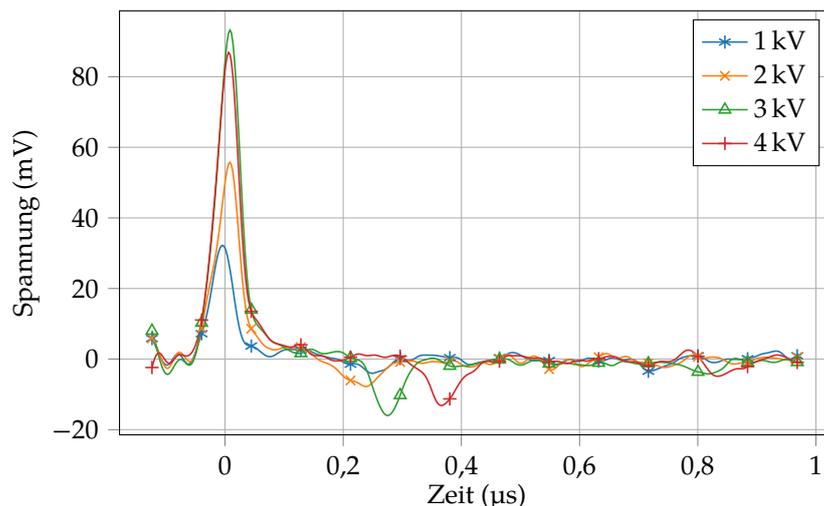


Abbildung 6.14: Erste Messung der Polarisationsphase bei $t=0$ min der jeweiligen Messserien mit 1, 2, 3 und 4 kV

Zunächst soll in [Abbildung 6.14](#) der Ausgangszustand bzw. die erste Messung direkt nach Anlegen der Spannung bei $t=0$ min von jeder Messserie betrachtet werden. Hier fällt auf, dass zunächst alle LIPP-Profile erneut die bereits in den Messungen zur Temperaturabhängigkeit (siehe [Abbildung 6.4](#)) beschriebene Ausgangsform aufweisen. Auch hier wird davon ausgegangen, dass zu Beginn des Versuchs keine Raumladungen im Volumen der Prüfkörperanordnung vorhanden sind und lediglich die Grenzflächenladungen im Signal sichtbar werden. Weiterhin lässt sich ein Ansteigen des ersten Peaks (A) mit steigenden Spannungen beobachten, was sich auf den Zusammenhang der elektrischen Feldstärke an der Oberfläche der HV-Elektrode mit der messbaren Oberflächenladungsdichte (siehe [Gleichung \(2.16\)](#)) zurückführen lässt. Obwohl der Anstieg des ersten Peaks (30, 55, 85 mV) mit den Spannungen (1 kV bis 3 kV) korreliert, trifft dieses Verhalten nicht auf die Messung mit 4 kV zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fettschicht in dieser Messserie dicker zu sein scheint und damit der negative Peak (B) nicht bei $0,3 \mu\text{s}$ zu finden ist, sondern deutlich nach rechts versetzt auftritt. Dieses Verhalten wurde in [Abbildung 4.5](#) auch in einem anderen Zusammenhang beschrieben: Eine dickere Fettschicht führt zu einer Minimierung der elektrischen Feldstärke und somit zu einer Reduzierung der Oberflächenladungsdichte, was mit einem Peak mit niedrigerer Amplitude einhergeht.

Im weiteren Verlauf der Polarisationsphase von 0 bis 60 min (siehe [Abbildung 6.15](#)) bilden sich für alle vier gezeigten Spannungen Heterocharges an der HV-Elektrode aus, wie es auch in den Versuchen zur Temperaturabhängigkeit bei 20°C beobachtet wurde. Bei Betrachtung der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer (B) (zeitäquivalenter Ort von ca. $t=0,3 \mu\text{s}$) lässt sich feststellen, dass es bei 1 kV sowohl zur Ausbildung einer negativen als auch einer positiven Ladung kommt. Auch bei einer Spannung von 2 und 3 kV baut sich eine positive sowie negative Ladung auf, wobei die Messung mit 4 kV zeigt, dass bei höheren elektrischen Feldstärken die positive Ladung an der Grenzfläche (B) der negativen gegen Ende der Polarisationsphase überwiegt. Bei Analyse der Raumladungsverteilung im Silikonelastomer (zeitäquivalenter Ort von ca. $t=0,3 \mu\text{s}$ bis $0,8 \mu\text{s}$) ist im Versuch mit 1 kV an der Erdelektrode sowie im Volumen ein Ladungsaufbau festzustellen. Im Fall von 2 kV lässt sich dieses Verhalten ebenso beobachten: An der Erdelektrode kommt es zu einem Aufbau von positiven Heterocharges, welche in Richtung Mitte des Plattenprüfkörpers abnehmen. Anschließend ist in der Nähe der Grenzfläche zum Silikonfett erneut der Aufbau einer positiven Ladungsansammlung zu beobachten.

