

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18060N

Thema

Syntaktischer Schaum als innovativer Isolationswerkstoff für Freiluftanwendungen

Berichtszeitraum

01.02.2014 – 30.11.2016

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

Forschungsstelle(n)

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University

gez. Mirnes Planic

gez. Michael Andres

Mannheim/Aachen, 7. April 2017

Ort, Datum

FS1: Mirnes Planic – FS2: Michael Andres

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	VII
1 Zusammenfassung	1
2 Forschungsstellen und Projektpartner	2
3 Forschungsinhalt	3
3.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
3.1.1 Ausgangssituation	3
3.1.2 Stand der Forschung	3
3.2 Forschungsziele	6
3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	6
4 AP 1: Materialqualifikation	7
4.1 Materialauswahl	7
4.1.1 Auswahl geeigneter Silikonmischungen	7
4.1.2 Auswahl geeigneter Füllstoffe	8
4.2 Materialqualifikation „Syntaktischer Schaum“	11
4.2.1 Erosion & Kriechwegbildung	11
4.2.2 Beständigkeit gegen stromschwache elektrische Entladungen	12
4.2.3 Dielektrische Materialeigenschaften	14
4.2.4 Durchschlagfestigkeit	15
4.2.5 Mechanische Materialkennwerte	17
4.2.6 Hydrophobieverlust	19
4.2.7 Hydrophobiewiederkehr	23
4.2.8 Hydrophobietransfer	24
4.2.9 Einfluss von Sonnenstrahlung auf Hydrophobie	26
4.2.10 Säure- und Bewetterungsbeständigkeit	26
4.2.11 Beständigkeit gegenüber Wasseraufnahme	28
4.2.12 Finale Materialbewertung und Auswahl	31
5 AP 2: Prozesstechnik	38
5.1 Compoundieren	38
5.2 Herstellung der plattenförmigen Proben	39
5.3 Herstellung des Prototyps	40

6	AP 3: Prüfverfahren Schirmisolatoren	41
6.1	Rad-Tauch-Prüfung	42
6.2	Prüfung mit Salznebel.....	46
6.3	Prüfung mit haftenden Fremdschichten	60
6.3.1	Untersuchungen an Plattenproben	61
6.3.2	Untersuchungen an Isolatoren.....	74
6.3.3	Langzeituntersuchung Hydrophobie	88
6.3.4	Beurteilung der Ergebnisse.....	91
6.4	Prüfung mit Wechselspannung an trockenen Isolatoren	92
6.5	Gesamtbeurteilung	92
7	Ausblick.....	93
8	Innovativer Beitrag und Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse	94
9	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	95
10	Literaturverzeichnis	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	REM-Aufnahme von syntaktischem Schaum	5
Abbildung 4-1:	Ausfallzeit für gefüllte LSR-Prüflinge im Schiefe-Ebenen-Prüfverfahren bei 3,5 kV	12
Abbildung 4-2:	Bestehensquote für gefüllte HTV-Prüflinge im Schiefe-Ebenen-Prüfverfahren bei 4 kV	12
Abbildung 4-3:	Ausfallzeiten für gefüllte LSR-Prüflinge im Lichtbogenbeständigkeit-Test nach DIN EN 61621	13
Abbildung 4-4:	Ausfallzeiten für gefüllte HTV-Prüflinge im Lichtbogenbeständigkeit-Test nach DIN EN 61621	13
Abbildung 4-5:	Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit von HTV gefüllt mit MHK.....	14
Abbildung 4-6:	Vergleich der relativen Permittivität von HTV gefüllt mit MHK	15
Abbildung 4-7:	Vergleich des Verlustfaktors von HTV gefüllt mit MHK	15
Abbildung 4-8:	Vergleich der AC-Durchschlagfeldstärke von LSR-Prüflingen mit aufgesetzten und eingegossenen Elektroden.....	16
Abbildung 4-9:	Zugfestigkeit von gefüllten LSR-Prüflingen.....	17
Abbildung 4-10:	Exemplarische Viskosität von gefülltem LSR in Abhängigkeit von der Scherrate	18
Abbildung 4-11:	Zugfestigkeit von gefüllten HTV-Prüflingen	18
Abbildung 4-12:	Elektronenmikroskopaufnahmen von gerissenen HTV-Prüflingen A: Glas 3 20/30 mit 200x Vergrößerung B: Glas 3 20/30 in 1.000x Vergrößerung C: Glas 3 s 20/30 mit 200x Vergrößerung D: Glas 3 s 20/30 in 1.000x Vergrößerung.....	19
Abbildung 4-13:	Links: Prüfanordnung Dynamischer Tropfen Prüfverfahren Rechts: Prüfanordnung modifiziertes Rad-Tauch-Prüfverfahren	20
Abbildung 4-14:	Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von LSR-Prüflingen gefüllt mit 10 vol.% MHK im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren.....	21
Abbildung 4-15:	Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren.....	21
Abbildung 4-16:	Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK im modifizierten Rad-Tauch-Prüfverfahren	22
Abbildung 4-17:	Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von HTV-Prüflingen im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren.....	23
Abbildung 4-18:	Exemplarische Hydrophobiewiederkehr von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK	24
Abbildung 4-19:	Exemplarische Hydrophobiewiederkehr von HTV-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK	24
Abbildung 4-20:	Exemplarischer Hydrophobietransfer von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK	25
Abbildung 4-21:	Exemplarischer Hydrophobietransfer von HTV-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK	26
Abbildung 4-22:	Erosionserscheinungen an der Oberfläche von säuregelagerten LSR-Prüflingen Keramik 30 vol.%	27

Abbildung 4-23: Exemplarische Erosionsspuren an LSR- und HTV-Prüflingen, die bei 50°C Lagerungstemperatur mit Schwefelsäure besprüht wurden.....	28
Abbildung 4-24: Exemplarische Gewichtsänderung von LSR-Prüflingen während der Wasserlagerung und der anschließenden Trocknung	29
Abbildung 4-25: Exemplarische Gewichtsänderung von HTV-Prüflingen während der Wasserlagerung und der anschließenden Trocknung	30
Abbildung 4-26: Exemplarische finale Materialbewertung von LSR gefüllt mit Glas-MHK	33
Abbildung 4-27: Exemplarische finale Materialbewertung von LSR gefüllt mit Keramik-MHK.....	34
Abbildung 4-28: Finale Materialbewertung von HTV gefüllt mit verschiedenen Füllgraden Glas 2	35
Abbildung 4-29: Finale Materialbewertung von HTV gefüllt mit silanisierten und unsilanisierten Glas-MHK.....	36
Abbildung 4-30: Finale Materialbewertung von HTV gefüllt mit Keramik-MHK	37
Abbildung 5-1: Herstellung der MHK- Compounds.....	38
Abbildung 5-2: Fertig geknetetes Compound ohne MHK (links) und mit MHK (rechts).....	39
Abbildung 5-3: Hydraulikpresse	39
Abbildung 5-4: Ausführungsform Silikonverbundisolator	40
Abbildung 6-1: Referenzisolator (links) und Prototyp (rechts)	42
Abbildung 6-2: Rad-Tauch-Prüfung - Aufbau ohne Salzwasser	43
Abbildung 6-3: Referenzisolator (links) und Prototyp (rechts)	45
Abbildung 6-4: Mechanischer Riss.....	45
Abbildung 6-5: Anordnung und Positionierung der Prüflinge im Salznebelprüfraum.....	46
Abbildung 6-6: Positionierung der Isolatoren in der Prüfkammer, Draufsicht [FG16]	48
Abbildung 6-7: Ableitströme Referenzisolator Position 1 (oben), Position 2 (Mitte) und Position 3 (unten)	49
Abbildung 6-8: Ableitströme Referenzisolator Position 4 (oben), Position 5 (Mitte) und Position 6 (unten)	50
Abbildung 6-9: Ableitströme Prototyp Position 7 (oben), Position 8 (Mitte) und Position 9 (unten)	51
Abbildung 6-10: Ableitströme Prototyp Position 10 (oben) Position 11 (Mitte) und Position 12 (unten)	52
Abbildung 6-11: Ableitströme Referenzisolator Position 1 (oben), Position 2 (Mitte) und Position 3 (unten)	54
Abbildung 6-12: Ableitströme Referenzisolator Position 4 (oben -> Ausfall nach ca. 672 h), Position 5 (Mitte) und Position 6 (unten)	55
Abbildung 6-13: Ableitströme Prototyp Position 7 (oben), Position 8 (Mitte) und Position 9 (unten)	56
Abbildung 6-14: Ableitströme Prototyp Position 10 (oben), Position 11 (Mitte) und Position 12 (unten)	57
Abbildung 6-15: Isolator nach der Prüfung.....	58

Abbildung 6-16: Hydrophobie neu (oben) nach der Prüfung ungereinigt (Mitte) und 3 Stunden nach der Reinigung (unten) für Referenzisolator (links) und Prototyp (rechts) [FG16].....	59
Abbildung 6-17: Erosionsspuren am Prototyp [FG16]	60
Abbildung 6-18: Schrägliegende Trocknungsvorrichtung	63
Abbildung 6-19: REF: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2	64
Abbildung 6-20: LSR: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2	65
Abbildung 6-21: ATH 48 %: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2	66
Abbildung 6-22: ATH 58 %: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2	67
Abbildung 6-23: Glas 20/30: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2	68
Abbildung 6-24: Keramik 30/20: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2	69
Abbildung 6-25: Beneblungseinrichtung.....	71
Abbildung 6-26: Ergebnisse der Widerstandsmessung mit Trendlinie: REF (oben), ATH 48 % (Mitte) und ATH 58 % (unten)	72
Abbildung 6-27: Ergebnisse der Widerstandsmessung mit Trendlinie: LSR (oben), Glas 20/30 (Mitte) und Keramik 30/20 (unten).....	73
Abbildung 6-28: Gesamtdarstellung der Ergebnisse mit Trendlinie	74
Abbildung 6-29: Rotierende Vorrichtung zum gleichmäßigen Auftragen und Trocknung der Schmutzsicht: Vorbehandlung (oben) und Auftragen der definierten Suspension (unten).....	75
Abbildung 6-30: Prüfraum und Prüfaufbau für haftende Fremdschichten nach IEC 60507 [FG16].....	76
Abbildung 6-31: Auf- und Ab-Prüfverfahren	77
Abbildung 6-32: Überschlüge für den Prototyp mit 71,8 h V1 (oben) und 65,2 h V5 (unten) Trocknung.....	78
Abbildung 6-33: Ableitströme für den Prototyp mit 71,8 h V1 (oben) und 65,2 h V5 (unten) Trocknung.....	79
Abbildung 6-34: Überschlüge für den Prototyp mit 17,5 h V3 (oben) und 17,3 h V7 (unten) Trocknung.....	80
Abbildung 6-35: Ableitströme für den Prototyp mit 17,5 h V3 (oben) und 17,3 h V7 (unten) Trocknung.....	81
Abbildung 6-36: Überschlüge für den Referenzisolator mit 66 h V2 (oben) und 66 h V6 (unten) Trocknung.....	82
Abbildung 6-37: Ableitströme für den Referenzisolator mit 66 h V2 (oben) und 66 h V6 (unten) Trocknung.....	83
Abbildung 6-38: Überschlüge für den Referenzisolator mit 18,3 h V4 (oben) und 17,3 h V8 (unten) Trocknung.....	84

Abbildung 6-39: Ableitströme für den Referenzisolator mit 18,3 V4 (oben) und 17,3 h V8 (unten) Trocknung	85
Abbildung 6-40: Darstellung der durchgeführten Prüfungen (unterschieden nach hydrophob (oben) und hydrophil (unten))	86
Abbildung 6-41: Prototyp vorher (links) nachher (rechts)	87
Abbildung 6-42: Referenzisolator vorher (links) und nachher (rechts)	87
Abbildung 6-43: Lagerung der beschmutzten Isolatoren	88
Abbildung 6-44: Kontinuierliche Aufzeichnung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit über eine Dauer von September bis Januar (Ausschnitt von Oktober bis Dezember)	89
Abbildung 6-45: Referenzisolator und Prototyp vor der Beschmutzung	89
Abbildung 6-46: Erste Untersuchung nach 5 Monaten	90
Abbildung 6-47: Erste Untersuchung nach 5 Monaten	90
Abbildung 6-48: Vergleich der Steh/Überschlagsspannungen eines Referenz- und Prototypisolators	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Relevante Eigenschaften moderner Freiluftisolierstoffe [AD98, IE07, Ki03].	7
Tabelle 4-2:	Eigenschaften der verwendeten MHK [3M07, Om11].....	8
Tabelle 4-3:	Gemessene Eigenschaften der sedimentierten Glas-MHK.....	9
Tabelle 4-4:	Notation und Kennwerte der verschiedenen Kompositmaterialien.....	10
Tabelle 4-5:	Verlustfaktoren wassergelagerter LSR- und HTV-Prüflinge.....	30
Tabelle 4-6:	Bewertete Materialeigenschaften für LSR und HTV-basierte Materialien ...	31
Tabelle 6-1:	Finale Materialauswahl für die Isolatormodelle.....	42
Tabelle 6-2:	Testergebnis Rad-Tauch-Test.....	44
Tabelle 6-3:	Zusammenfassung der Prüfbedingungen.....	47
Tabelle 6-4:	Randbedingungen und Verlauf bei zweitem 1000 h Test (Test 2)	53
Tabelle 6-5:	Verwendete Plattenproben für die Kontaktwinkelmessung	61
Tabelle 6-6:	Zusammensetzung der verschiedenen inerten Stoffe nach [DI14].....	62
Tabelle 6-7:	Verwendete Plattenproben für die Widerstandsmessung	70
Tabelle 6-8:	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	77

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

HTV	Hochtemperatur vernetzender Silikonkautschuk
LSR	Liquid Silicone Rubber, Flüssigsilikonkautschuk
MHK	Mikrohohlkugeln
ATH	Aluminiumtrihydrat
ESDD	Äquivalente Salzablagerungsdichte
NSDD	Nicht lösliche Ablagerungsdichte
SDD	Salzablagerungsdichte

1 Zusammenfassung

Die Silikonverbundisolatoren sind in der Hochspannungsisolieretechnik, vor allem im Freiluftsektor, seit Jahrzehnten bevorzugt in Anwendung. Der vermehrte Einsatz erneuerbarer Energien und die daraus folgende Herausforderung, bezüglich des Energietransportes, erfordert die Verwendung neuester Technologien im Bereich der Isolierung unter Spannung stehender Bauteile. Weiterführende Untersuchungen für die Verbesserung von elektrischen, chemischen oder mechanischen Eigenschaften von Silikonelastomeren werden vorangetrieben, um einen effizienten Einsatz für jedes Anwendungsziel zu gewährleisten. Die Erforschung von Materialien, die durch Zugabe weiterer Füllstoffe eine Verbesserung der Eigenschaften von Silikonverbundisolatoren ermöglichen sollen, ist Gegenstand dieser Arbeit.

Ein vielversprechender Ansatz ist die Verwendung von syntaktischem Schaum im Silikonverbundisolator für Freiluftanwendungen. Dabei werden dem Silikonkautschuk mikroskalige Hohlkugeln (Mikrohohlkugeln: MHK) zugegeben, die eine geringere Dichte und geringere Materialkosten aufweisen, als das Matrixmaterial. In diesem Projekt wurden neben der Erforschung des Einflusses der MHK auf die Freilufttauglichkeit der Materialkompositionen zusätzlich Untersuchungen durchgeführt, die einen Beitrag für die Festlegung der noch fehlenden einheitlichen Prüfvorschrift für verschmutzte Polymerisolatoren liefern können. Die Schwerpunkte der einzelnen Arbeitspakete sowie deren Ergebnisse sind im Folgenden festgehalten:

- **Erforschung der finalen Materialzusammensetzung** bestehend aus definierten Anteilen von MHK, Silikon und dem Flammenschutzmittel Aluminiumtrihydrat (ATH). Die untersuchten Materialproben bestehen zum einen aus Flüssigsilikonkautschuk (LSR) und hochtemperaturvernetzendem Silikonkautschuk (HTV).
- **Identifikation von geeigneten Materialzusammensetzungen.** Insbesondere HTV ist für eine Füllung mit MHK aus Glas oder Keramik geeignet. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnten durch veränderte Materialzusammensetzungen Ergebnisse erzielt werden, welche im Vergleich zu einer konventionellen Zusammensetzung von HTV-Silikonkautschuk gleichwertige und teilweise verbesserte alterungskritische Eigenschaften aufweisen.
- **Die Optimierung des Herstellungsprozesses.** Dieses Arbeitspaket wurde mit Hilfe der Expertise von der Firma LAPP Insulators GmbH durchgeführt. Durch verschiedene Untersuchungen konnte die erfolgreiche Verarbeitung der MHK für die Herstellung von Plattenproben und Prototypisolatoren erzielt werden.
- **Prüfung von gefertigten Isolatormodellen.** Dabei wurden die Eigenschaften des Prototyps (mit MHK) mit denen eines Referenzisolators verglichen. Zusätzlich erfolgten Untersuchungen mit haftenden Fremdschichten an Plattenproben, welche sich an [CI13] orientierten. Die Untersuchung der haftenden Fremdschichten an vollwertigen Isolatoren wurde ebenfalls in Anlehnung an [CI13] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen keine Unterschiede bei dem Vergleich zwischen einem Referenzisolator und dem Prototyp. Ebenfalls wurde gezeigt, dass mit der konventionellen Vorbehandlung und empfohlenen Trocknungszeit, bei der Prüfung von Silikonverbundisolatoren (noch keine definierte Norm erhältlich) hinsichtlich des hydrophoben Zustands, keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können. Weiterführende Untersuchungen mit dem Schwerpunkt der Erforschung geeigneter Vorbehandlung (Untersuchung geeigneter inerter Stoffe) und definierter Trocknungszeit werden angestrebt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

2 Forschungsstellen und Projektpartner

Forschungsstellen:

- Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH e.V.)
- Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University

Folgende Partner haben am Projekt mitgearbeitet:

- Bluestar Silicones - International Silicon Rubber & electrical Insulation
- CONSENTEC GmbH
- Elektrotechnische Werke - Fritz Driescher & Söhne GmbH
- Fritz Driescher KG - Spezialfabrik für Elektrizitätsbedarf GmbH & Co.
- LAPP Insulators GmbH
- SebaKMT - Hagenuk KMT Kabelmesstechnik GmbH
- 3M Deutschland GmbH

3 Forschungsinhalt

3.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1.1 Ausgangssituation

Netzbetreiber und Hersteller von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung stehen vor der Aufgabe, eine wirtschaftlich-technisch hohe Versorgungsqualität der Endkunden durch einen optimierten Einsatz hocheffizienter Anlagen und entsprechende Strategien sicherzustellen. Dabei stellen effiziente Isoliermaterialien in der Hoch- und Mittelspannungsebene eine Grundvoraussetzung zuverlässiger Energieversorgung für den Endverbraucher dar. Der Entwicklung neuer und verbesserter Materialien für die Anwendung im Bereich der Freiluftisolatoren kommt vor dem Hintergrund der Steigerung der Effektivität von Übertragungs- und Verteilungsnetzen zunehmend eine größere Bedeutung zu.

Silikonelastomere werden in den Netzen der Energieübertragung und -verteilung weltweit in steigendem Maße eingesetzt. Dies gilt sowohl für den Einsatz bei Freileitungsisolatoren im Hoch- und Mittelspannungsbereich als auch für Gehäuse von Überspannungsableitern, Durchführungen, Messwandlern und für andere Anwendungen. Die Vorzüge des Materials sind vielfach in der Literatur beschrieben, wobei insbesondere auf das sehr gute Fremdschichtverhalten solcher Isolatoren aufgrund der hydrophoben Eigenschaften hingewiesen wird [Pa12].

Den nachweisbar guten Eigenschaften von Silikonelastomeren steht wiederum ein hoher Kostenfaktor entgegen. Dies macht die Entwicklung neuer Materialien mit vergleichbaren technischen Vorteilen und zusätzlich gesteigertem wirtschaftlichen Potential, vor dem Hintergrund der steigenden Auslastung und dem Ausbau der deutschen Übertragungs- und Verteilungsnetze, äußerst erstrebenswert. Syntaktischer Schaum stellt sich in dieser Hinsicht als besonders zukunftssträftig dar. Bei diesem handelt es sich um einen innovativen Verbundwerkstoff aus einem Polymer, z.B. Silikon, und darin eingebetteten MHK (gasgefüllte Kugeln mit Durchmessern im Mikrometerbereich). Diese substituieren das vergleichsweise kostenintensive Polymer, woraus eine Reduzierung der Gesamtmaterialekosten resultiert. Gleichzeitig weist das Material durch seine spezifische Struktur eine besonders geringe Dichte auf, so dass eine Verringerung des Gesamtgewichts einhergehend mit einer Reduzierung von Transportkosten sowie ggfs. Anforderungen an die Statik von Freileitungen erzielt werden können.

3.1.2 Stand der Forschung

Silikon zeichnet sich durch seine – für ein Freiluftisoliermaterial besonders vorteilhaften – Eigenschaften aus, wie z.B. schwere Entflammbarkeit, elektrische Hochwertigkeit, hohe Beständigkeit gegen Zersetzung, Unempfindlichkeit gegen Ozon und UV-Strahlung sowie Hydrophobie. Diese Eigenschaften verleihen der Umhüllung aus Kunststoff eine optimale Ausgangsbedingung für den effizienten Einsatz im Bereich der Freiluftisolatoren, deren Aufgabe es ist, spannungsführende Leiter gegen Erde oder gegeneinander zu isolieren sowie auftretende mechanische Lasten zuverlässig zu tragen. Die Kunststoff-Verbundisolatoren weisen dabei Vorzüge auf wie z.B. eine kompakte einteilige Bauform bis zu höchsten Betriebsspannungen, Unempfindlichkeit gegen Vandalismus sowie ein gutes bis sehr gutes Isoliervermögen beim Einsatz unter Verschmutzungsbedingungen. Dabei ist zu beachten, dass das gute Isoliervermögen abhängig von den Umhüllungsstoffen ist. Gegenwärtig bestehen die meisten Umhüllungen aus den gummielastischen Werkstoffen Silikonelastomer oder Ethylenpropylenelastomer. Neben den oben genannten Vorteilen von Silikon ist bei der Prüfung des Fremdschichtverhaltens der Hydrophobieeffekt hervorzuheben. Als Ursache der Hydrophobie wird vermutet, dass nachweisbar geringe Mengen

niedermolekularer Bestandteile aus Silikonelastomeren in die Schmutzschicht diffundieren und dadurch den Abperleffekt hervorrufen [Ex09].

Bei der Betrachtung von Isolatoren für die Hoch- und Mittelspannungsebene ergeben sich durch den Einsatz kostengünstiger und effizienter Materialien sowie neuer Technologien enorme technische und wirtschaftliche Potentiale. Einen entscheidenden Einfluss auf den effizienten Einsatz von Isolatoren stellt das Fremdschichtverhalten dar. Die Prüfverfahren sind in der Norm „Fremdschichtprüfungen an Hochspannungs-Isolatoren zur Anwendung in Wechsellspannungssystemen“ DIN EN 60507 [DI12] festgehalten. Unter Freiluftbedingungen werden Isolatoren auf eine natürliche Art verschmutzt. Die grundsätzlichen Arten von Verschmutzungsbedingungen sind:

- Industriverschmutzung
- Wüstenverschmutzung
- Salznebelverschmutzung
- Spezielle Verschmutzung in der Nähe von z.B. Chemieanlagen

Die Unterscheidung der Verschmutzung erfolgt nach DIN IEC 60815-1 [DI07] in aktive und inerte Verschmutzung. Die Charakterisierung der Verschmutzung erfolgt bei der aktiven Verschmutzung durch den ESDD-Wert und der inerten Verschmutzung durch den NSDD-Wert. Bestehende Materialien für die Freiluftanwendung sowie neue Entwicklungen, welche in diesem Projekt zum Einsatz kommen, sollen nach der in den Normen vorgegebenen Anforderung geprüft werden [DI06, DI07, DI12].

Bei heutigen hochspannungstechnischen Geräten und Anlagen werden zur elektrischen Isolation vermehrt Polymere eingesetzt. Diese haben eine hohe Durchschlagfeldstärke und im Vergleich zu flüssigen oder gasförmigen Isolierstoffen den Vorteil der mechanischen Stabilisierung des konstruktiven Gesamtaufbaus. Nachteilig ist jedoch ihre vergleichsweise hohe spezifische Dichte, so dass alternative Isolationsmaterialien erwünscht sind, welche vergleichbare gute mechanische und elektrische Eigenschaften bei geringerer spezifischer Dichte aufweisen. Eine zukunftssträchtige Alternative ist der Einsatz syntaktischen Schaums.

Syntaktischer Schaum ist ein innovativer Verbundwerkstoff aus hohlen Mikropartikeln, sogenannte MHK, die in eine Polymermatrix eingebettet sind. Als Polymermatrix kommen z.B. Silikon, Epoxidharz und Polyurethan in Frage. Die MHK können z.B. aus Glas, Kunststoff und Keramik sein. Auf Grund seiner Struktur weist das Material eine sehr geringe Dichte auf. Abbildung 3-1 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop- (REM-) Aufnahme der Materialstruktur. Der Name syntaktischer Schaum resultiert aus der schaumartigen Struktur bedingt durch die in die Polymermatrix eingebrachten MHK.

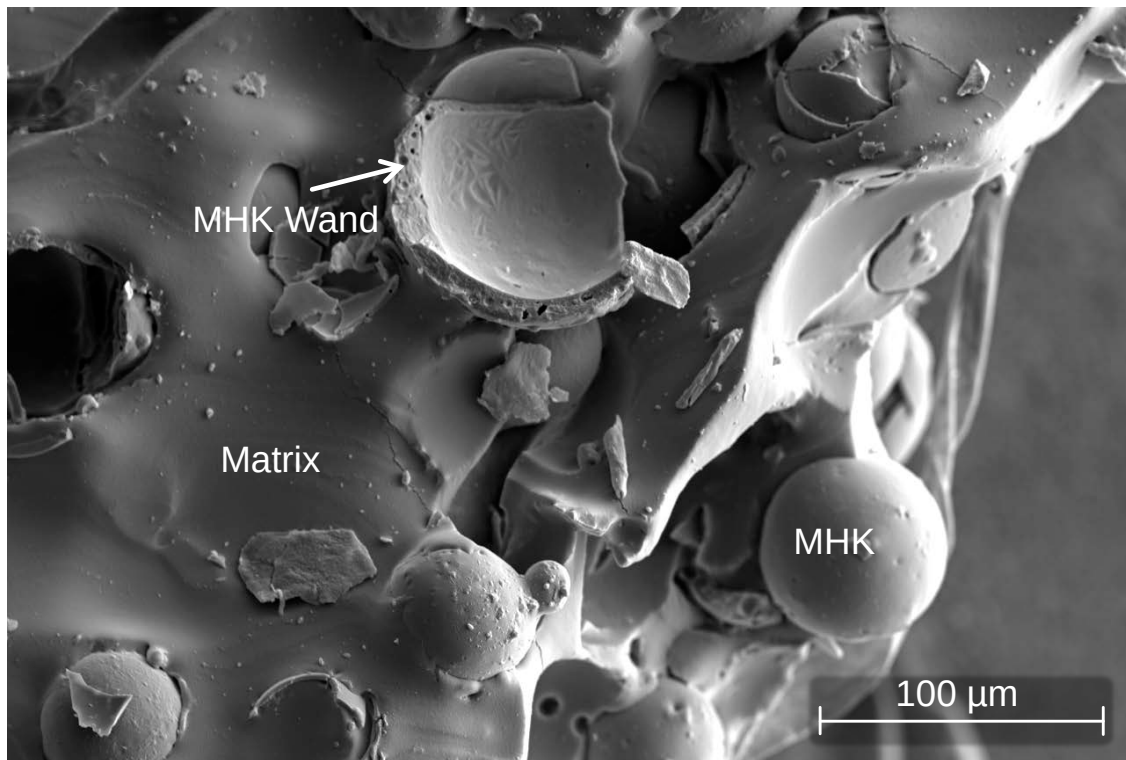


Abbildung 3-1: REM-Aufnahme von syntaktischem Schaum

Ursprünglich wurde syntaktischer Schaum 1960 als Auftriebshilfe für die Tiefseeforschung entwickelt. Heutzutage wird er unter anderem in der Luft- und Raumfahrttechnik, in der Automobilindustrie und beim Schiffsbau als besonders leichtes, kompaktes und mechanisch belastbares Material eingesetzt. Untersuchungen zum Einsatz von syntaktischem Schaum in der Hochspannungstechnik gibt es erst seit wenigen Jahren. Bisherige Erfahrungen mit syntaktischen Schäumen auf Epoxidharz- und Silikongelbasis zeigen jedoch eine hohe Tauglichkeit beim Einsatz als Isolationsmaterial für hochspannungstechnische Anwendungen [Ke10, Ma10a, Ma10b, Ma13, Ro11a, Ro11b, Ro12, St08, St09, St10a, St10b, St10b, St11, St12a, St12b, Tr09, Wi14]. Seit einigen Jahren wird das Material bereits in Komponenten der Hochspannungstechnik als Isoliermaterial eingesetzt, bei denen eine kompakte und leichte Bauweise gefordert ist (z.B. als Hochspannungsisolierung in Computertomographen).

Die elektrischen Eigenschaften der verschiedenen syntaktischen Schäume sind stark von den Materialparametern (z.B. Füllstoffanteil, Mikrohohlkugeldurchmesser und verwendete Materialkomponenten) sowie äußeren Parametern (z.B. Feldstärkebelastung und Temperatur) abhängig. Syntaktische Schäume weisen für Wechsel- und Gleichspannungsbelastung eine hohe elektrische Festigkeit sowie eine geringe Permittivität, eine geringe spezifische Leitfähigkeit und einen geringen Verlustfaktor auf. Die mechanischen Eigenschaften sind von den Materialparametern, und hier insbesondere vom verwendeten Matrixsystem und Mikrohohlkugeltyp, abhängig. So sind die syntaktischen Schäume bei Verwendung von Glas-MHK und Epoxidharz mechanisch stabil und bei Verwendung von Kunststoff-MHK und Silikongel elastisch [Ke10, Tr09].

Hinsichtlich der Nutzbarkeit für Freiluftkomponenten bestehen bisher keine Betriebserfahrungen, so dass grundlegende Untersuchungen notwendig sind, die Gegenstand des durchgeführten Vorhabens sind.

3.2 Forschungsziele

Das Forschungsziel des AiF-Projekts ist die Entwicklung eines freilufttauglichen syntaktischen Schaums auf Silikonbasis und dessen Anwendung in Isolatorschirmen. Der Isolatorschirm aus syntaktischem Schaum soll hierbei die gleichen technischen Vorteile wie herkömmliche Silikonschirme aufweisen. Aufgrund der MHK und der daraus resultierenden Materialeinsparung von Silikon können sowohl Kosten als auch Gewicht eingespart werden.

Der syntaktische Schaum soll weiterhin hinsichtlich der Einsatztauglichkeit für die Freiluftanwendung im Vergleich zu konventionellen Silikonverbundisolatoren beurteilt werden. Zu diesem Zwecke werden einerseits die reinen Materialeigenschaften anhand definierter Probenkörper und andererseits das Materialverhalten im Zusammenspiel mit der Auslegung des Isolatorschirmprofils anhand von Isolatormodellen untersucht. Genormte Prüfverfahren existieren hierzu teilweise nur für Keramikisolatoren, nicht aber für Verbundisolatoren, so dass ein weiteres Forschungsziel die Überprüfung der Übertragbarkeit bereits durchgeführter Cigré-Untersuchungen durch eine Anpassung der in diesem Projekt geplanten Prüfungen, in Anlehnung an [CI13], ist. Dadurch können die Ergebnisse aus diesem Projekt einen Beitrag für die Herausarbeitung eines einheitlichen Prüfverfahrens leisten.

3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Um die angestrebten technisch-wissenschaftlichen Forschungsziele zu erreichen, sind insgesamt drei Arbeitspakete vorgesehen. Hierbei werden AP1 und AP2 der ersten Phase des Projektes und AP3 der zweiten Phase des Projektes zugeordnet.

Die **Phase 1** dient der Identifikation einer geeigneten Materialzusammensetzung:

AP1: Das äußere Schirmmaterial des Isolators ist sowohl elektrischen als auch klimatischen Belastungen ausgesetzt. Bevor neue Materialien ihren Einsatz in Freiluftanwendungen finden, gilt es zunächst das Alterungsverhalten des Materials zu bestimmen. Die Auswahl geeigneter Materialzusammensetzungen von syntaktischem Schaum zur Anwendung in Schirmisolatoren erfolgt anhand genormter Standardtests.

AP2: Aufgrund der veränderten Materialeigenschaften ist die Verarbeitbarkeit hinsichtlich bestehender Produktionsprozesse (Compoundieren, Extrudieren und Spritzgusstechnik) zu validieren und ggf. eine Anpassung der Produktionsverfahren vorzunehmen. Hier stellt ein Kooperationspartner (LAPP Insulators GmbH) geeignete Anlagen sowie die Expertise zur Verarbeitung von Silikonen zur Verfügung. Speziell ist zu untersuchen, ob und wie die MHK oberflächenbehandelt (z.B. silanisiert) werden müssen/sollten und ob Basisprozesse – „Compoundieren“, „Extrudieren“ und „Spritzgusstechnik“ – angepasst werden müssen.

Die daran anschließende **Phase 2** dient der Beurteilung des Isolatorschirms aus syntaktischem Schaum hinsichtlich der Einsatztauglichkeit für die Freiluftanwendung im Vergleich zu konventionellen Silikonverbundisolatoren:

AP3: Verschiedene genormte Bauartprüfungen zur Überprüfung der Beständigkeit des Isolatorschirms aus syntaktischem Schaum gegenüber Wetter- und Umwelteinflüssen sollen an vorgefertigten Schirmisolatoren durchgeführt werden. Aus langjährigen Betriebserfahrungen wird angenommen, dass Silikonisolationen für den Freilufteinsatz geeignet sind, wenn keine lang andauernde Oberflächenbeanspruchung durch Entladungen auftritt. Solche Entladungen werden dem Vorhandensein von Fremdschichten und den damit entstehenden Oberflächenströmen zugeschrieben. Da genormte Prüfverfahren zu haftenden Fremdschichten bisher nur für Keramikisolatoren existieren, jedoch nicht für Verbundisolatoren [CI13], ist eine Überprüfung der Übertragbarkeit der durchgeführten Cigré-Untersuchungen und ggf. eine Anpassung der geplanten Prüfungen erforderlich.

4 AP 1: Materialqualifikation

Das Ziel des ersten Arbeitspaketes ist es, geeignete Materialkombinationen zu identifizieren, welche die hohen Anforderungen an Freiluftisolierstoffe nach IEC TR 62039 und von Anwenderseite erfüllen [DH15, IE07]. Hierfür sind umfangreiche Untersuchungen bezüglich der elektrischen, mechanischen, umweltbezogenen und sonstigen Materialeigenschaften erforderlich (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Relevante Eigenschaften moderner Freiluftisolierstoffe [AD98, IE07, Ki03]

Elektrisch	Mechanisch	Umweltbedingt	Sonstige
Volumenwiderstand	Reißfestigkeit	Resistenz gegen Ozon	Flammfestigkeit
Verlustfaktor	Weiterreißfestigkeit	Hydrophobieeigenschaften	Glasübergangstemperatur
Durchschlagfestigkeit	Elastizität	UV-Beständigkeit	Zersetzungstemperatur
Erosions- und Kriechspurbeständigkeit	Viskosität	Chemische Zersetzung	
Lichtbogenbeständigkeit	Einstellbare Härte	Wasseraufnahme	

Basierend auf vorherigen Erkenntnissen ist eine starke Beeinflussung der meisten Materialeigenschaften durch das Einbringen der MHK zu erwarten [Ke10, Ku05, Ro12, St12, Tr09]. In Diskussion mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde übereinstimmend vereinbart, dass Untersuchungen der sonstigen Materialeigenschaften (Flammfestigkeit, Glasübergangstemperatur, Zersetzungstemperatur) nicht notwendig sind, da nicht erwartet wird, dass diese Eigenschaften des Silikons durch das Einbringen der MHK verändert werden können. Dementsprechend fokussieren sich die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen auf die elektrischen, mechanischen und umweltbedingten Eigenschaften. Dabei werden die Ergebnisse der Materialuntersuchungen stets in Relation gesetzt zu den Materialeigenschaften der jeweils kommerziell verwendeten Silikonformulierungen. Der final ausgewählte silikonbasierte syntaktische Schaum soll keine der relevanten Materialeigenschaften in kritischem Maße verschlechtern und auch insgesamt möglichst geringe Änderungen der Materialeigenschaften hervorrufen. Um dies beurteilen zu können, werden die Ergebnisse am Ende dieses Kapitels in Netzdiagrammen übersichtlich dargestellt und zusammengefasst.

4.1 Materialauswahl

Basierend auf Erfahrungen des Isolatorherstellers LAPP Insulators GmbH und des Instituts für Hochspannungstechnik werden in einem ersten Schritt mögliche Materialien für die Erstellung der neuen Silikonformulierungen ausgewählt.

4.1.1 Auswahl geeigneter Silikonmischungen

In hochspannungstechnischen Freiluftanwendungen werden zwei verschiedene Silikontypen verwendet: Flüssigsilikonkautschuk (Engl.: Liquid Silicone Rubber / LSR) und hochtemperaturvernetzender Silikonkautschuk (Engl.: High Temperature Vulcanized / HTV), wobei HTV mit rund 95 % Marktanteil am häufigsten verwendet wird [PF08]. Da diese Silikonart nur eine unzureichende Beständigkeit gegen Erosion- und Kriechwegbildung durch elektrische Entladungen besitzt, wird sie kommerziell mit dem Flammenschutzmittel Aluminium-Trihydrat (ATH) zu rund 55 Gew.% gefüllt, was rund 36 vol.% entspricht [PS12]. Basierend auf

Betriebserfahrungen der Firma LAPP Insulators GmbH wird als Ausgangsmaterial für Untersuchungen an MHK gefülltem HTV eine kommerziell von LAPP Insulators GmbH verwendete Silikonformulierung ausgewählt. Diese Basismischung besteht vor allem aus HTV gemischt mit ATH mit einem geringen Zusatz an Farbpigmenten und zusätzlichen Stoffen.

Neben Untersuchungen an HTV finden auch Untersuchungen an LSR statt, da LSR einfacher zu verarbeiten ist, so dass die Prüflingsherstellung auch am Institut für Hochspannungstechnik erfolgen kann. Der Einfluss der MHK auf die Materialeigenschaften von LSR und HTV wird als sehr ähnlich eingeschätzt, so dass die Materialuntersuchungen durch die Hinzunahme von LSR insgesamt vereinfacht werden.

4.1.2 Auswahl geeigneter Füllstoffe

Die Auswahl geeigneter MHK-Füllstoffe basiert auf Erfahrungen des Instituts für Hochspannungstechnik und eigenen Voruntersuchungen [Ke10, Ma13, Ro12, St12, Tr09]. Die Verwendung von elastischen, kunststoffbasierten MHK wird nach Voruntersuchungen aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes der MHK nicht weiter untersucht. Stattdessen fokussieren sich die Untersuchungen auf temperaturbeständige Glas- und Keramik-MHK. Diese sollen eine möglichst geringe Dichte aufweisen, um eine möglichst hohe Gewichtsreduktion der Isolatoren erreichen zu können. Zugleich sollen die MHK aber auch eine möglichst gute Bruchfestigkeit aufweisen, da die Silikonformulierungen zur Herstellung von Isolatoren im Spritzgussverfahren verarbeitet werden. Die minimale Bruchbeständigkeit wird basierend auf Erfahrungen von LAPP Insulators GmbH zu 25 MPa in HTV gewählt. In LSR wird ein weiterer Kugeltyp hinzugenommen, der eine geringere Dichte und geringere Bruchbeständigkeit aufweist, da bei der Verarbeitung von LSR ein geringerer Druck während des Spritzgießens auftritt. Die Materialeigenschaften der Glas- und Keramik-MHK können Tabelle 4-2 entnommen werden.

Tabelle 4-2: Eigenschaften der verwendeten MHK [3M07, Om11]

MHK-Typ	Glas 1	Glas 2	Glas 3	Keramik
Dichte in g/cm ³	0,32	0,38	0,6	0,88*
Bruchbeständigkeit in MPa	13,8	27,6	68,9	2.500
Mittlerer Durchmesser in µm	40	40	30	50-80
Wärmeleitfähigkeit in W/m K	0,108	0,127	0,200	unbekannt
*: Wert selbst bestimmt				

Zur detaillierten Untersuchung des Einflusses der MHK-Größe und –Dichte auf die thermische Beständigkeit der Kompositmaterialien wird der MHK-Typ Glas 3 in Ethanol sedimentiert, um deutlich unterscheidbare Größenverteilungen ansonsten gleicher MHK zu erreichen. Die abgesetzten und aufgeschwommenen MHK-Anteile wurden getrennt entnommen und auf ihre Größenverteilung überprüft. Die Ergebnisse können Tabelle 4-3 entnommen werden, wobei die aufgeschwommenen MHK als Glas 3.1 und die abgesetzten MHK als Glas 3.2 bezeichnet werden. Diese MHK werden nur zur Untersuchung des thermischen Abbaus des syntaktischen Silikonschaumes verwendet.