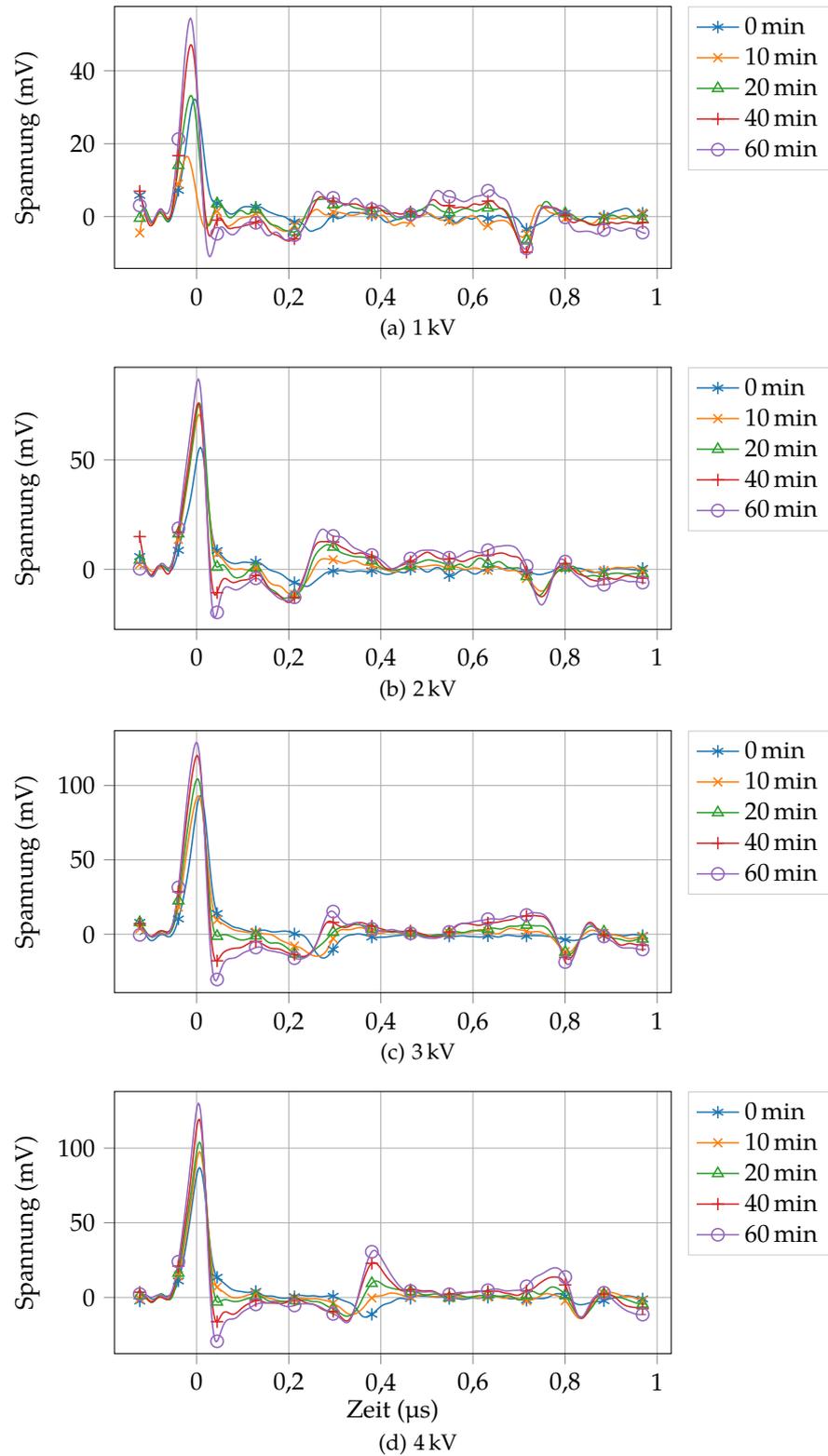


Abbildung 6.15: Feldstärkeabhängiges Raumladungsverhalten der Modellordnung bei 20 °C während der Polarisationsphase von 60 min

Das gleiche Verhalten zeigt sich in den Messungen mit einer externen Spannung von 3 kV und 4 kV, wobei sich mit zunehmender Spannung verstärkt positive Ladung an der Grenzfläche zum Silikonfett und zur Erdelektrode ansammelt und im mittleren Bereich des Plattenprüfkörpers mit steigenden Spannungen weniger Ladung vorzufinden ist.

Im Anschluss an die beschriebene Polarisationsphase erfolgt der automatische Kurzschluss der Modellanordnung, wobei die letzte Messung der Polarisationsphase bei $t=60$ min und die erste Messung der Kurzschlussphase bei $t=0$ min mit 4 kV vergleichend in [Abbildung 6.16](#) dargestellt werden.

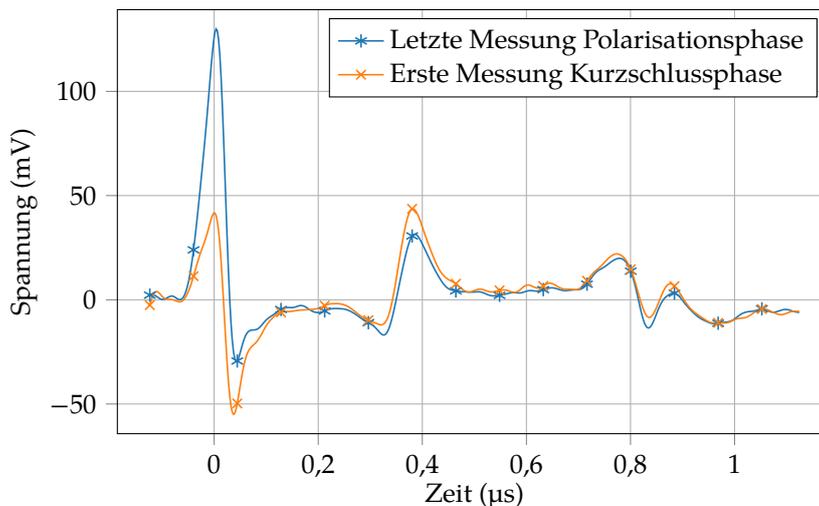


Abbildung 6.16: Darstellung der letzten Messung der Polarisationsphase nach Beaufschlagung mit 4 kV für 60 min sowie der ersten Messung der Kurzschlussphase

Wie bereits analog im Kapitel zur Temperaturabhängigkeit beschrieben wurde, ist auch hier ein signifikanter Unterschied im LIPP-Profil an der HV-Elektrode zu erkennen, wobei sich das Ladungsbild innerhalb der Prüfkörperanordnung nicht unterscheidet, was dafür spricht, dass die im Material aufgebauten Ladungen direkt nach dem Kurzschluss der Modellanordnung weiterhin vorhanden sind. Der darauffolgende Ladungsabbau in der Kurzschlussphase wird in [Abbildung 6.17](#) dargestellt. Bei der Betrachtung der jeweiligen Ausgangswerte bei $t=0$ min lässt sich feststellen, dass diese auch bei den Spannungen von 1, 2 und 3 kV dem jeweiligen Endwert der Polarisationsphase bei 60 min in [Abbildung 6.15](#) entsprechen. Weiterhin wird deutlich, dass sich Ladung innerhalb der Prüfkörperanordnung (zeitäquivalenter Ort von $t=0$ µs bis $0,8$ µs) schneller abzubauen scheint als Ladung an den Elektroden. Eine genauere Beschreibung dieses zeitlichen Auf- und Abbauverhaltens von Ladung innerhalb der Modellanordnung wird im nächsten Abschnitt vorgenommen.

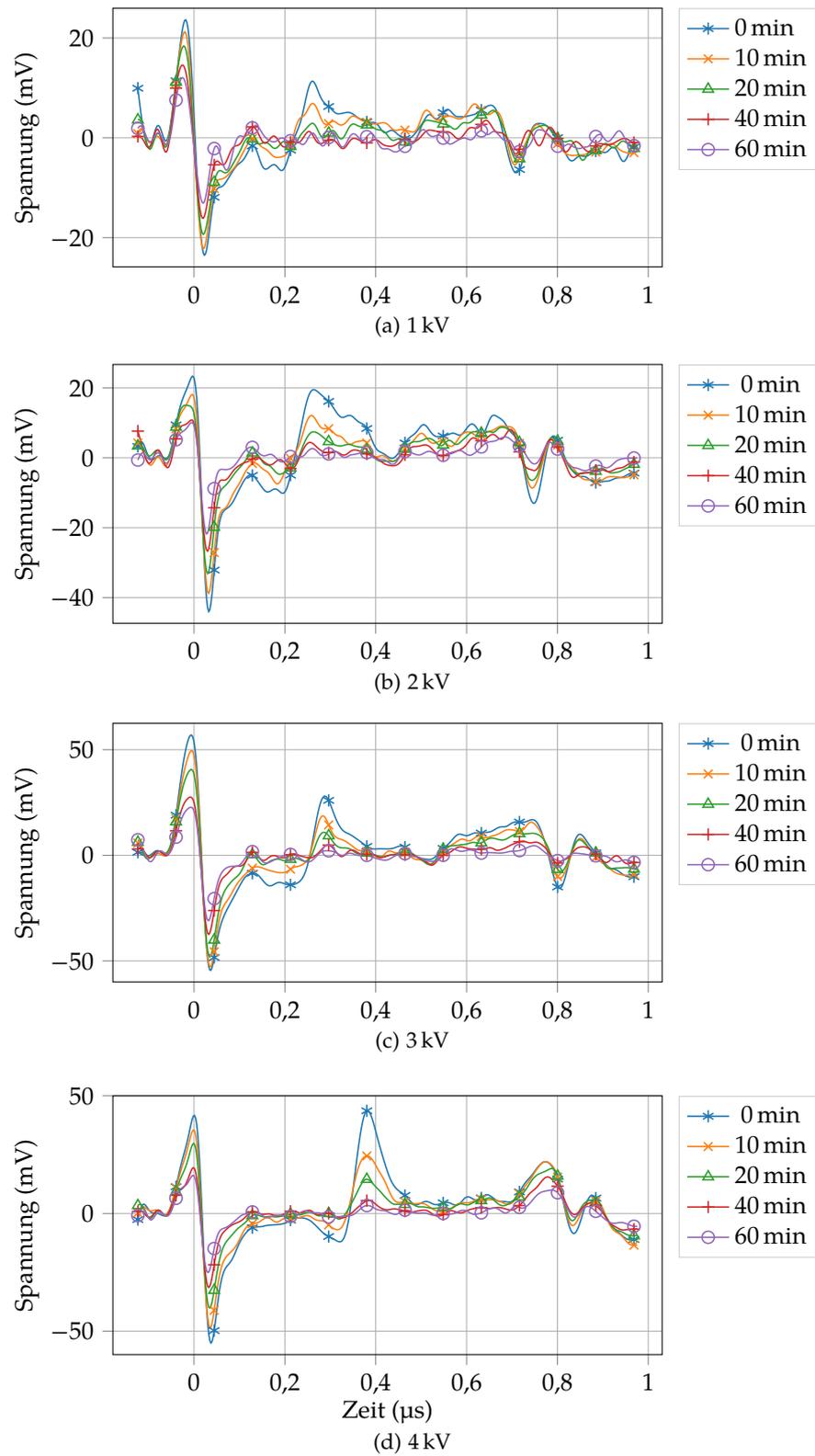


Abbildung 6.17: Feldstärkeabhängiges Raumladungsverhalten der Modellordnung während der Kurzschlussphase nach Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV für jeweils 60 min bei 20 °C

6.3.2 Analyse des Ladungsaufbaus und Ladungsabbaus in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke

In **Abbildung 6.18** wird der Aufbau und Abbau der Elektrodenladung (Grenzfläche von der HV-Elektrode zum Silikonfett (A)) während der Polarisations- und Kurzschlussphase von jeweils 60 min gezeigt. Wie bereits im Abschnitt zur Temperaturabhängigkeit beschrieben, wird der Maximalwert des ersten Peaks innerhalb des LIPP-Profiles (siehe **Abbildung 6.15** für die Polarisationsphase und **Abbildung 6.17** für die Kurzschlussphase) über der Zeit aufgetragen, wobei jede Markierung innerhalb der folgenden Abbildungen jeweils einem Datenpunkt eines LIPP-Profiles entspricht.

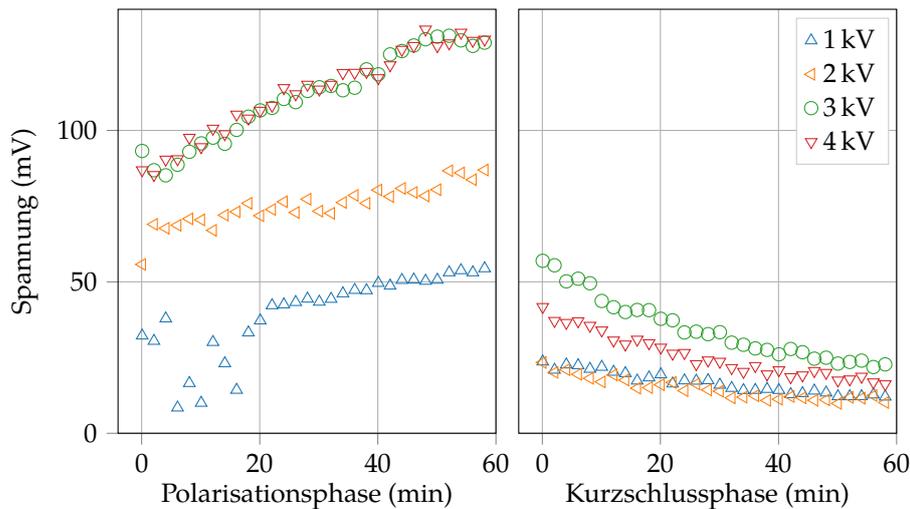


Abbildung 6.18: Ladungsaufbau und Ladungsabbau der Elektrodenladung während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV (links) sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen (rechts)

Während der Polarisationsphase in der Messserie mit 1 kV streuen die Werte in den ersten 20 min deutlich, wobei dies nicht auf einen Raumladungseffekt, sondern vielmehr auf einen kurzzeitigen Ausfall des automatischen Beschichtungssystems zurückzuführen ist. Bei dem Vergleich des Ausgangswertes bei 0 min fällt auf, dass sich dieser bei 1, 2 und 3 kV mit ca. 30, 60 und 90 mV jeweils um 30 mV vergrößert. Diese Differenz in der Amplitude lässt sich anhand der **Gleichung (2.16)** erklären: Die elektrische Feldstärke an der Oberfläche der HV-Elektrode und die Elektrodenladung der HV-Elektrode sind linear abhängig, was auch in den Messdaten ersichtlich ist. Die geringe Differenz zwischen den Messserien mit 3 und 4 kV lässt sich teilweise mit dem Fehler aufgrund der Präparation bei Verwendung eines neuen Prüfkörpers (**Abschnitt 5.6**) erklären, welcher dort mit 15 mV bestimmt wurde. Dieser Fehler kommt durch die dickere Fettschicht zustande, wie bereits anhand der **Abbildung 6.14**

beschrieben wurde. Interessant ist der folgende Ladungsabbau in der Kurzschlussphase. Auch wenn der Ladungsaufbau bei 3 und 4 kV annähernd identisch ist, zeigt die Kurve für den Ladungsabbau Unterschiede auf.

Für die weitere Beurteilung des Verhaltens bei höheren Feldstärken wäre die Durchführung von Versuchen mit einer Spannung von bis zu 10 kV sinnvoll. Dieser Spannungsbereich übersteigt allerdings die Maximalspannung der jetzigen Prüfwelle. Es ist geplant, im Anschluss an diese Arbeit eine neue Prüfwelle mit erweitertem Feldstärkebereich zu entwickeln.

Das Raumladungsverhalten während der Polarisationsphase und Kurzschlussphase in unmittelbarer Nähe der HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05 \mu\text{s}$ in [Abbildung 6.15](#) für die Polarisationsphase und [Abbildung 6.17](#) für die Kurzschlussphase) wird in [Abbildung 6.19](#) dargestellt.