Tabelle 4-3: Gemessene Eigenschaften der sedimentierten Glas-MHK

MHK-Typ	Glas 3.1	Glas 3	Glas 3.2
Dichte in g/cm ³	0,46	0,6	1,19
Mittlerer Durchmesser in µm	38	30	25

Die MHK werden mit einem maximalen Füllgrad von 30 vol.% eingebracht, der mit Dichtebestimmungen beständig kontrolliert wird. In Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass höhere Füllgrade aufgrund einer unzulässig niedrigen Erosions- und Kriechwegbeständigkeit der Materialien nicht möglich sind. Im Laufe der Untersuchungen konnte der zugehörige Wirkmechanismus identifiziert werden, so dass zukünftig wahrscheinlich höhere Füllgrade möglich sind [Quelle: DIES Paper → eingereicht, noch keine Rückmeldung].

Reines HTV besitzt eine unzureichende Beständigkeit gegen Erosion und Kriechwegbildung, so dass kommerziell eingesetzte Materialien mit dem Flammenschutzmittel ATH versetzt werden müssen. Dementsprechend beinhalten die untersuchten HTV-Kompositionen weiterhin einen verhältnismäßig großen Anteil an ATH. Die Untersuchungen zeigen eine starke Abhängigkeit der Erosionsbeständigkeit der neuen HTV-Kompositionen vom ATH-Anteil. Es ist bekannt, dass ATH in Silikon erst ab rund 20 vol.% seine Flammenschutzwirkung zeigt. Daher wurde der minimale Füllgrad an ATH nach Voruntersuchungen zu 20 vol.% gewählt. Da die Materialeigenschaften des HTV beibehalten werden sollten, wurde der maximale Gesamtfüllgrad zu 50 vol.% gewählt, woraus ein maximaler MHK-Füllgrad von 30 vol.% resultiert.

Eine Übersicht über die untersuchten Materialkombinationen ist zusammen mit Angaben der gemessenen Dichte und berechneten MHK-Füllgrade in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: Notation und Kennwerte der verschiedenen Kompositmaterialien

Füllstoffe	Füllgrad	Notation	Dichte	Tatsächlicher MHK-Füllgrad
LSR				
-	-	LSR	1,11 g/cm ³	0 vol.%
Glas 1	10 vol.%	10 vol.% Glas 1	1,06 g/cm ³	9,2 vol.%
Glas 1 sil.	10 vol.%	10 vol.% Glas 1 s	1,06 g/cm ³	9,5 vol.%
Glas 1	30 vol.%	30 vol.% Glas 1	0,89 g/cm ³	29,7 vol.%
Glas 1 sil.	30 vol.%	30 vol.% Glas 1 s	0,90 g/cm ³	29,5 vol.%
Glas 2	10 vol.%	10 vol.% Glas 2	1,07 g/cm ³	10,3 vol.%
Glas 2	30 vol.%	30 vol.% Glas 2	0,91 g/cm ³	30,9 vol.%
Glas 3	10 vol.%	10 vol.% Glas 3	1,09 g/cm ³	9,1 vol.%
Glas 3 sil.	10 vol.%	10 vol.% Glas 3 s	1,09 g/cm ³	9,4 vol.%
Glas 3	30 vol.%	30 vol.% Glas 3	0,98 g/cm ³	31,6 vol.%
Glas 3 sil.	30 vol.%	30 vol.% Glas 3 s	0,98 g/cm ³	31,6 vol.%
Keramik	10 vol.%	10 vol.% Keramik	1,11 g/cm ³	10,1 vol.%
Keramik	30 vol.%	30 vol.% Keramik	1,05 g/cm ³	31,9 vol.%
HTV				
ATH	36 vol.%	36 vol.% ATH	1,61 g/cm ³	0 vol.%
Glas 2	20 vol.% MHK / 30 vol.% ATH	Glas 2 20/30	1,45 g/cm ³	15,9 vol.%
Glas 2	25 vol.% MHK / 25 vol.% ATH	Glas 2 25/25	1,33 g/cm ³	21,2 vol.%
Glas 2	30 vol.% MHK / 20 vol.% ATH	Glas 2 30/20	1,23 g/cm ³	24,9 vol.%
Glas 3	20 vol.% MHK / 30 vol.% ATH	Glas 3 20/30	1,45 g/cm ³	19,4 vol.%
Glas 3 sil.	20 vol.% MHK / 30 vol.% ATH	Glas 3 s 20/30	1,44 g/cm ³	19,6 vol.%
Glas 3	25 vol.% MHK / 25 vol.% ATH	Glas 3 25/25	1,33 g/cm ³	25,4 vol.%
Glas 3	30 vol.% MHK / 20 vol.% ATH	Glas 3 30/20	1,25 g/cm ³	28,2 vol.%
Keramik	20 vol.% MHK / 30 vol.% ATH	Keramik 20/30	1,51 g/cm ³	16,8 vol.%
Keramik	30 vol.% MHK / 20 vol.% ATH	Keramik 30/20	1,34 g/cm ³	25,0 vol.%

Deutlich wird, dass die angestrebten MHK-Füllgrade in LSR mit geringen Abweichungen erreicht werden. Die maximale Dichtereduktion in LSR bei Verwendung des leichtesten MHK-Typen (Glas 1) und 30 vol.% beträgt 20 %. Je höher die Dichte der eingebrachten MHK, umso geringer ist die resultierende Dichtereduktion. In HTV konnten die angestrebten MHK-Füllgrade bei Verwendung der MHK Typen Glas 2 und Keramik nicht erreicht werden. Mit Hilfe von Lasermikroskopaufnahmen konnte der Bruch eines signifikanten Anteils der MHK nachgewiesen werden. Die MHK sind nach dem Einmischen in die Silikonmasse noch intakt und zerbrechen teilweise aufgrund des hohen Drucks während des anschließenden Heißpressens der Prüflinge. Die maximale Dichtereduktion von MHK-gefülltem HTV verglichen mit dem HTV-Referenzmaterial wird durch Verwendung des MHK-Typs Glas 2 und 30 vol.% Füllgrad erreicht und beträgt knapp 24 %.

4.2 Materialqualifikation „Syntaktischer Schaum“

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen der verschiedenen relevanten Materialeigenschaften vorgestellt. Die Untersuchungsmethoden folgen dabei normierten Prüfverfahren, falls diese existieren und wissenschaftlichen Empfehlungen, falls nicht. Zunächst werden die kritischen bzw. füllgradbegrenzenden Materialeigenschaften vorgestellt. Die übrigen Eigenschaften folgen in der in Tabelle 4-1 gezeigten Reihenfolge. Falls nicht gesondert angemerkt, werden alle Ergebnisse mit ihrem arithmetischen Mittelwert und dem 95-% Konfidenzintervall angegeben.

4.2.1 Erosion & Kriechwegbildung

Die Beständigkeit gegen Erosion und Kriechwegbildung ist eine der wichtigsten Eigenschaften für Freiluftisolierstoffe. Verschmutzte und benässte Isolierstoffoberflächen zeigen einen geringeren Oberflächenwiderstand und daher größere Leckströme. Diese können elektrische Teilentladungen auf der Oberfläche hervorrufen, wodurch vor allem Polymere irreversibel geschädigt werden und das Lebensdauerende eines Silikonverbundisolators eingeleitet werden kann. Die auftretenden Schädigungen können sich entweder als elektrisch leitfähiger Graben entlang des Isolators zeigen (Kriechwegbildung) oder als grabende Erosion, die den wetterunbeständigen Kern des Isolators freilegt. Daher ist eine ausreichende Beständigkeit gegen Kriechwegbildung und Erosion unerlässlich für einen neuen Freiluftisolierstoff. Die Tests werden im Schiefe-Ebenen-Prüfverfahren nach DIN EN 60587 an jeweils 10 Prüflingen je Materialkomposition durchgeführt. Dabei wird ein Plattenprüfling im 45°-Winkel eingespannt und mit einem hydrophobieunterdrückenden, leitfähigen Elektrolyt betropft, während Hochspannung von einigen kV angelegt wird [Sc15]. Die Mindestanforderung für Freiluftisolierstoffe beträgt 3,5 kV Prüfspannung, daher werden alle Materialien bei dieser Spannung untersucht [IE07]. Für HTV-Prüflinge werden die Prüfbelastungen mit einer Spannung von 4 kV verschärft (Flussrate 0,5 ml/min, Vorwiderstand 33 kΩ), um eine bessere Materialunterscheidung vornehmen zu können. Die Prüflinge werden maximal 6 h belastet. Tritt in dieser Zeit Erosion auf, die durch einen Prüfling hindurchgeht, oder bildet sich eine elektrisch leitfähige Kriechspur, wird der Prüfling abgeschaltet und die Ausfallzeit aufgenommen. Die Referenzmaterialien bestehen den Test, d.h. von 10 Prüflingen ist auch nach 6 h kein Prüfling ausgefallen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der maximale Füllgrad für die MHK auf rund 30 vol.% begrenzt ist, unabhängig davon, ob LSR oder HTV-Prüflinge untersucht werden. Daher werden für Untersuchungen der übrigen Materialeigenschaften keine höheren MHK-Füllgrade untersucht.

LSR

Untersuchungen an LSR zeigen eine starke Abhängigkeit der Erosionsbeständigkeit von den verwendeten MHK und von dem Füllgrad [Sc15]. In Abbildung 4-1 sind die Ausfallzeiten für verschiedene LSR-Kompositionen aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen eine erhöhte Ausfallzeit bei der Verwendung von Glas-MHK mit großem Durchmesser (Glas 3.1) auch bei 30 vol.% Füllgrad. Die Zugabe von Keramik-MHK hat nur geringe Auswirkungen auf die Ausfallzeit. 90 % der untersuchten Prüflinge bestehen den Test für 10 und 30 vol.% Füllgrad, während die Bestehensquote für Glas-MHK mit 10 vol.% zwischen 20 und 60 % liegt und für 30 vol.% für alle Materialien mit Glas-MHK zwischen 0 und 30 %. Die Erosionsbeständigkeit kann durch die zusätzliche Zugabe von Nanopartikeln oder Quarzmehl (jeweils 5 Gew.%) nicht verbessert werden. Eine Oberflächenbehandlung der MHK mit einem Vinylsilan für eine chemische Anbindung zwischen MHK und Matrix verschlechtert die Beständigkeit der Materialien gegen Erosions- und Kriechwegbildung tendenziell, was auf eine geringere Vernetzung des LSR bei Zugabe von Vinylsilan zurückzuführen ist [SLG16a].

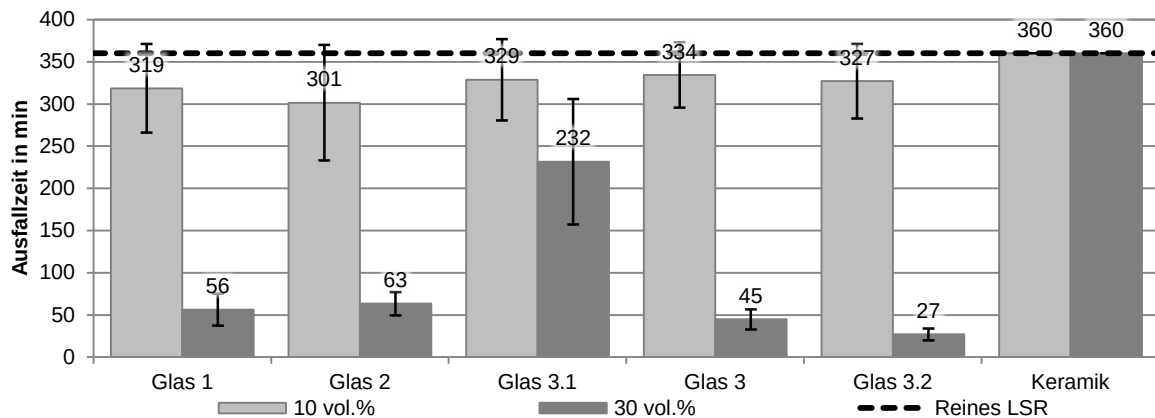


Abbildung 4-1: Ausfallzeit für gefüllte LSR-Prüflinge im Schiefe-Ebenen-Prüfverfahren bei 3,5 kV

HTV

Die untersuchten Materialkompositionen zeigen bei Belastung laut Norm bei 3,5 kV alle eine ausreichend hohe Beständigkeit gegen Erosion und Kriechwegbildung [Sc15]. Um eine bessere Unterscheidung der Materialien zu ermöglichen, werden die Prüfbedingungen wie beschrieben verschärft (siehe Abbildung 4-2). Deutlich wird, dass bei höheren Belastungen MHK-Füllgrade von mehr als 20 vol.% nur für keramikgefüllte Prüflinge empfehlenswert sind.

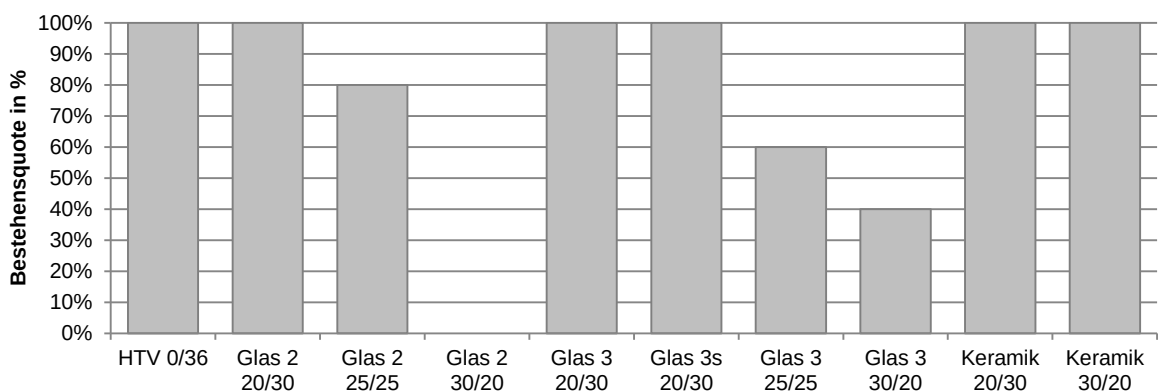


Abbildung 4-2: Bestehensquote für gefüllte HTV-Prüflinge im Schiefe-Ebenen-Prüfverfahren bei 4 kV

4.2.2 Beständigkeit gegen stromschwache elektrische Entladungen

Neben der Beständigkeit gegen Erosion und Kriechwegbildung ist die Beständigkeit gegen stromschwache elektrische Entladungen die zweitwichtigste Eigenschaft für einen Freiluftisoliertstoff, da hierbei ebenfalls die thermische Beständigkeit des Isolierstoffes untersucht wird. Die Untersuchungen werden im Lichtbogenbeständigkeit-Prüfverfahren nach DIN EN 61621 durchgeführt. Dabei werden auf einen kleinen Prüflingsblock zwei Elektroden aufgesetzt und mit 12,5 kV belastet, so dass sich zwischen den Elektroden eine stabile elektrische Entladung ausbildet. Über 7 Minuten lang wird jede Minute über eine Steigerung der Brenndauer und Stromstärke der Prüfling zunehmend stärker thermisch belastet, bis er durch Entzündung oder Bildung einer leitfähigen Schicht ausfällt. Die Mindestanforderungen für Freiluftisoliertstoffe sieht eine Ausfallzeit von mehr als 180 s vor [IE07]. Es werden jeweils 10 Prüflinge untersucht.

LSR

Die Untersuchung von LSR-Prüflingen zeigt eine deutliche Abnahme der Lichtbogenbeständigkeit bei Zugabe von Glas-MHK und einen tendenziellen Anstieg bei Zugabe von

Keramik-MHK (Abbildung 4-3). Für Glas-MHK nimmt die Lichtbogenbeständigkeit zudem mit steigendem Füllgrad ab, wohingegen sie für Keramik-MHK bei den untersuchten Füllgraden konstant bleibt. Dies kann teilweise durch die zunehmende Wärmeleitfähigkeit des Kompositmaterials durch Zugabe der Keramikpartikel erklärt werden, wodurch die Kühlung der thermisch belasteten Silikonoberfläche erhöht wird [DEIS Paper]. Allgemein zeigen die untersuchten Materialien eine ausreichend hohe Lichtbogenbeständigkeit von mehr als 180 s nach IEC TR 62039, mit Ausnahme der mit Glas 3 und Glas 3.2 zu 30 vol.% gefüllten LSR-Proben.

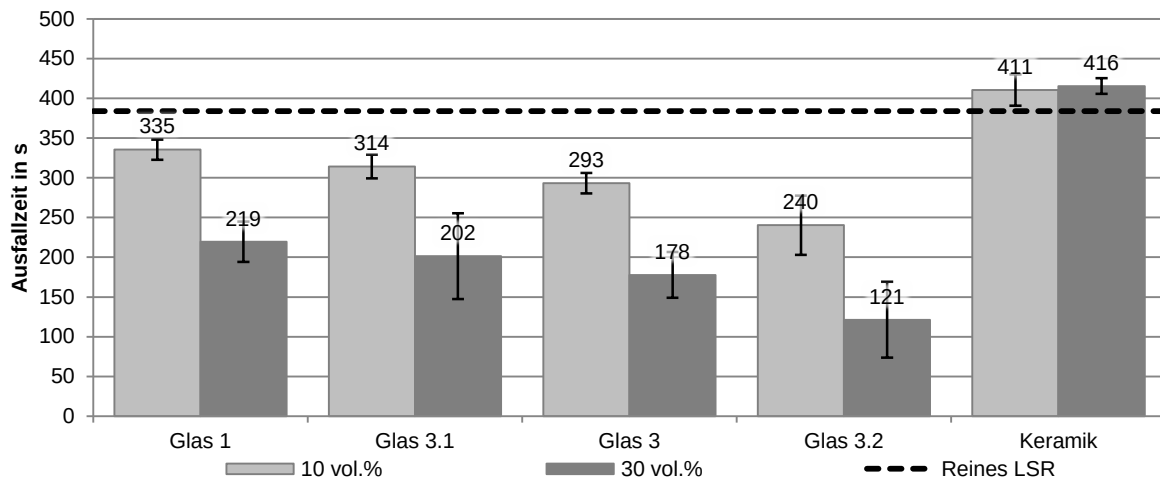


Abbildung 4-3: Ausfallzeiten für gefüllte LSR-Prüflinge im Lichtbogenbeständigkeit-Test nach DIN EN 61621

HTV

Bei Untersuchungen an HTV-Prüflingen zeigen alle Materialien eine ausreichend hohe Lichtbogenbeständigkeit nach IEC TR 62039 (siehe Abbildung 4-4). Durch die Zugabe von Keramik-MHK kann die Beständigkeit im Vergleich zum Referenzmaterial erhöht werden, ebenso bei Verwendung von silanisierten Glas-MHK.

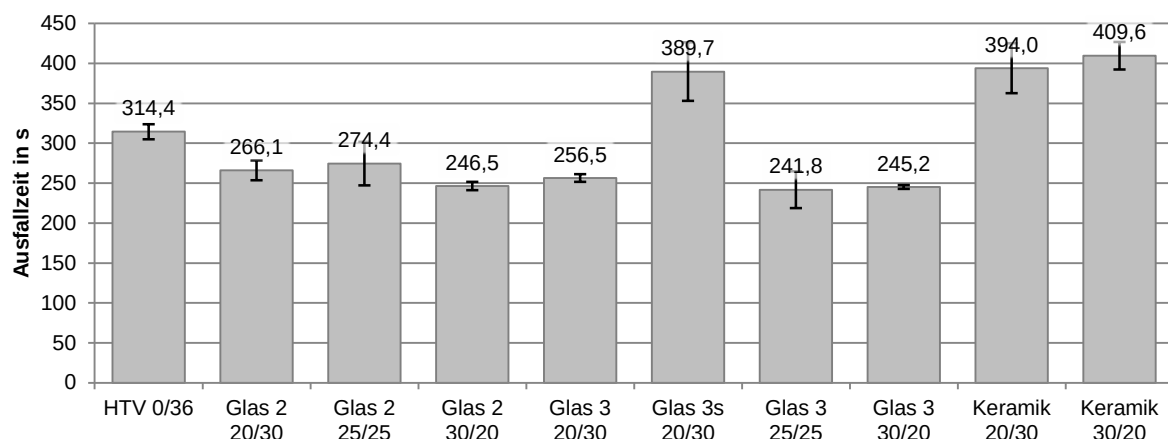


Abbildung 4-4: Ausfallzeiten für gefüllte HTV-Prüflinge im Lichtbogenbeständigkeit-Test nach DIN EN 61621

Die beobachteten Einflüsse der MHK auf die Beständigkeit gegen Lichtbögen, Erosions- und Kriechwegbildung kann durch eine verringerte thermische Beständigkeit der Kompositmaterialien bei Zugabe der Füllstoffe erklärt werden und wird in thermogravimetrischen

Analysen nachgewiesen. Als Ursache hierfür wird die Zunahme der Silikonoberfläche identifiziert, die einen schnelleren Abbau des Polymers bei Überschreiten der Zersetzungstemperatur hervorruft. Durch chemische Anbindung der MHK an die Matrix wird die Oberfläche des Silikons gegenüber der Verwendung von unsilanisierten MHK stark verringert, woraus eine stark erhöhte thermische Beständigkeit resultiert. Ähnliches gilt für Keramik-MHK, die vermutlich eine stärkere Anbindung an die Polymermatrix hervorgerufen und damit den beschleunigten Abbau des Silikons verhindern. Durch die hohe thermische Beständigkeit der anorganischen MHK kann sich die gesamte thermische Beständigkeit der Kompositmaterialien erhöhen.

4.2.3 Dielektrische Materialeigenschaften

Die dielektrischen Materialeigenschaften umfassen die elektrische Leitfähigkeit, den Verlustfaktor und die Relative Permittivität. Eine genaue Kenntnis dieser Materialparameter ist vor allem für feststoffisolierte Systeme von großer Bedeutung; für gasisolierte Systeme, wie Freiluftisolatoren, jedoch abgesehen von der relativen Permittivität lediglich von untergeordneter Bedeutung. Die Ursache hierfür ist, dass die Isolatoren nicht den Schwachpunkt der Isolation darstellen, sondern diese an den Grenzflächen der Isolatoren zu dem umgebenden Gasmedium liegen. Die Grenzflächen unterliegen dabei einer undefinierten Belastung, die sich aus Verschmutzung und Benässung ergibt. Entscheidend sind daher die Leitfähigkeit und der Verlustfaktor der verschmutzten Grenzschichten, die jedoch stark variieren. Daher werden die dielektrischen Parameter lediglich für HTV-basierte Materialien bestimmt und nur in Einzelfällen für LSR-basierte Materialien. Die Messungen folgen den Empfehlungen der DIN EN 60093 und VDE 0303 Teil 4.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-7 dargestellt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die elektrische Leitfähigkeit durch die Zugabe von Keramik-MHK steigt, während Glas-MHK kaum einen Einfluss haben. Die relative Permittivität der Materialien sinkt verglichen mit dem Referenzmaterial mit steigendem Füllgrad wie erwartet ab. Der Verlustfaktor nimmt bei Zugabe von Glas-MHK mit steigendem Füllgrad tendenziell ab, während er bei Zugabe von Keramik-MHK tendenziell ansteigt.

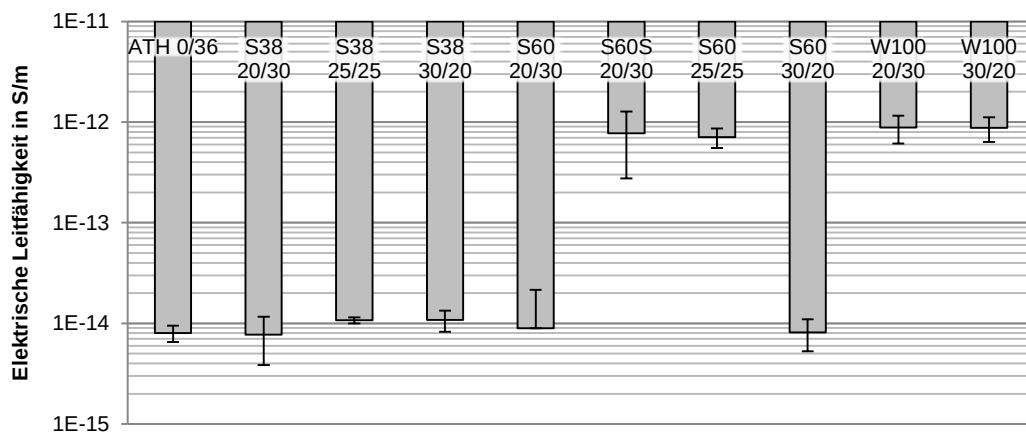


Abbildung 4-5: Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit von HTV gefüllt mit MHK

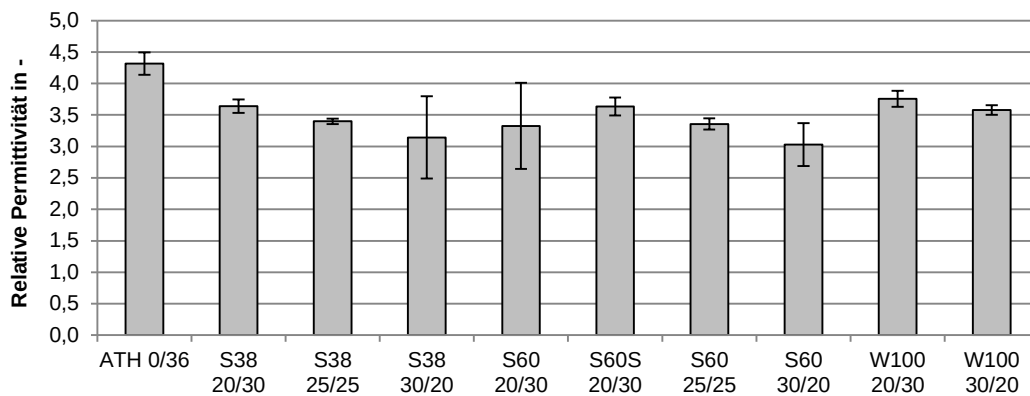


Abbildung 4-6: Vergleich der relativen Permittivität von HTV gefüllt mit MHK

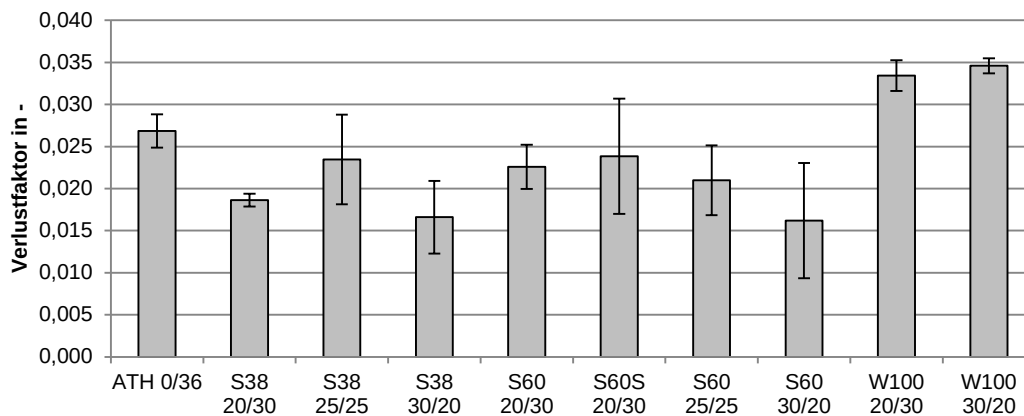


Abbildung 4-7: Vergleich des Verlustfaktors von HTV gefüllt mit MHK

Insgesamt werden die Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften als für die Anwendung unkritisch bewertet.

4.2.4 Durchschlagfestigkeit

Die Durchschlagfestigkeit von MHK-gefüllten Silikonproben wird für Wechsel-, Gleich- und Blitzstoßspannungsbelastung entsprechend der Vorgaben von VDE 0303-21, VDE 0303-22 und VDE 0303-23 durchgeführt und die Stehspannung bestimmt. Für die Untersuchungen werden LSR-Prüflinge mit eingegossenen Elektroden verwendet, da in dieser Anordnung die intrinsische Durchschlagfestigkeit am besten bestimmt werden kann [Sc16]. Aufgrund der Verarbeitungsmethode ist eine Herstellung entsprechender HTV-Proben nicht möglich, so dass diese Materialien mit aufgesetzten, ungleichen Elektroden untersucht werden. Untersuchungen der Wechsel- und Gleichspannungsfestigkeit werden mithilfe des 20-Sekunden Stufenverfahrens durchgeführt, Untersuchungen der Blitzimpulsspannungsfestigkeit mithilfe von 3 Blitzstößen je Spannungsstufe bei positiver Polarität. Um Überschläge zu vermeiden werden alle Untersuchungen in Transformatoröl durchgeführt.

Es werden jeweils 5 LSR-Proben zur Bestimmung der Wechselspannungsfestigkeit untersucht sowie 10 Proben zur Bestimmung der Gleich- und Blitzstoßspannungsfestigkeit. Für HTV werden für alle Untersuchungen jeweils 5 Proben verwendet. Die Ergebnisse wurden veröffentlicht und können detailliert in der Literatur nachgelesen werden [Sc16].

Die intrinsische Durchschlagfestigkeit von LSR nimmt durch die Zugabe von MHK generell gegenüber dem ungefüllten Zustand sowohl bei Belastung mit Wechsel-, Gleich- und

Blitzstoßspannung ab [Sc16]. Aufgrund der veränderten Prüfanordnung ist in HTV ein leicht gegenläufiger Trend erkennbar. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei Untersuchungen mit aufgesetzten Elektroden äußere Teilentladungen an den Elektrodenkanten einen Erosionsdurchschlag der Materialien hervorrufen. Durch Zugabe von MHK wird dieser Erosionsvorgang verzögert, da die Füllstoffe für die Erosionskanäle als Barrieren wirken. Ein ähnlicher Effekt kann bei LSR-Prüflingen, die zusätzlich mit aufgesetzten Elektroden untersucht werden, ebenfalls beobachtet werden (Abbildung 4-8).

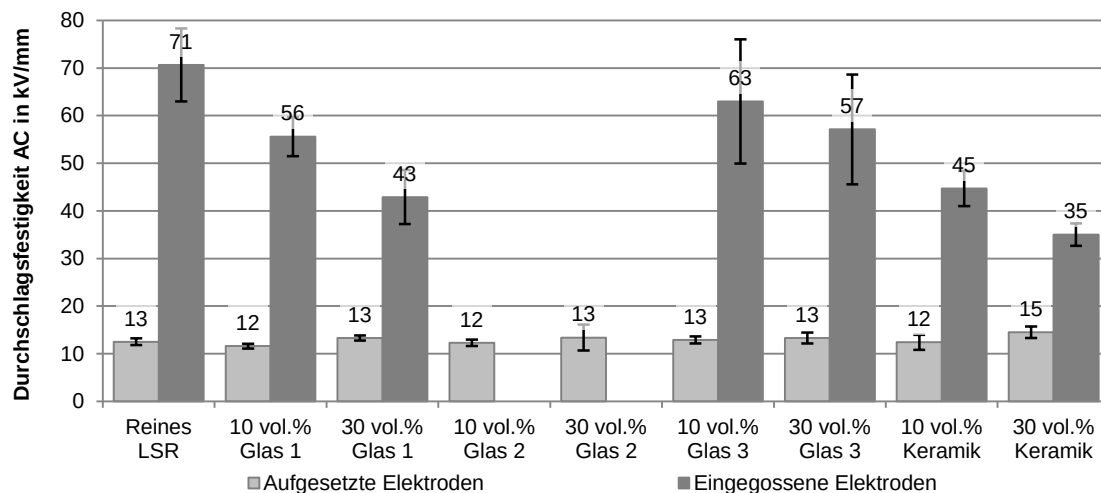


Abbildung 4-8: Vergleich der AC-Durchschlagfeldstärke von LSR-Prüflingen mit aufgesetzten und eingegossenen Elektroden

Beim Vergleich der Durchschlagergebnisse für syntaktischen Schaum auf Silikonbasis mit syntaktischen Schäumen auf Epoxidharzbasis werden starke Übereinstimmungen hinsichtlich des Einflusses der MHK, der mittleren MHK-Durchmesser und der MHK-Wandmaterialien identifiziert. Die für Epoxidharzschäume entwickelten Modelle zur Erklärung der Durchschlagvorgänge können für die untersuchten Materialien übertragen werden [Tr09, Wi14].

Es wird davon ausgegangen, dass der Durchschlagprozess in syntaktischem Schaum bei Wechsellastspannungsbelastung durch Teilentladungen in den MHK eingeleitet wird. Diese erodieren die MHK-Wände und Matrixstege zwischen den MHK und leiten somit den Gesamtdurchschlag ein. Durch die Verwendung von weniger MHK steigt die durchschnittliche Dicke der Matrixstege, wodurch die Durchschlagspannung steigt. Durch Verwendung von kleineren MHK steigt die Einsatzfeldstärke für Teilentladungen in den MHK an und die einzelnen Ladungsträgerlawinen sind kleiner, wodurch eine geringere Erosion verursacht wird. Dies führt ebenfalls zu einem Anstieg der Durchschlagspannung.

Der Durchschlag bei Gleichspannungsbelastung verläuft ähnlich, jedoch ist die Teilentladungsaktivität deutlich geringer, woraus eine höhere Durchschlagspannung bei Gleichspannungsbelastung resultiert.

Der Durchschlagprozess bei Blitzstoßspannungsbelastung beruht nicht auf Erosionsvorgängen, weshalb die beobachteten Durchschlagspannungen höher liegen, als bei Wechsel- und Gleichspannungsbelastung. Teilentladungen in einzelnen MHK rufen dabei durch die Beeinflussung des elektrischen Feldes im Kompositmaterial Teilentladungen in benachbarten MHK hervor, wodurch die elektrische Belastung des dazwischenliegenden Matrixmaterials ansteigt und ein Durchschlag der Matrixstege folgen kann. Die Durchschlagfestigkeit der Kompositmaterialien hängt in diesem Fall ebenfalls von der Größe der MHK sowie von dem Füllgrad ab.

4.2.5 Mechanische Materialkennwerte

Die mechanischen Eigenschaften des syntaktischen Schaumes werden hinsichtlich der Zugfestigkeit, Reißdehnung und Weiterreißfestigkeit nach ISO 34-1 und ISO 527-2 anhand von Zugversuchen untersucht. Detaillierte Ergebnisse zur Zugfestigkeit, Reißdehnung und Weiterreißfestigkeit wurden veröffentlicht und können der Literatur entnommen werden [SLG16a].

Zur Qualifizierung der Füllstoffanbindung werden Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop angefertigt. Dabei werden die Prüflinge zerrissen und anschließend die Reißfläche betrachtet.

Zusätzlich werden für LSR Untersuchungen der Viskosität durchgeführt, da die Viskosität einen starken Einfluss auf die zukünftige Verarbeitbarkeit des Isolierstoffs hat. Da HTV auch ohne Füllstoffe bereits standfest ist, werden für HTV-basierte Materialien keine Viskositätsmessungen durchgeführt.

LSR

Mechanische Untersuchungen in LSR dienen neben der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Untersuchung der Füllstoffanbindung und der Wirksamkeit von Oberflächenbehandlungen der MHK, um eine chemische Anbindung an die Matrix zu erreichen. Exemplarisch ist der Einfluss verschiedener MHK auf die Zugfestigkeit dargestellt (Abbildung 4-9).

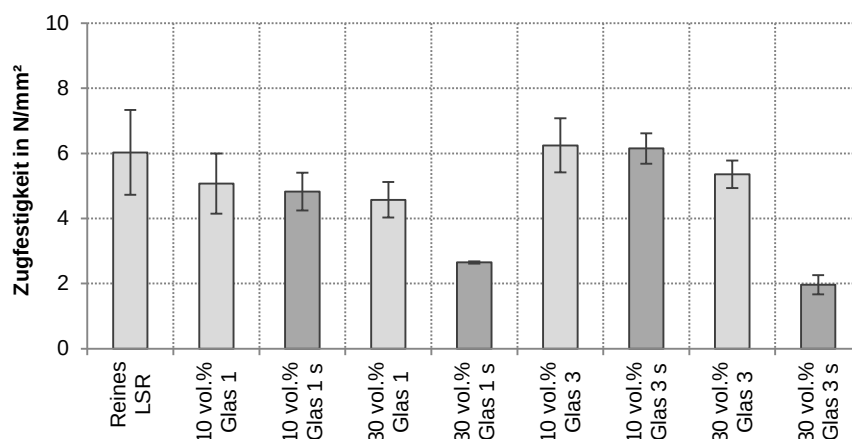


Abbildung 4-9: Zugfestigkeit von gefüllten LSR-Prüflingen

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeit bei Zugabe von 30 vol.% silanisierter MHK in LSR. In Kooperation mit Wacker Chemie AG konnte eine reduzierte Vernetzung des LSR durch den aufgetragenen Überzug der MHK mit Vinylsilan zur Ausbildung einer chemischen Anbindung zwischen MHK und Matrix nachgewiesen werden. Durch das zusätzliche Einbringen von Vinylgruppen ist eine Anpassung des Verhältnisses der für die Vernetzung des LSR zuständigen Vinyl- und Silangruppen. Daher werden die übrigen Materialeigenschaften nicht mit silanisierten MHK in LSR untersucht.

Durch Zugabe der MHK nimmt die Reißdehnung der Prüflinge insgesamt ab, da die Steifigkeit des Materials zunimmt. Dies wirkt sich positiv auf das Handling der final hergestellten Komponenten aus.

Die Viskosität des LSR nimmt durch die Zugabe der MHK abhängig vom gewählten Füllgrad stark zu, behält allerdings ihre mit steigender Scherrate fallende Charakteristik bei. Der

Einfluss der MHK-Größe auf die Viskosität ist gering ausgeprägt und wird als vernachlässigbar angesehen.

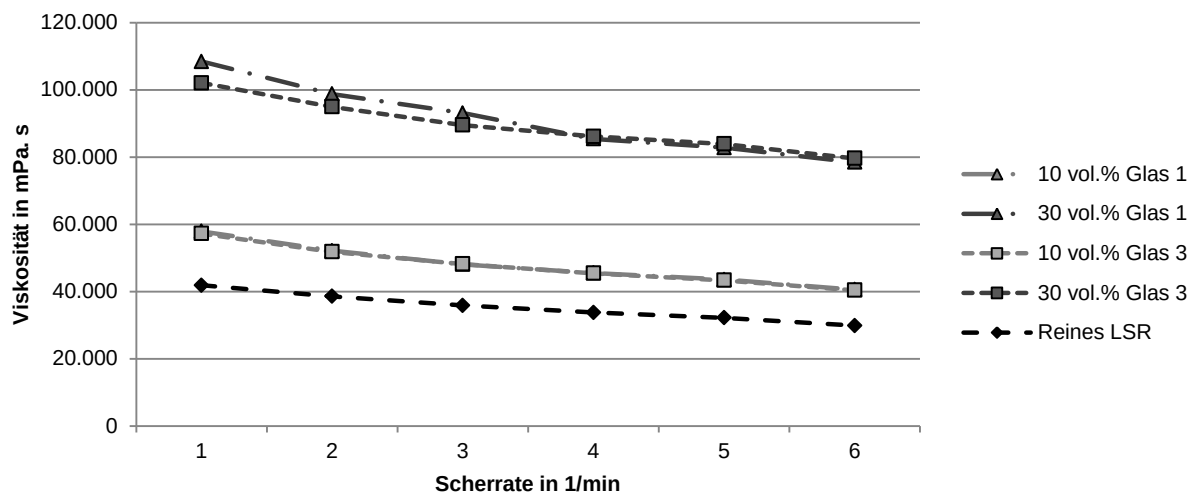


Abbildung 4-10: Exemplarische Viskosität von gefülltem LSR in Abhängigkeit von der Scherrate

HTV

Untersuchungen in HTV dienen ebenfalls neben der Bestimmung der mechanischen Kennwerte der Bewertung des Einflusses einer Oberflächensilanisierung der MHK. Im Gegensatz zu LSR konnte kein negativer Einfluss des eingebrachten Vinylsilans auf die mechanischen Eigenschaften von HTV identifiziert werden.