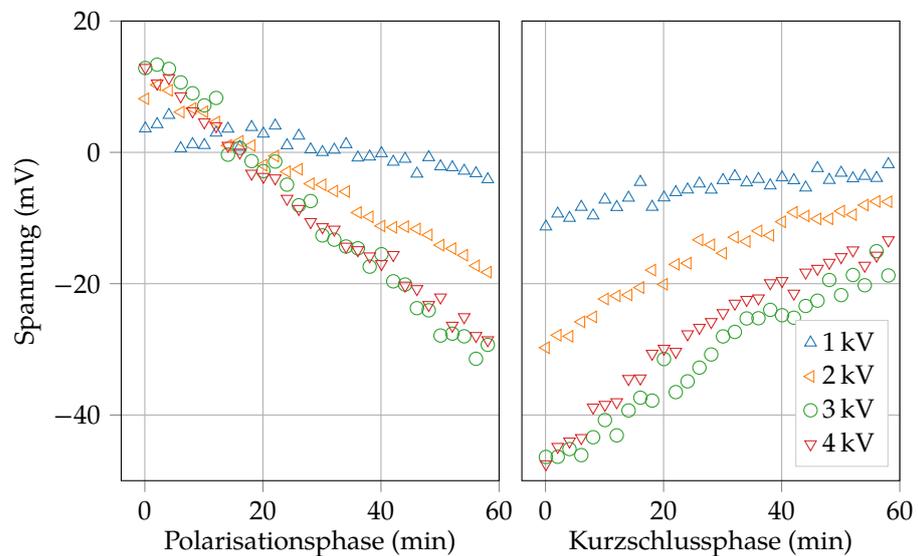


Abbildung 6.19: Ladungsaufbau und Ladungsabbau in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05 \mu\text{s}$) während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV (links) sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen (rechts)

Bei Betrachtung der Ladungsverhältnisse an diesem Ort in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke lässt sich während der Polarisationsphase ein negativer Anstieg von Heterocharges feststellen: Bei einer externen Spannung von 1 kV kommt es zu einem geringeren Anstieg als bei 2 kV. In der sich an die Polarisationsphase anschließenden Kurzschlussphase ändert sich der Abbau der Heterocharges bei 3 und 4 kV mit einer signifikant höheren Steigung der

Kurve im Vergleich zu den Versuchen mit 1 oder 2 kV. Im Gegensatz dazu zeigte das Ladungsverhalten an diesem Ort in den Versuchen zur Temperaturabhängigkeit, das in [Abbildung 6.11](#) dargestellt wurde, ein mit steigender Temperatur zunehmend exponentielles Verhalten.

Abschließend ist in [Abbildung 6.20](#) der Ladungsaufbau und Ladungsabbau an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer (B) während der Polarisationsphase und Kurzschlussphase dargestellt.

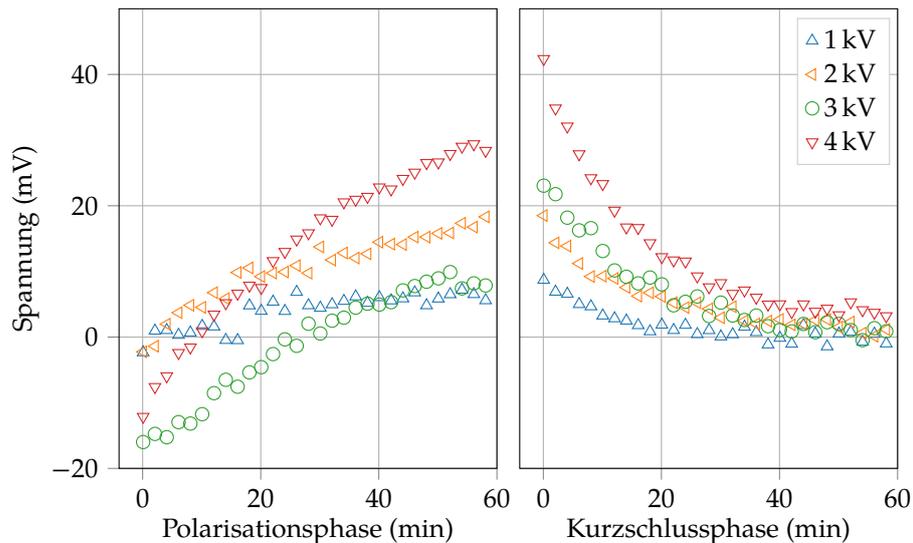


Abbildung 6.20: Ladungsaufbau und Ladungsabbau an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer (B) während der Polarisationsphasen unter Beaufschlagung mit 1, 2, 3 und 4 kV (links) sowie der sich anschließenden Kurzschlussphasen (rechts)

Hier zeigt sich, dass die Ladung an der Grenzfläche zu Beginn der Polarisationsphasen jeweils negativ ist, was der bereits mehrfach beschriebenen Ausgangssituation entspricht. Mit fortschreitender Versuchsdauer bilden sich jeweils positive Ladungen an der Grenzfläche heraus. Auch hier gibt es im Betrachtungszeitraum kein starkes exponentielles Verhalten. Das Abbauverhalten der Ladungen während der Kurzschlussphase zeigt im Gegensatz dazu, dass im Vergleich zu den anderen untersuchten Orten in diesem Abschnitt im Betrachtungszeitraum von einer Stunde ein stärkeres exponentielles Verhalten vorliegt. Zum Ende der Kurzschlussphase bei $t=60$ min ist an der Grenzfläche keine Ladung mehr vorhanden. Damit bauen sich die Raumladungen innerhalb der Modellanordnung wesentlich schneller ab als an der HV-Elektrode und in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode.

Zur genaueren Analyse des ortsabhängigen Ladungsabbaus wird in **Abbildung 6.21** das Abbauverhalten während der Kurzschlussphase in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05\ \mu\text{s}$ in **Abbildung 6.15**) sowie an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer (B) verglichen.

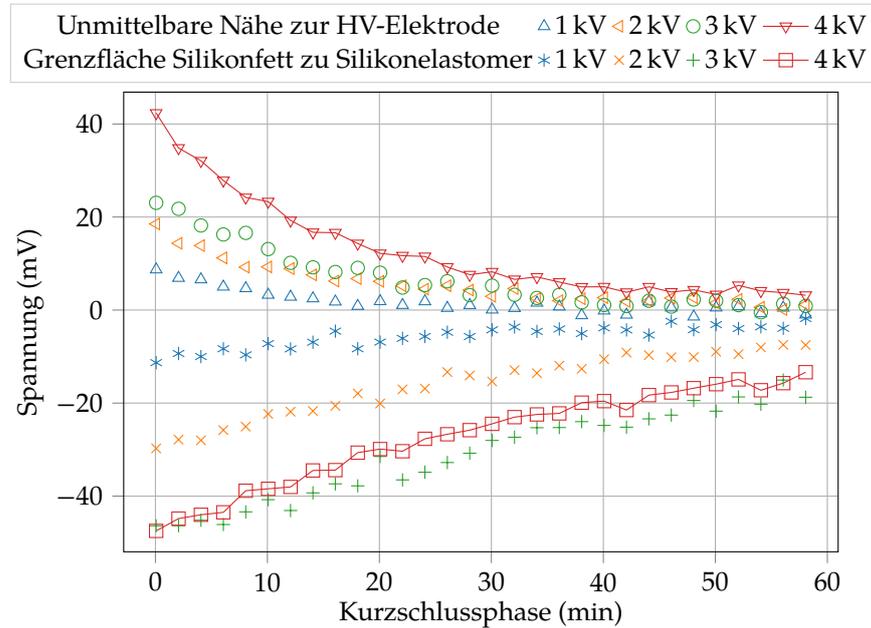


Abbildung 6.21: Vergleich des Ladungsabbaus in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode (zeitäquivalenter Ort bei $t=0,05\ \mu\text{s}$ in **Abbildung 6.15**) sowie an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer nach Polarisation mit 1, 2, 3 und 4 kV für jeweils 60 min