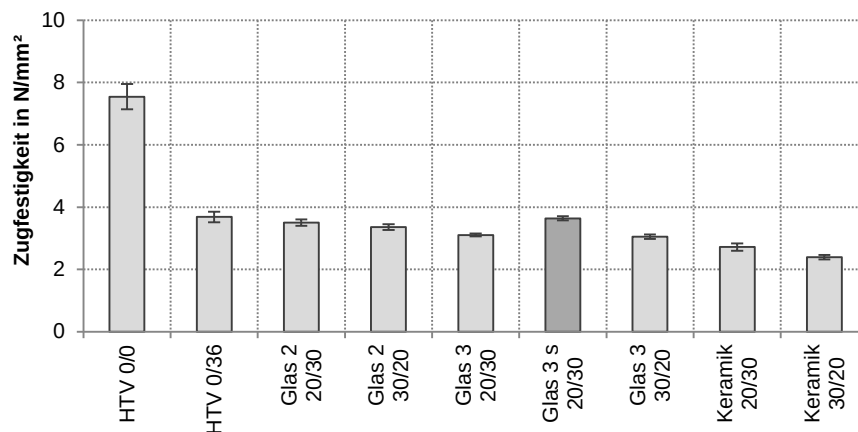


Abbildung 4-11: Zugfestigkeit von gefüllten HTV-Prüflingen

Die Ergebnisse zeigen eine starke Abnahme der Zugfestigkeit durch Zugabe von ATH an. Dieser Einfluss wird durch das Einbringen von MHK nur geringfügig beeinflusst. Glas-MHK beeinflussen die mechanischen Eigenschaften nur in geringem Maße. Die Verwendung von silanisierten MHK kann die Zugfestigkeit leicht erhöhen. Keramik-MHK verursachen die größte Abnahme der Zugfestigkeit. Der Einfluss auf die Weiterreißfestigkeit von MHK in HTV ist gering. Die Reißdehnung nimmt ab, da auch das HTV durch Zugabe der MHK eine höhere Steifigkeit aufweist, was sich positiv auf das Handling der gefertigten Komponenten auswirkt.

Untersuchungen mit einem Rasterelektronenmikroskop der Reißfläche von LSR- und HTV-Prüflingen zeigen eine gute Anhaftung der MHK an die Matrix. Die MHK lösen sich nur selten

beim Zerreißen von der Matrix, sondern brechen häufiger. Dieser Effekt ändert sich nicht durch die Zugabe von Vinylsilan (Abbildung 4-12). Daraus wird abgeleitet, dass die Anbindung der MHK an die Matrix gut ist und sich daher nur eine geringfügige Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch einen Haftvermittler erreichen lassen.

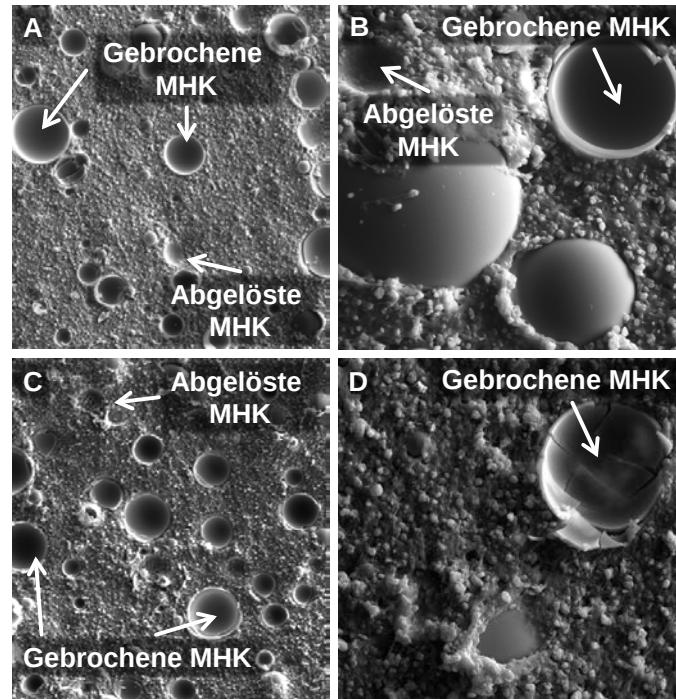
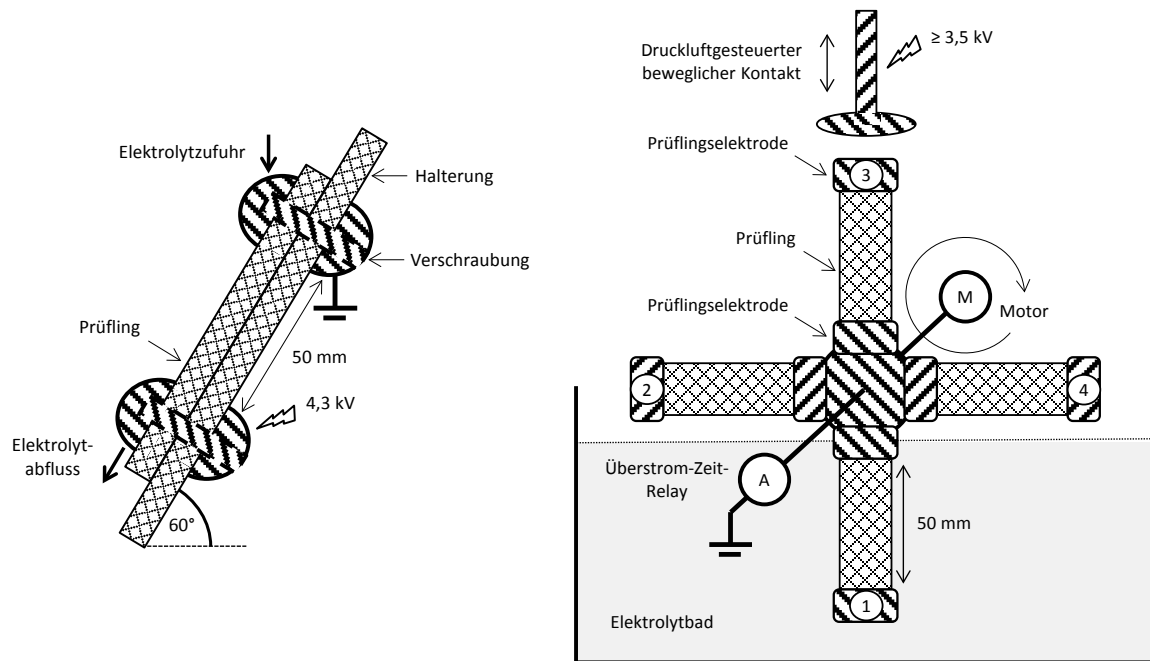


Abbildung 4-12: Elektronenmikroskopaufnahmen von gerissenen HTV-Prüflingen

- A: Glas 3 20/30 mit 200x Vergrößerung
- B: Glas 3 20/30 in 1.000x Vergrößerung
- C: Glas 3 s 20/30 mit 200x Vergrößerung
- D: Glas 3 s 20/30 in 1.000x Vergrößerung

4.2.6 Hydrophobieverlust

Die Hydrophobie von polymeren Freiluftisolierstoffen hat maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer von Freiluftisolierstoffen. Durch z.B. elektrische Entladungen an Wassertropfen wird die Oberfläche der Polymere geschädigt, so dass die Hydrophobie verloren gehen kann. Da noch keine standardisierten Prüfverfahren zum Hydrophobieverlust existieren, wird der Verlust der Hydrophobie durch Koronaentladungen an Wassertropfen mithilfe des Dynamischen Tropfen-Prüfverfahrens und des modifizierten Rad-Tauch-Prüfverfahrens nach Empfehlungen der Cigré untersucht [Ci10, Ci16]. Im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren rollen regelmäßig Elektrolittropfen über einen geneigten Plattenprüfling ab, während im modifizierten Rad-Tauch-Prüfverfahren zylindrische Prüfkörper nacheinander in ein Elektrolytbad eingetaucht und nach einer Abtropfphase mit Hochspannung belastet werden (Abbildung 4-13). In beiden Prüfverfahren kann der Verlust der Hydrophobie durch die Ausbildung einer geschlossenen Elektrolitspur auf dem Prüfling beobachtet werden. Dies verursacht einen Anstieg des Ableitstromes, der überwacht und zur Bestimmung der Ausfallzeit genutzt wird. Zur Verringerung der Ergebnisstreuung wird die Prüfspannung im Rad-Tauch-Prüfverfahren nach 24 h um 0,5 kV erhöht. Im Rad-Tauch-Prüfverfahren werden je 5 Prüflinge untersucht, im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren jeweils 10 Prüflinge. Da für HTV-Kompositionen keine entsprechenden Prüflinge gefertigt werden konnten, beschränken sich die Untersuchungen mit dem Rad-Tauch-Prüfverfahren auf LSR.



**Abbildung 4-13: Links: Prüfanordnung Dynamischer Tropfen Prüfverfahren
Rechts: Prüfanordnung modifiziertes Rad-Tauch-Prüfverfahren**

Herstellungsbedingt stehen für das modifizierte Rad-Tauch-Prüfverfahren nur LSR-Proben zur Verfügung, so dass für HTV kein Vergleich zwischen den beiden Prüfverfahren erfolgen kann.

LSR

Statistische Auswertungen zeigen, dass die beobachteten Ausfallzeiten des Dynamischen Tropfen Prüfverfahrens und des modifizierten Rad-Tauch-Prüfverfahrens insgesamt keiner Normalverteilung folgen. Daher erfolgt die Darstellung und Auswertung anhand der empirischen Verteilungsfunktionen (Abbildung 4-14, Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16). Die Ausfallzeiten weisen eine starke Ergebnisstreuung auf, so dass kein klarer Effekt der MHK auf den Hydrophobieverlust festgestellt werden kann.

Im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren fällt auf, dass mit MHK-gefüllte Prüflinge vereinzelt deutlich höhere Ausfallzeiten aufweisen, als Prüflinge ohne MHK. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigendem Füllgrad.

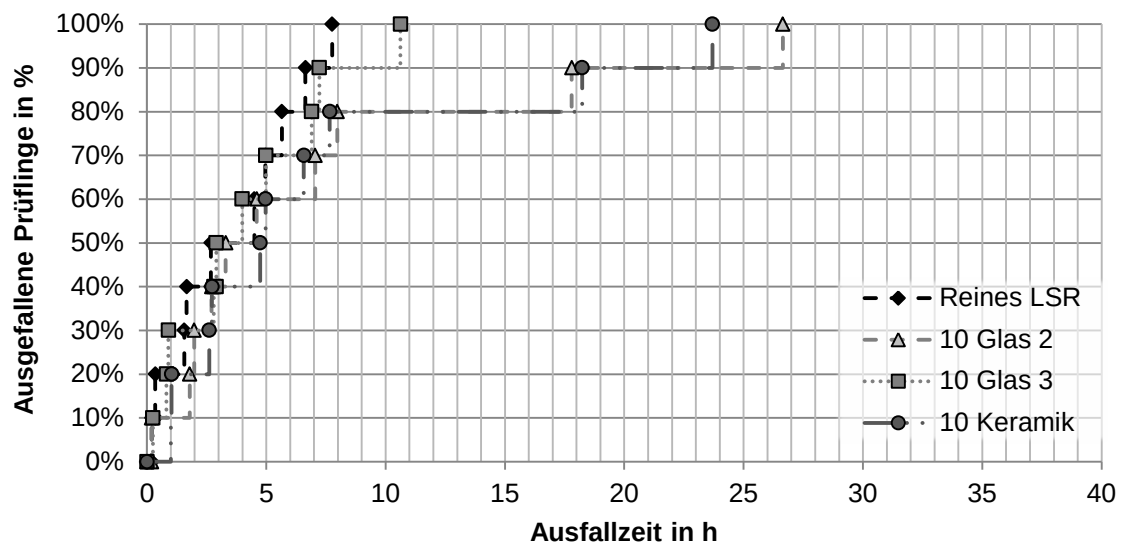


Abbildung 4-14: Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von LSR-Prüflingen gefüllt mit 10 vol.% MHK im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren

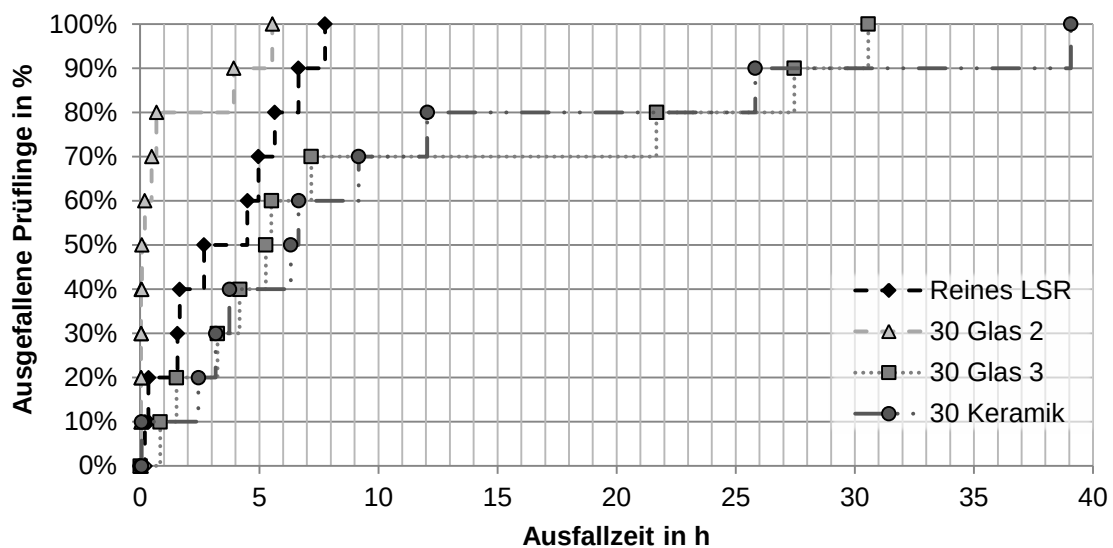


Abbildung 4-15: Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren

Im modifizierten Rad-Tauch-Prüfverfahren kann kein Einfluss der MHK auf den Hydrophobieverlust in LSR identifiziert werden. Jedoch zeigt sich ebenfalls eine zunehmende Ergebnisstreuung bei Zugabe der MHK in LSR.

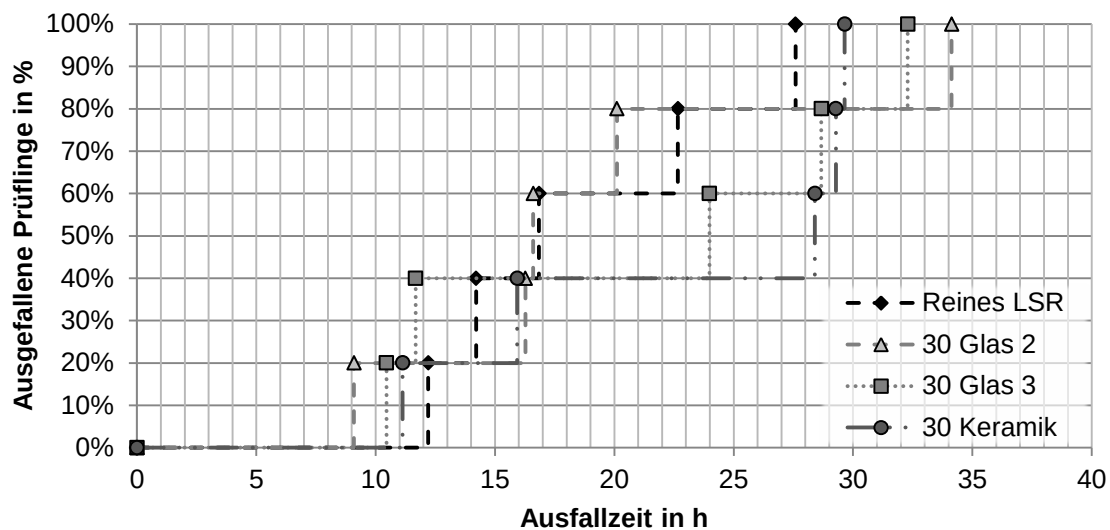


Abbildung 4-16: Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK im modifizierten Rad-Tauch-Prüfverfahren

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse kann kein eindeutiger Einfluss der MHK auf den Hydrophobieverlust in LSR identifiziert werden. Tendenziell nimmt die Ausfallzeit bei Zugabe von MHK zu. Die Ursache für diesen Effekt ist bislang nicht bekannt, so dass weitergehende Forschung notwendig ist.

HTV

Untersuchungen an HTV-Prüflingen zeigen verschiedene Einflüsse der MHK auf den Hydrophobieverlust. Herstellungsbedingt liegen bei diesen Prüflingen die MHK an der Oberfläche frei und sind nicht mit Silikon bedeckt. An später hergestellten Isolatorschirmen aus HTV wurde dieser Effekt nicht beobachtet. Daher dienen die folgenden Untersuchungen als Worst-Case-Abschätzung des Hydrophobieverlustes, wenn an der Oberfläche eine große Zahl an hydrophilen MHK freiliegen.

Freiliegende Keramik-MHK verursachen eine Abnahme der Ausfallzeiten, während freiliegende Glas-MHK tendenziell eine Zunahme der Ausfallzeiten hervorrufen (Abbildung 4-17). Diese Beobachtungen werden durch Untersuchungen an Prüflingen gefüllt mit Glas 3 bestätigt. Durch eine Erhöhung des MHK-Füllgrades werden diese Effekte tendenziell verstärkt.

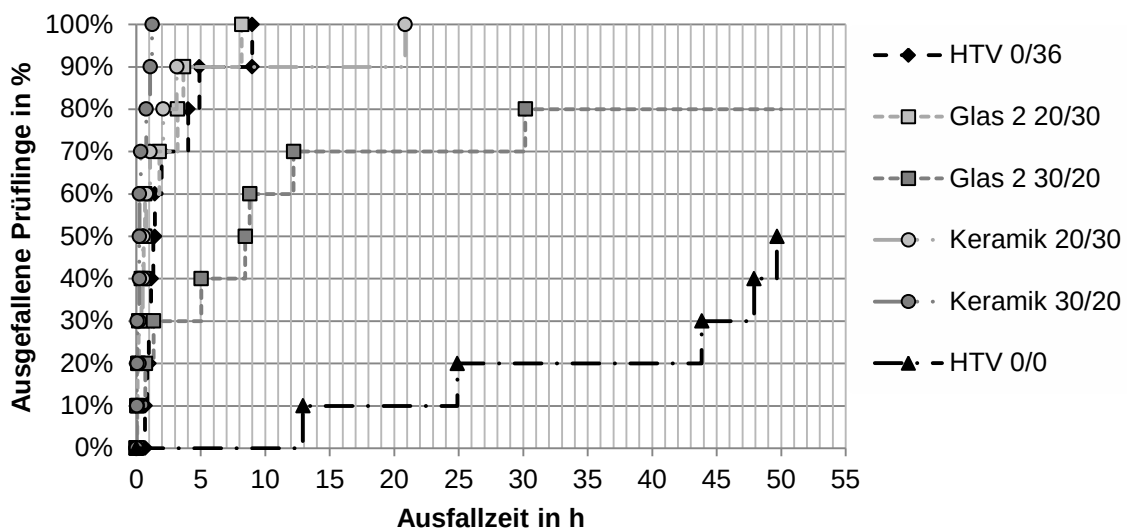


Abbildung 4-17: Empirische Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten von HTV-Prüflingen im Dynamischen Tropfen Prüfverfahren

Die Ursache für die veränderten Ausfallzeiten ist nicht bekannt. Die freiliegenden MHK sind vor Beginn der Untersuchungen mit Silikonmolekülen bedeckt und somit hydrophob. Der Abbau der Silikonmoleküle durch Tropfenkorona und die Bewegung der Silikonmoleküle auf und über die MHK-Oberflächen konnten im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht werden. Es wird empfohlen, zum besseren Verständnis der Vorgänge, in Zukunft die Grundlagenforschung in diesem Bereich fortzuführen.

4.2.7 Hydrophobiewiederkehr

Nach dem Verlust der Hydrophobie kann diese durch Umoorientierung von Molekülen und Bedeckung von geschädigten Oberflächen mit kurzkettigen, unbeschädigten Silikonmolekülen wiederkehren. Zur Untersuchung der Hydrophobiewiederkehr existiert kein genormtes Prüfverfahren, so dass auf Empfehlungen vorhergehender Forschungsarbeiten zurückgegriffen wird. Die Hydrophobiewiederkehr wird untersucht, indem zunächst mit elektrischen Entladungen die Oberfläche der Silikonprüflinge oxidiert wird, wodurch die Hydrophobie verloren geht. In der Folge wird in regelmäßigen Zeitabständen die Wiederkehr der Hydrophobie beobachtet. Die Bewertung erfolgt anhand der Messung der Randwinkel von auf der Prüflingsoberfläche aufgesetzten Wassertropfen. Insbesondere die Messung des dynamischen Rückzugswinkels erlaubt eine aussagekräftige Bewertung der Oberflächeneigenschaften. Der dynamische Rückzugswinkel kann gemessen werden, indem ein aufgesetzter Wassertropfen in seinem Volumen verringert wird. Der bei diesem Vorgang messbare Kontaktwinkel wird als dynamischer Rückzugswinkel bezeichnet. Die Hydrophobiebewertung folgt damit Empfehlungen der Cigré [Ci10, Ci16]. Je Material werden fünf Prüflinge untersucht und jeweils vier Wassertropfen je Messzeitpunkt aufgesetzt. Die detaillierten Ergebnisse sind veröffentlicht [SLG16b].

LSR

Die Untersuchungen an LSR zeigen eine Verlangsamung der Hydrophobiewiederkehr durch Zugabe von MHK. Bei Zugabe von Keramik-MHK ist die Verlangsamung abhängig von dem eingebrachten Füllgrad. Dieser Effekt tritt für Glas-MHK nicht auf, die Ursache hierfür ist nicht bekannt und bedarf weiterer Grundlagenforschung zur Klärung.

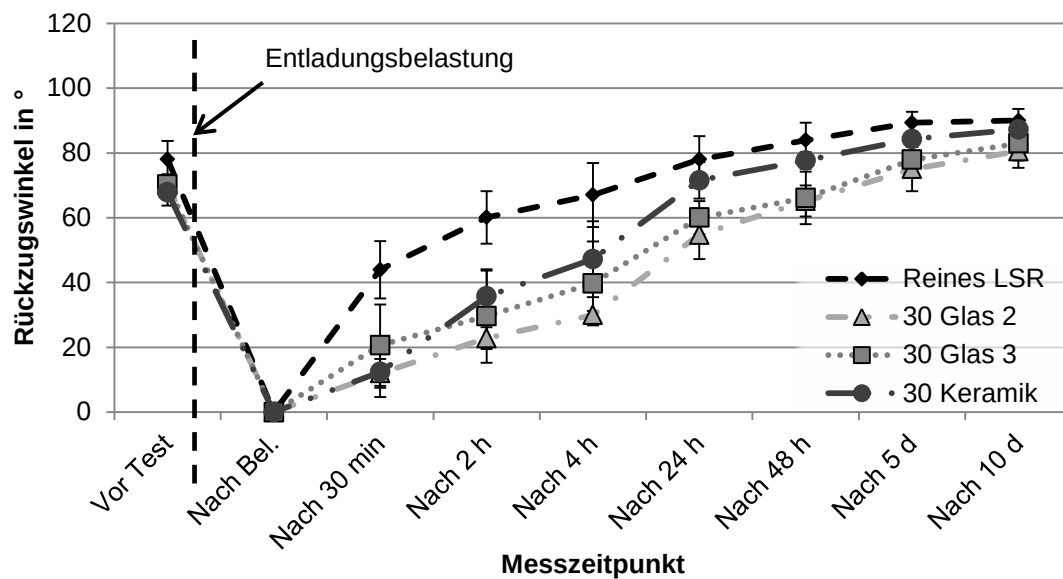


Abbildung 4-18: Exemplarische Hydrophobiewiederkehr von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK

HTV

Der in LSR beobachtete Einfluss von MHK auf die Hydrophobiewiederkehr zeigt sich in ähnlicher Form auch an HTV-Prüflingen, bei denen die MHK herstellungsbedingt freiliegen. Bei Verwendung von Glas-MHK ist die Hydrophobiewiederkehr tendenziell gegenüber dem Referenzmaterial verlangsamt.

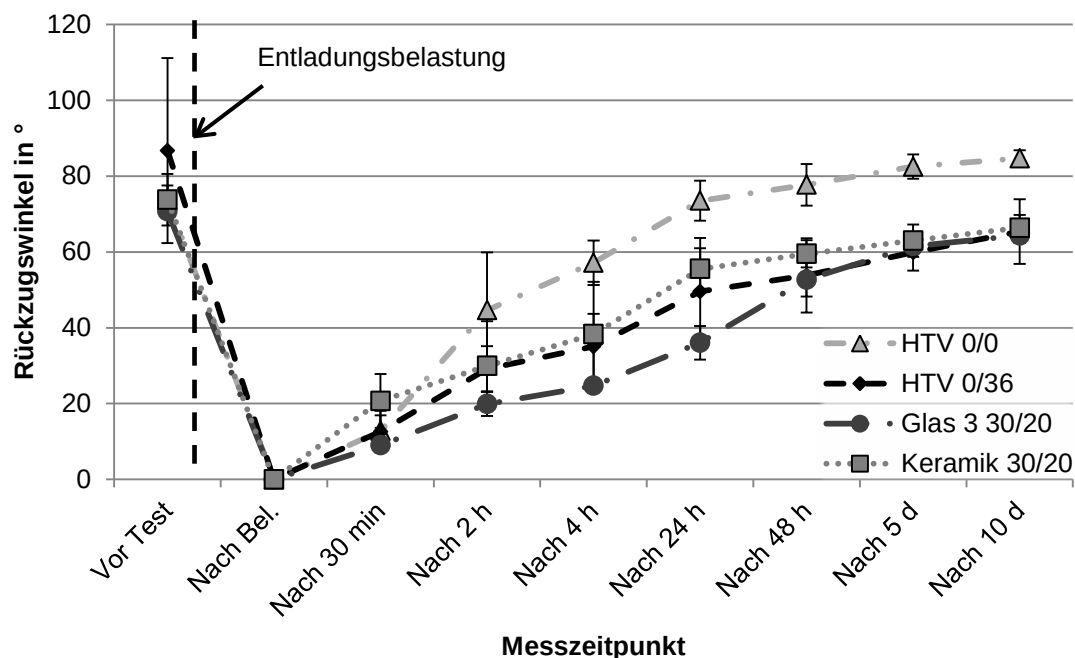


Abbildung 4-19: Exemplarische Hydrophobiewiederkehr von HTV-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK

4.2.8 Hydrophobietransfer

Die wichtigste Hydrophobie-eigenschaft stellt der Transfer der Hydrophobie auf angelagerte Verschmutzungsschichten dar. Dies erfolgt durch die Diffusion von kurzkettigen Silikonmolekülen aus der Materialoberfläche auf die Verschmutzungsschicht. Im Freilufteinsatz werden Isolatoren rasch mit Staub, etc. bedeckt. Ohne eine rasch ablaufende Übertragung der

Hydrophobie auf die Verschmutzungsschicht, besteht das Risiko der Bildung von Trockenbandentladungen, die zu einer irreversiblen Schädigung der Isolatoren führen.

Der Transfer wird nach Empfehlungen der Cigré untersucht, da es auch zu dieser Materialeigenschaft derzeit keine genormten Prüfverfahren gibt [Ci10]. Die Siliconproben werden mit silanisiertem Quarzmehl verschmutzt. Anschließend wird über einen definierten Zeitbereich regelmäßig die Hydrophobie der Verschmutzungsschicht anhand Messungen des dynamischen Rückzugswinkels bewertet. Je Material werden fünf Prüflinge untersucht. Die detaillierten Ergebnisse sind bereits veröffentlicht [SLG16b].

LSR

Untersuchungen an LSR zeigen keinen signifikanten Einfluss der Zugabe von MHK auf den Hydrophobietransfer (Abbildung 4-20), unabhängig von dem verwendeten MHK-Typ und MHK-Hüllmaterial.

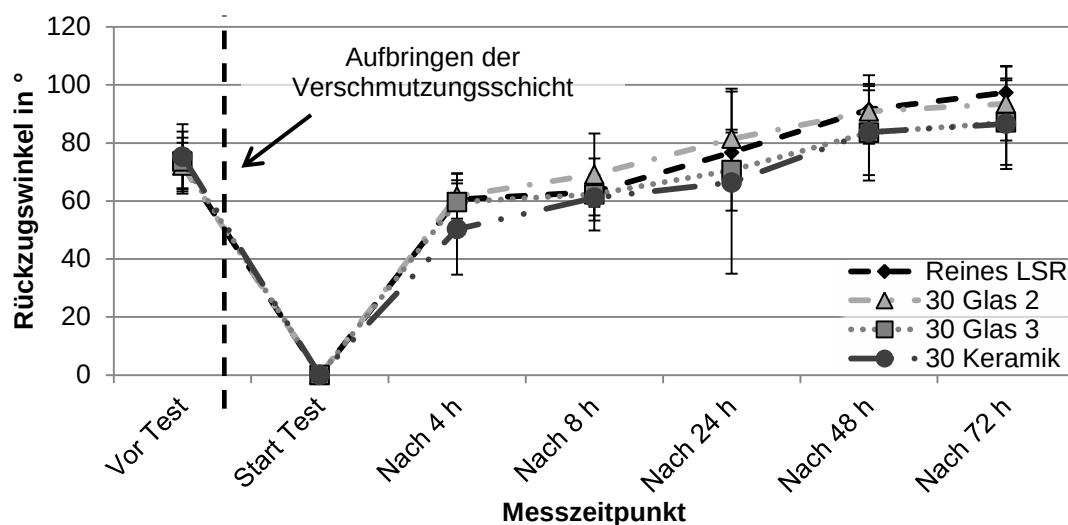


Abbildung 4-20: Exemplarischer Hydrophobietransfer von LSR-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK

HTV

Der Hydrophobietransfer von HTV-Prüflingen wird durch das Einbringen von Glas-MHK, verglichen mit dem Referenzmaterial, nicht beeinflusst. Die Zugabe von Keramik-MHK beschleunigt das Ansteigen der dynamischen Rückzugswinkel. Die Ergebnisse deuten an, dass die Bewegung von Siliconmolekülen durch die Keramik-MHK weniger stark behindert werden, als durch das als Flammenschutzmittel verwendete ATH, so dass verglichen mit dem Referenzmaterial eine Beschleunigung des Hydrophobietransfers beobachtet werden kann.

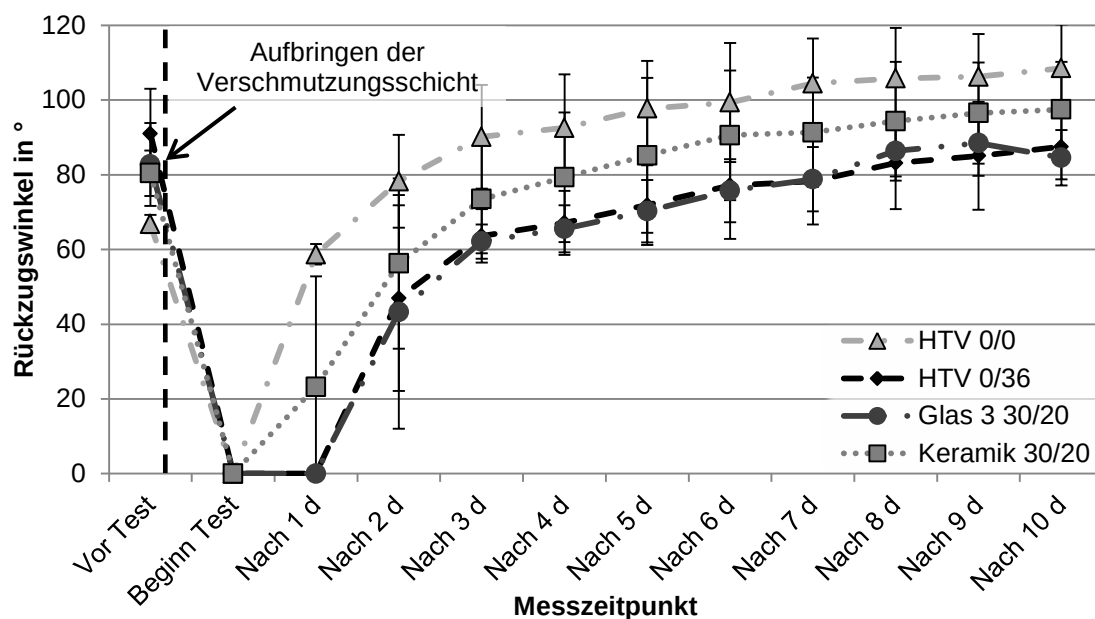


Abbildung 4-21: Exemplarischer Hydrophobietransfer von HTV-Prüflingen gefüllt mit 30 vol.% MHK

4.2.9 Einfluss von Sonnenstrahlung auf Hydrophobie

Durch UV-Strahlung können chemische Bindungen in Silikon aufgebrochen werden und somit eine Alterung des Materials hervorrufen, die sich unter Anderem in einer Änderung des Kontaktwinkels zeigt [Fa12, Ha99]. Es ist bekannt, dass Silikon gegenüber atmosphärischer UV-Strahlung unempfindlich ist [Ki03], die Grenzflächen an Füllstoffen jedoch anfällig gegenüber UV-Strahlung sein können [Fa12].

Zur Untersuchung der Alterungsbeständigkeit werden Silikonprüflinge für 10 Tage unter Tageslichtlampen gelegt und ununterbrochen mit 950 W/m^2 bestrahlt. Nach 5 und 10 Tagen werden die dynamischen Rückzugswinkel gemessen. Die Ergebnisse zeigen keine signifikante Veränderung der Kontaktwinkel, so dass keine Schädigung der Prüflinge durch Tageslicht nachgewiesen werden kann. Mit Untersuchungen der Prüflingsoberflächen nach den Tests mit einem Lasermikroskop kann keine Schädigung der Prüflinge festgestellt werden.

4.2.10 Säure- und Bewetterungsbeständigkeit

Die Beständigkeit gegen Säurebelastung und Bewetterung wird durch 30-tägige Säurelagerung von Materialproben in Schwefelsäure und Salpetersäure mit der jeweiligen Konzentration von 0,01 mol/l untersucht (Schwefelsäure: pH 1,87; Salpetersäure pH 2,04). Diese beiden Säuren werden verwendet, da bekannt ist, dass saurer Regen zum größten Teil aus Schwefel- und Salpetersäure besteht [Bo15, MGM99, RCV81, Ve87]. Zur Beurteilung der Oberflächenschädigung werden die Kontaktwinkel zur Hydrophobiebestimmung gemessen und optische Untersuchungen mit einem Lasermikroskop durchgeführt. Parallel erfolgen Untersuchungen mit Prüflingen gelagert in Wasser, um eine Unterscheidung zwischen dem Säureeinfluss und dem eindiffundieren von Wassermolekülen vornehmen zu können. Zusätzlich werden die Materialproben mit den genannten Säuren für 10 Tage einmal täglich besprüht und zusätzlich unter Tageslichtlampen mit der Bestrahlungsintensität von 950 W/m^2 bei 30°C Umgebungstemperatur für 10 Tage gelagert. Die Strahlungsintensität liegt damit leicht oberhalb der Strahlungsintensität, die in Mitteleuropa während eines Hochsommertages entsteht [VD11].

Während der Säurelagerung werden die Kontaktwinkel alle 5 Tage gemessen und mit den Kontaktwinkeln der wassergelagerten Kontrollgruppe verglichen. Dabei werden keine Unterschiede zwischen den säuregelagerten und wassergelagerten Prüflingen festgestellt. Ein besprühen der Silikonoberflächen mit Säure hat ebenfalls keinen Effekt, der sich von einem Besprühen mit Wasser unterscheidet. Die Rückzugswinkel aller Prüflinge werden durch die Lagerung und Besprühung lediglich geringfügig verringert.

Beobachtungen mit einem Lasermikroskop zeigen starke Erosionsspuren an LSR-Prüflingen gefüllt mit Keramik-MHK (Abbildung 4-22). Durch die Erosion werden oberflächennahe Keramik-MHK, die zuvor mit Silikon bedeckt waren, freigelegt. Auffällig ist, dass die Erosionsspuren alle in eine gemeinsame Richtung zeigen. Bei Lagerung von LSR-Prüflingen gefüllt mit Keramik-MHK in Wasser sind keine Erosionsspuren zu beobachten. Es ist bekannt, dass Füllstoffe mit Ton-Mineralien nicht in Silikone eingebracht werden sollen, da hierdurch Hydrolyse katalysiert werden kann [Hi01, Xu98]. Die Ursache für den beobachteten Effekt konnte nicht abschließend geklärt werden. Denkbar ist ein Auswaschen von Eisenverbindungen aus der Keramik durch Säurelagerung, wodurch die Hydrolyse des Silikons katalysiert wird.

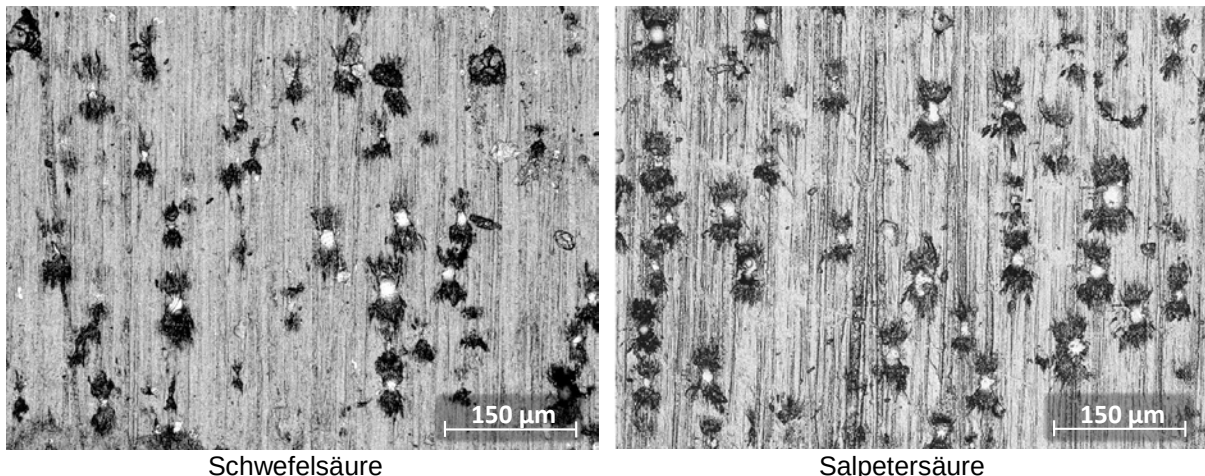


Abbildung 4-22: Erosionserscheinungen an der Oberfläche von säuregelagerten LSR-Prüflingen Keramik 30 vol.%

Werden Silikonprüflinge mit Schwefel- oder Salpetersäure besprüht und zwischen dem Sprühen bei 50 °C gelagert, so entstehen auf allen Prüflingen bereits nach 3-5 facher Besprühung deutliche Erosionsspuren, die unabhängig sind von der verwendeten Silikonart und der Zugabe von Füllstoffen (Abbildung 4-23). Das gleiche Verhalten zeigt sich, wenn Prüflinge bei 950 W/m² und 30°C Umgebungstemperatur besprüht werden. Durch Messungen mit einem Pyrometer wird die Oberflächentemperatur der Prüflinge zu 50 °C bestimmt.

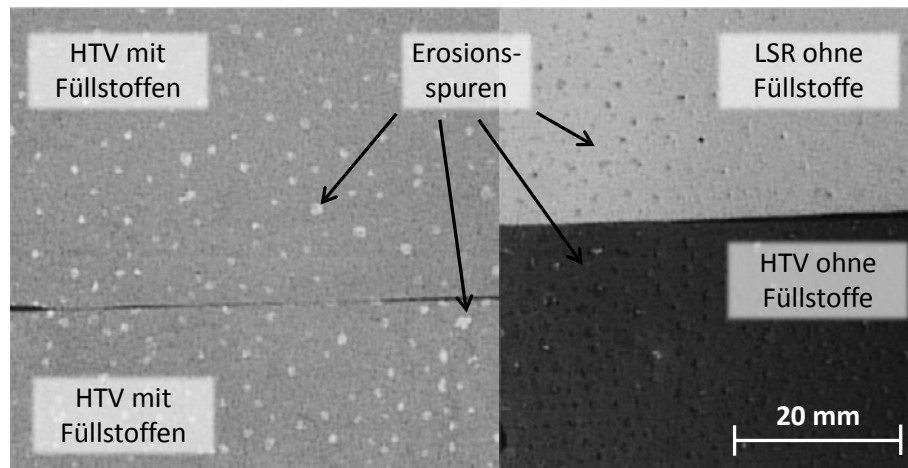


Abbildung 4-23: Exemplarische Erosionsspuren an LSR- und HTV-Prüflingen, die bei 50°C Lagerungstemperatur mit Schwefelsäure besprüht wurden

Basierend auf den Ergebnissen wird die Säurebeständigkeit der gefüllten Silikone als ausreichend bewertet. Jedoch wird nicht empfohlen, Keramik-MHK in LSR einzubringen, bis der Schädigungsmechanismus geklärt worden ist.

4.2.11 Beständigkeit gegenüber Wasseraufnahme

Silikone zeigen eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit [Bä99]. Die Wasseraufnahme von Isolierstoffen kann durch die Zugabe von Füllstoffen stark zunehmen [Ha99, Ku05]. Als Folge davon verändern sich die dielektrischen Eigenschaften und die Durchschlagfestigkeit nimmt ab. Zur Untersuchung der Wasseraufnahmefähigkeit werden Silikonprüflinge für 50 Tage bei 50 °C in destilliertem Wasser gelagert, das alle 10 Tage gewechselt wird. Während der Lagerdauer wird die Gewichtszunahme dokumentiert und nach der Wasserlagerung wird der Verlustfaktor gemessen. Dieser soll nach Empfehlungen von IEC TR 62039 auf nicht mehr als 0,2 ansteigen. Je Material werden fünf Prüflinge in Wasser gelagert, von denen an dreien der Verlustfaktor nach DIN EN 60093 mithilfe einer Schutzringanordnung in einer Dreifachbestimmung ermittelt wird.

LSR

Die exemplarische Wasseraufnahme von LSR-Prüflingen ist in Abbildung 4-24 dargestellt. Während das ungefüllte LSR und LSR gefüllt mit Keramik-MHK keine statistisch signifikanten Gewichtsänderungen erfahren, nehmen Prüflinge gefüllt mit Glas-MHK deutlich an Gewicht zu und nach 50 Tagen ist keine Sättigung der Gewichtszunahme erkennbar. Die Gewichtszunahme fällt mit steigendem Füllgrad, sinkendem MHK-Durchmesser und bei Zugabe einer Silanisierung stärker aus. Nach dem Ende der Wasserlagerung sinkt das Gewicht der Prüflinge innerhalb von rund 4 Tagen wieder auf das Ausgangsgewicht ab.

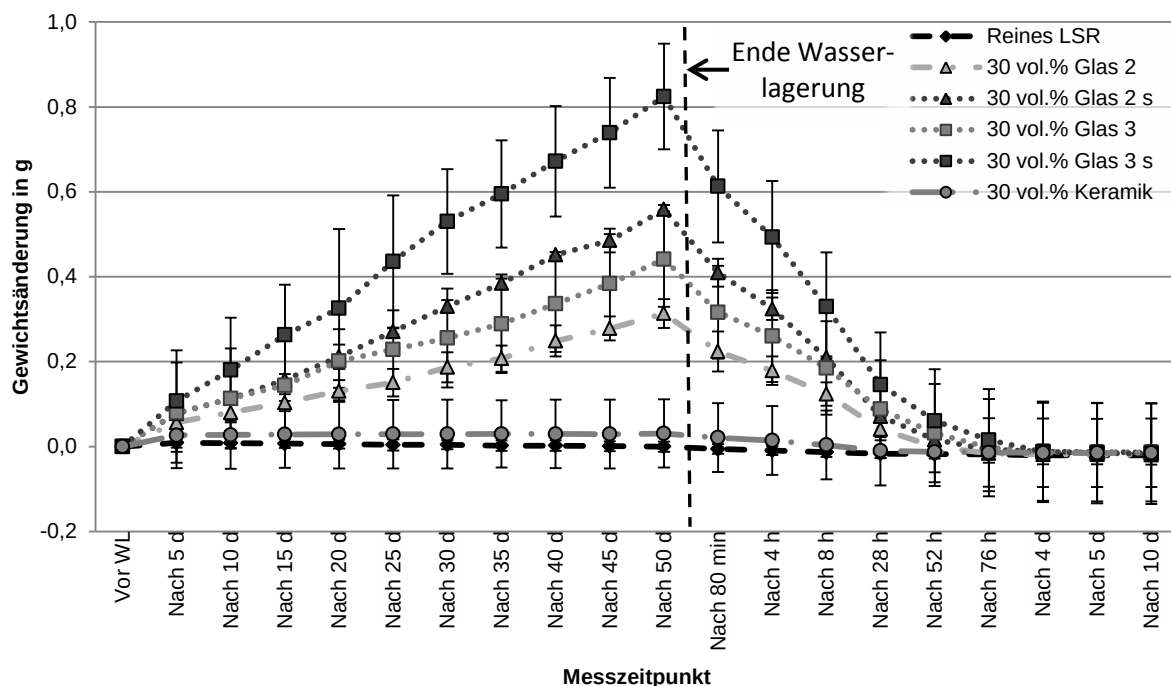


Abbildung 4-24: Exemplarische Gewichtsänderung von LSR-Prüflingen während der Wasserlagerung und der anschließenden Trocknung

Als Ursache für die Zunehmende Wasseraufnahme kann das Rieselmittel auf den Glas-MHK identifiziert werden. Wird dieses vorher abgewaschen, fällt die Gewichtszunahme deutlich geringer aus und erreicht innerhalb von 5 Tagen einen stationären Wert. Daraus wird abgeleitet, dass die hohe Wasseraufnahme auf einen hohen Konzentrationsgradienten gelöster Salze zurückzuführen ist. Eindringendes Wasser sammelt sich an der Oberfläche der MHK und löst dort Salze aus der MHK und dem Rieselmittel. Da das destillierte Wasser außerhalb der Prüflinge eine deutlich geringere Salzkonzentration aufweist, entsteht in Folge des angestrebten Konzentrationsausgleiches ein osmotischer Druck des Wassers, der ein aufquellen der Silikonprüflinge zur Folge hat. Es wird erwartet, dass dieser Effekt bei Verwendung von z.B. Leitungswasser nicht auftritt.

Die erhöhte Wasseraufnahme bei Verwendung von silanisierten Glas-MHK ist durch die geringere Vernetzung des Silikons begründet (siehe 4.2.5). Beim Eindringen des Wassers ist die notwendige Kraft zum Aufdehnen des Silikons bei geringerer Vernetzung geringer, so dass schneller Wasser eindringen kann.

HTV

Die bereits bei LSR beobachteten Effekte treten in HTV ebenfalls auf, jedoch hat die Silanisierung der Glas-MHK hier keinen negativen Einfluss auf die Wasseraufnahme, sondern verringert diese geringfügig. Keramik-MHK rufen auch in HTV keine verstärkte Wasseraufnahme hervor. Überraschend ist, dass ungefülltes HTV eine deutliche Gewichtszunahme während der Wasserlagerung zeigt, die durch Zugabe von silanisiertem ATH oder Keramik-MHK reduziert werden kann. Nach dem Trocknen der HTV-Prüflinge erreichen die Prüflinge nach 4 Tagen im Gegensatz zum LSR nicht wieder ihr Ausgangsgewicht, so dass davon auszugehen ist, dass unabhängig von der Materialkombination Restfeuchte im Material verbleibt.

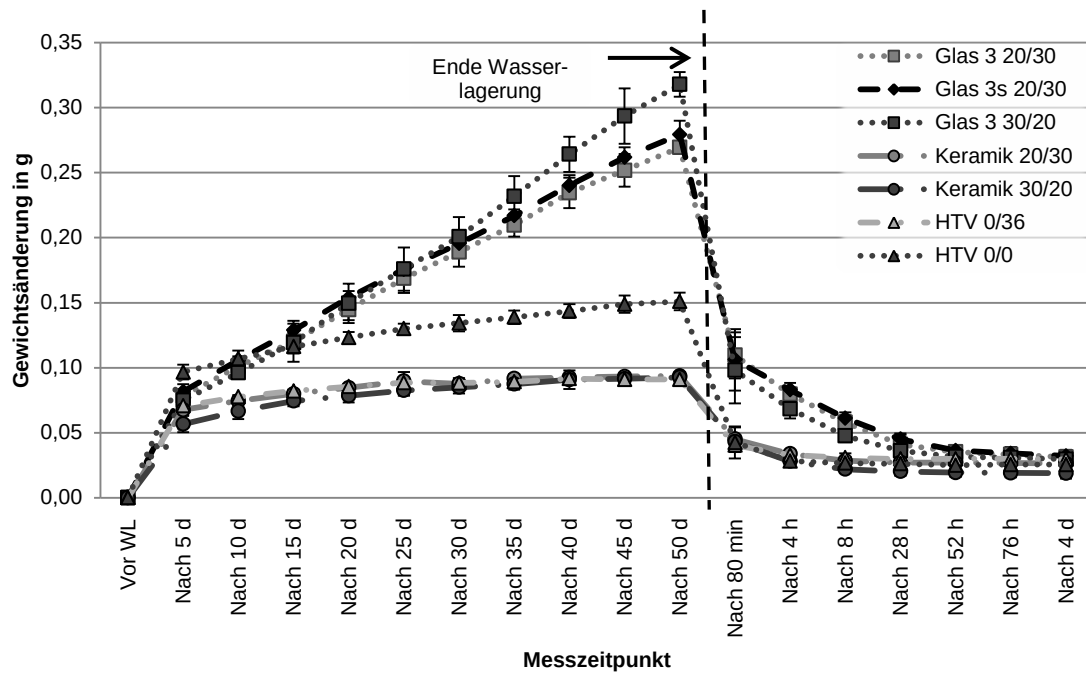


Abbildung 4-25: Exemplarische Gewichtsänderung von HTV-Prüflingen während der Wasserlagerung und der anschließenden Trocknung

Die Verlustfaktoren nach Ende der 50-tägigen Wasserlagerung sind in Tabelle 4-5 abgebildet. Durch die Wasserlagerung steigen die Verlustfaktoren an, überschreiten jedoch nicht den von der IEC vorgegebenen Grenzwert von 0,02.

Tabelle 4-5: Verlustfaktoren wassergelagerter LSR- und HTV-Prüflinge

Material	Mittelwert Verlustfaktor nach Wasserlagerung	Material	Mittelwert Verlustfaktor nach Wasserlagerung
LSR		HTV	
LSR	0,00086	HTV 0/36	0,0722
30 vol.% Glas 2	0,0074	Glas 2 20/30	0,0647
30 vol.% Glas 2 s	0,0046	Glas 2 25/25	0,0618
30 vol.% Glas 3	0,01	Glas 2 30/20	0,0591
30 vol.% Glas 3 s	0,0093	Glas 3 20/30	0,0693
30 vol.% Keramik	0,056	Glas 3 s 20/30	0,0655
		Glas 3 25/25	0,0528
		Glas 3 30/20	0,0443
		Keramik 20/30	0,0742
		Keramik 30/20	0,0645

Aufgrund der raschen Trocknung der Prüflinge und die nicht direkt auf Freiluftanwendungen übertragbaren Versuchsbedingungen wird die erhöhte Wasseraufnahme durch Glas-MHK-gefüllte Prüflinge als unkritisch bewertet.

4.2.12 Finale Materialbewertung und Auswahl

Die finale Materialauswahl erfolgt anhand der Gegenüberstellung der relevanten Materialeigenschaften der gefüllten Materialien mit den Eigenschaften der Referenzmaterialien anhand der Mittelwerte, sofern nicht anders angegeben. Dabei wird relativ zueinander eine Verbesserung/Verschlechterung der Materialeigenschaften angezeigt. Das jeweilige Referenzmaterial wird dabei zu 100 % gesetzt und die MHK gefüllten Materialien in Relation dazu angezeigt, wobei ein Wert größer als 100 % eine Verbesserung der jeweiligen Materialeigenschaft anzeigt und ein Wert kleiner 100 % eine Verschlechterung. Die für jede Materialeigenschaft festgelegte Verbesserungsrichtung ist in Tabelle 4-6 aufgeführt. Die relevanten Eigenschaften unterscheiden sich für LSR und HTV geringfügig.

Tabelle 4-6: Bewertete Materialeigenschaften für LSR und HTV-basierte Materialien

Materialeigenschaft	Besser bewertet, wenn ...	Materialeigenschaft	Besser bewertet, wenn ...
LSR		HTV	
Schiefe-Ebene-Test 3,5 kV [mm³/h]	niedrig	Schiefe-Ebene-Test 3,5 kV [mm³/h]	niedrig
Lichtbogentest [s]	hoch	Schiefe-Ebene-Test 4 kV [mm³/h]	niedrig
Durchschlagsfestigkeit AC [kV/mm] eingegossen	hoch	Lichtbogentest [s]	hoch
Durchschlagsfestigkeit DC (kV/mm) eingegossen	hoch	Durchschlagsfestigkeit AC [kV/mm] Platte/Platte	hoch
Impulsspannungsfestigkeit [kV/mm] eingegossen	hoch	Durchschlagsfestigkeit DC (kV/mm) Platte/Platte	hoch
Volumenwiderstand [Ohm Meter]*	hoch	Impulsspannungsfestigkeit [kV/mm] Platte/Platte	hoch
Verlustfaktor [-]	niedrig	Volumenwiderstand [Ohm Meter]*	hoch
Relative Permittivität [-]	niedrig	Verlustfaktor [-]	niedrig
Dichte [g/cm³]	niedrig	Relative Permittivität [-]	niedrig
Zugfestigkeit [N/mm²]	hoch	Dichte [g/cm³]	niedrig
Reißdehnung [%]	hoch	Zugfestigkeit [N/mm²]	hoch
Weiterreißwiderstand [N/mm]	hoch	Reißdehnung [%]	hoch
Shore A-Härte [-]	hoch	Weiterreißwiderstand [N/mm]	hoch
Median DDT Ausfallzeit [h]	hoch	Shore A-Härte [-]	hoch
Median Rad-Tauch-Prüfverfahren Ausfallzeit [h]	hoch	Median DDT Ausfallzeit [h]	hoch
Rückzugswinkel nach WL [°]	hoch	Rückzugswinkel nach WL [°]	hoch
Wasseraufnahme nach 50 Tagen	niedrig	Wasseraufnahme nach 50 Tagen	niedrig
Wasseraufnahme nach Trocknung (2d)	niedrig	Wasseraufnahme nach Trocknung (2d)	niedrig
Rel. Perm. 50 d WL [-]	niedrig	Rel. Perm. 50 d WL [-]	niedrig
Verlustf. 50 d WL [-]	niedrig	Verlustf. 50 d WL [-]	niedrig
Regeneration RW (48 h)	hoch	Regeneration RW 2d [%]	hoch
H.-Transfer nach 2 d [°]	hoch	H.-Transfer nach 2 d [°]	hoch
Preis [€/l]	niedrig	Preis [€/l]	niedrig
* Da die Kennwerte sich um Größenordnungen unterscheiden, wird für die Darstellung die Bewertung wie folgt durchgeführt: Relative Einordnung [%] = $\ln(\text{Material})/\ln(\text{Referenz})$			

Bei der Betrachtung der Auswertungsdiagramme und der Bewertung ist zu beachten, dass keine Konfidenzintervalle angegeben sind. Die Ausfallzeiten im Dynamischen Tropfen-Prüfverfahren und modifizierten Rad-Tauch-Prüfverfahren werden aufgrund der hohen Ergebnisstreuung mit ihrem Median angegeben. Auftretende Materialunterschiede in diesen Materialeigenschaften unterliegen daher keiner statistisch nachweisbaren Signifikanz (siehe Kapitel 4.2.6).

LSR

Die Bewertung der LSR-basierten Materialien hat früh ergeben, dass die Beständigkeit gegen Erosion, Kriechspurbildung und elektrische Entladungen nicht den Anforderungen entspricht, so dass nicht für alle untersuchten Materialkombinationen alle Materialeigenschaften untersucht wurden. Vielmehr wurde der Fokus auf die vollständige Analyse der vielversprechenderen HTV-Materialien gelegt. Zur Einordnung der Eignung von gefülltem LSR ist exemplarisch in Abbildung 4-20 die Übersicht für LSR gefüllt mit 30 vol.% Glas 3 gegeben, die nahezu vollständig vorliegt. Da für Glas 1 und Glas 2 jeweils nur rund die Hälfte der Materialeigenschaften untersucht wurden und die MHK sich lediglich hinsichtlich ihrer Dichte unterscheiden, werden diese in der Abbildung zusammen dargestellt. Die Kennwerte „Schiefe-Ebene-Test 3,5 kV“ bis „Shore-A Härte“ entsprechend Tabelle 4-6 stammen von Prüflingen gefüllt mit Glas 1, die übrigen Kennwerte von Prüflingen gefüllt mit Glas 2.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei Verwendung von Glas-MHK in LSR bei 30 vol.% starke Einbußen hinsichtlich der Erosions- und Kriechwegbeständigkeit, der Beständigkeit im Lichtbogentest, der Durchschlagfestigkeit, der Reißdehnung und der Wasseraufnahmefähigkeit hingenommen werden müssen. Dem stehen eine Verbesserung der Materialkosten, der relativen Permittivität und Dichte, der Shore-A Härte und möglicherweise des Hydrophobieverlustes gegenüber. Durch das Einbringen der MHK verändern sich die Materialeigenschaften verglichen mit dem Referenzmaterial sehr stark. Daher wird nicht empfohlen, Glas-MHK in LSR für Freiluftisolationen einzubringen.

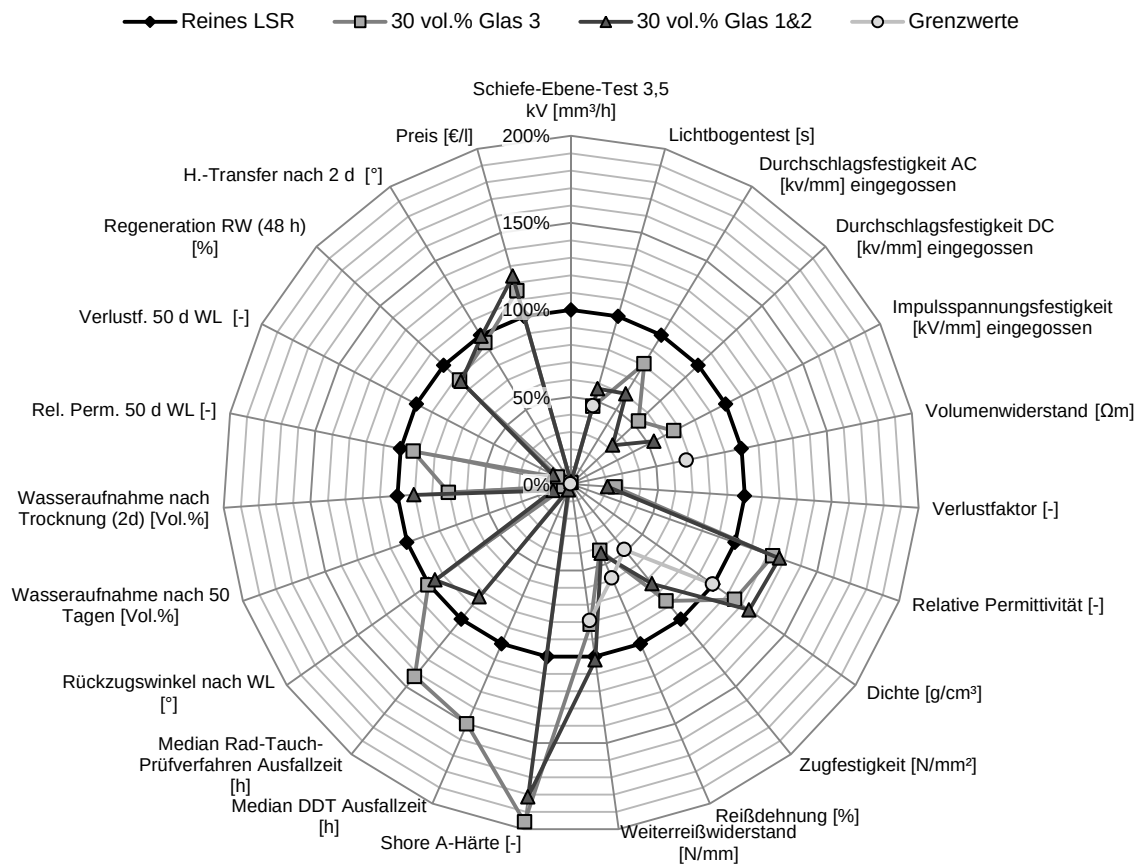


Abbildung 4-26: Exemplarische finale Materialbewertung von LSR gefüllt mit Glas-MHK

Die Materialbewertung für LSR gefüllt mit Keramik-MHK ähnelt dem Ergebnis für LSR gefüllt mit Glas-MHK. Die Materialien zeigen vergleichbare Schwächen, abgesehen von der durch die Keramik-MHK hervorgerufene geringere Wasseraufnahme und verbesserte Lichtbogenbeständigkeit. Die Verwendung von LSR gefüllt mit Keramik-MHK ist denkbar, jedoch wird empfohlen, bei einer geplanten Anwendung zuvor die Erosions- und Kriechwegbeständigkeit an realen Isolatoren mithilfe eines Rad-Tests oder eines Salznebel-Tests zu überprüfen.

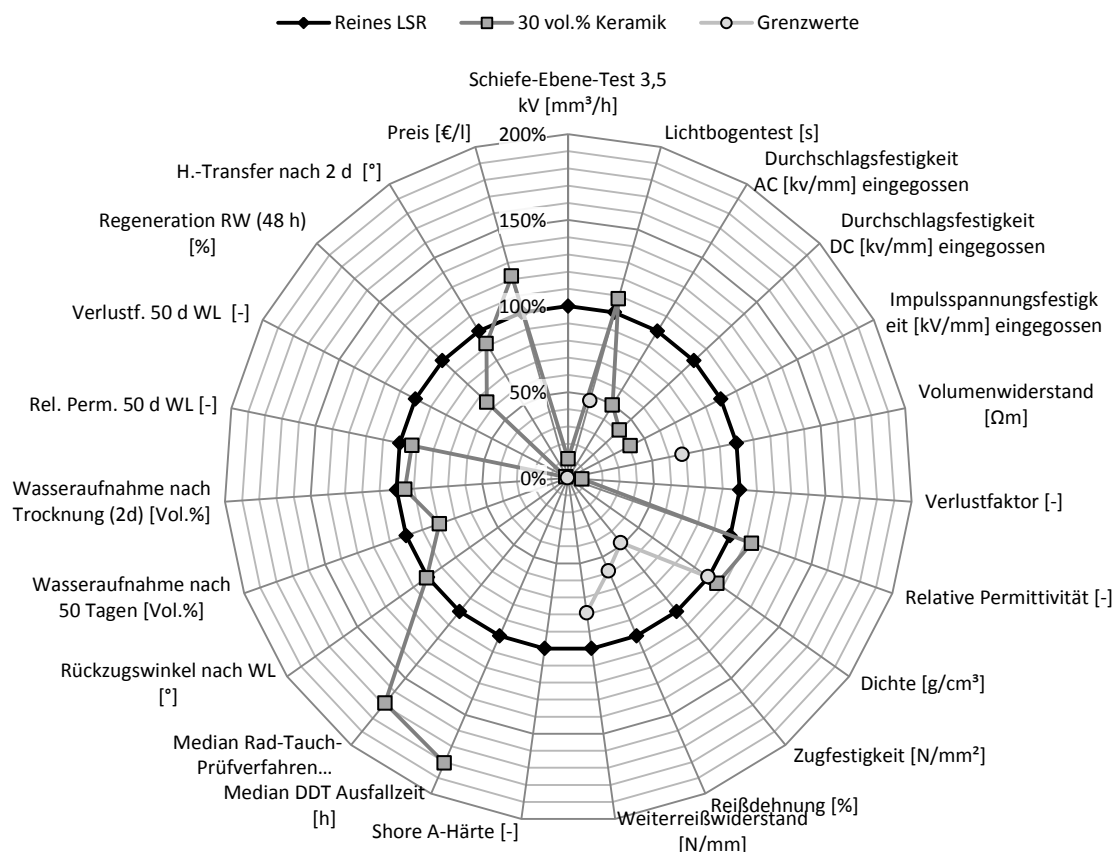


Abbildung 4-27: Exemplarische finale Materialbewertung von LSR gefüllt mit Keramik-MHK

HTV

Bei der Bewertung der HTV-basierten Materialien ist zu beachten, dass die Untersuchungen zur Durchschlagfestigkeit an Scheibenprüflingen mit aufgesetzten Plattenelektroden nicht die intrinsische Durchschlagfestigkeit anzeigen, sondern die Beständigkeit gegen äußere Teilentladungen, die einen Erosionsdurchschlag einleiten [Sc16]. Die Ursache hierfür liegt in der verwendeten Prüfanordnung, da keine Prüflinge mit eingegossenen Elektroden hergestellt werden konnten.

Durch die Zugabe des für HTV üblichen Flammenschutzmittels ATH kann die größte Schwäche der LSR-basierten Materialien – eine geringe thermische Beständigkeit gegen elektrische Entladungen – vermieden werden. Als Folge davon erfolgt eine geringe Veränderung der Materialeigenschaften von MHK-gefülltem HTV verglichen mit kommerziell eingesetzten Materialkompositionen. Sowohl Glas-, als auch Keramik-MHK können eingesetzt werden. Der Füllgrad von Glas-MHK ist dabei aufgrund der Beständigkeit gegen Erosion und Kriechspurbildung auf 20 vol.% begrenzt (Abbildung 4-30), falls MHK ohne Haftvermittler verwendet werden. Verringerten Materialeigenschaften hinsichtlich der thermischen Beständigkeit, der Reißdehnung und der Wasseraufnahme stehen Verbesserungen hinsichtlich des Verlustfaktors, der relativen Permittivität, der Dichte und den Materialkosten entgegen.

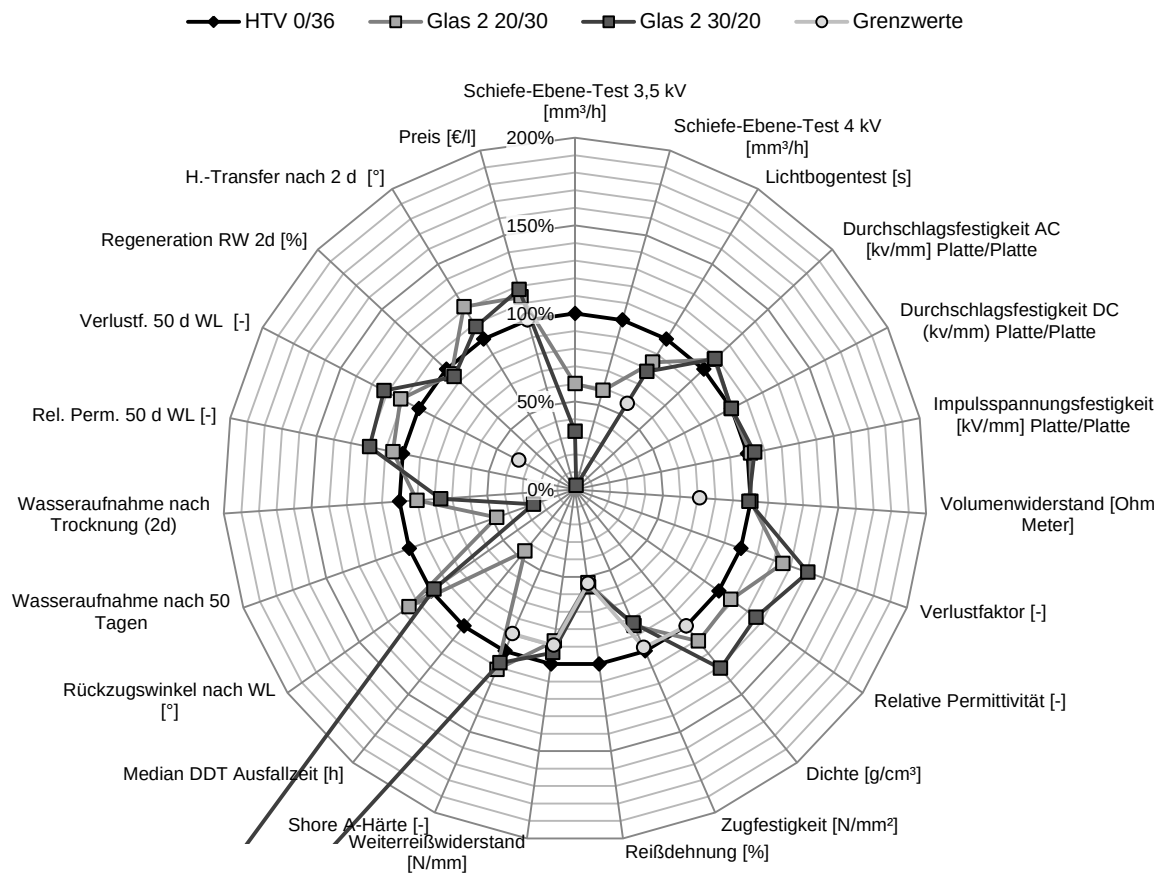


Abbildung 4-28: Finale Materialbewertung von HTV gefüllt mit verschiedenen Füllgraden Glas 2

Durch Verwendung von silanisierten Glas-MHK kann in HTV die thermische Beständigkeit verbessert werden, wobei die übrigen Materialeigenschaften nahezu unverändert bleiben. Der maßgebliche Einflussfaktor auf die thermische Beständigkeit – die während der Materialzersetzung aktive Silikonoberfläche – wurde erst am Ende der Projektlaufzeit identifiziert. Daher konnten keine Untersuchungen mit silanisierten Glas-MHK mit höheren Füllgraden mehr durchgeführt werden. Es wird empfohlen, diese Untersuchungen nachzuholen, da der maximal mögliche Füllgrad für silanierte Glas-MHK erwartungsgemäß höher liegt, als 20 vol.%. Daraus ergeben sich größere Kosteneinsparungen und womöglich insgesamt verbesserte Materialeigenschaften.

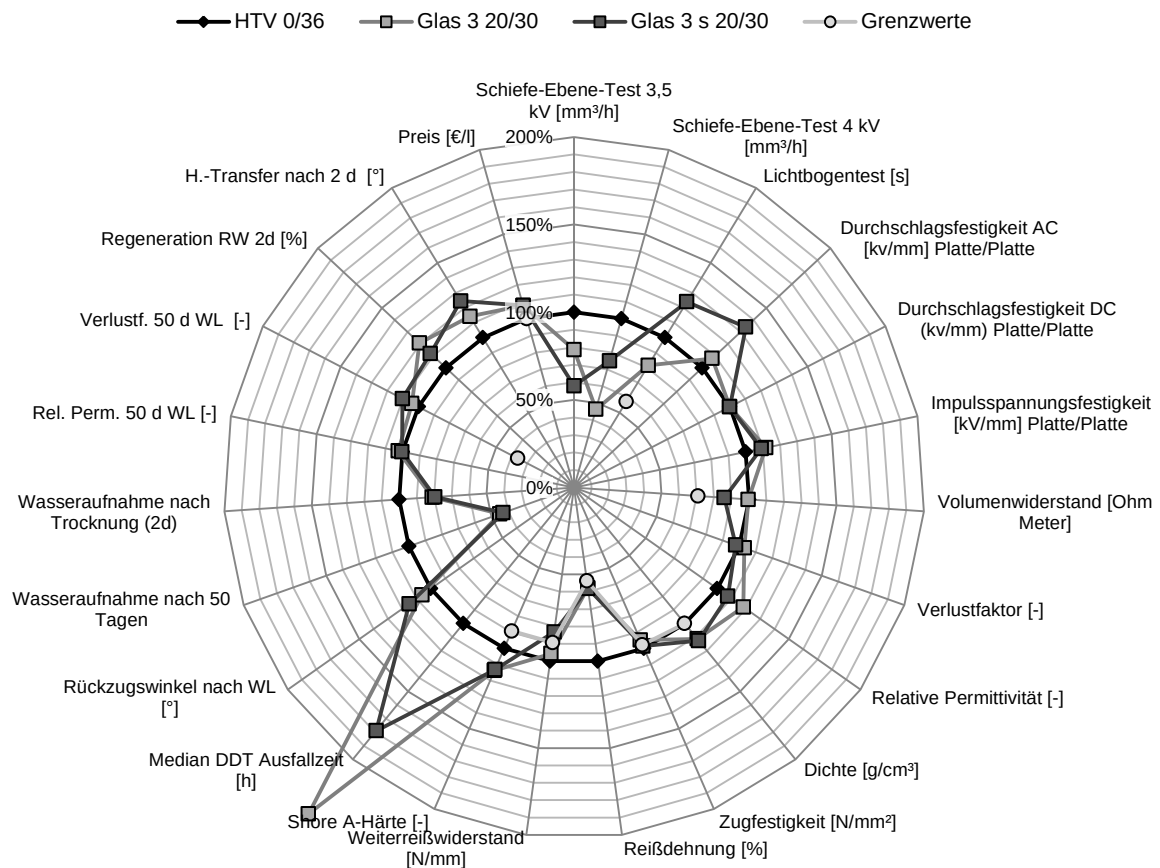


Abbildung 4-29: Finale Materialbewertung von HTV gefüllt mit silanisierten und unsilanisierten Glas-MHK

Die Verwendung von Keramik-MHK in HTV kann basierend auf den vorliegenden Ergebnissen ebenfalls empfohlen werden. Von allen untersuchten Materialkompositionen ergeben sich verglichen mit dem kommerziell eingesetzten Referenzmaterial die geringsten Verschlechterungen einzelner Materialeigenschaften. Einer Verschlechterung des Verlustfaktors, der Zugfestigkeit und Reißdehnung, sowie der Erosionsrate bei 3,5 kV stehen Verbesserungen in der Lichtbogenbeständigkeit, der relativen Permittivität, der Dichte, sowie der Hydrophobiewiederkehr und dem Hydrophobietransfer gegenüber. Ein Füllgrad von 30 vol.% kann empfohlen werden, möglicherweise können auch höhere Füllgrade verwendet werden. Es wird empfohlen, diese Fragestellung im Anschluss an dieses Projekt weiter zu untersuchen.

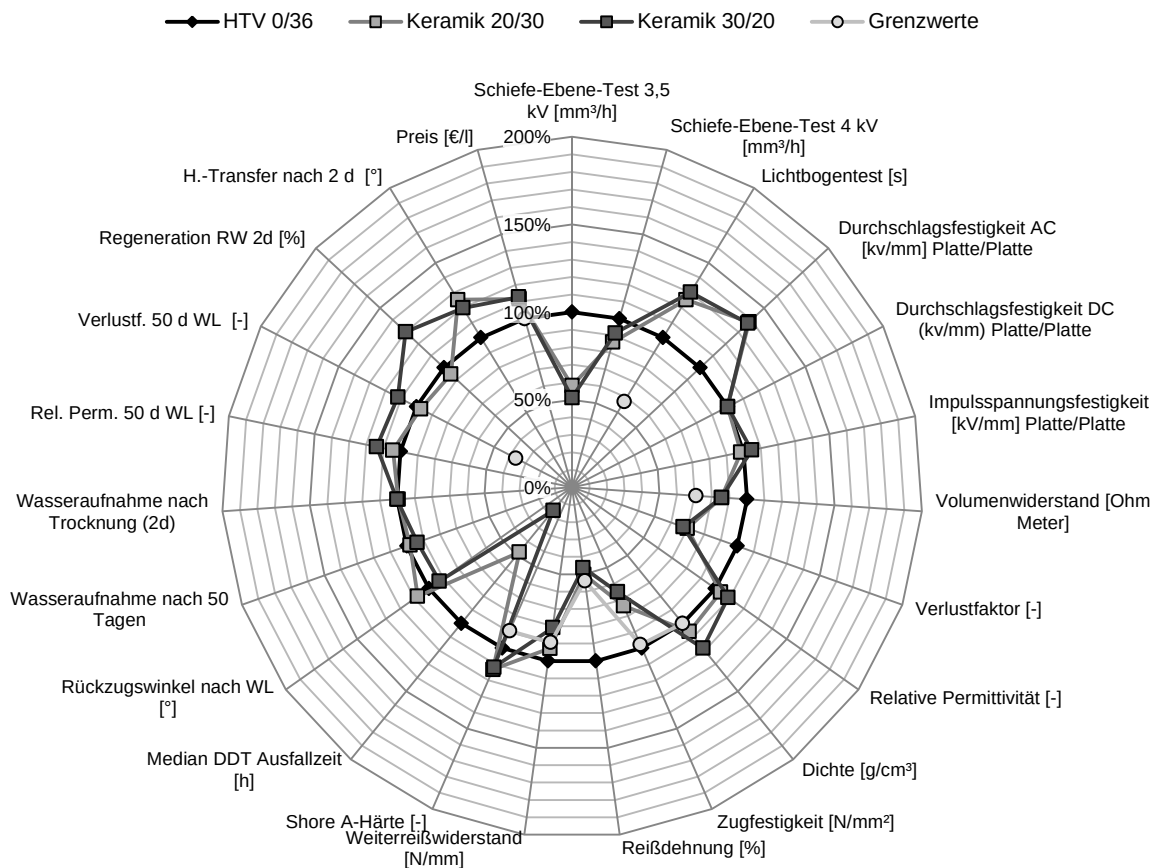


Abbildung 4-30: Finale Materialbewertung von HTV gefüllt mit Keramik-MHK

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen wird entschieden, die Isolatorprototypen mit Schirmen des Materials HTV Glas 2 20/30 herzustellen, da die finalen Ergebnisse der silanisierten Glas-MHK erst nach den Tests an den Prototypen final vorliegen. Von der Verwendung von Keramik-MHK wird abgesehen, da die Herstellung dieser MHK nicht definiert erfolgt und es große Unterschiede zwischen verschiedenen Materialchargen hinsichtlich der Dichte, der chemischen Zusammensetzung und der Größe der MHK geben kann.

5 AP 2: Prozesstechnik

Die Durchführung der Arbeiten im Arbeitspaket 2 erfolgte mit Hilfe der Expertise des Projektpartners LAPP Insulators GmbH. Ziel des AP 2 ist die Herstellung der für die experimentellen Untersuchungen benötigten Prüflinge mit Blick auf die Verarbeitbarkeit von MHK und die Implementierung in den Produktionsprozess. Zur Bearbeitung des Projektes wurden sowohl plattenförmige HTV-Silikonprüfkörper (in den nachfolgenden Ausführungen „Plattenproben“ genannt) als auch Prototypenisolatoren aus HTV benötigt.

In den nachfolgenden Erläuterungen wird die Vorgehensweise bei der Herstellung von Plattenproben und Isolatoren in drei Punkte unterteilt:

- Compoundieren
- Herstellung der Plattenproben
- Herstellung des Prototyps

5.1 Compoundieren

Zur Herstellung des MHK-Compounds wurde ein Doppelsigma-Laborknetter mit einem maximalen Knetvolumen von 12 kg verwendet. Die einzelnen Zutaten wurden in verschiedenen Prozessschritten hinzudosiert. Dies wurde analog zur Compoundherstellung der laufenden Fertigung durchgeführt.

Im ersten Herstellungsschritt wurde die Siliconbase zusammen mit dem Vernetzer, dem Farbstoff und ca. 1/3 Aluminiumtrihydrat (ATH) und 1/3 MHK in den Knetter gegeben (Abbildung 5-1).

Nach jeweils 10 min kneten wurde erneut 1/3 ATH und 1/3 MHK zugegeben.



Abbildung 5-1: Herstellung der MHK- Compounds

Bei der Referenzmischung (Compound 0 - ohne MHK) wurde ebenfalls der gleiche Herstellungsprozess verwendet, allerdings ohne Zugabe von MHK.

Bei dem Knetprozess hat sich gezeigt, dass sich die MHK bei allen Rezepten gut in das Compound einmischen lassen. Dabei wird die Konsistenz vom Vorhandensein der MHK verändert, was jedoch bei der Herstellung der Prototypen und Plattenproben nicht hinderlich war. Compounds, welche MHK enthalten, sind im unvernetzten Zustand spröder und rauer also solche ohne MHK (Abbildung 5-2).



Abbildung 5-2: Fertig geknetetes Compound ohne MHK (links) und mit MHK (rechts)

5.2 Herstellung der plattenförmigen Proben

Nach der Herstellung des unvernnetzten Compounds wurden Plattenproben für elektrische-, chemische- und mechanische Versuche hergestellt. Für die elektrischen und chemischen Untersuchungen wurden Plattenproben mit dem Abmaß 15 x 30 x 30 mm sowie 120 x 50 x 6,5 mm und für die mechanischen Untersuchungen mit dem Abmaß 118 x 148 x 2 mm produziert.

Alle Plattenproben werden mit einer Hydraulikpresse bei 180°C und 70 bar für einen Zeitraum von 10 min gepresst (Abbildung 5-3). Um möglichst nah am kompletten Herstellungsprozess zu sein, wurden die Plattenproben für einen Zeitraum von 3,5 h bei 130°C im Ofen nachgetempert.



Abbildung 5-3: Hydraulikpresse

5.3 Herstellung des Prototyps

Für die elektrischen Untersuchungen (Rad-Tauch-Test, Salznebelprüfung, Prüfung mit haftenden Fremdschichten und Wechselspannungsprüfung) wurden Verbundisolatoren aus dem MHK-Compound und dem Referenzmaterial ohne MHK angefertigt.