In **Abbildung 6.13** wurde bereits gezeigt, dass sich die Grenzflächenladung (B) unabhängig von der Temperatur schneller abbaut als die Ladung im Silikonfett in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode. Das gleiche Verhalten lässt sich hier in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke beobachten. Bei Betrachtung der Messserie mit 4 kV kommt es hier zu einer wesentlich schnelleren Reduzierung der Grenzflächenladungen im Vergleich zu den Heterocharges im Silikonfett. Auch für die anderen untersuchten Spannungen trifft dieses Verhalten zu. Daraus kann zusammenfassend geschlossen werden, dass es in der Modellanordnung unabhängig von der Spannung zu einem schnelleren Abbau der Grenzflächenladungen im Vergleich zu den Heterocharges in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode kommt.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode für wiederholbare Raumladungsmessungen an dielektrischen Schichtanordnungen auf Grundlage des LIPP-Prinzips. Die Entwicklung der Methode, die Interpretation des resultierenden Messsignals sowie die Fehlerbetrachtung werden im ersten Teil der Arbeit vorgestellt. Im zweiten Teil wird die entwickelte Methode dazu verwendet, das Raumladungsverhalten an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer in Kabelgarnituren in Abhängigkeit von der Temperatur und der elektrischen Feldstärke zu beschreiben. Dazu werden Versuche an einer Modellanordnung durchgeführt, die aus einer von Messingelektroden umschlossenen Schichtanordnung aus Silikonfett und Silikonelastomer besteht.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des ersten Teils (i-vii) sowie des zweiten Teils (viii-xi) der Arbeit vorgestellt. Anschließend werden ausblickend weitere Möglichkeiten zur Optimierung des Messsystems sowie zur weitergehenden Charakterisierung der betrachteten dielektrischen Schichtanordnung dargelegt.

Im ersten Teil wird zunächst in **Kapitel 3** der Versuchsaufbau beschrieben. Das entwickelte System hebt sich dadurch von anderen Raumladungsmesssystemen auf Basis des LIPP-Prinzips ab, dass Messungen vollautomatisiert über einen Zeitraum von Stunden und Tagen durchgeführt werden können, wobei folgendes Ergebnis hervorgehoben werden soll:

- i) Im Zusammenhang mit der Optimierung der Versuchsparameter konnte gezeigt werden, dass die Laserpulsenergie keinen signifikanten Einfluss auf die Signalstärke hat, aber eine Veränderung des Strahldurchmessers zu einer wesentlichen Verbesserung des Signalpegels führt.

Im Anschluss an die Beschreibung des Messsystems wird in **Kapitel 4** das resultierende LIPP-Profil interpretiert. Die Ergebnisse werden im Folgenden aufgeführt:

- ii) Durch die Berechnung des theoretischen Reflexionsverhaltens der Druckwelle innerhalb der Modellanordnung konnte dem gesamten LIPP-Profil, bestehend aus Nutzsignal sowie folgenden Reflexionsanteilen, ein theoretisch berechneter Ort innerhalb der Modellanordnung zugewiesen werden.

- iii) Es konnte bewiesen werden, dass bei Verwendung von Silikonöl als Koppelmaterial keine messbare Raumladung an der Grenzfläche zwischen der HV-Elektrode und dem Silikonöl entsteht und folglich keine Elektrodenladung messbar ist, wie teilweise in der Fachwelt angenommen wird.
- iv) Weiterhin wurde festgestellt, dass diese Elektrodenladung bei Verwendung von Silikonfett als Koppelmaterial deutlich vom Messsystem aufgelöst werden kann. Der beschriebene Effekt wird damit erklärt, dass die geringere Leitfähigkeit des Silikonfetts im Gegensatz zum Silikonöl eine Erhöhung des elektrischen Feldes im Silikonfett nach sich zieht, was somit zu einer messbaren Elektrodenladung führt.

In **Kapitel 5** wird die Wiederholbarkeit von Messungen und Messserien mit der entwickelten Methode beschrieben, wobei sich die Ergebnisse folgendermaßen zusammenfassen lassen:

- v) Anhand von Versuchen wurde erstmals nachgewiesen, dass auf Basis des LIPP-Prinzips mit der entwickelten Methode wiederholbare Messungen durchgeführt werden können. Dies wurde durch die Verwendung eines automatischen Beschichtungssystems erreicht, das vor jeder Messung und somit vor jeder Entstehung eines Plasmas auf der HV-Elektrode eine neue Schicht Material auf die Oberfläche der HV-Elektrode aufträgt. Dies führt dazu, dass gleichbleibende Oberflächenbedingungen und somit ein reproduzierbares Druckprofil erzeugt werden können.
- vi) Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass das Raumladungsverhalten an der Modellanordnung bei konsekutiven Wiederholungen ohne zwischenzeitliche Präparation (erneutes Auflegen des Prüfkörpers und Auftragen des Silikonfetts) mit großer Präzision wiederholbar messbar ist.
- vii) Außerdem wurde beobachtet, dass bei Wiederholung einer Messserie mit zwischenzeitlich erneuter Präparation der Schichtanordnung ein signifikant höherer Fehler auftritt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird mit der entwickelten Methode in **Kapitel 6** das Raumladungsverhalten an der Modellanordnung in Abhängigkeit von der Temperatur und der elektrischen Feldstärke während einer Polarisationsphase und einer sich anschließenden Kurzschlussphase von jeweils 60 min beschrieben. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- viii) Bei Beaufschlagung der Modellanordnung mit einer Temperatur von 10 °C konnte keine Ansammlung von Heterocharges im Silikonfett beobachtet werden, wobei sich mit steigenden Temperaturen von 10 °C bis 40 °C zunehmend Heterocharges

herausbilden. Das Aufbauverhalten und Abbauverhalten dieser Heterocharges hat einen mit zunehmender Temperatur ansteigenden exponentiellen Charakter.