Es wurde festgelegt, dass das Extrudatmaterial um den glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) keine MHK enthalten wird (Beispiel: Abbildung 5-4). Der Grund dafür liegt in der stärkeren elektrischen Belastung in der Nähe der Metallarmaturen. Da diese Abschnitte unter extremen äußeren Umweltbelastungen eine hohe elektrische Erosionsfestigkeit aufweisen müssen, werden für diese Untersuchungen im ersten Ansatz das Compound aus der laufenden Fertigung als Extrudat genutzt. Prozentual betrachtet weisen die Schirme besonders bei längeren Isolatoren ein höheres Gesamtgewicht auf als das Extrudatmaterial. Somit kann durch Substitution des Silikons oder Füllstoffes durch MHK eine Gewichtsreduzierung erzielt werden.

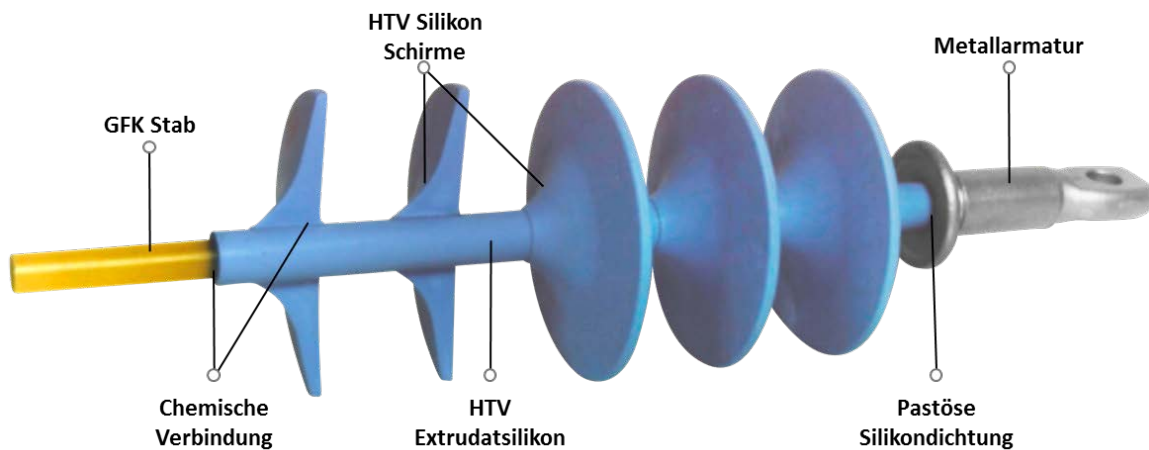


Abbildung 5-4: Ausführungsform Silikonverbundisolator

Die Silikonschirme (mit und ohne MHK) wurden analog zu den Plattenproben in konzentrischen Formen in der Hydraulikpresse hergestellt. Nachdem die Schirme bei 180°C, 70 bar und 10 min gepresst wurden, wurde auf eine separate Nachtemperung im Ofen verzichtet.

Aus der laufenden Fertigung wurden extrudierte GFK-Stäbe entnommen und gleichmäßig mit einem durchsichtigen unvernnetzten HTV-Silikon bestrichen. Im Aufschiebeverfahren wurden auf jeden vorbehandelten Stab drei Silikonschirme in entsprechenden Abständen aufgebracht. Um die Schirme chemisch an das Extrudat anzubinden wurden die präparierten Isolatoren für 3,5 h bei 130°C vernetzt.

In den letzten Arbeitsschritten wurden die Metallarmaturen aufgespresst und mit einem pastösen Silikon abgedichtet.

Die Silikonschirme wurden nicht wie üblich im Spritzgussverfahren hergestellt, da dazu größere Materialmengen ($m > 20$ kg) notwendig sind.

Die inhomogene Konsistenz des MHK-Compounds weicht von der Konsistenz der laufenden Fertigung ab. Trotzdem konnten alle Materialien mit der bestehenden Prozesstechnik gut und vergleichbar verarbeitet werden.

6 AP 3: Prüfverfahren Schirmisolatoren

Im mehrstufigen Prozess zur Qualifikation von Polymerisolatoren für Freiluftanwendungen werden zwei Prüfungen durchgeführt:

- Prüfungen an Isolatormodellen
- Prüfungen an Plattenproben

Ziel dieser Prüfungen sind Erkenntnisse über die Einsatztauglichkeit der Isolation unter verschiedenen Wetter- und Umwelteinflüssen.

Prüfungen unter Fremdschichtbelastung stellen eine Notwendigkeit zur Beurteilung der Erosions- und Kriechstrombeständigkeit sowie der Überschlagbeständigkeit von Isolatoren und damit ihrer Einsatztauglichkeit für Freiluftanwendungen dar. Fremdschichten werden dabei unterschieden in haftend und nicht haftend. Grundsätzlich ist für Freiluftisolatoren die Kenntnis des Verhaltens unter beiden Bedingungen erforderlich. Für Keramik und Glasisolatoren existiert mit DIN IEC 60507 daher eine Norm, die jeweils entsprechende Prüfverfahren festlegt. Dagegen sind für Polymerisolatoren lediglich Bauartprüfungen genormt (DIN IEC 62217). Der Grund liegt in der hydrophoben Eigenschaft der polymeren Schirmhülle, die eine Anwendung der Testverfahren, wie sie für Keramikisolatoren genutzt werden, nicht zulässt.

Die nachfolgenden Untersuchungen sind wie folgt aufgebaut:

- Die Isolatoren werden in einem ersten Schritt einer Rad-Tauch-Prüfung unterzogen. Diese zielt auf die Erosion und Kriechstrombeständigkeit der Freiluftisolatoren unter nicht haftender Fremdschichtbelastung ab.
- Darüber hinaus wird eine 1.000 h-Salznebelprüfung durchgeführt. Hierbei erfolgen zwei Testdurchläufe. Die Prüfungen finden sowohl in horizontaler als auch vertikaler Lage statt. Diese soll der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Anwender der IEC 62217 Rechnung tragen.
- Des Weiteren werden die Isolatoren Prüfungen mit haftenden Fremdschichten nach DIN IEC 60507 und CIGRE Technical Brochure 555:2013 unterzogen, um den hier entwickelten Schirmhüllenwerkstoff aus syntaktischem Schaum hinsichtlich seiner Einsatztauglichkeit für Freiluftanwendungen beurteilen zu können. Zusätzlich werden auch Untersuchungen an Plattenproben durchgeführt. Diese Untersuchungen unterteilen sich in zwei Kategorien: Kontaktwinkelmessungen und Widerstandsanalyse der Schmutzschicht.

Nach den durchgeführten Fremdschichtprüfungen wurden Langzeituntersuchungen des Hydrophobietransfers an beschmutzten Isolatoren begonnen und werden über das Projekt hinaus angestrebt.

- Des Weiteren werden Untersuchungen zum Überschlagverhalten an Wechselspannung (trocken ohne Fremdschicht) durchgeführt.

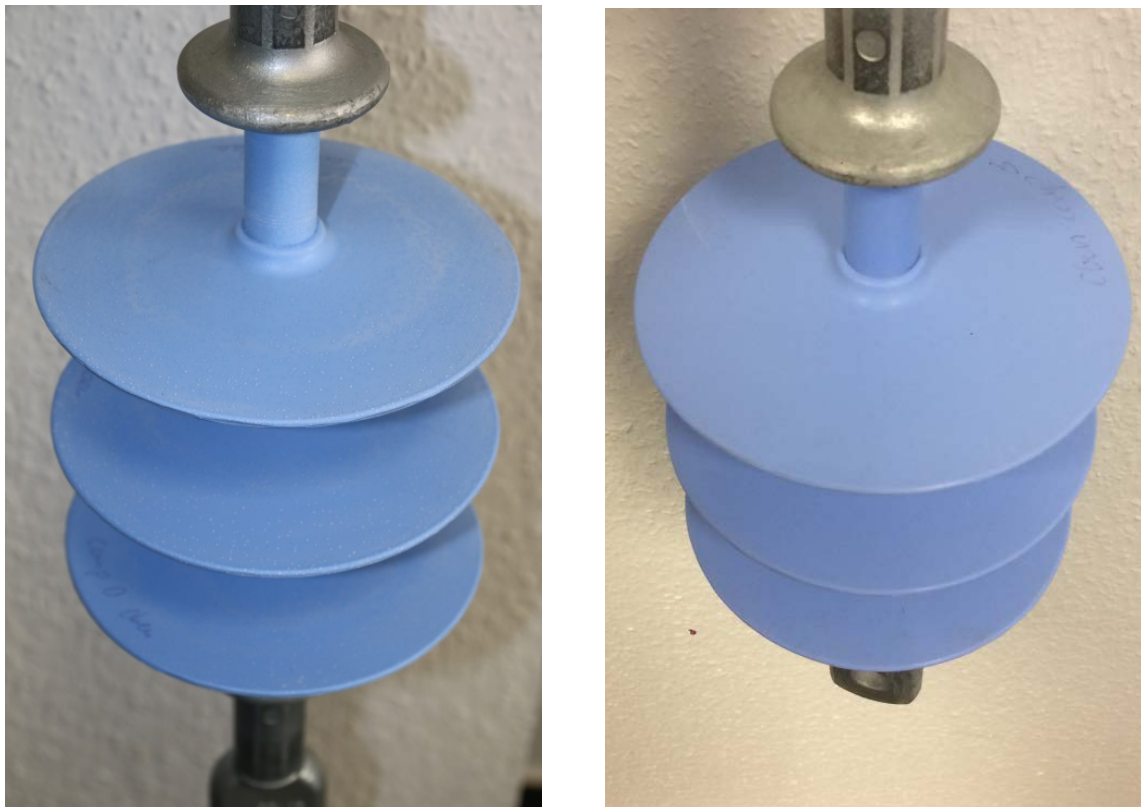
Die Durchführung der Prüfung an Isolatoren erfolgt an zwei Modellen (Tabelle 6-1): Referenzisolator und Prototyp.

Tabelle 6-1: Finale Materialauswahl für die Isolatormodelle

Name	Kugeltyp	Anteil MHK (vol.%)	Anteil ATH (vol.%)
Referenzisolator	-	0 %	36 %
Prototyp	Glas	20 %	30 %

Der Referenzisolator (Abbildung 6-1, links) besteht aus Lapp Standard Schirmsilikon (HTV-Silikon + ATH-Anteil). Bei dem Prototyp (Abbildung 6-1, rechts) wurde der Füllstoff teilweise durch Glas-MHK substituiert. Das optimale Verhältnis von ATH- und MHK-Gehalt wurde durch die vorangegangenen Werkstoffuntersuchungen (AP 1: Materialqualifikation) herausgearbeitet.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die beiden Isolatormodelle, welche für die unterschiedlichen Prüfungen in verschiedener Stückzahl verwendet wurden. Für jede Prüfung wurde ein neuer Isolator verwendet.

**Abbildung 6-1: Referenzisolator (links) und Prototyp (rechts)**

6.1 Rad-Tauch-Prüfung

Die Prüfung wurde bei dem Kooperationspartner LAPP Insulators GmbH durchgeführt. Ein Rad-Tauch-Test wird nach IEC/TR 62730 durchgeführt (Abbildung 6-2). In der nachfolgenden Abbildung sind die einzelnen Schritte der Prüfung dargestellt.

Ziel ist die Bewertung des Einflusses von MHK als Füllstoff in HTV-Silikon für Verbundisolatoren auf die beschleunigte Alterung im Rad-Tauch-Test. Zwei Verbundisolatoren dienen als Referenz und bestehen aus LAPP Standard Schirmsilikon (Referenzisolator). Zwei weitere Isolatoren besitzen Schirme, bei denen ein Teil vom Füllstoff durch Glas-Mikrohohlkugel

substituiert wurde (Prototyp). Der Rad-Tauch-Test wird mit Wechselspannung $u_{\text{eff}} = 21 \text{ kV}$ durchgeführt. Der Salzgehalt der Prüflösung beträgt gemäß Norm $1,4 \text{ kg/m}^3 \pm 0,06 \text{ kg/m}^3$, welches einer Schichtleitfähigkeit von $2600 \text{ } \mu\text{S/cm}$ entspricht. Der obere Grenzwert liegt bei $2700 \text{ } \mu\text{S/cm}$ und der untere bei $2490 \text{ } \mu\text{S/cm}$. Die Umgebungstemperatur bewegt sich bei $20^\circ\text{C} \pm 5 \text{ K}$. Die Dauer des wöchentlich notwendigen Wasserwechsels beträgt jeweils ca. 1 h. Der Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

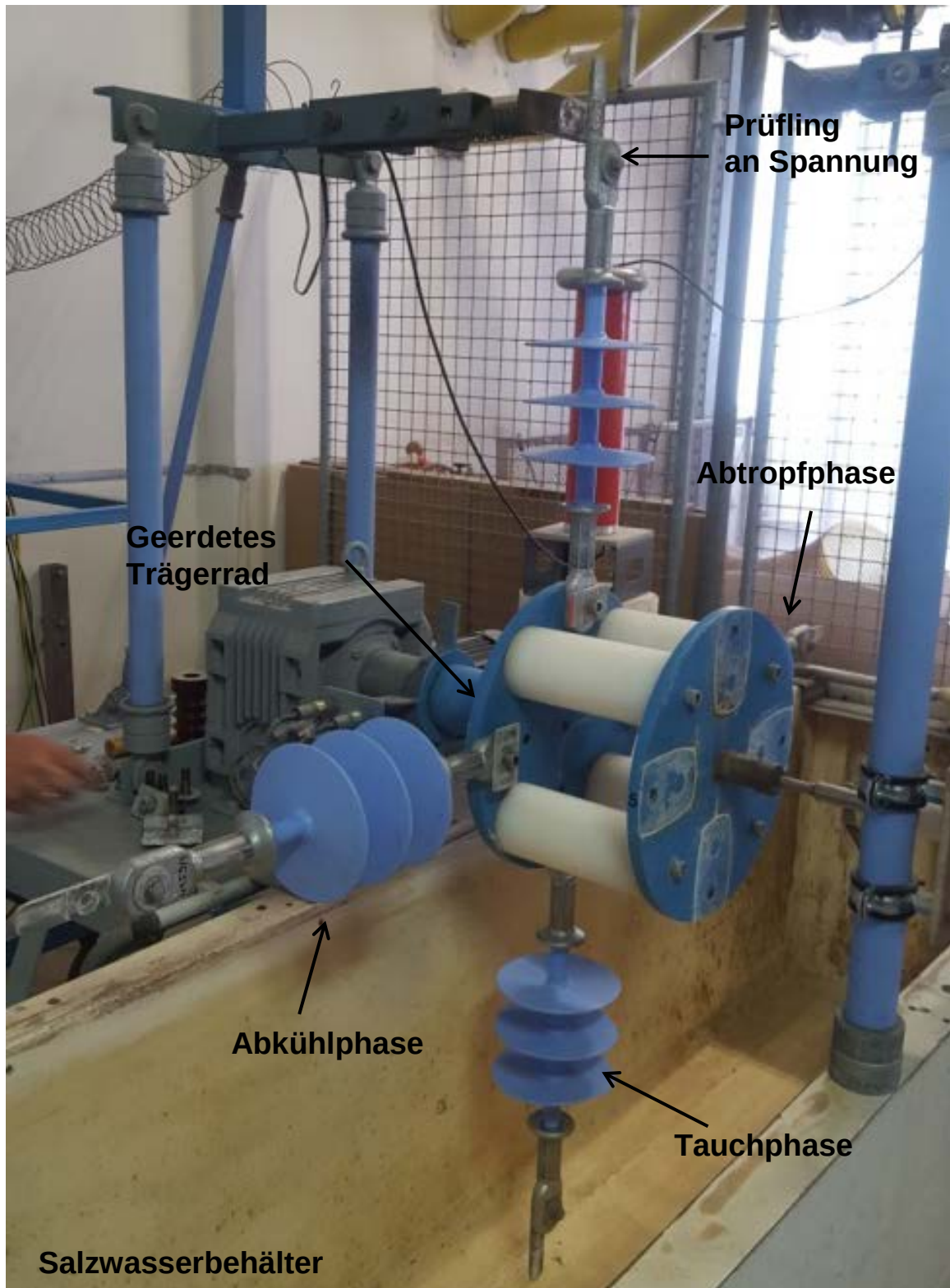


Abbildung 6-2: Rad-Tauch-Prüfung - Aufbau ohne Salzwasser

Im nachfolgendem sind die Ergebnisse in einer Tabelle festgehalten.

Tabelle 6-2: Testergebnis Rad-Tauch-Test

Datum	Unterbrechung	Zyklus	Leitfähigkeit [μs/cm]	Umgebungs- Temperatur	Bemerkung
30.06.2016	1		2650	24	Inspektion und Salzwasserwechsel
08.07.2016	1	3395	2620	24	Inspektion und Salzwasserwechsel
15.07.2016	1	6312	2700	24	Inspektion und Salzwasserwechsel
22.07.2016	1	9342	2530	25	Inspektion und Salzwasserwechsel
29.07.2016	1	12385	2540	25	Inspektion und Salzwasserwechsel
05.08.2016	1	15292	2640	25	Inspektion und Salzwasserwechsel
12.08.2016	1	18260	2540	25	Inspektion und Salzwasserwechsel
19.08.2016	1	21222	2600	24	Inspektion und Salzwasserwechsel
26.08.2016	1	24265	2570	25	Inspektion und Salzwasserwechsel
02.09.2016	1	27320	2600	25	Inspektion und Salzwasserwechsel
09.09.2016	1	30217			Ende

Alle Isolatoren haben den Rad Tauch Test ohne Ausfälle bestanden. Bei der aufgetretenen Verschmutzung handelt es sich in allen Fällen um äußerliche Effekte (Abbildung 6-3).



Abbildung 6-3: Referenzisolator (links) und Prototyp (rechts)

Zu Versuchsbeginn wurde ein Riss am Referenzisolator festgestellt (Abbildung 6-4). Dabei ist es aufgrund der Erscheinung auszuschließen, dass dieser Riss elektrischen Ursprung hat. Es wird vermutet, dass der Riss beim Aufschieben der handgemachten Schirme (Prozess nicht so zuverlässig, wie industrieller Prozess) entstanden ist. Während der gesamten Versuchsdauer, hat der Riss sein Erscheinungsbild nicht geändert.



Abbildung 6-4: Mechanischer Riss

6.2 Prüfung mit Salznebel

Dieser Test ist eine zeitbegrenzte Prüfung in Salznebel bei konstanter Spannung mit Betriebsfrequenz nach [DI06]. Die Prüfung erfolgte bei [FG16]. Die nachfolgenden Erläuterungen der Vorgehensweise sind mit den in der Norm [DI06] festgehaltenen Anforderungen für die Vorbereitung und Durchführung dieser Prüfung abgestimmt.

Die Durchführung dieser Prüfung erfolgte in einer feuchtigkeitsdichten und korrosionsbeständigen Kammer. Aufgrund der Anzahl der Prüflinge wurde bei dieser Prüfung allerdings eine größere Prüfkammer verwendet, welche ein Volumen von 19 m^3 aufwies. Für eine natürliche Belüftung wurde eine Öffnung von höchstens 80 cm^2 vorgesehen.

Um Wassertropfen in einer Größe von $5 \text{ }\mu\text{m}$ bis $10 \text{ }\mu\text{m}$ zu erzeugen, wurden Düsen mit konstanter Zerstäubungsleistung verwendet. Die Kammer wurde vollständig mit Nebel ausgefüllt wobei die Prüflinge nicht direkt besprüht wurden. Vor Beginn der Prüfung wurde eine Kalibrierung des Nebels vorgenommen. Dazu wurden mindestens zwei saubere Sammelbehälter mit einer Sammelfläche von $8000 \text{ mm}^2 \pm 2000 \text{ mm}^2$ und einer Höhe von höchstens 100 mm so nah wie möglich an den Enden des Prüfobjekts angeordnet. Die Behälter wurden so positioniert, dass sie nicht von Prüflingen abgeschirmt wurden und ein Tropfenfall von den Konstruktionselementen der Kammer oder einer anderen Quelle vermieden wurde. Die aufgefangene Salzwassermenge pro Stunde war zwischen $1,5 \text{ ml}$ und $2,0 \text{ ml}$ (korrigiert auf 8.000 mm^2 Sammelfläche) gemittelt über eine Dauer von mindestens 16 Stunden.

Das bei der Prüfung gesammelte Wasser am Boden der Kammer wurde abgeleitet und nicht zur weiteren Verneblung wiederverwendet. Es wurden zwei Prüfungen hintereinander in der gleichen Prüfkammer durchgeführt. Bei jeder Prüfung wurden je 6 Isolatoren (Tabelle 6-1) verwendet. Von jedem Typ wurden 3 Isolatoren senkrecht und 3 Isolatoren waagrecht in der Prüfkammer montiert (Abbildung 6-5).



Abbildung 6-5: Anordnung und Positionierung der Prüflinge im Salznebelprüfraum

Zwischen parallel angeordneten Prüflingen und zwischen Prüflingen und Decke, Wänden und Boden betrug der Abstand mindestens 400 mm. Die oberen Armaturen der senkrechten Isolatoren wurden mit einer Silikonbeschichtung versehen, um Korrosionseinflüsse zu vermeiden. Nach der Anordnung der Isolatoren in der Prüfkammer wurde die Oberfläche der Isolatoren mit entionisiertem Wasser gereinigt. Die Prüfspannung wurde auf den tatsächlichen Kriechweg der Prüflinge eingestellt, die durch Teilen des Kriechweges in Millimeter durch 34,6 (gleich dem spezifischen Kriechweg von 20 mm/kV) ermittelt wurde [DI06].

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Parameter festgehalten.

Tabelle 6-3: Zusammenfassung der Prüfbedingungen

Prüfspannung (U_p)	602 mm / 34,6 = 17,4 kV
Strunkdurchmesser	22 mm (< 50 mm)
Kriechweg	602 mm
Schlagweite p	280 mm
l/p	2,15 (< 3)
NaCl-Anfangsgehalt des Wassers nach DIN EN 62217 (VDE 0441-1000):2013-07 Tabelle 2	8 kg/m ³

Beide Prüfungen wurden mit einer Prüfspannung von 17,4 kV und einem Salzgehalt von 8 kg/m³ gestartet. Die Prüfdauer war 1.000 Stunden und die Umgebungstemperatur betrug 20 °C +/- 5 K. Bei der ersten Prüfung wurde das Prüfverfahren nach Norm eingehalten. Die Prüfung erfolgte somit bei einer Prüfspannung von 17,4 kV und einem Salzgehalt von 8 kg/cm³. Bei der zweiten Prüfung wurden abweichend der Salzgehalt und danach die Spannung, in definierten Abständen, gesteigert. Durch den höheren NaCl-Gehalt und die Steigerung der Spannung sollten Ausfälle/Schädigungen gezielt provoziert werden, um die Grenzbelastung zu ermitteln. Die Position der Isolatoren ist der

Abbildung 6-6 zu entnehmen. Die darauffolgenden Abbildungen zeigen die gemessenen Ableitströme.

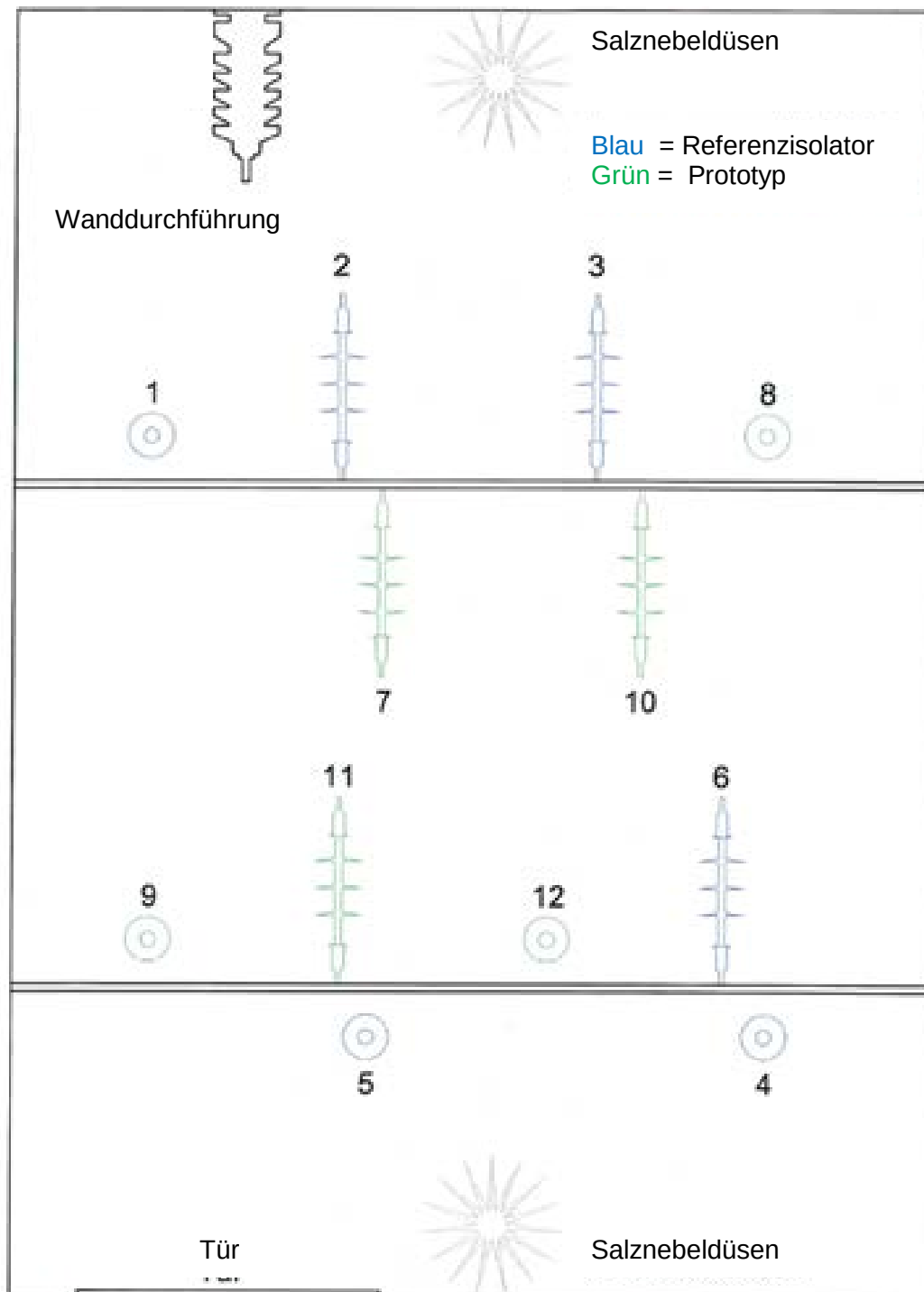
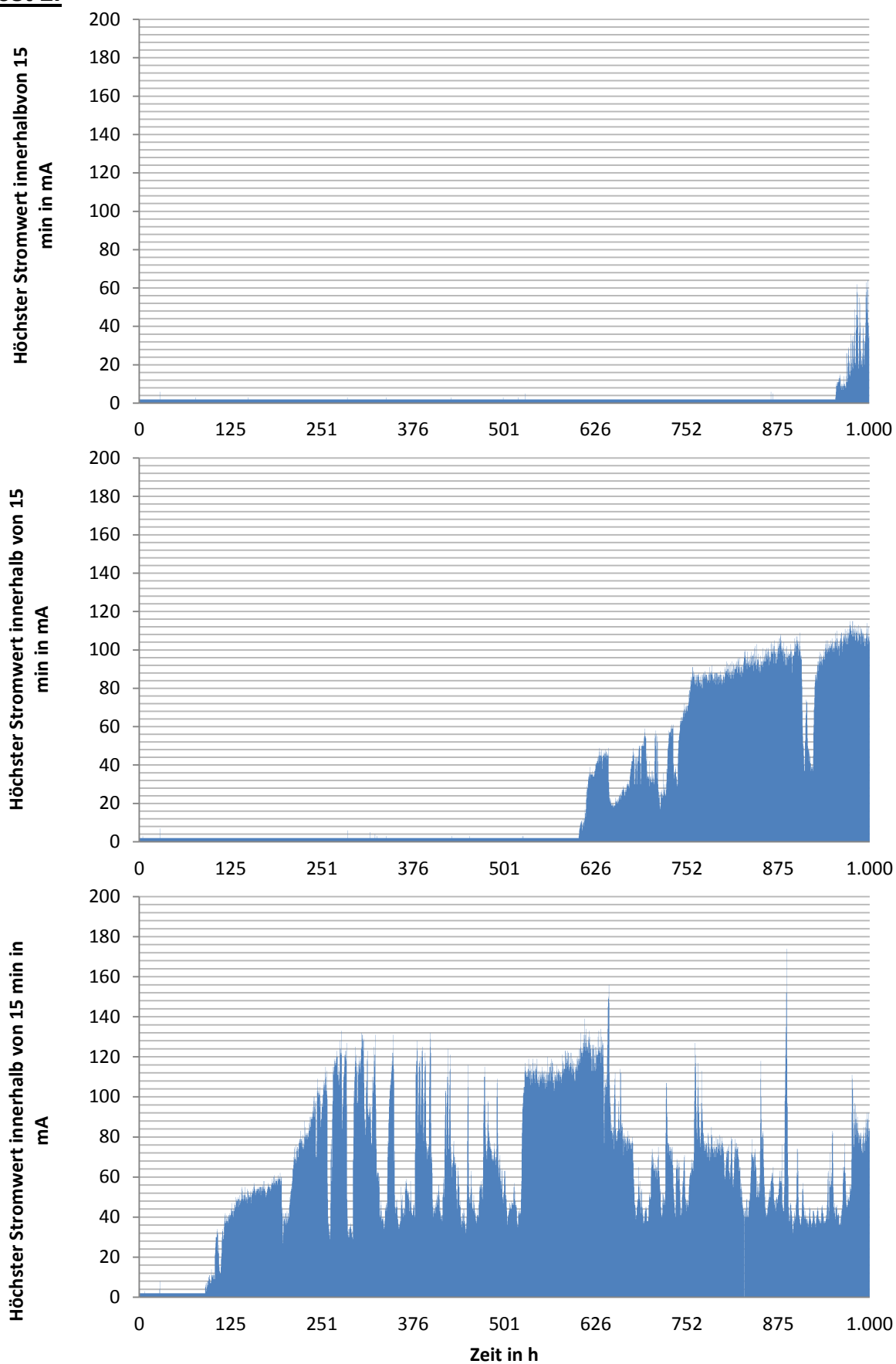


Abbildung 6-6: Positionierung der Isolatoren in der Prüfkammer, Draufsicht [FG16]

Test 1:**Abbildung 6-7: Ableitströme Referenzisolator Position 1 (oben), Position 2 (Mitte) und Position 3 (unten)**

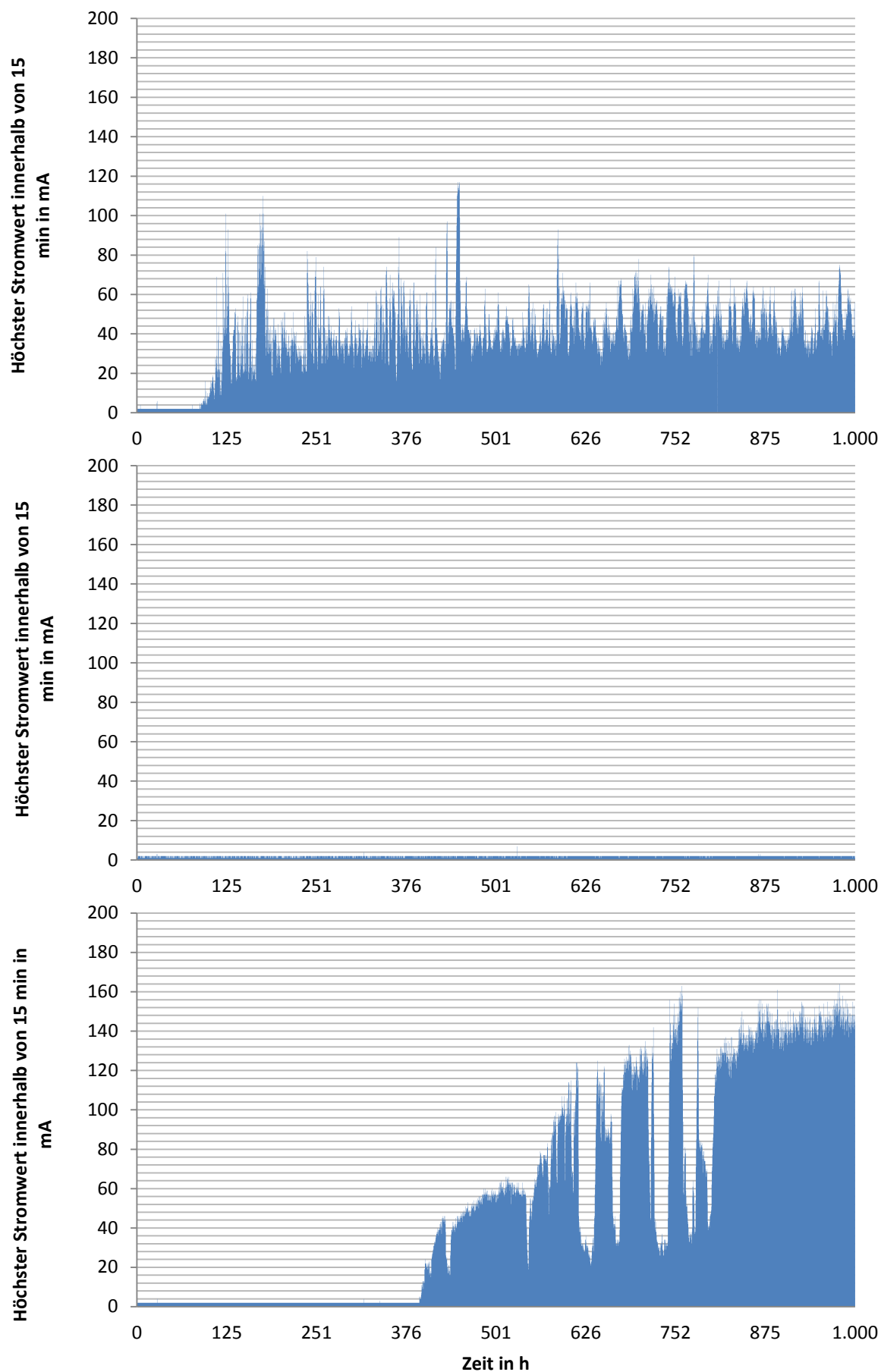


Abbildung 6-8: Ableitströme Referenzisolator Position 4 (oben), Position 5 (Mitte) und Position 6 (unten)

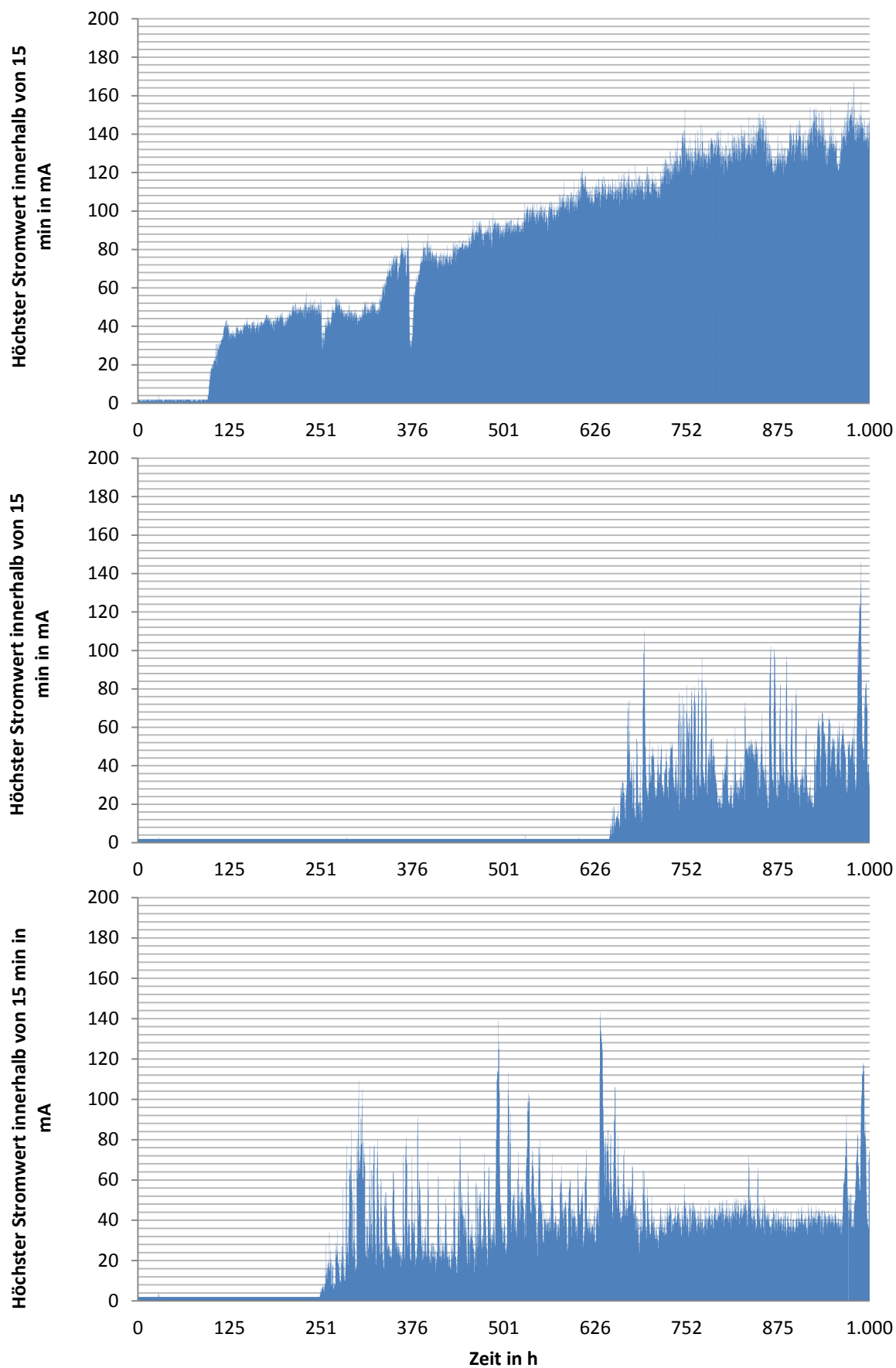


Abbildung 6-9: Ableitströme Prototyp Position 7 (oben), Position 8 (Mitte) und Position 9 (unten)

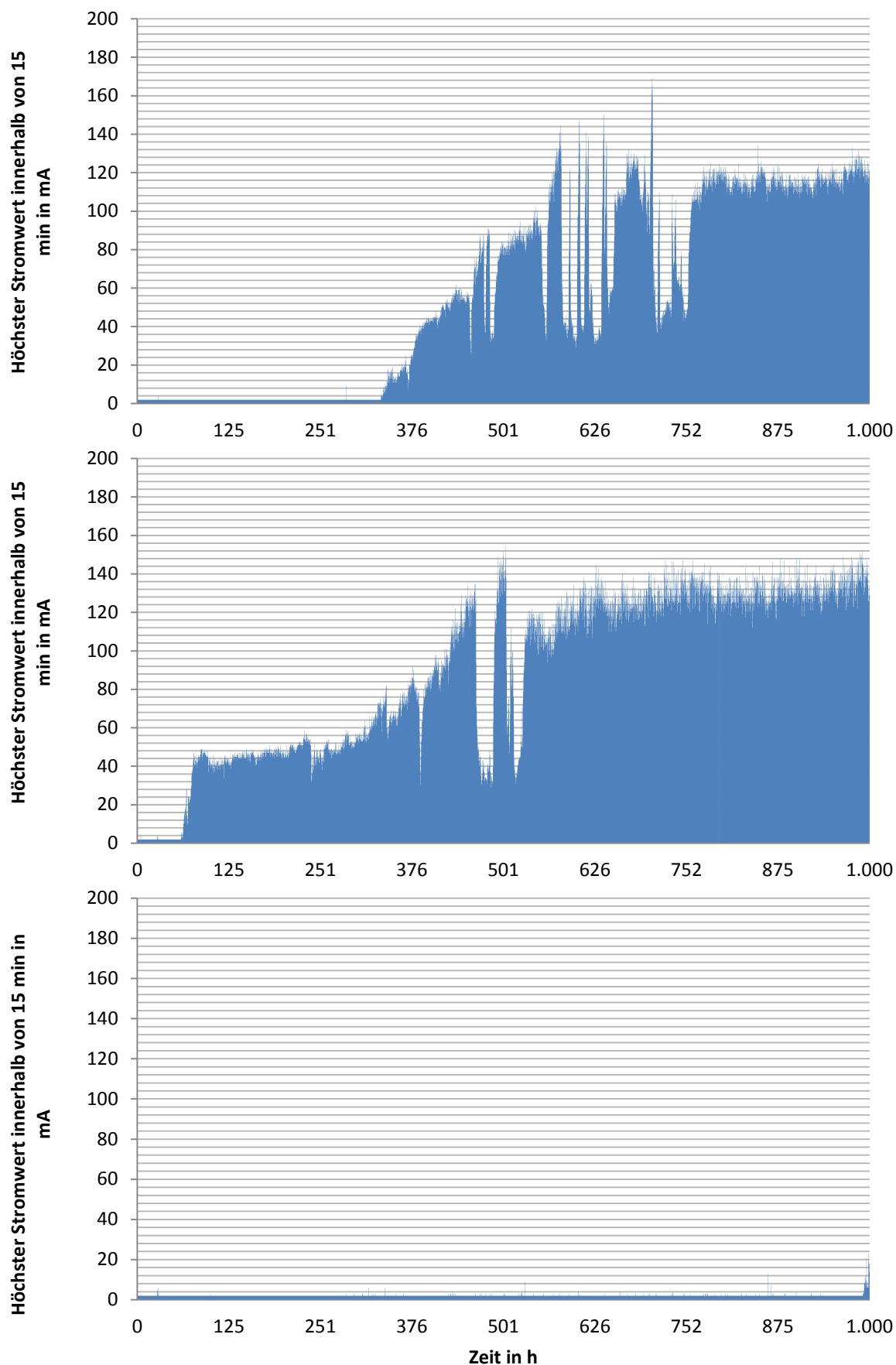


Abbildung 6-10: Ableitströme Prototyp Position 19 (oben) Position 11 (Mitte) und Position 12 (unten)

Test 2:

In Tabelle 6-4, ist die Prüfprozedur festgehalten. Während des zweiten Tests wurde der Salzgehalt weiter erhöht, falls nach einer bestimmten Dauer kein Ausfall erfolgte.