- ix) Weiterhin wurde nachgewiesen, dass sich an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer bei Temperaturen von 10 °C negative Ladungen ansammeln. Steigt die Temperatur von 10 °C bis 40 °C, so bildet sich im Laufe der Polarisationsphase eine zunehmend positive Ladung an der Grenzfläche aus.
- x) Es konnte gezeigt werden, dass sich unabhängig von der elektrischen Feldstärke die Grenzflächenladung zwischen Silikonfett und Silikonelastomer schneller abbaut, als Heterocharges in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode.
- xi) Dieses Verhalten wurde auch in den Versuchen zur Abhängigkeit der Temperatur festgestellt. Auch wenn sich der Ladungsabbau im Silikonfett und an der Grenzfläche zwischen Silikonfett und Silikonelastomer mit steigenden Temperaturen jeweils zunehmend schneller vollzieht, baut sich dennoch bei jeder untersuchten Temperatur die Ladung an der Grenzfläche signifikant schneller ab als jene im Silikonfett in unmittelbarer Nähe zur HV-Elektrode.

Nach Beschreibung der Ergebnisse soll im Folgenden erläutert werden, welche weiterführenden Untersuchungen zur Beschreibung des Raumladungsverhaltens der dielektrischen Grenzflächen in Kabelgarnituren sinnvoll sind und welche Erweiterungen des entwickelten Messsystems angestrebt werden.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht in der Weiterentwicklung der LIPP-Methode, weshalb das Raumladungsverhalten ausschließlich anhand einer vereinfachten Modellanordnung beschrieben wurde. Für ein besseres Verständnis und eine realitätsnähere Beschreibung des Raumladungsverhaltens in DC-Kabelgarnituren ist es in einem nächsten Schritt notwendig, die komplexere dielektrische Grenzfläche aus dem Volumenmaterial (Silikonelastomer oder EPDM), dem Silikonfett und der Kabelisolation zu untersuchen. Die Voraussetzungen dafür wurden durch die in dieser Arbeit entwickelte Messmethode geschaffen.

Weiterhin wird in dieser Arbeit das Raumladungsverhalten der Modellanordnung ausschließlich aufgrund der makroskopischen Prozesse der Grenzflächenauf Ladungen beschrieben. Ein weiterer Schritt nach ausführlicheren Messserien könnte die Erklärung der beobachteten Raumladungsphänomene anhand der bekannten Theo-

rien zum Ladungstransport sein.

In diesem Zusammenhang wird z.B. in [RF14; Tal01] gezeigt, dass einige Ladungstransportprozesse, wie die Injektion von Ladungsträgern an den Elektroden, vom Material der Elektrode abhängen. Für die Untersuchung dieser Abhängigkeit müssten weitergehende Versuche durchgeführt werden, da in dieser Arbeit ausschließlich Messingelektroden verwendet wurden.

Im jetzigen Zustand wird die Messzelle indirekt durch die Luft erwärmt, wodurch gleichzeitig die elektronischen Komponenten des Messsystems erwärmt werden. Dies führt dazu, dass keine Versuche über einer Temperatur von 60 °C durchgeführt werden können. Für die Erweiterung des Temperaturbereichs wäre eine direkte Beheizung bzw. Kühlung der Elektrode notwendig.

In der Messzelle ist neben der Elektrode für die LIPP-Messungen bereits eine weitere konzentrisch angeordnete Elektrode zur parallelen Durchführung von PDC-Messungen vorgesehen. Bei paralleler Messung am selben Prüfkörper könnte eine Verbindung zwischen dem Polarisations- bzw. Depolarisationsstrom und dem Raumladungsverhalten hergestellt werden.

In dieser Arbeit wurde Wasser als Beschichtungsmaterial verwendet, obwohl schwarze Markertinte zu einem besseren Signal-Rauschabstand führt. Für eine Erweiterung des Versuchs mit schwarzer Markertinte muss das bestehende Beschichtungssystem so erweitert werden, dass auch Farbe bzw. schwarze Markertinte eingesetzt werden kann.

Abschließend kann festgehalten werden, dass das entwickelte Messsystem die automatische Durchführung und Wiederholung von Messserien mit variablen Spannungsrampen, Temperaturrampen sowie automatischer zwischenzeitlicher Polaritätsumkehr ermöglicht und somit vielfältige Betriebssituationen von DC-Kabelsystemen nachbilden kann. Hiermit wurde die Grundlage für ein besseres Verständnis der Problematik des Raumladungsverhaltens in DC-Kabelgarnituren gelegt. Für eine weitere Annäherung an die reale Raumladungsverteilung in DC-Kabelgarnituren ist die Durchführung von Raumladungsmessungen an der Schichtanordnung aus dem Volumenmaterial (Silikonelastomer oder EPDM) der Garnitur, dem Silikonfett und der Kabelisolation unter realen Betriebssituationen der nächste logische Schritt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [Ada+98] N. Adachi, X. Qin, Y. Tanaka und T. Takada. "Comparison between the PEA method and the PWP method for measuring space charge distributions". In: *1998 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 1998, S. 617–620. DOI: [10.1109/CEIDP.1998.732973](https://doi.org/10.1109/CEIDP.1998.732973).
- [Aga+16] M. Aganbegović, P. Werle, E. Gockenbach und H. Borsi. "Prüfung der elektrischen Festigkeit von speziellen Silikonverbindungen für den Einsatz in HGÜ-Kabeln". In: *ETG-Fb. 150: VDE-Hochspannungstechnik 2016*. 2016, S. 133–138. ISBN: 3800743108.
- [Ben+02] W. Benson, J. W. Harris, H. Stocker und H. Lutz. *Handbook of physics*. 2002. ISBN: 0-387-95269-1.
- [Bes15] Beschluss des Bundesrates. *Gesetz zur Änderung von Bestimmungen des Rechts des Energieleitungsbaus: 595/15 (Beschluss)*. 2015.
- [BMS06] R. Bodega, P. H. F. Morshuis und J. J. Smit. "Space charge measurements on multi-dielectrics by means of the pulsed electroacoustic method". In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 13.2 (2006), S. 272–281. ISSN: 10709878. DOI: [10.1109/TDEI.2006.1624272](https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.1624272).
- [Chi14] F.-C. Chiu. "A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films". In: *Advances in Materials Science and Engineering* 2014 (2014), S. 1–18. DOI: [10.1155/2014/578168](https://doi.org/10.1155/2014/578168).
- [Del+08] S. Delpino, D. Fabiani, G. C. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega und L. A. Dissado. "Feature article - Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part 2: insulation interfaces". In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 24.1 (2008), S. 14–24. ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2008.4455499](https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4455499).
- [DF92] L. A. Dissado und J. C. Fothergill. *Electrical degradation and breakdown in polymers*. Bd. 9. 1992. ISBN: 0863411967.
- [DLL16] B. X. Du, Z. L. Li und J. Li. "Effects of direct fluorination on space charge accumulation in HTV silicone rubber". In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 23.4 (2016), S. 2353–2360. ISSN: 10709878. DOI: [10.1109/TDEI.2016.7556513](https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.7556513).