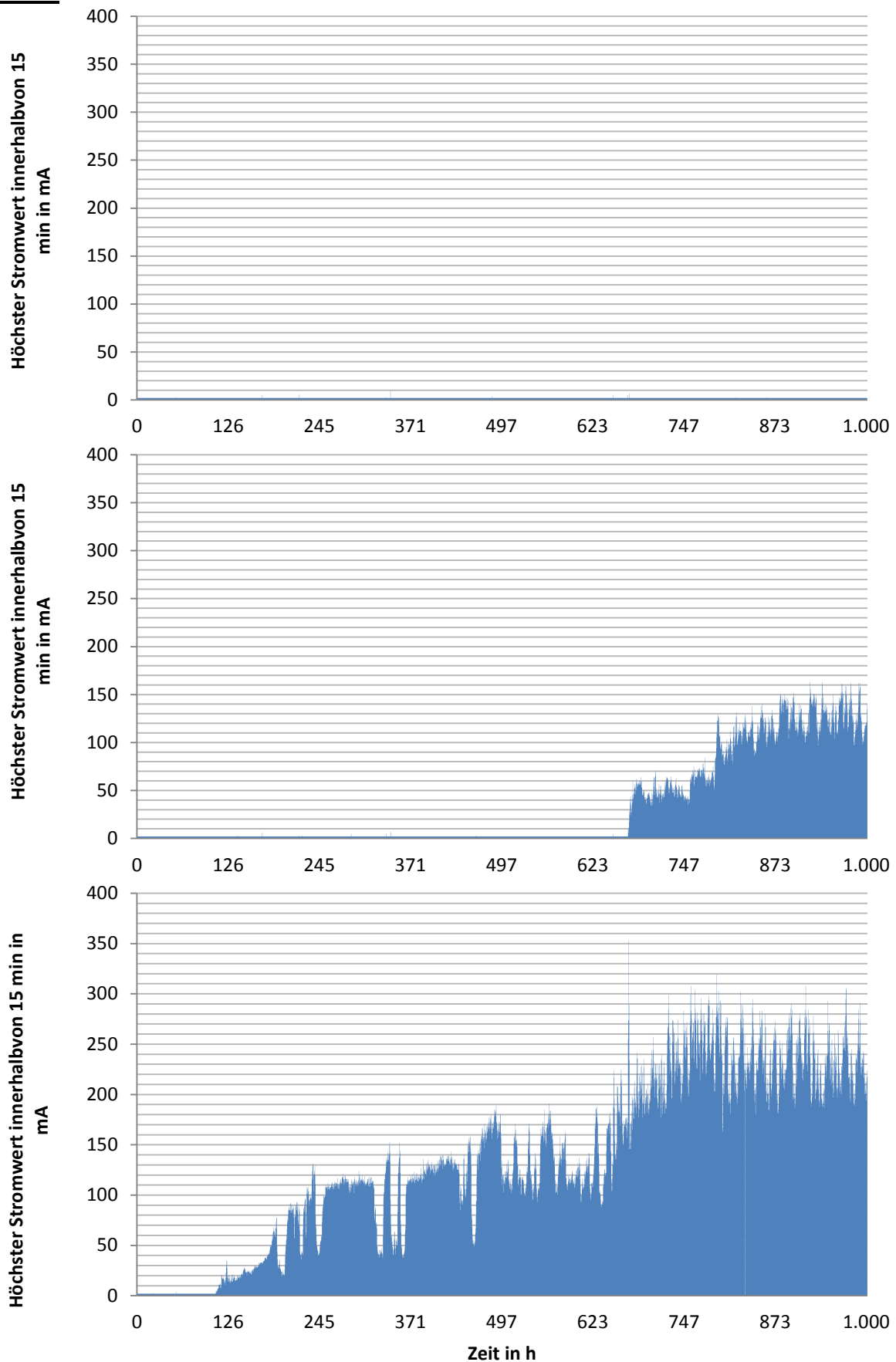
Nach dem Erreichen des Maximums an Salzgehalt (nach DIN IEC 62217) wurde in einem zweiten Schritt die Spannung erhöht. Wurde ein Ausfall registriert, ist eine Herabstufung der Spannung auf den vorherigen Wert erfolgt. Die Position der Isolatoren wurde wie im Test 1 beibehalten (siehe

Abbildung 6-6).

Tabelle 6-4: Randbedingungen und Verlauf bei zweitem 1000 h Test (Test 2)

Betriebsstunden	Bemerkungen
0	Start mit 8 kg/m ³
198	Salz erhöht auf 10 kg/m ³
461	Salz erhöht auf 14 kg/m ³
651	Up +20% erhöht auf 20,9 kV
671	Up +20% erhöht auf 24,4 kV
672	Überstromauslösung → Position 4
672	Up verringert auf 20,9 kV
1.000	Versuchsende

Die Ergebnisse sind den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen.

Test 2:**Abbildung 6-11: Ableitströme Referenzisolator Position 1 (oben), Position 2 (Mitte) und Position 3 (unten)**

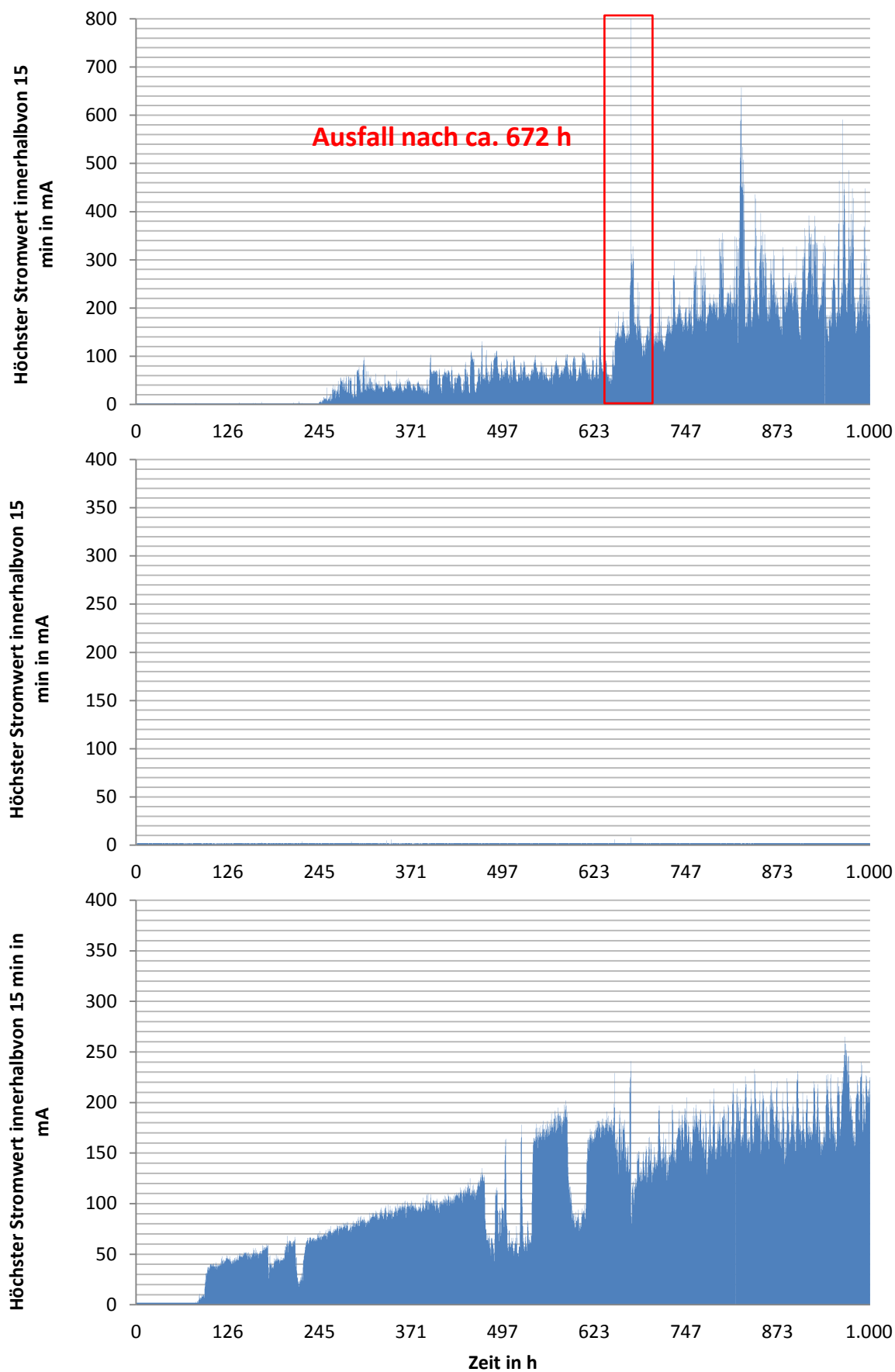


Abbildung 6-12: Ableitströme Referenzisolator
Position 4 (oben -> Ausfall nach ca. 672 h), Position 5 (Mitte) und Position 6 (unten)

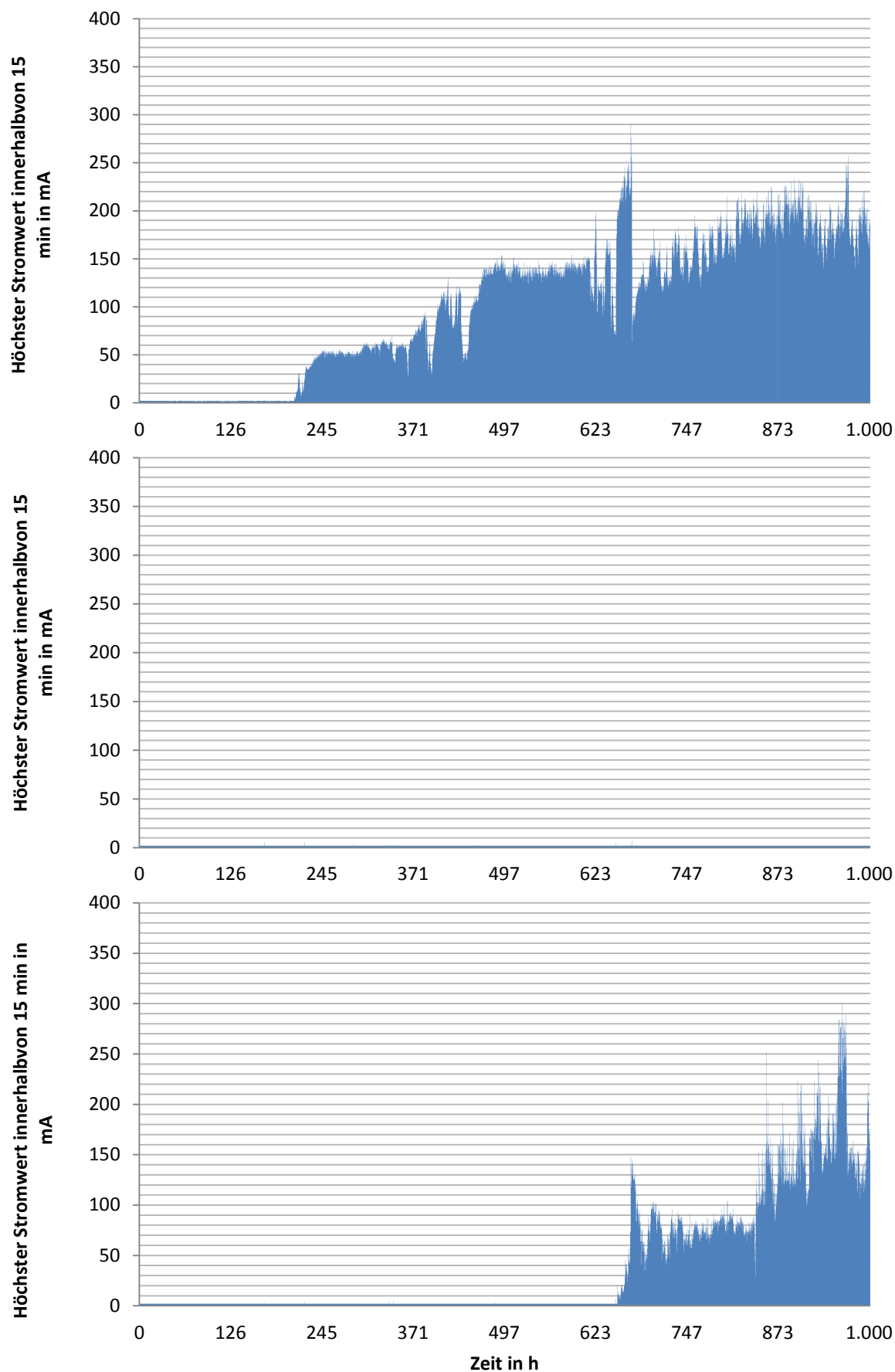


Abbildung 6-13: Ableitströme Prototyp Position 7 (oben), Position 8 (Mitte) und Position 9 (unten)

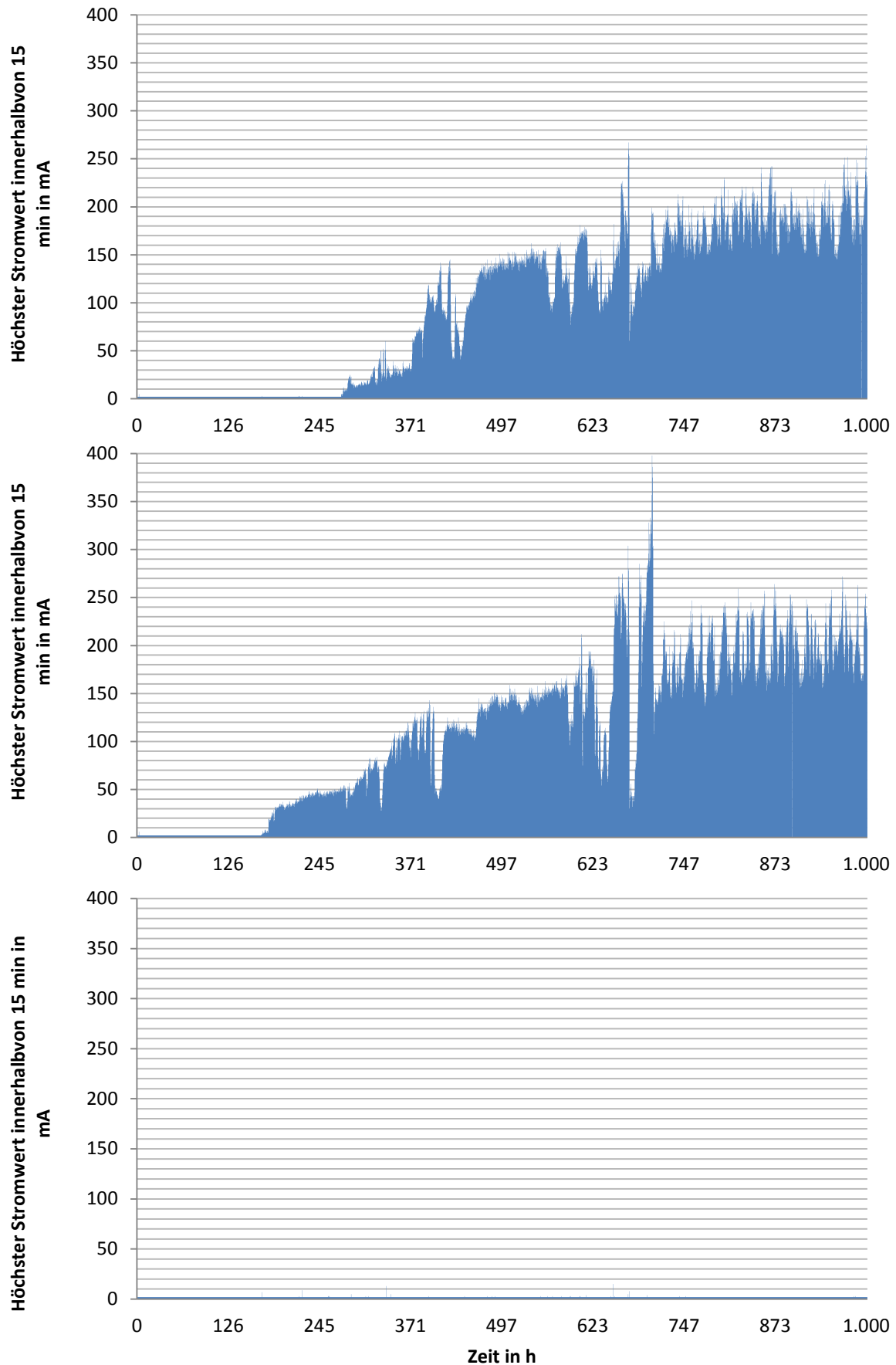


Abbildung 6-14: Ableitströme Prototyp Position 10 (oben), Position 11 (Mitte) und Position 12 (unten)

Die Ergebnisse der beiden Prüfungen zeigen auf den ersten Blick ähnliche Verläufe/ Tendenzen. In beiden Testabläufen ist bei einigen Isolatoren die kontinuierliche Zunahme der Entladung (Größenordnung) zu erkennen. Des Weiteren weisen einige Isolatoren vernachlässigbar geringe Entladungen auf.



Abbildung 6-15: Isolator nach der Prüfung

Am Ende der Prüfung wurden die Isolatoren auf Kriechweg- und Erosionsspuren untersucht. Die Nachkontrolle bei den Isolatoren hat ergeben, dass bei allen Prüflingen keine Kriechspurbildung aufgetreten ist. Direkt nach der Prüfung war die Oberfläche der Isolatoren hydrophil (Abbildung 6-15 in Anlehnung an das STRI-Verfahren [Swedish Transmission Research Institute (STRI), Guide 1 92/1, hydrophobicity Classification Guide]).

Nach der Säuberung und einer Erholungszeit von 3 Stunden ist die Hydrophobie an beiden Isolatormodellen wieder zurückgekehrt. In Abbildung 6-16 wird der Zustand der Schirme (hydrophob oder hydrophil) vor der Prüfung, sofort danach und nach einer Erholungszeit von 3 Stunden dargestellt.

Bei einigen Isolatoren sind Erosionsspuren festgestellt worden (Abbildung 6-17). Die meisten Isolatoren mit Erosionsspuren waren horizontal befestigt worden. Bei den Isolatoren in dieser Lage ist ein nahezu kontinuierlicher Verlust der Hydrophobie bzw. der Steigerung der Teilentladungsbelastung zu erkennen. Vermutlich wird die Teilentladungsentwicklung am Strunk durch diese Lage begünstigt. Die Erosionstiefe betrug weniger als 3 mm und der Kern wurde nicht erreicht. Des Weiteren wurden bei einigen Isolatoren, welche alle vertikal befestigt waren, sehr geringe Ableitströme registriert. Diese Isolatoren waren vertikal befestigt wor-

den. Ein Durchschlag an den Schirmen, den Schirmhüllen oder den Grenzflächen ist nicht aufgetreten.

Im zweiten Test ereignete sich eine Überstromauslösung am Referenzisolator (Abbildung 6-13) an der Position 4 (

Abbildung 6-6). Die Spannung wurde nach der Überstromauslösung wieder um eine Stufe gesenkt. Die Prüfung konnte danach ohne weitere Auslösungen beendet werden.

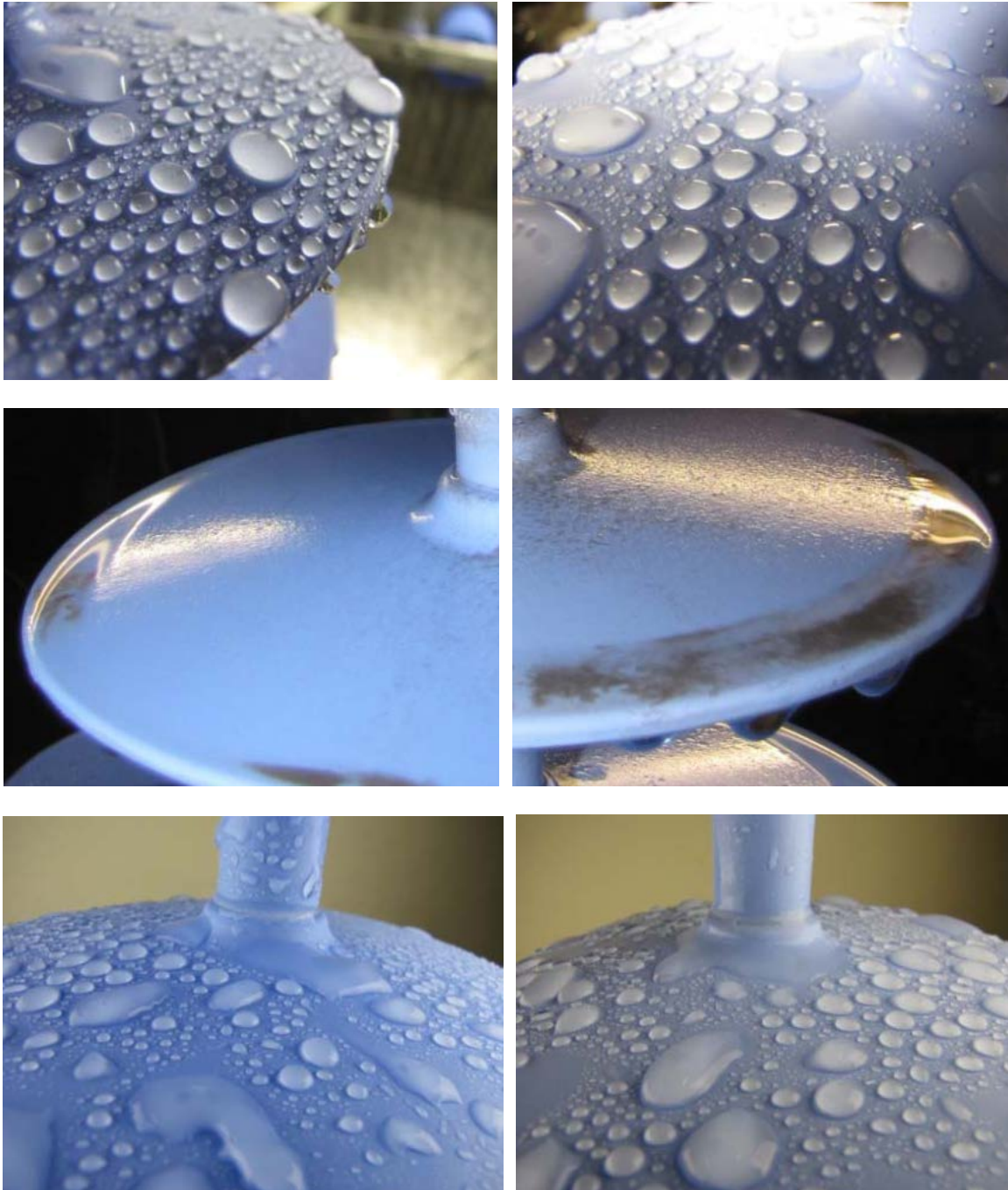


Abbildung 6-16: Hydrophobie neu (oben) nach der Prüfung ungereinigt (Mitte) und 3 Stunden nach der Reinigung (unten) für Referenzisolator (links) und Prototyp (rechts) [FG16]



Abbildung 6-17: Erosionsspuren am Prototyp [FG16]

6.3 Prüfung mit haftenden Fremdschichten

Zurzeit existieren keine standardisierten Fremdschichtprüfverfahren für die Bewertung von Polymerisolatoren. Die Prüfung von Keramik- und Glasisolatoren erfolgt nach DIN EN 60507. Aufgrund fehlender Prüfeempfehlungen erfolgen die Tests in Abstimmung zwischen dem Energieversorgungsunternehmen und dem Hersteller [DI08].

Dabei sollten u.a. folgende Punkte beachtet werden:

- Hydrophober/hydrophiler Zustand
- Aufbringen der Schmutzschicht
- Standard-Vorkonditionierungstechniken für Keramik und Glasisolatoren können die Hydrophobie zerstören

In der Vergangenheit wurden Untersuchungen zu diesem Themenbereich von Cigré vorangetrieben und werden gegenwärtig fortgesetzt. Die aktuelle Publikation der Cigré Working Group C4.303 mit dem Thema „*Artificial Pollution Test for Polymer Insulators*“ zielt u.a. auf die Standardisierung eines Prüfverfahrens ab. Die Veröffentlichung dieses Tests erfolgte im Oktober 2013. Die durchgeführten Prüfungen an Isolatoren im Round Robin-Test erfolgten ohne Beteiligung eines deutschen Prüfinstituts. Zurzeit orientiert sich die Durchführung von Prüfungen mit haftenden Fremdschichten (an Polymerisolatoren) an der Norm DIN EN 60507, unter Berücksichtigung bestimmter Vorbehandlungstechniken. Im Round Robin-Test wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches zusätzlich die Recovery-Phase (Hydrophobiewiederkehr) berücksichtigt. Hinsichtlich der zum Zeitpunkt der Antragsstellung unbekannten Ergebnisse aus der angeführten Cigré-Publikation wurde im Fortlauf des Projektes, bei der Durchführung von Untersuchungen nach AP3 (Untersuchungen zum Überschlagverhalten an haftenden Fremdschichten), die Anlehnung an die Realisierung im Round Robin-Test angestrebt. Das Verhalten von Silikonelastomeren, welche mit syntaktischem Schaum (Glaskugeln oder Keramikugeln) modifiziert wurden, zeigen, wie in dem Kapitel 4 dargestellt, ähnliche und teilweise verbesserte Eigenschaften des Hydrophobietransfers im Vergleich zu dem Referenzmaterial (Standardmischung eines Polymerisolators). Dadurch ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt.

Die Prüfungen mit haftender Fremdschicht wurden wie folgt gegliedert:

- Die Voruntersuchungen an Materialproben wurden an ausgewählten Materialien in Plattenprobenform durchgeführt. Dabei erfolgt die Untersuchung in Anlehnung an [CI13]:

Es wird zum einen eine Kontaktwinkelmessung an mit inerten Stoffen verschmutzten Plattenproben und zum anderen eine Widerstandsanalyse der Schmutzschicht durchgeführt

- Die Untersuchungen an Isolatoren orientieren sich an der DIN EN 60507 und [CI13]. Gemäß der Veröffentlichung werden die Tests in zwei Varianten unterteilt:

Variante 1: Die Zeit zwischen Vorbehandlung und Prüfung des Isolators darf ca. 16-20 Stunden nicht überschreiten (no recovery time).

Variante 2: Die Zeit zwischen Vorbehandlung und Prüfung des Isolators beträgt ca. 64-68 Stunden (recovery phase).

Neben der Anpassung der Prüfprozedur werden ebenfalls die Vorbehandlungstechniken wie Behandlung mit Kaolinpulver, das Auftragen einer einheitlichen Schmutzschicht sowie die Trocknung näher betrachtet. Bei der Behandlung von Plattenproben und Isolatoren wurde darauf geachtet, dass eine einheitliche, reproduzierbare Schmutzschicht auf den Prüflingen erzielt wird. Dazu gehörte neben dem Auftragen einer Schmutzschicht auch die Auswahl einer geeigneten Trocknungsmethode.

6.3.1 Untersuchungen an Plattenproben

Der Aspekt des Hydrophobieverlustes, der Hydrophobiewiederkehr und des Hydrophobie-transfers wurde bereits im Kapitel 4 (AP 1: Materialqualifikation) eingehend erläutert. In Abgrenzung zu den bereits durchgeführten Untersuchungen werden in diesem Kapitel Kontaktwinkel- und Widerstandsmessungen mit definierter Verschmutzung betrachtet. Die Art der Verschmutzung sowie das Aufbringen auf die Oberfläche wurde in Anlehnung an [CI13, DE09, WA00] durchgeführt. In dieser Untersuchung sollen nur Tendenzen aufgezeigt werden. Folgende Plattenproben aus unterschiedlichen Materialzusammensetzungen wurden untersucht (Tabelle 6-5: Verwendete Plattenproben):

Tabelle 6-5: Verwendete Plattenproben für die Kontaktwinkelmessung

Material	Bemerkung
HTV - Material	Referenzmaterial mit ca. 36 vol.% ATH Abk. → REF
HTV - Material	48 gew.% ATH, Abk. → ATH 48 %
HTV - Material	58 gew.% ATH, Abk. → ATH 58 %
LSR	
Glas 20/30	HTV – Material mit 20 vol.% Glaskugeln und 30 vol.% ATH Abk. → Glas 20/30
Keramik 30/20	HTV – Material 30 vol.% Keramikugeln und 20 vol.% ATH Abk. → Keramik 30/20

Die Kombination Glas 20/30 wurde auch für die Herstellung des Prototyp-Isolators verwendet (Kapitel 6.3.2). Für die Untersuchung des Hydrophobietransfers wurden unterschiedliche inerte Stoffe verwendet:

- Kaolin,
- Tonoko rot,
- Tonoko weiß,
- Kieselgur

Die Zusammensetzung der einzelnen Stoffen ist wie folgt in [DI14] festgehalten:

Tabelle 6-6: Zusammensetzung der verschiedenen inerten Stoffe nach [DI14]

Typ	Gewichtszusammensetzung in %				Korngrößenverteilung (kumulative Verteilung) in μm			Volumenleitfähigkeit σ_{20} S/m
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	16 %	50 %	85 %	
Kieselgur	70-90	5-25	0,5-6	7-14	1-10	10-20	20-50	0,0015-0,02
Kaolin	40-50	30-40	0,3-2	7-14	0,5-2	2-8	8-25	0,0015-0,02
Tonoko	60-70	10-20	4-8	-	1-3	5-10	15-30	0,002-0,01

Die Beschaffung von Tonoko (mit den geforderten Kennwerten nach [DI14]) gestaltete sich als schwierig. Tonoko ist ein Gemisch aus bildsamen (Ton und Kaolin) und unbildsamen Mineralien. Der unbildsame Anteil liegt bei etwa 75 % und besteht überwiegend aus Quarz, Feldspat und Glimmer. Für die Beeinflussung der Farbe des Tones sind weitere Spurenelemente enthalten (Tonoko weiß → shiro Tonoko und Tonoko rot → aka Tonoko). Deshalb wurden für die Untersuchung zwei Tonokosorten verwendet, welche direkt aus Japan importiert wurden.

Da es sich um Naturmaterial handelt, unterliegen die Anteile der einzelnen Stoffe Schwankungen (SiO₂ → 60-80 %, Al₂O₃ → 10-20 % ...) [Ka77].

Aus der übermittelten Analyse-Tabelle, welche nur für Tonoko weiß zur Verfügung stand, ist der Anteil von Siliciumdioxid und Aluminiumoxide wie folgt festgehalten:

SiO₂ = 77,66 %

Al₂O₃ = 10,20 %

FeO = 3,17 %

Der Anteil von SiO₂ ist somit etwas höher als in [DI14] gefordert/festgehalten.

Kontaktwinkelmessung:

Die Untersuchungen mittels Kontaktwinkelmessungen werden nachfolgend beschrieben. Als Prüflinge werden Plattenproben verwendet.

Zwei unterschiedliche Ansätze wurden bei dem Auftragen der Verschmutzung auf der Prüflingsoberfläche verfolgt.

1. Das Auftragen von reinem Pulver (nur die inerten Stoffe in Pulverform, keine Suspension)
2. Prüflinge werden in eine Suspension von 40g/Liter (Kaolin und Tonoko) und 100g/Liter (Kieselgur) „eingetaucht“ (ohne NaCl). Die Herstellung der Suspension entspricht [DI14] wobei die Zugabe von NaCl entfällt.

Der Hintergrund von Ansatz 1 ist, dass vor dem Aufbringen einer Suspension die erstmalige Vorbehandlung der Isolatoroberfläche mit einem inertem Stoff (z.B. Kaolin) erfolgen muss. Dadurch soll ein hydrophiler Zustand geschaffen werden, welcher es überhaupt erst ermöglicht die Suspension auftragen zu können.

Die Vorbereitung der Plattenproben nach Ansatz 1 wurde wie folgt durchgeführt:

Nach einer vorangegangenen Reinigung und Trocknung wurden die inertesten Stoffe mit einem Pinsel auf den Plattenproben gleichmäßig verteilt. Danach wurden die losen Reste der inertesten Stoffe von der Plattenprobenoberfläche weggeblasen. Es wurden von jedem Material insgesamt 4 Plattenproben mit den verschiedenen inertesten Stoffen behandelt und für die Untersuchung verwendet.

Die Vorbereitung der Plattenproben nach Ansatz 2 wurde wie folgt durchgeführt:

Die Vorbehandlung mit Pulver erfolgte analog zu Ansatz 1. Nach dem Eintauchen in die Suspension wurden die Plattenproben auf einer schrägliegenden Vorrichtung (einheitlicher Winkel = 45°) unter Raumtemperatur von 25°C und einer relativen Luftfeuchte von 35 % getrocknet (Abbildung 6-18). Generell wurde bei den Messungen, welche sich über einen Zeitraum von mehreren Wochen/Monaten erstreckten, für jeden Ansatz und jedes Material jeweils nur eine Plattenprobe verwendet. Je Plattenprobe und inertem Stoff wurden drei Tropfen aufgesetzt.

Die Messung des statischen Kontaktwinkels wurde sowohl für Ansatz 1 als auch für Ansatz 2 durchgeführt. Die Messung des Rückzugswinkels erfolgte nur für Ansatz 1. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse festgehalten und jeweils nach Material geordnet. Diese werden in Anlehnung an die in CIGRE Technical Brochure 555:2013 veröffentlichte Darstellung vorgestellt [CI13 und Wa00].

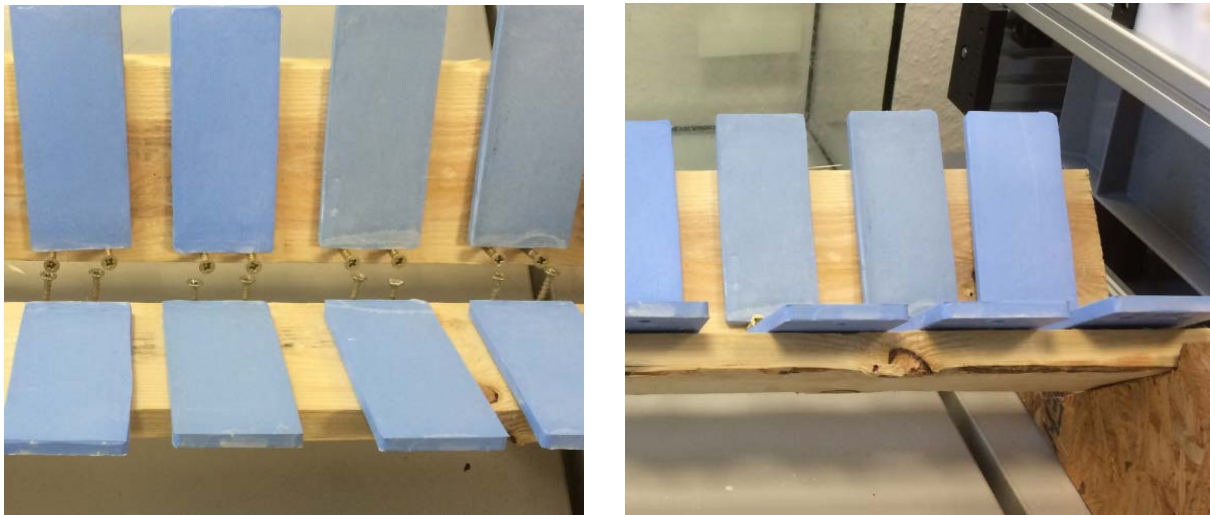


Abbildung 6-18: Schrägliegende Trocknungsvorrichtung

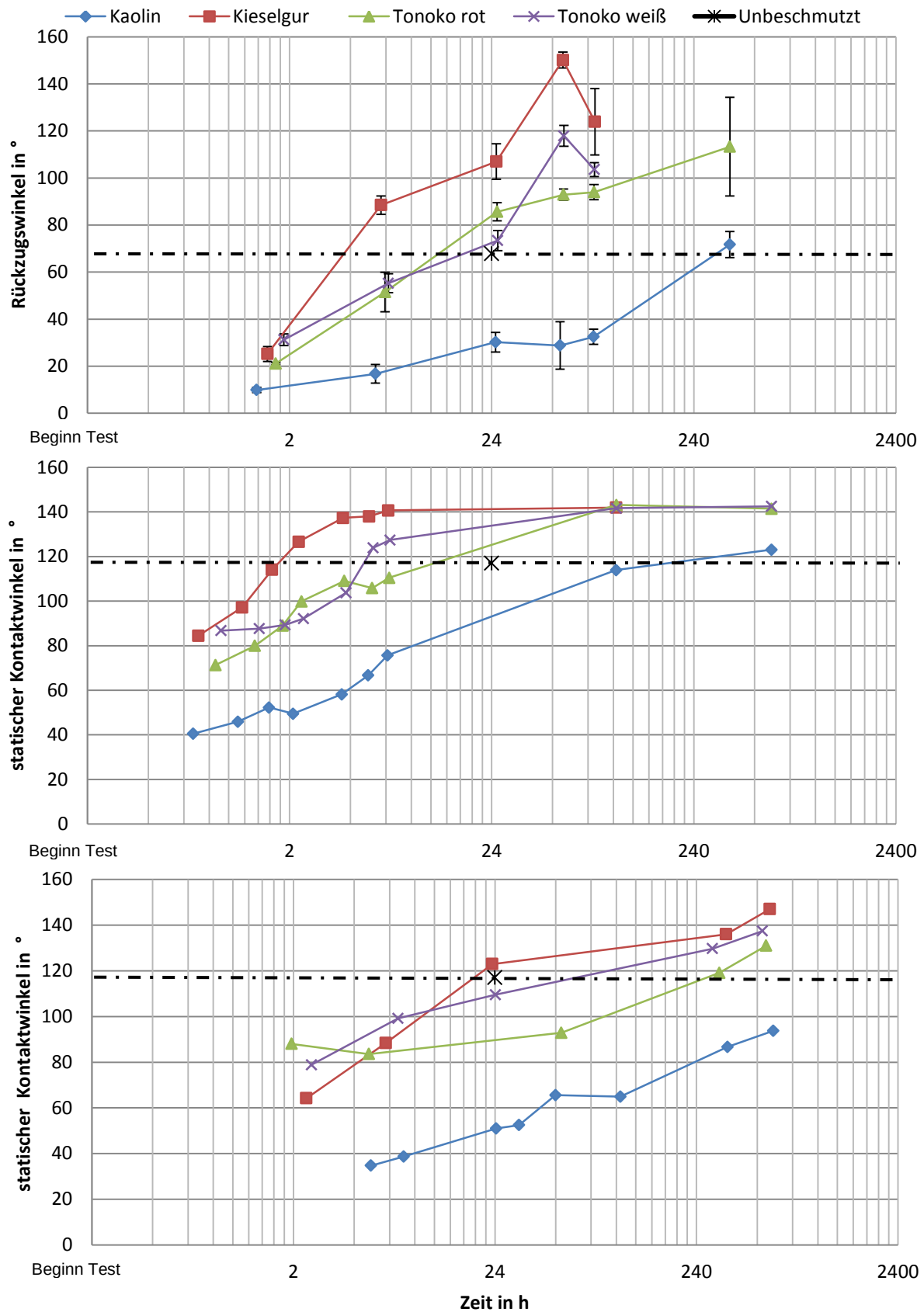


Abbildung 6-19: REF: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2

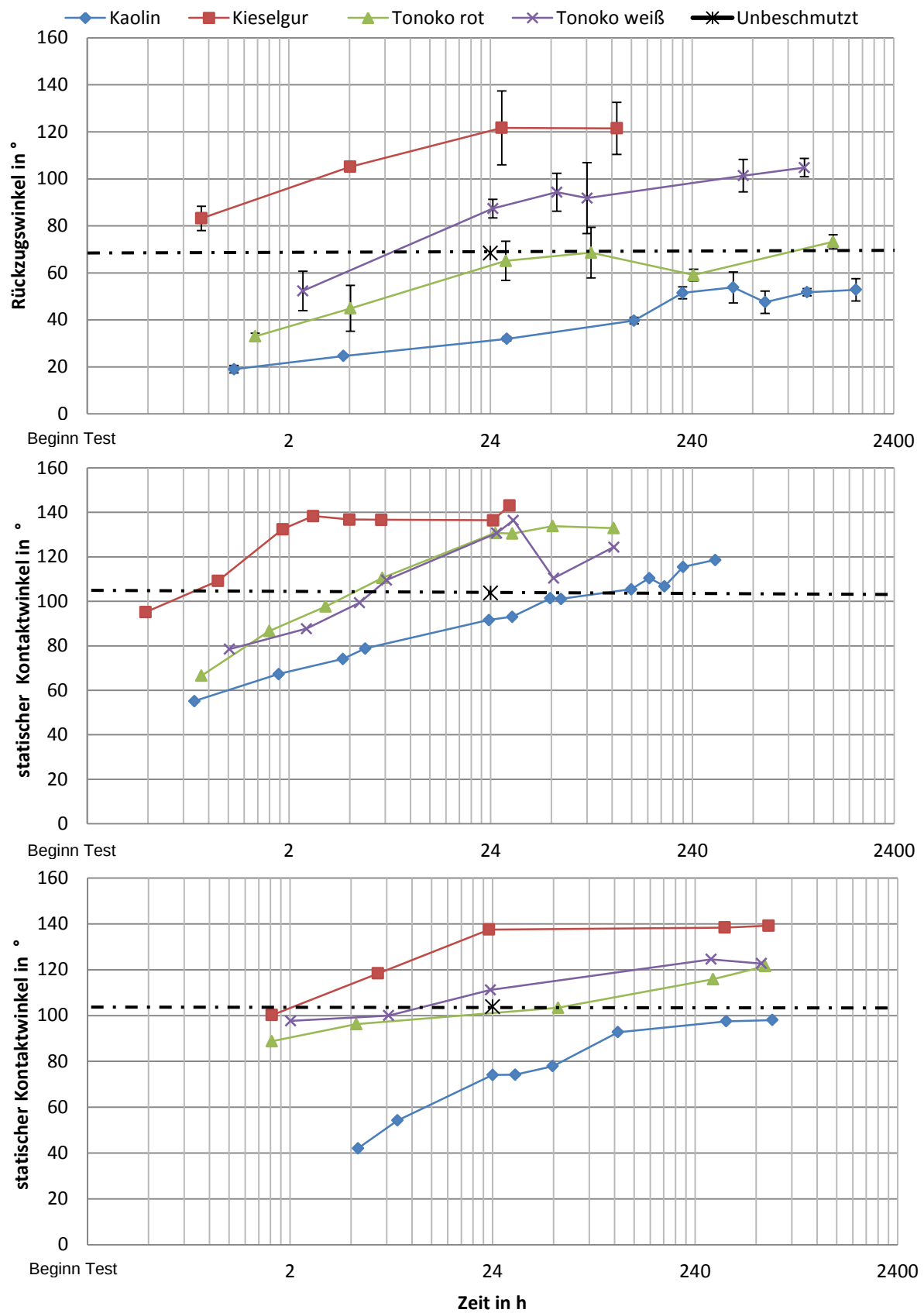


Abbildung 6-20: LSR: Rückzugswinkel (oben) und statistischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statistischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2

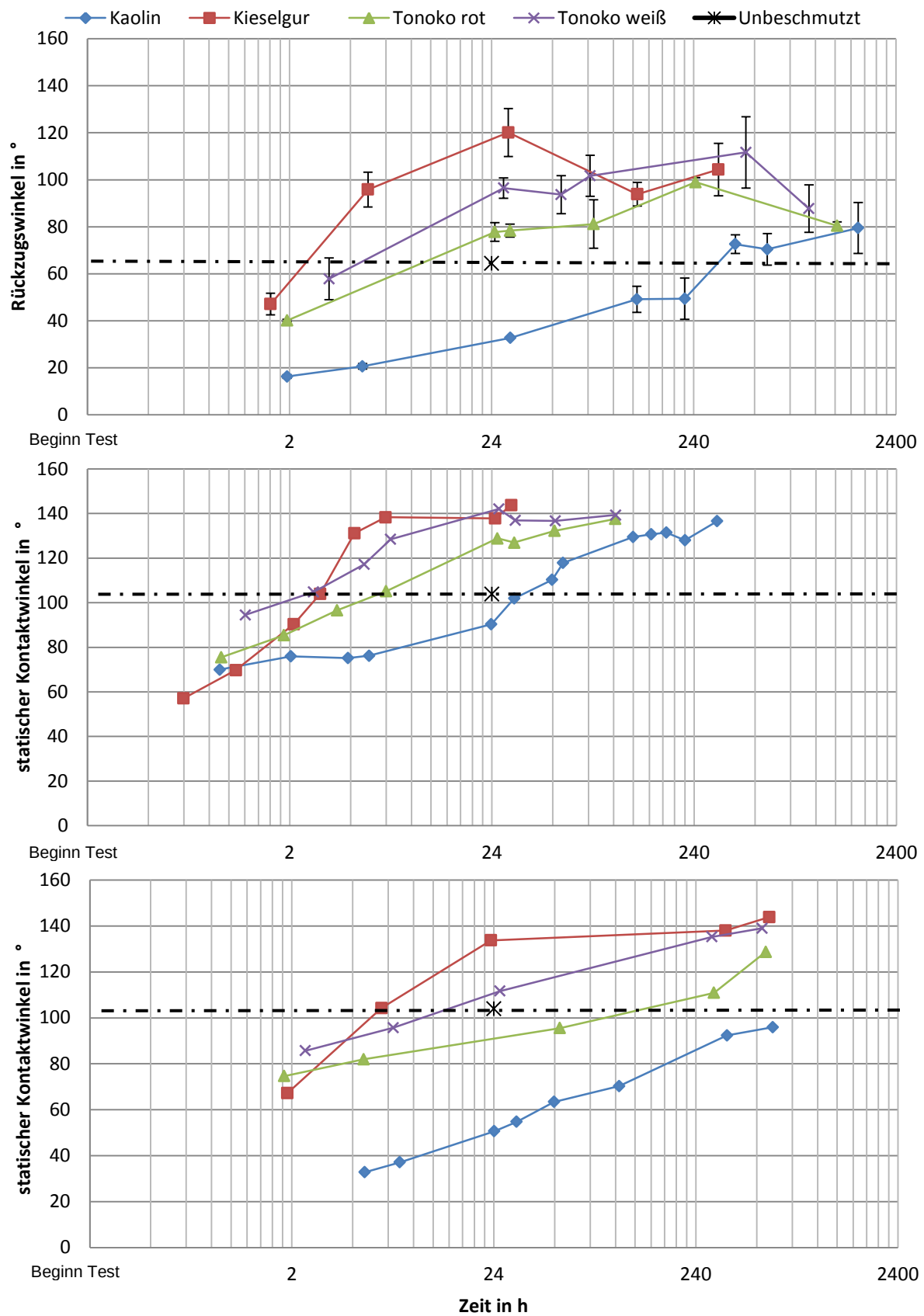


Abbildung 6-21: ATH 48 %: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2

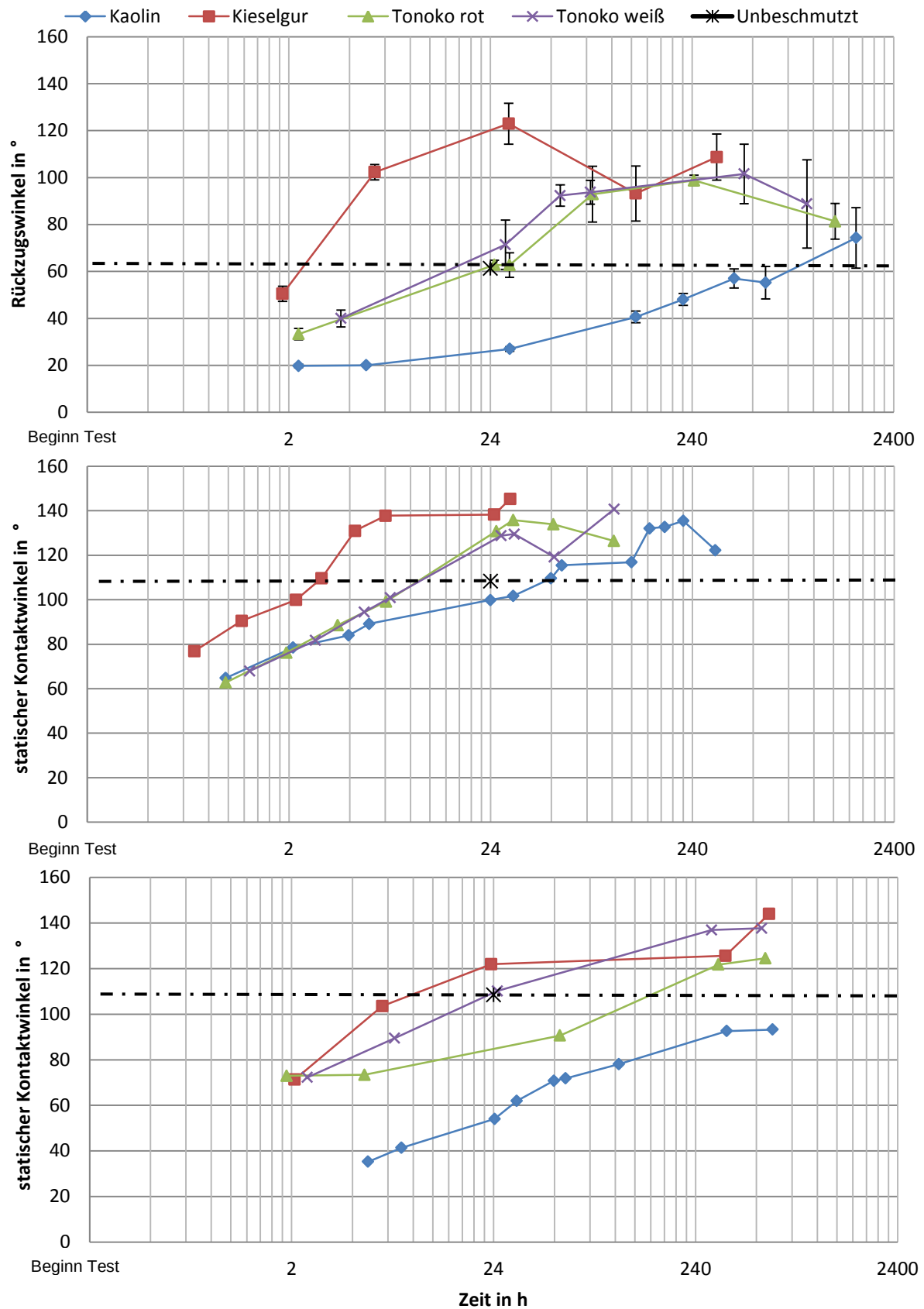


Abbildung 6-22: ATH 58 %: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2

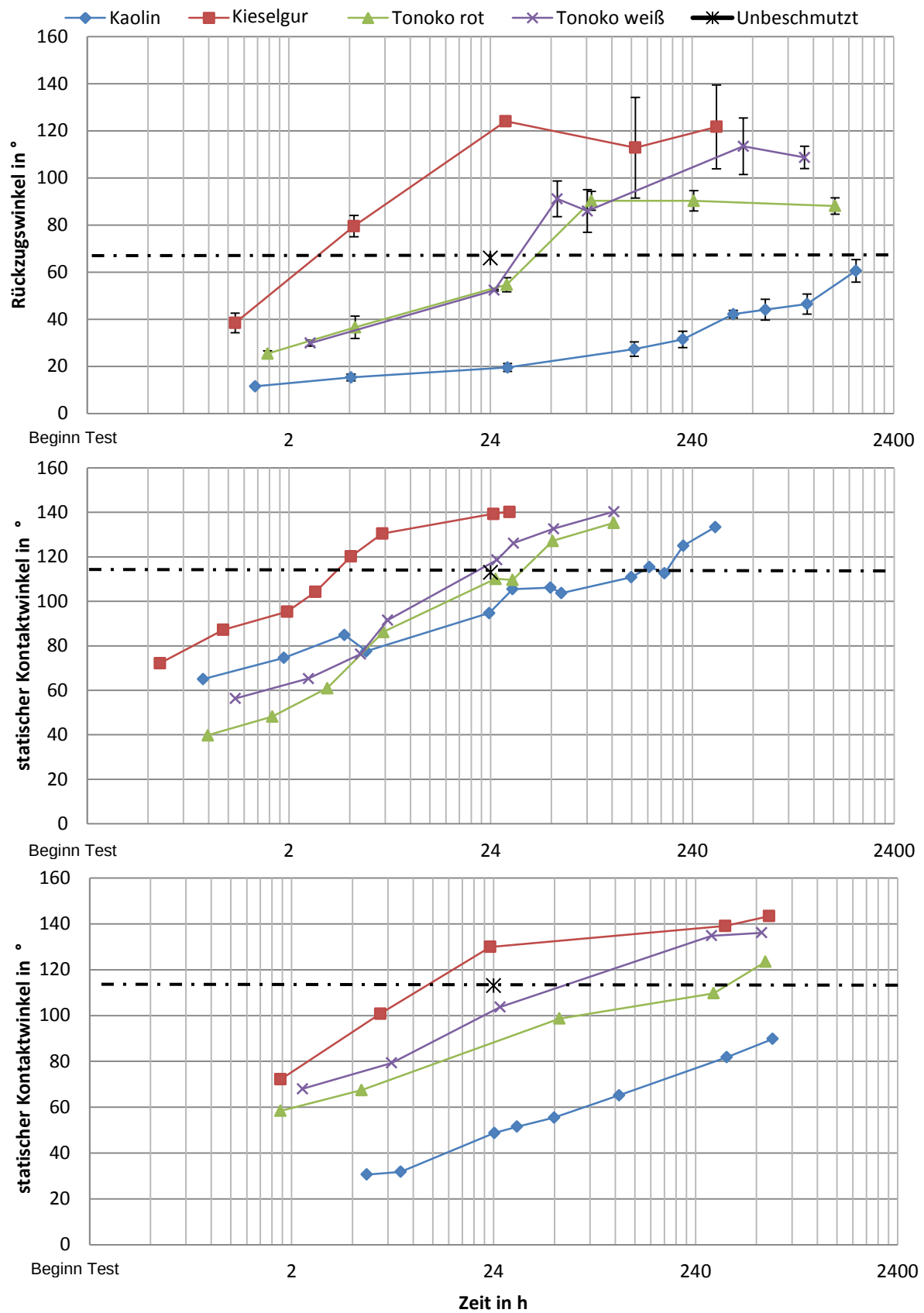


Abbildung 6-23: Glas 20/30: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2

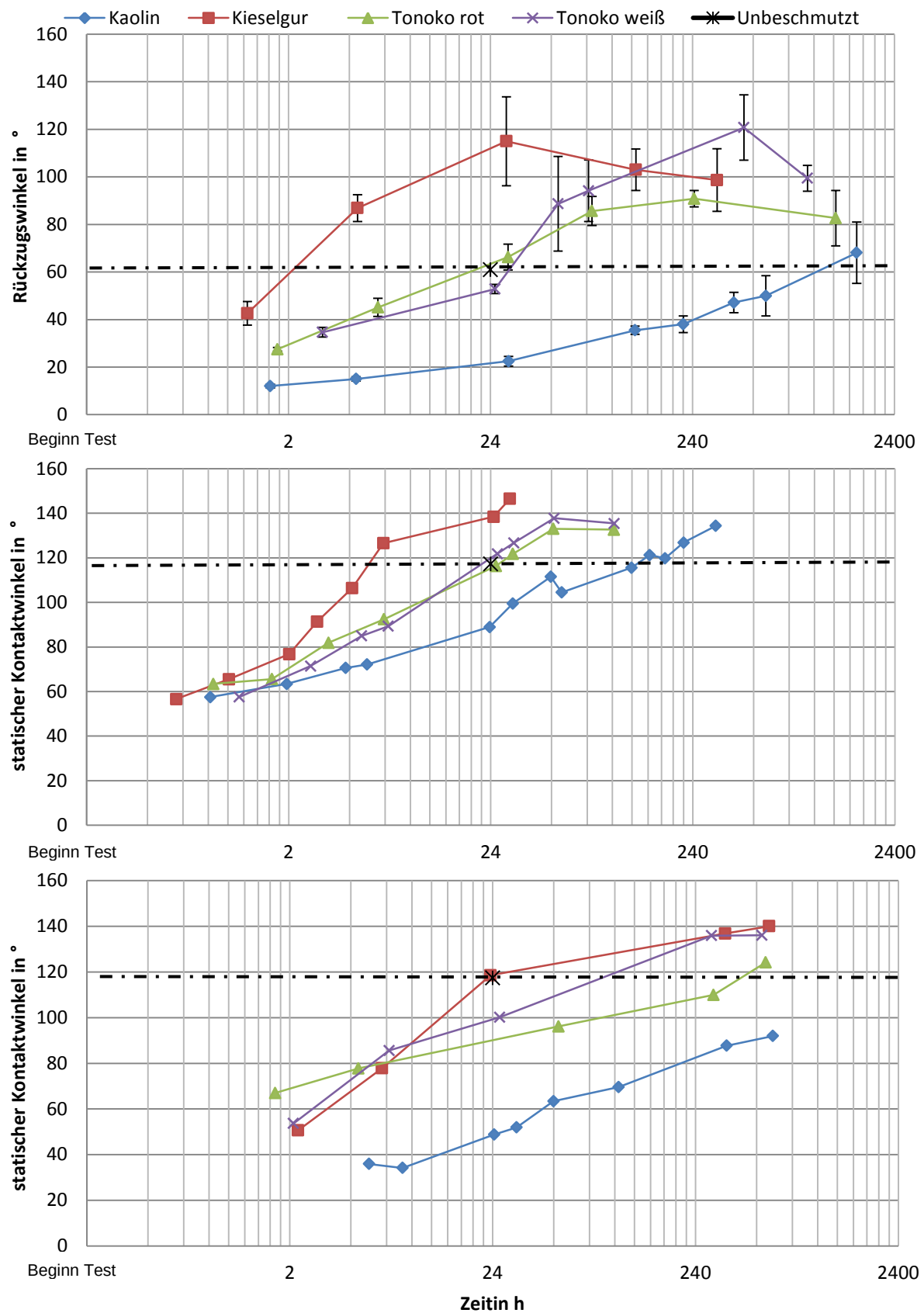


Abbildung 6-24: Keramik 30/20: Rückzugswinkel (oben) und statischer Kontaktwinkel (Mitte) nach Ansatz 1 sowie statischer Kontaktwinkel (unten) nach Ansatz 2

Die Ergebnisse bestätigen die bereits aufgezeigten Tendenzen nach CIGRE Technical Brochure 555:2013. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Tropfen nur auf einer Stelle der Plattenprobenoberfläche abgesetzt wurden, an der zuvor noch kein Tropfen abgesetzt wurde. Unabhängig vom Material, dauert der Hydrophobietransfer bei Plattenproben mit Kaolinbeschmutzung länger als bei anderen mit inerten Stoffen beschmutzten Oberflächen. Bei Kieselgur tritt der Hydrophobietransfer erwartungsgemäß besonders schnell ein. Abhängig von Material und der daraus resultierenden Möglichkeit einer ungehinderten Bewegung der Silikonmoleküle (Hydrophobietransfer, Kapitel 4.2.8), sind die Verläufe, bei der Betrachtung der Größenordnung des Kontaktwinkels (statischer Kontaktwinkel oder Rückzugswinkel) und Dauer des Hydrophobietransfers, unterschiedlich.

Der Vergleich der beiden Ansätze (statischer Kontaktwinkels) ergibt zum Teil bei der Betrachtung von Kaolin differenzierte Ergebnisse. Bei den Plattenproben, welche in eine Suspension eingetaucht wurden, wird der Hydrophobietransfer verzögert. Die Ergebnisse überschneiden sich jedoch teilweise bei der Betrachtung von Kieselgur und Tonoko. Durch das Auftragen der Schmutzschicht (ohne NaCl), verbunden mit der anschließenden Trocknung, ergeben sich andere Oberflächenbedingungen, welche vermutlich die Übertragung der Hydrophobieeigenschaft auf die Schmutzschicht (Hydrophobietransfer) verzögern.

Widerstandsmessung:

Der Hydrophobietransfer in eine Schmutzschicht, welche bei dieser Untersuchung zusätzlich einen Anteil von NaCl enthält, wird nachfolgend durch eine Widerstandsmessung untersucht.

Diese Untersuchung erstreckte sich über einen Zeitraum von mehreren Tagen mit Pausen, um den erwarteten Anstieg der Widerstandswerte dokumentieren zu können. Die Plattenproben waren zuvor keinen elektrischen Beanspruchungen unterzogen worden. Neue Plattenproben der nachfolgend dargestellten Materialzusammensetzung (Tabelle 6-7):

Tabelle 6-7: Verwendete Plattenproben für die Widerstandsmessung

HTV-Material	Referenzmaterial mit ca. 36 vol.% ATH Abk. → REF	Plattenproben wurden extra für diese Prüfung hergestellt.
HTV-Material	48 gew.% ATH Abk. → ATH 48 %	
HTV-Material	58 gew.% ATH Abk. → ATH 58 %	
LSR		Plattenproben wurden für die Kontaktwinkelmessung verwendet. Diese wurden keinerlei elektrischen Belastungen unterzogen, ausreichend Erholungszeit.
Glas 20/30	HTV - Material mit 20 vol.% Glaskugeln und 30 vol.% ATH Abk. → Glas 20/30	
Keramik 30/20	HTV - Material 30 vol.% Keramikkugeln und 20 vol.% ATH Abk. → Keramik 30/20	

Die Beschmutzung der Plattenproben erfolgte einheitlich und an einem Tag. Nach der Vorbehandlung der Plattenprobenoberfläche mit Kaolin, wurden diese in eine Suspension eingetaucht („dipping“).

Im Gegensatz zu der Suspension nach dem zuvor beschriebenen Ansatz 2, welche ohne Zusatz von NaCl erfolgt ist, wurde bei dieser Untersuchung ein SDD Wert von 0,2-0,3 mg/cm² angestrebt [CI13 und DE09]. Die Herstellung der Suspension erfolgte nach DIN EN 60507 mit einer Abänderung auf 7g Kaolin / Liter entmineralisiertem Wasser.

Die Plattenproben wurden, analog zum Ansatz 2, auf einem Gestell in Schrägstellung getrocknet (Abbildung 6-18). Nach der Trocknung erfolgte die erste Messung am Tag der Verschmutzung. Es wurde jeweils eine Plattenprobe pro Tag gemessen.

Die Plattenproben wurden dazu in einer Kammer für jeweils 3 min benebelt, um eine einheitliche und reproduzierbare Befeuchtung der Oberfläche zu erreichen (Abbildung 6-25). Die angefeuchtete Plattenprobe wurde unverzüglich in eine Prüfvorrichtung mit definiertem Elektrodenabstand gespannt und der Oberflächenwiderstand mit Hilfe eines Isolationsmessgerätes erfasst.

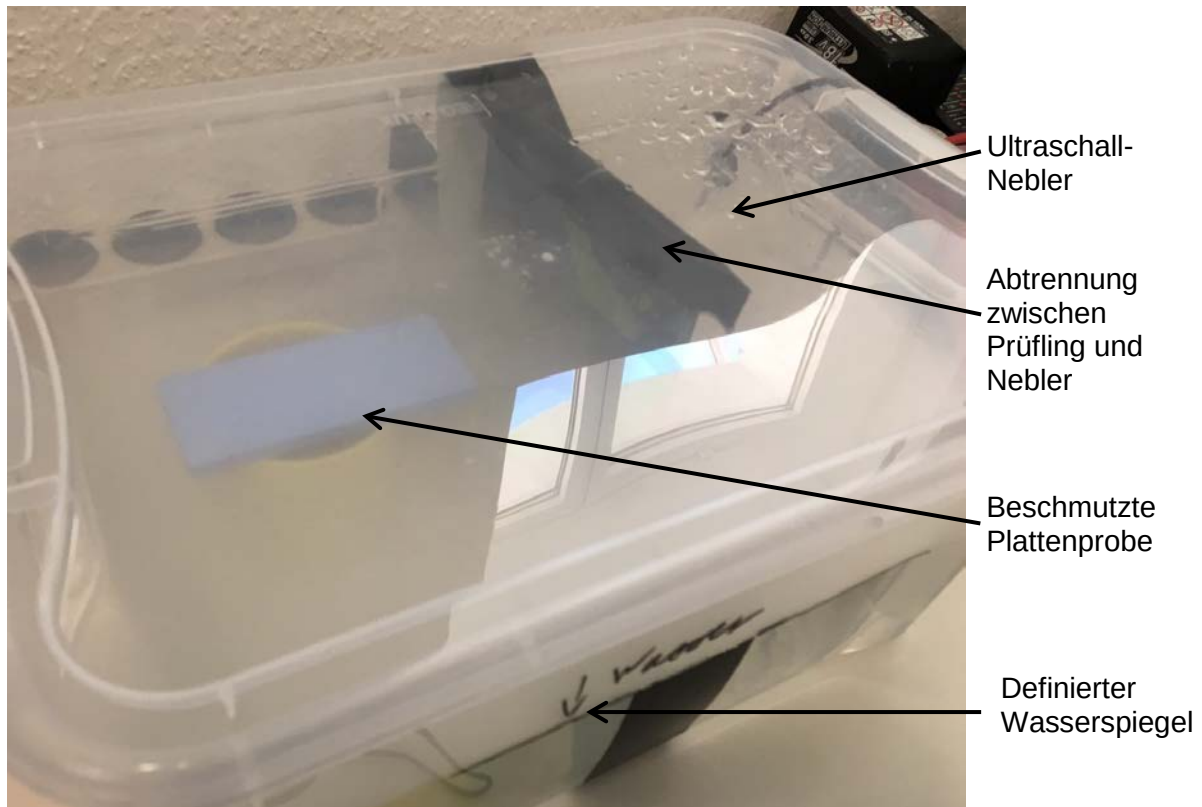


Abbildung 6-25: Beneblungseinrichtung

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 6-26 - Abbildung 6-28) sind die Ergebnisse der Widerstandsmessung dargestellt.

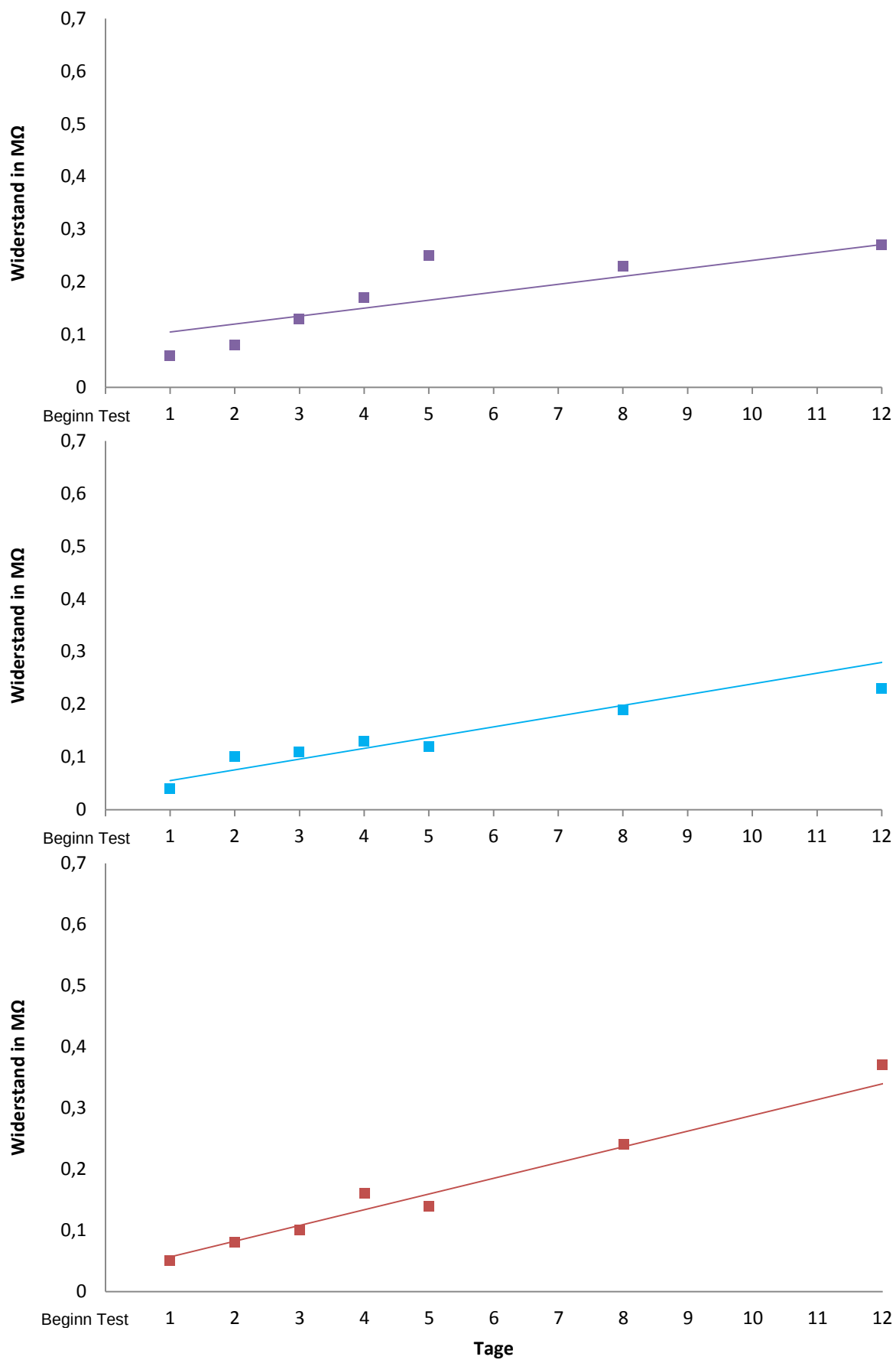


Abbildung 6-26: Ergebnisse der Widerstandsmessung mit Trendlinie: REF (oben), ATH 48 % (Mitte) und ATH 58 % (unten)

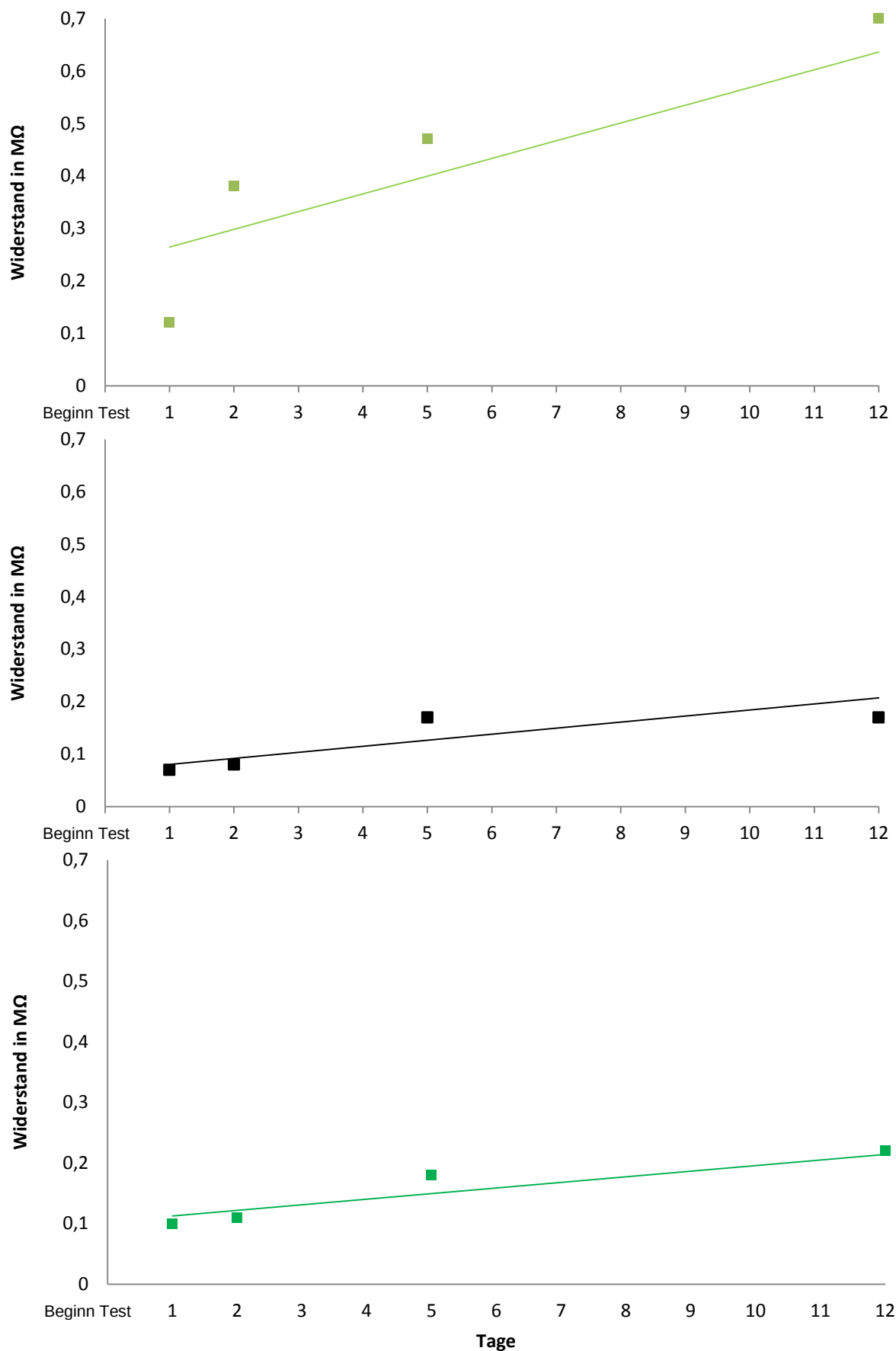


Abbildung 6-27: Ergebnisse der Widerstandsmessung mit Trendlinie: LSR (oben), Glas 20/30 (Mitte) und Keramik 30/20 (unten)

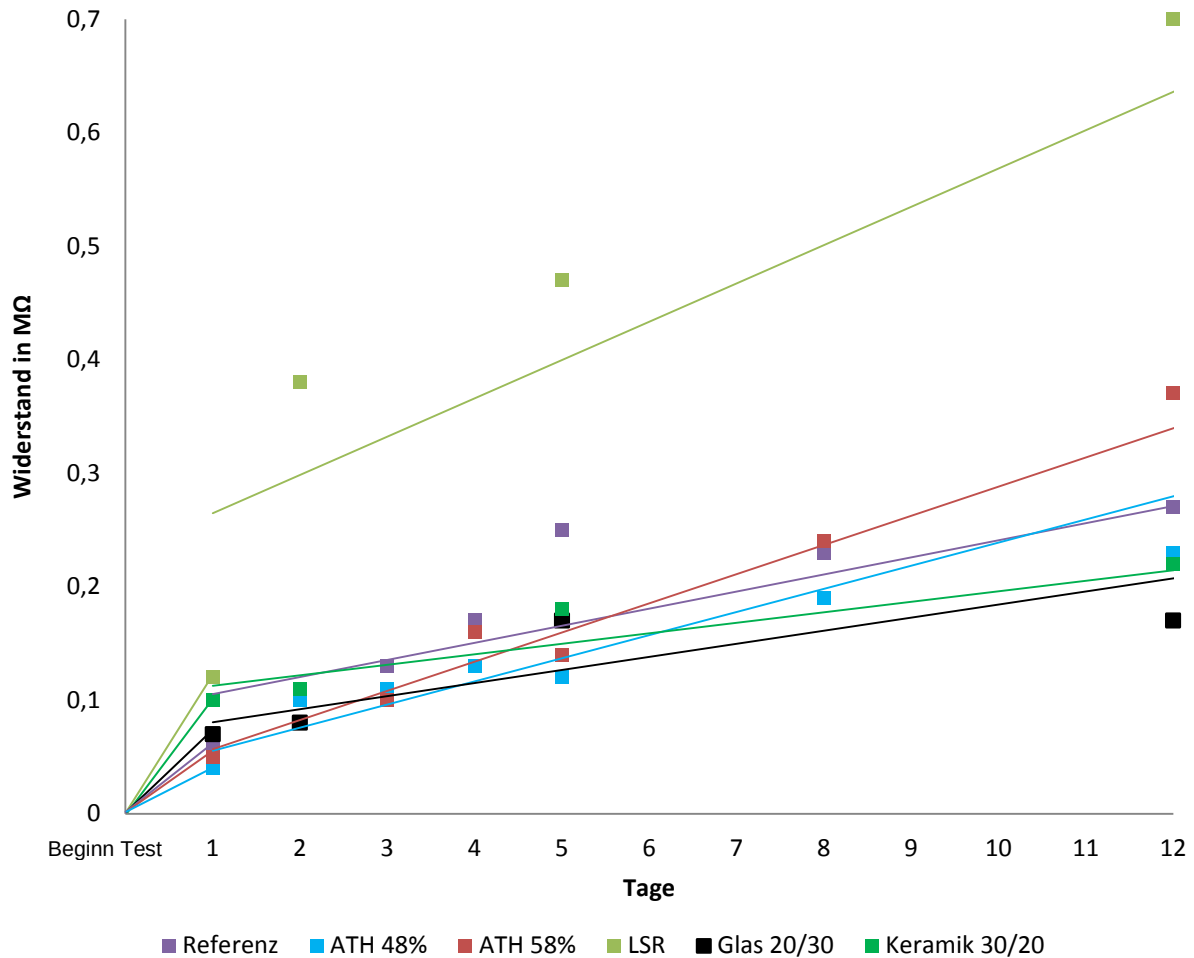


Abbildung 6-28: Gesamtdarstellung der Ergebnisse mit Trendlinie

Alle Ergebnisse zeigen steigende Widerstandswerte in Abhängigkeit der Messdauer. Dadurch ist, in Abhängigkeit der Lagerungsdauer, für jede Materialzusammensetzung (Plattenprobe) eine Tendenz zum Hydrophobietransfer zu erkennen. Besonders herausstechend sind die steigenden Widerstandswerte der LSR-Prüflinge. Diese zeigen nach kurzer Zeit, in Vergleich zu den anderen Materialien, eine deutliche Widerstandsänderung.

6.3.2 Untersuchungen an Isolatoren

Die Prüfung an den Isolatormodellen basiert auf dem Prüfverfahren für haftende Fremdschichten nach IEC 60507, Kapitel 6 sowie eigenen Anpassungen/Instruktionen (in Anlehnung an CIGRE Technical Brochure 555:2013). Aufgrund der abweichenden Prüflingsabmessungen war eine exakte Durchführung der Messung entsprechend CIGRE Technical Brochure 555:2013 nicht möglich. Dabei wurde insbesondere die Prüfprozedur durch die Auf- und Ab-Methode aus der CIGRE-Veröffentlichung ersetzt. Die Prüfung erfolgte bei [FG16].

Es wurden acht Prüfungen durchgeführt, jeweils vier am Referenzisolator und vier am Prototyp. Hierbei wurden zwei Trocknungszeiten festgelegt, wodurch der Effekt des Hydrophobietransfers/-wiederkehr Berücksichtigung finden sollte:

- Hydrophiler Zustand (kurze Trocknungszeit mit ca. 17 Stunden)
- Hydrophober Zustand (längere Trocknungszeit mit ca. 66 Stunden)

Die Verschmutzung der Isolatoren wurde mit einer Suspension bestehend aus Wasser, Kaolin und Salz hergestellt.

Das Aufbringen der Suspension sowie die Trocknung der Isolatoren erfolgten auf einer rotierenden Vorrichtung (Abbildung 6-29). Dadurch wurde versucht ein gleichmäßiges Aufbringen der Fremdschicht und der Trocknung zu gewährleisten.