- [ESD16] S. Ebert, F. Sill und J. Diederichs. "Extruded XLPE DC underground-cable technology and experiences up to 525kV - a key building block for the German "Energie-wende"". In: *VDE High Voltage Technology 2016 - ETG-Symposium*. 2016, S. 8–13.
- [Elb+16] A. Elben, F. Petzold, P. Mohaupt und R. Plath. "Alternative Prüftechniken für lange AC-Hochspannungskabel". In: *ETG-Fb. 150: VDE-Hochspannungstechnik 2016*. 2016, S. 684–689. ISBN: 978-3-8007-4310-0.
- [Fab+07] D. Fabiani, G. C. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega, L. A. Dissado, A. Campus und U. H. Nilsson. "Polymeric HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation. Part 1: Insulation/Semicon Interface". In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 23.6 (2007), S. 11–19. ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2007.4389975](https://doi.org/10.1109/MEI.2007.4389975).
- [Fle05] R. J. Fleming. "Space charge profile measurement techniques: Recent advances and future directions". In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 12.5 (2005), S. 967–978. ISSN: 10709878. DOI: [10.1109/TDEI.2005.1522190](https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1522190).
- [Fol74] D. L. Folds. "Speed of sound and transmission loss in silicone rubbers at ultrasonic frequencies". In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 56.4 (1974), S. 1295–1296. ISSN: 0001-4966. DOI: [10.1121/1.1903422](https://doi.org/10.1121/1.1903422).
- [Fro+18] S. J. Frobin, C. F. Niedik, C. Freye, F. Jenau, D. Haring und G. Schroeder. "A Generic Approach for HVDC Cable Accessories Modelling". In: *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2018. ISBN: 978-1-5386-6389-9. DOI: [10.1109/ICD.2018.8514703](https://doi.org/10.1109/ICD.2018.8514703).
- [Ger83] R. Gerhard-Multhaupt. "Analysis of pressure-wave methods for the nondestructive determination of spatial charge or field distributions in dielectrics". In: *Physical Review B* 27.4 (1983), S. 2494–2503. ISSN: 0163-1829. DOI: [10.1103/PhysRevB.27.2494](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.27.2494).
- [Ger87] R. Gerhard-Multhaupt. "Electrets: Dielectrics with Quasi-Permanent Charge or Polarization". In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* EI-22.5 (1987), S. 531–554. ISSN: 0018-9367. DOI: [10.1109/TEI.1987.299007](https://doi.org/10.1109/TEI.1987.299007).
- [GGG17] 50Hertz Transmission GmbH, TenneT GmbH und Ampri-on GmbH. *Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2017, 2. Entwurf*. 2017.

- [Hac+92] H. Hachiya, S. Ohtsuki, M. Tanaka und F. Dunn. "Determination of sound speed in biological tissues based on frequency analysis of pulse response". In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 92.3 (1992), S. 1564–1568. ISSN: 0001-4966. DOI: [10.1121/1.403897](https://doi.org/10.1121/1.403897).
- [Hae+18] D. Haering, G. Schroeder, C. Freye, C. F. Niedik, S. J. Frobin und F. Jenau. "Evaluation of Extruded HVDC Cable Systems". In: *ETG-Fb. 157: VDE-Hochspannungstechnik*. 2018, S. 521–526. ISBN: 978-3-8007-4807-5.
- [Har98] B. J. Harrison. "Cable accessories. Accessory failures". In: *IEE Colloquium on Ensuring the Reliability of 11 - 132 kV Cable Accessories*. 1998. DOI: [10.1049/ic:19980028](https://doi.org/10.1049/ic:19980028).
- [HJ74] B. Hartmann und J. Jarzynski. "Immersion apparatus for ultrasonic measurements in polymers". In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 56.5 (1974), S. 1469–1477. ISSN: 0001-4966. DOI: [10.1121/1.1903466](https://doi.org/10.1121/1.1903466).
- [Kre92] F. H. Kreuger. *Industrial high voltage*. 1992. ISBN: 9062755623.
- [Küc09] A. Küchler. *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. 2009. ISBN: 9783540784135.
- [Küc15] A. Küchler. "Ausbildung und Steuerung elektrischer Felder bei Gleichspannungsbeanspruchung". In: *RCC-Tagungsbericht*. 2015.
- [LWGo3] J. Lambrecht, H. P. Wolf und E. Gerlach. *Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren*. 2003.
- [LSD14] I. Leibacher, S. Schatzer und J. Dual. "Impedance matched channel walls in acoustofluidic systems". In: *Lab on a chip* 14.3 (2014), S. 463–470. DOI: [10.1039/C3LC51109J](https://doi.org/10.1039/C3LC51109J).
- [Len+12] A. Lenshof, M. Evander, T. Laurell und J. Nilsson. "Acoustofluidics 5: Building microfluidic acoustic resonators". In: *Lab on a chip* 12.4 (2012), S. 684–695. DOI: [10.1039/C1LC20996E](https://doi.org/10.1039/C1LC20996E).
- [Li+18] D. Li, L. Chen, Z. Zhu, L. Yang, Z. Jiang und Y. Ma. "Research on EPDM for ± 535 kV HVDC Cable Accessories". In: *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. 2018. ISBN: 978-1-5386-4126-2. DOI: [10.1109/CMD.2018.8535830](https://doi.org/10.1109/CMD.2018.8535830).
- [LDX17] J. Li, B. X. Du und H. Xu. "Suppressing interface charge between LDPE and EPDM for HVDC cable accessory insulation". In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24.3 (2017), S. 1331–1339. ISSN: 10709878. DOI: [10.1109/TDEI.2017.006073](https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006073).

- [LYT94] Y. Li, M. Yasuda und T. Takada. "Pulsed electroacoustic method for measurement of charge accumulation in solid dielectrics". In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 1.2 (1994), S. 188–195. ISSN: 10709878. DOI: [10.1109/94.300251](https://doi.org/10.1109/94.300251).
- [Liu+16] Y. Liu, Y. Xiao, Y. Su, X. Chen, C. Zhang und W. Li. "Electrical treeing test of DC cable XLPE insulation under DC voltage and high temperature". In: *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2016, S. 752–755. ISBN: 978-1-5090-2804-7. DOI: [10.1109/ICD.2016.7547725](https://doi.org/10.1109/ICD.2016.7547725).
- [Mal96] D. Malec. "Etude du rôle des charges d'espace dans la rupture diélectrique des isolants solides par la méthode d'onde de pression induite par impact laser: Réalisation technologique et étude théorique". Diss. Laboratoire de Génie Electrique et Plasma de Toulouse, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1996.
- [Mal00] D. Malec. "Technical problems encountered with the laser induced pressure pulse method in studies of high voltage cable insulators". In: *Measurement Science and Technology* 11.5 (2000), S. 76–80. ISSN: 0957-0233. DOI: [10.1088/0957-0233/11/5/403](https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/5/403).
- [Mar13] J. Martinez-Vega. *Dielectric Materials for Electrical Engineering*. 2013. DOI: [10.1002/9781118557419](https://doi.org/10.1002/9781118557419).
- [MH17] F. Mauseth und H. Haugdal. "Electric field simulations of high voltage DC extruded cable systems". In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 33.4 (2017), S. 16–21. ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/MEI.2017.7956628](https://doi.org/10.1109/MEI.2017.7956628).
- [MM13] G. Mazzanti und M. Marzinotto. *Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development*. 2013. ISBN: 9781118096666.
- [Miy+03] H. Miyake, K. Iida, Y. Tanaka, T. Takada, T. Shindo und T. Tanaka. "Space charge formation at interface between polyethylene and other polymeric materials". In: *IEEE 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. 2003, S. 665–668. DOI: [10.1109/ICPADM.2003.1218505](https://doi.org/10.1109/ICPADM.2003.1218505).
- [Miz94] T. Mizutani. "Space charge measurement techniques and space charge in polyethylene". In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 1.5 (1994), S. 923–933. ISSN: 10709878. DOI: [10.1109/94.326659](https://doi.org/10.1109/94.326659).
- [Mol15] P. Molinié. "A Panorama of Electrical Conduction Models in Dielectrics, With Application to Spacecraft Charging". In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 43.9 (2015), S. 2869–2874. ISSN: 0093-3813. DOI: [10.1109/TPS.2015.2461625](https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2461625).

- [MJ97] P. H. F. Morshuis und M. Jeroense. "Space charge measurements on impregnated paper: A review of the PEA method and a discussion of results". In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 13.3 (1997), S. 26–35. ISSN: 0883-7554. DOI: [10.1109/57.591529](https://doi.org/10.1109/57.591529).
- [NFJ16] C. F. Niedik, C. Freye und F. Jenau. "Raumladungsansammlung in polymeren Kabelwerkstoffen unter Variation der elektrischen Feldstärke und Kontaktierung". In: *ETG-Fb. 150: VDE-Hochspannungstechnik 2016*. 2016. ISBN: 978-3-8007-4310-0.
- [Oes96] J. Oesterheld. "Dielektrisches Verhalten von Silikonelastomer-Isolierungen bei hohen elektrischen Feldstärken". Diss. Institut für Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Technische Universität Dresden, 1996.
- [Rai+09] P. Rain, D. H. Nguyen, A. Sylvestre und S. Rowe. "Field and temperature dependence of space charge injection in a silicone rubber". In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.23 (2009), S. 1–10. ISSN: 0022-3727. DOI: [10.1088/0022-3727/42/23/235404](https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/23/235404).
- [Rap+15] H. Rapp, M. Jeroense, H. Ghorbani, M. Saltzer, A. Gustafsson und P. Sunnegårdh. "New developments within the area of extruded HVDC cables". In: *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*. 2015. ISBN: 978-1-84919-982-7. DOI: [10.1049/cp.2015.0053](https://doi.org/10.1049/cp.2015.0053).
- [Ren96] U. R. Rengel. "Messung des Raumladungsverhaltens in Polyethylen beim Einsatz als Isolierstoff in Hochspannungskabeln". Diss. Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, 1996.
- [RF14] F. Rogti und M. Ferhat. "Maxwell–Wagner polarization and interfacial charge at the multi-layers of thermoplastic polymers". In: *Journal of Electrostatics* 72.1 (2014), S. 91–97. ISSN: 03043886. DOI: [10.1016/j.elstat.2013.11.012](https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.11.012).
- [Ros14] J. L. Rose. *Ultrasonic guided waves in solid media*. 2014. ISBN: 9781107273610.
- [Ses+82] G. M. Sessler, J. E. West, R. Gerhard-Multhaupt und H. von Seggern. "Nondestructive Laser Method for Measuring Charge Profiles in Irradiated Polymer Films". In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 29.6 (1982), S. 1644–1649. ISSN: 0018-9499. DOI: [10.1109/TNS.1982.4336420](https://doi.org/10.1109/TNS.1982.4336420).
- [SIP18a] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Electrical Field-Strength Dependent Space Charge and Charge Decay Characteristics at Silicone Rubber / Silicone Grease Interfaces". In: *2018 IEEE Conference on Electrical Insulati-*

- on and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. 2018, S. 66–69. ISBN: 978-1-5386-6192-5. DOI: [10.1109/CEIDP.2018.8544843](https://doi.org/10.1109/CEIDP.2018.8544843).
- [SIP18b] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Influence of Coupling Materials on Space Charge Measurements of Silicone Elastomers". In: *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. 2018. DOI: [10.1109/ICHVE.2018.8642225](https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642225).
- [SIP18c] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Parameter Optimization and Improvement of Space Charge Measurements with the Laser Induced Pressure Pulse Method". In: *ETG-Fb. 157: VDE-Hochspannungstechnik*. 2018, S. 120–124. ISBN: 978-3-8007-4807-5.
- [SIP18d] S. Spelzhausen, M.-R. Ionian und R. Plath. "Temperature dependent space charge and charge decay characteristics at silicone rubber / silicone grease interfaces". In: *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2018. ISBN: 978-1-5386-6389-9. DOI: [10.1109/ICD.2018.8514592](https://doi.org/10.1109/ICD.2018.8514592).
- [Tak+98] T. Takada, Y. Tanaka, N. Adachi und X. Qin. "Comparison between the PEA method and the PWP method for space charge measurement in solid dielectrics". In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 5,6 (1998), S. 944–951. ISSN: 10709878. DOI: [10.1109/94.740780](https://doi.org/10.1109/94.740780).
- [Talo1] M. Taleb. "Phenomenes aux Interfaces des isolants: Mesure et simulation". Diss. Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2001.
- [VAR10] H.T. Van, J.-L. Auge und P. Rain. "Study of the generation of the pressure pulse in the laser induced pressure pulse method: Optimization of the process". In: *10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. 2010. ISBN: 978-1-4244-7945-0. DOI: [10.1109/ICSD.2010.5568130](https://doi.org/10.1109/ICSD.2010.5568130).
- [Vog+11] R. Vogelsang, H.-J. Winter, H. Gramespacher und M. Grunwald. "Silicone technology for reliable performance of joints and terminations for high voltage polymer power cables". In: *8th International Conference on Insulated Power Cables*. 2011.
- [Yin+11] Y. Yin, J. Gu, Q. Wang, Z. Li und Z. Wang. "Investigation of space charge at the interface between the insulation of cable and its accessory". In: *2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*. 2011, S. 47–50. DOI: [10.1109/ISEIM.2011.6826299](https://doi.org/10.1109/ISEIM.2011.6826299).
- [ZCC96] Y. Zhang, H. L. W. Chan und C. L. Choy. "Effect of target material on the laser induced pressure pulse measurements for thick P(VDF-TrFE) copolymers". In: *9th Interna-*

tional Symposium on Electrets (ISE 9). 1996, S. 271–276. ISBN: 0-7803-2695-4. DOI: [10.1109/ISE.1996.578081](https://doi.org/10.1109/ISE.1996.578081).

- [Zho+18] M. Zhou, Y. Zhou, Q. Zhuang, Z. Han und X. Lei. “Measuring Partial Discharge on EHV DC Cable Accessories Insulated with Silicone Rubber in Development Tests”. In: *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. 2018. DOI: [10.1109/POWERCON.2018.8601835](https://doi.org/10.1109/POWERCON.2018.8601835).