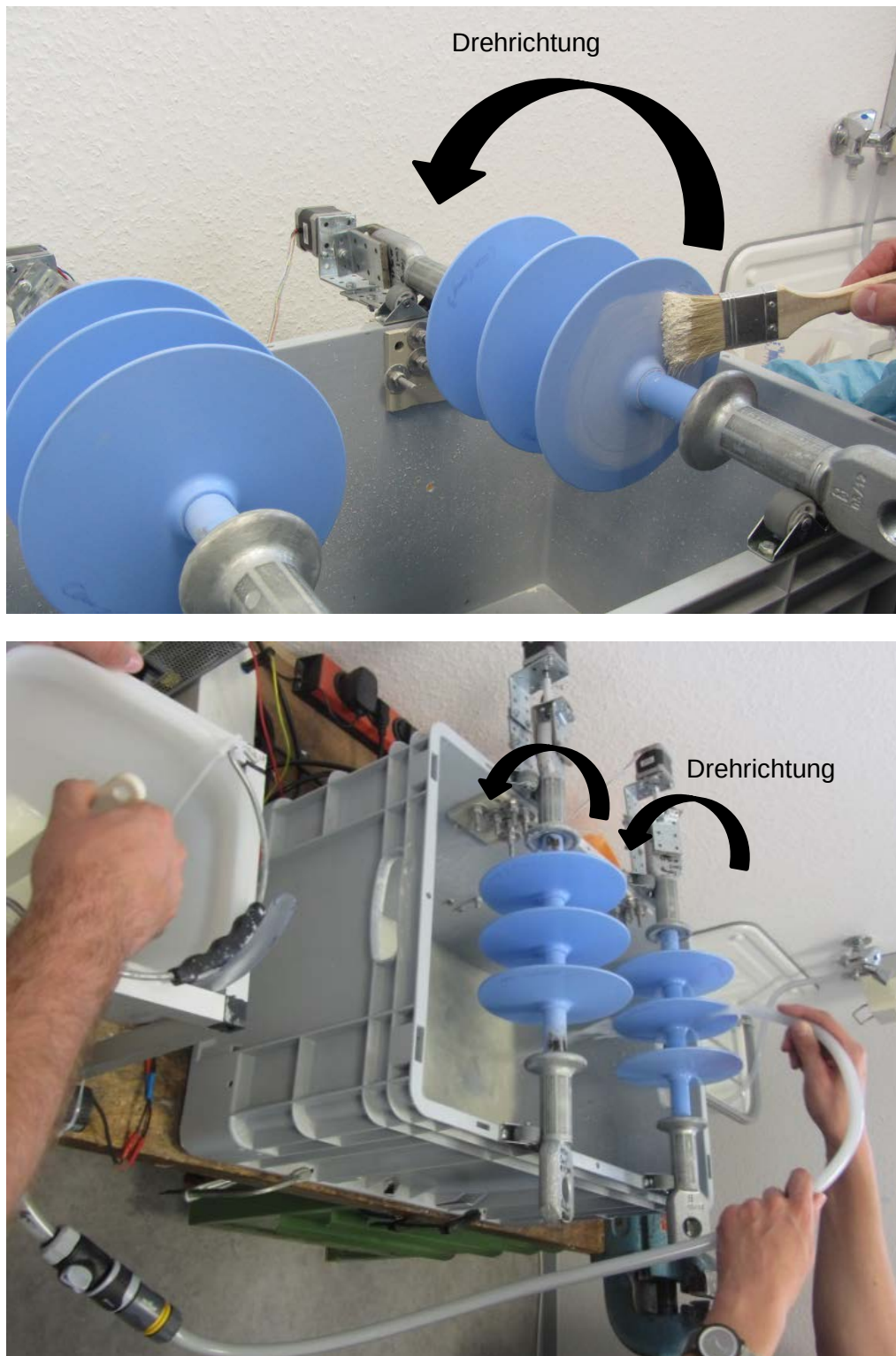


Abbildung 6-29: Rotierende Vorrichtung zum gleichmäßigen Auftragen und Trocknung der Schmutzschicht: Vorbehandlung (oben) und Auftragen der definierten Suspension (unten)

Nach der Vorbehandlung der Isolatoren wurden die isolierenden Teile nicht mehr berührt. Die Oberfläche war vollständig hydrophil. Die SDD- und NSDD-Werte wurden nach IEC 60507, Kapitel 6.5 und IEC 60817-1, Anhang C gemessen.

Der angewandte Toleranzbereich für den SDD- und NSDD-Wert war $\pm 15\%$.

- Spezifizierter SDD-Wert: $0,3\text{mg/cm}^2$
- Spezifizierter NSDD-Wert: $0,1\text{mg/cm}^2$

Jeder verschmutzte Prüfling wurde im Prüfraum montiert und reiner Wasserdampf wurde zur Befeuchtung der Schmutzschicht verwendet. Der Dampfgenerator lieferte eine gleichmäßige Verteilung des Nebels um den Prüfling. Der Temperaturanstieg in der Prüfkammer, gemessen in Prüflingshöhe, hat am Ende jeder Prüfung 15 K nicht überschritten. Die Isolatoren wurden im trockenen Zustand an Spannung gelegt und befeuchtet. Die nachfolgende Abbildung 6-30 zeigt den Aufbau in der Prüfkammer.

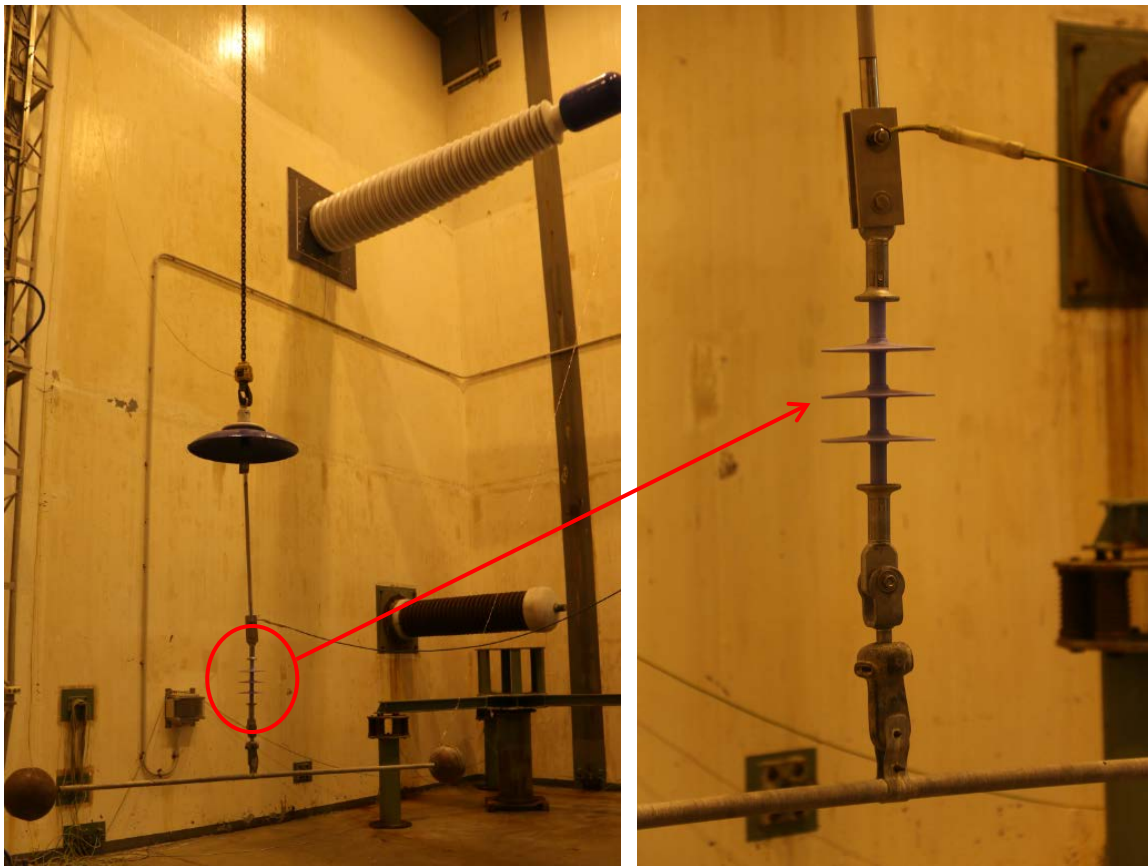


Abbildung 6-30: Prüfraum und Prüfaufbau für haftende Fremdschichten nach IEC 60507 [FG16]

Die Auf- und Ab-Methode wurde wie folgt durchgeführt:

Nach Ablauf der definierten Trocknungszeit wurde der Prüfling im Prüfraum montiert und mit einer definierten Spannung von 34 kV beaufschlagt. Mit Hilfe eines Dampfgenerators wurde zur Befeuchtung der Schmutzschicht reiner Wasserdampf in den Prüfraum geleitet, welcher sich gleichmäßig um den Prüfling verteilte. Für eine Dauer von 15 Minuten wurde die Prüfspannung angelegt und danach jede Minute bis zum Überschlag um 10 %, bezogen auf den Startwert, erhöht. Nach dem ersten Überschlag wurde die Spannung schnellstmöglich auf 90 % der Überschlagsspannung geregelt und alle 3 Minuten um 5 % der letzten Überschlagsspannung erhöht. Bei einem weiteren Überschlag wurde die Prüfspannung wieder auf 90 % der jeweils letzten Überschlagsspannung geregelt und erneut alle 3 Minuten um 5 % erhöht.

Die Prüfung wurde für einen Zeitraum von mindestens 100 Minuten und einer minimalen Anzahl von 10 Überschlagen fortgesetzt bzw. bis nach dem zunächst fallenden Verlauf der Überschlagsspannung wieder ein Anstieg dieses Wertes zu erkennen war. Als Prüfergebnis wird die niedrigste Überschlagsspannung, die während der Versuchsreihe auftritt dokumentiert. Einen schematischen Ablauf der Versuchsdurchführung zeigt Abbildung 6-31.

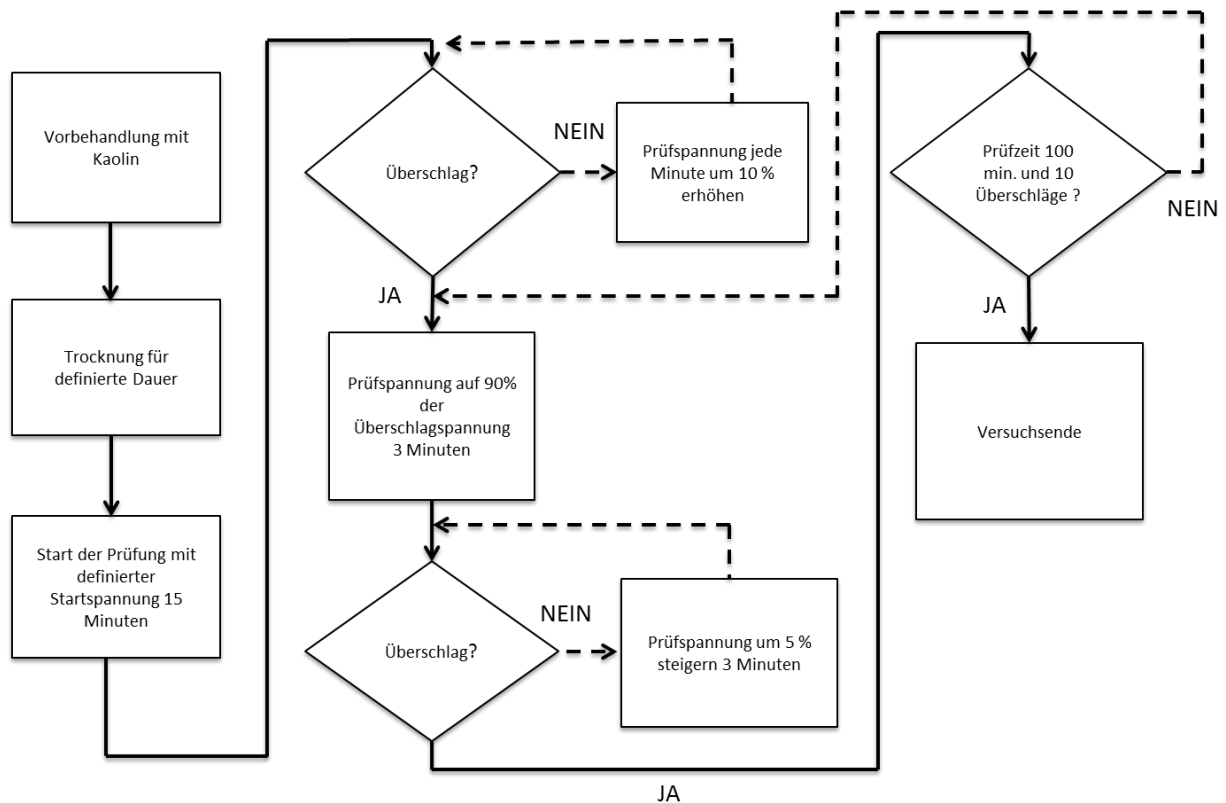


Abbildung 6-31: Auf- und Ab-Prüfverfahren

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Kennwerte sowie die Ergebnisse der Prüfung festgehalten.

Tabelle 6-8: Zusammenfassung der Ergebnisse

Material	Referenz				Prototyp			
SDD in mg/cm	0,2881				0,3047			
NSDD in mg/cm	0,124				0,112			
Versuchsnummer	V4	V8	V2	V6	V3	V7	V5	V1
Trocknungszeit in Stunden	18,3	17,3	66,0	66,0	17,5	17,3	65,2	71,8
Prüfdauer in Minuten	133	112	114	124	150	126	136	139
Geringste Überschlagswechselspannung nach Minuten	80	45	72	50	111	67	47	92
Geringste Überschlagswechselspannung in kV	30,7	30,4	30,6	32,1	30,6	28,3	31,5	36,1

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die einzelnen Ergebnisse (Höhe der Überschlagespannung und der Ableitströme). Die Ableitströme sind in den Grafiken blau dargestellt. Die Reihenfolge der nachfolgenden Darstellung von Ergebnissen erfolgt nach Material und Trocknungszeit.

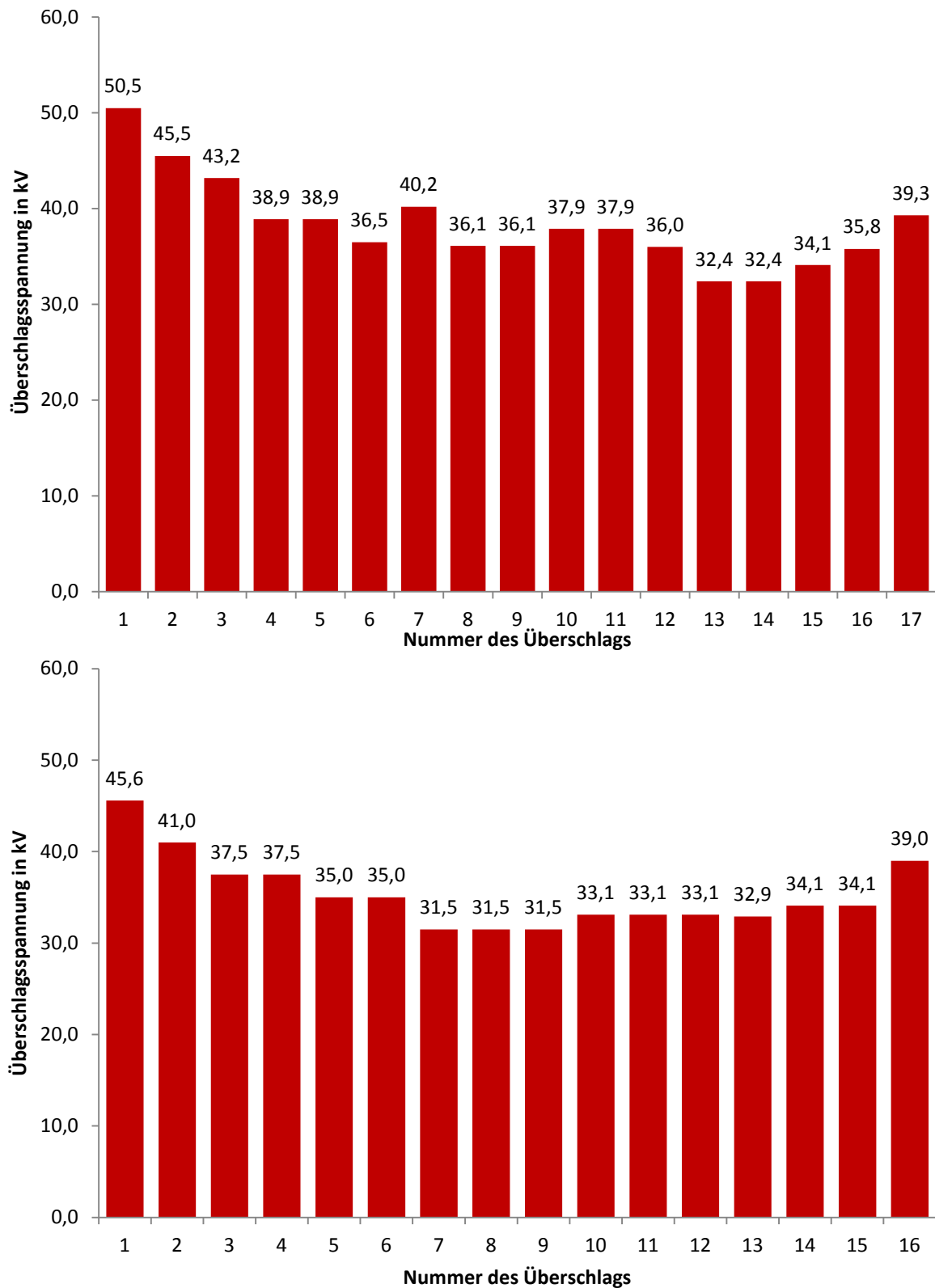


Abbildung 6-32: Überschlüsse für den Prototyp mit 71,8 h V1 (oben) und 65,2 h V5 (unten) Trocknung

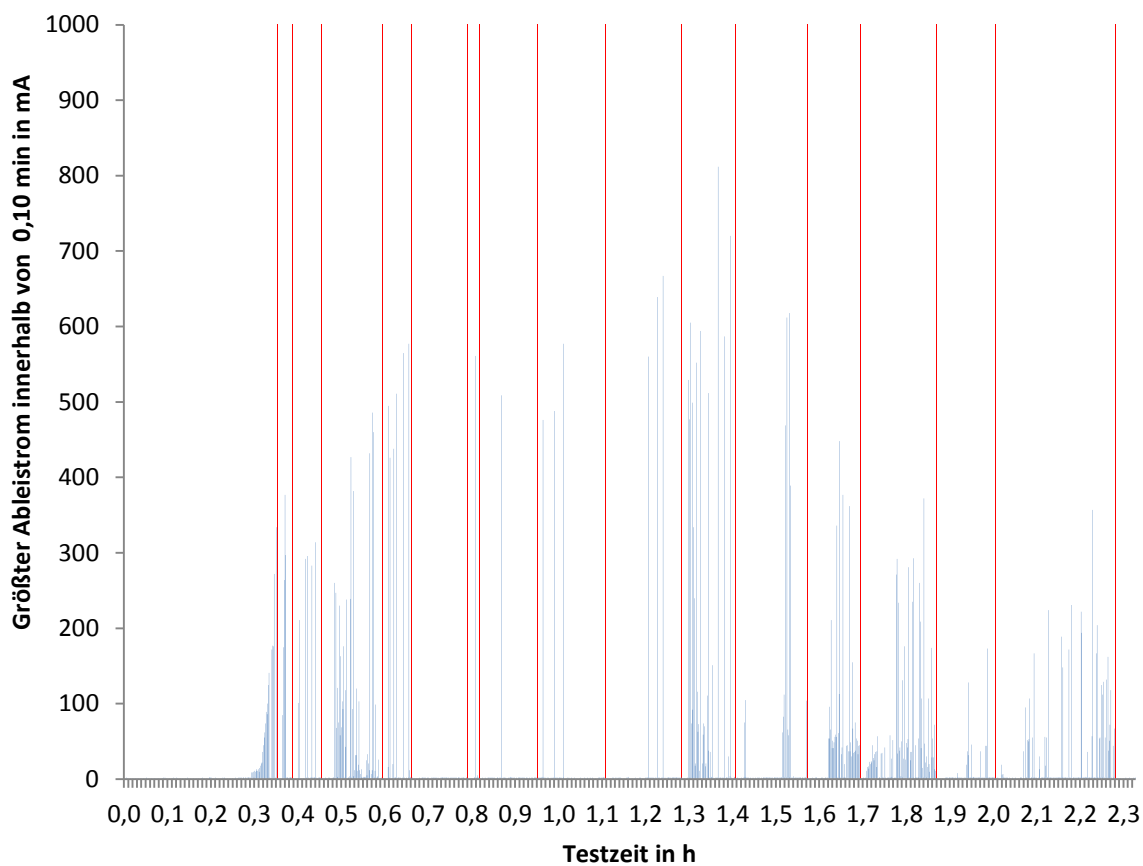
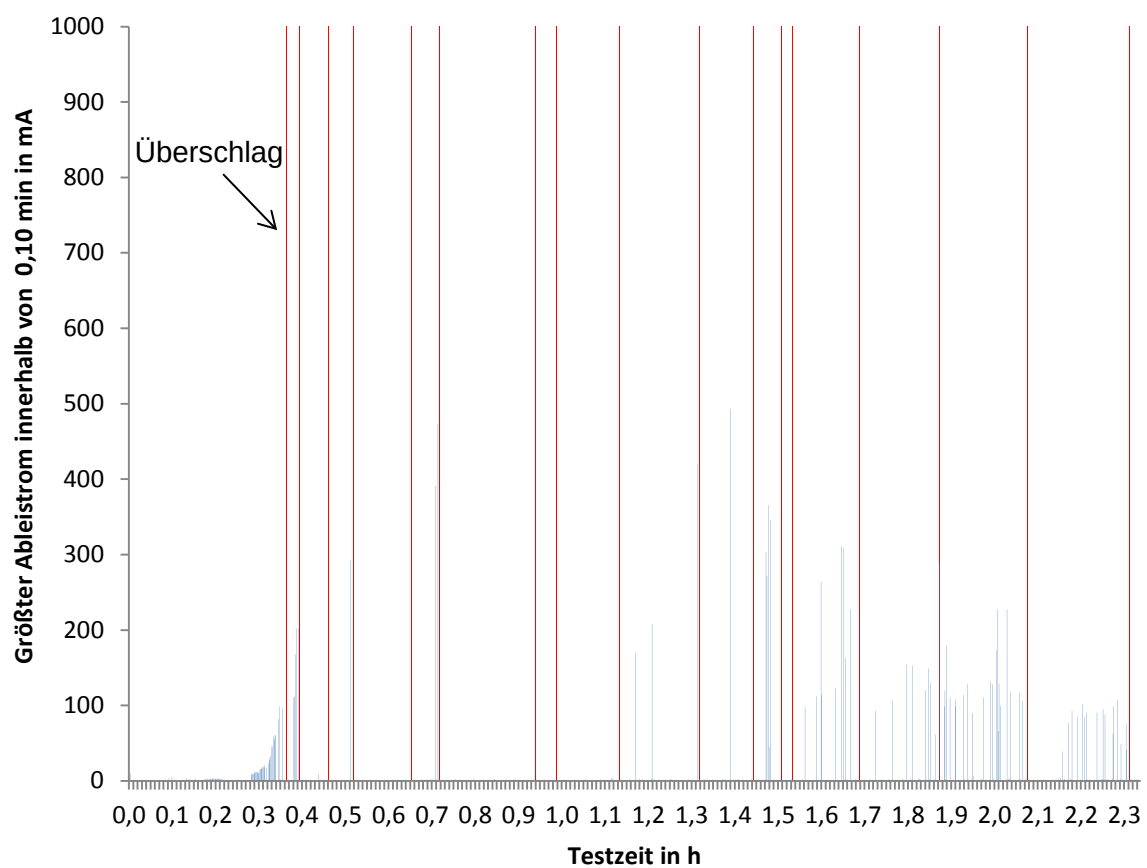


Abbildung 6-33: Ableitströme für den Prototyp mit 71,8 h V1 (oben) und 65,2 h V5 (unten) Trocknung

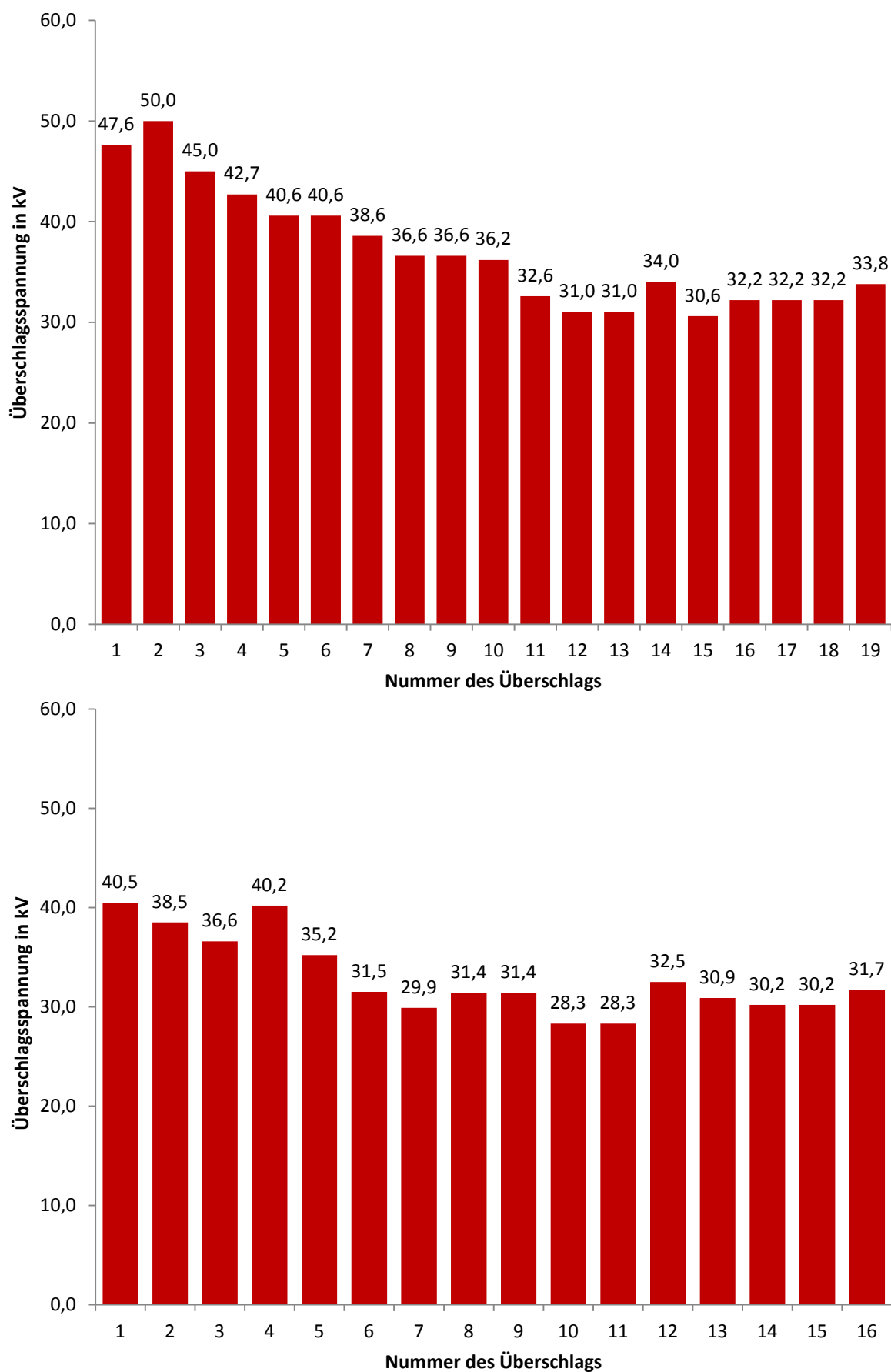


Abbildung 6-34: Überschlüsse für den Prototyp mit 17,5 h V3 (oben) und 17,3 h V7 (unten) Trocknung

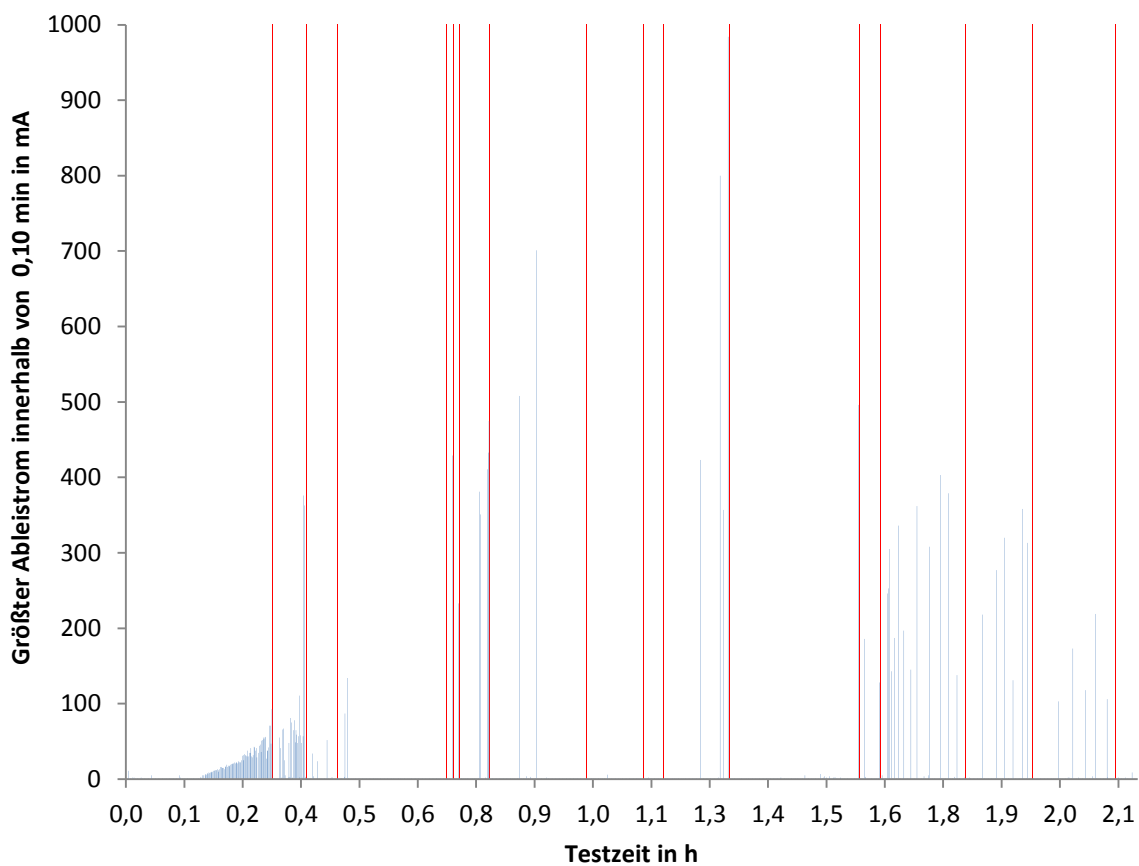
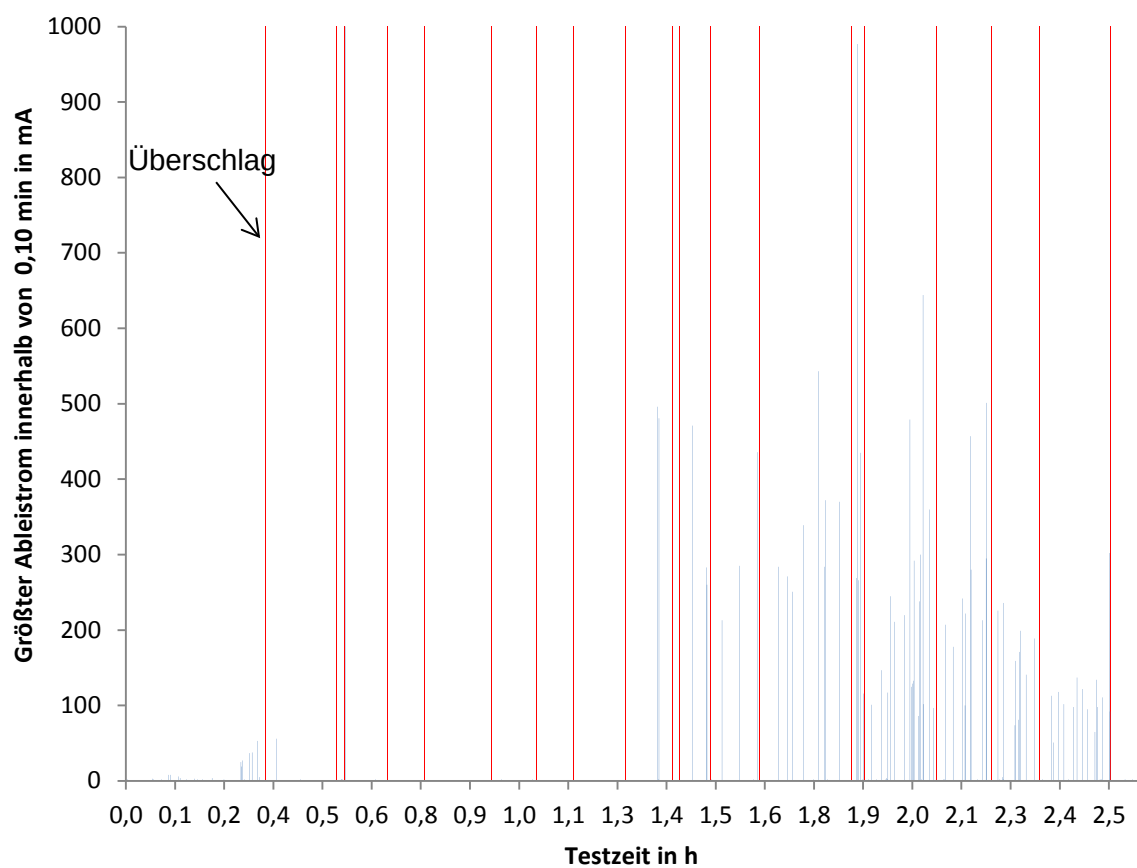


Abbildung 6-35: Ableistströme für den Prototyp mit 17,5 h V3 (oben) und 17,3 h V7 (unten) Trocknung

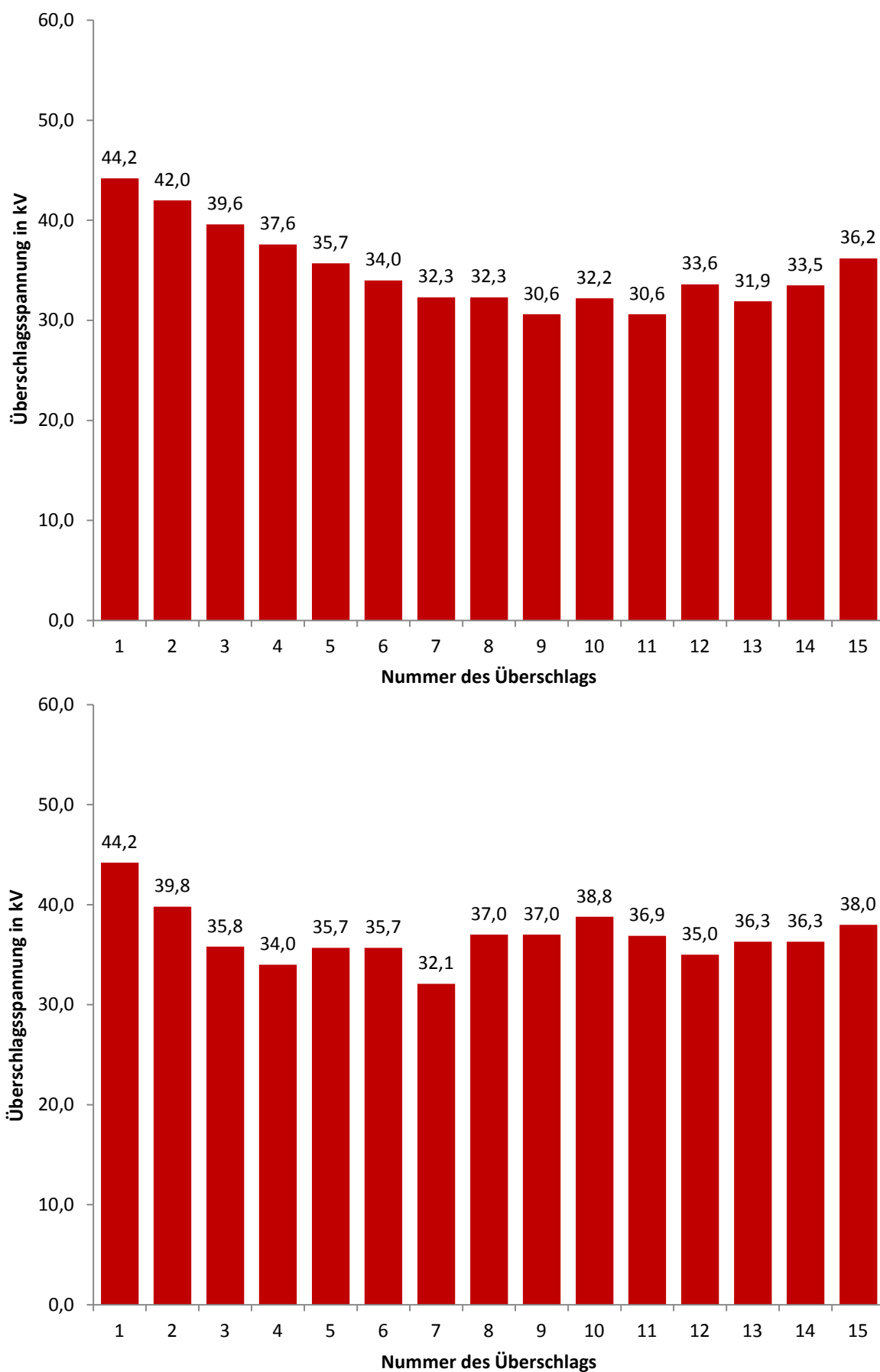


Abbildung 6-36: Überschlüge für den Referenzisolator mit 66 h V2 (oben) und 66 h V6 (unten) Trocknung

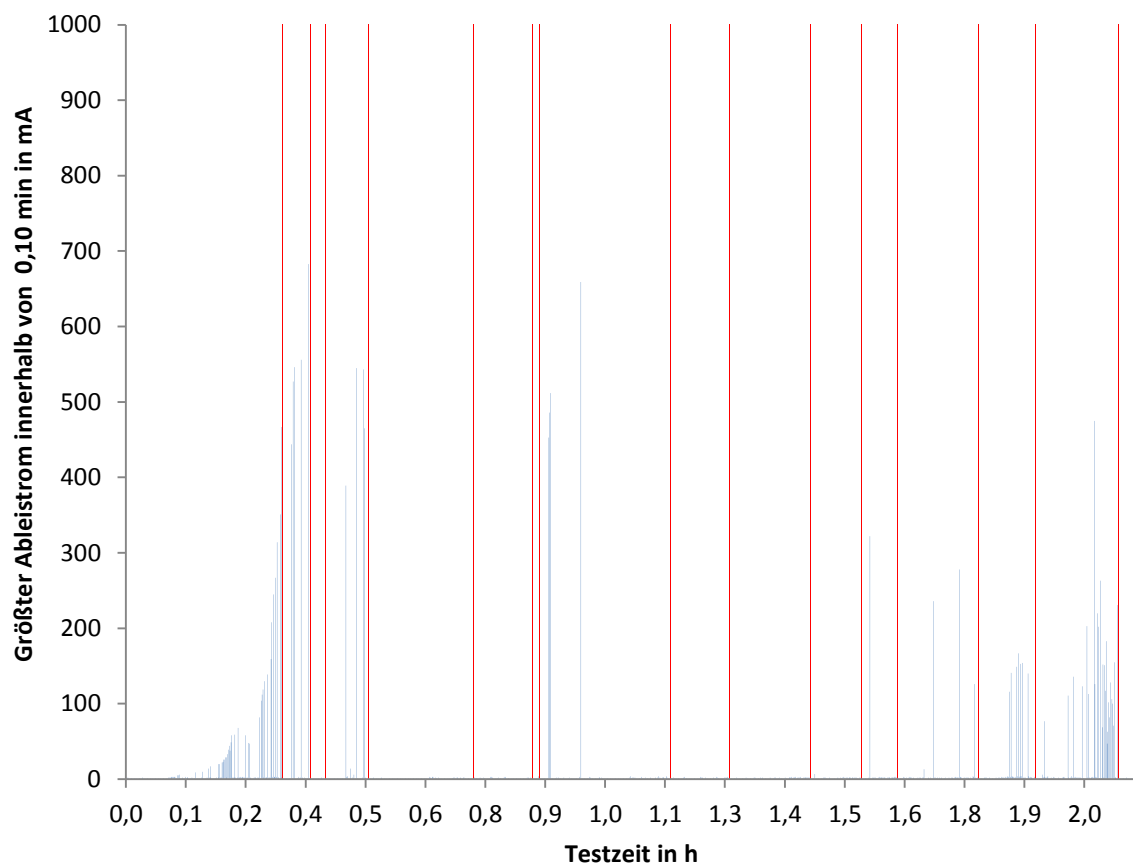
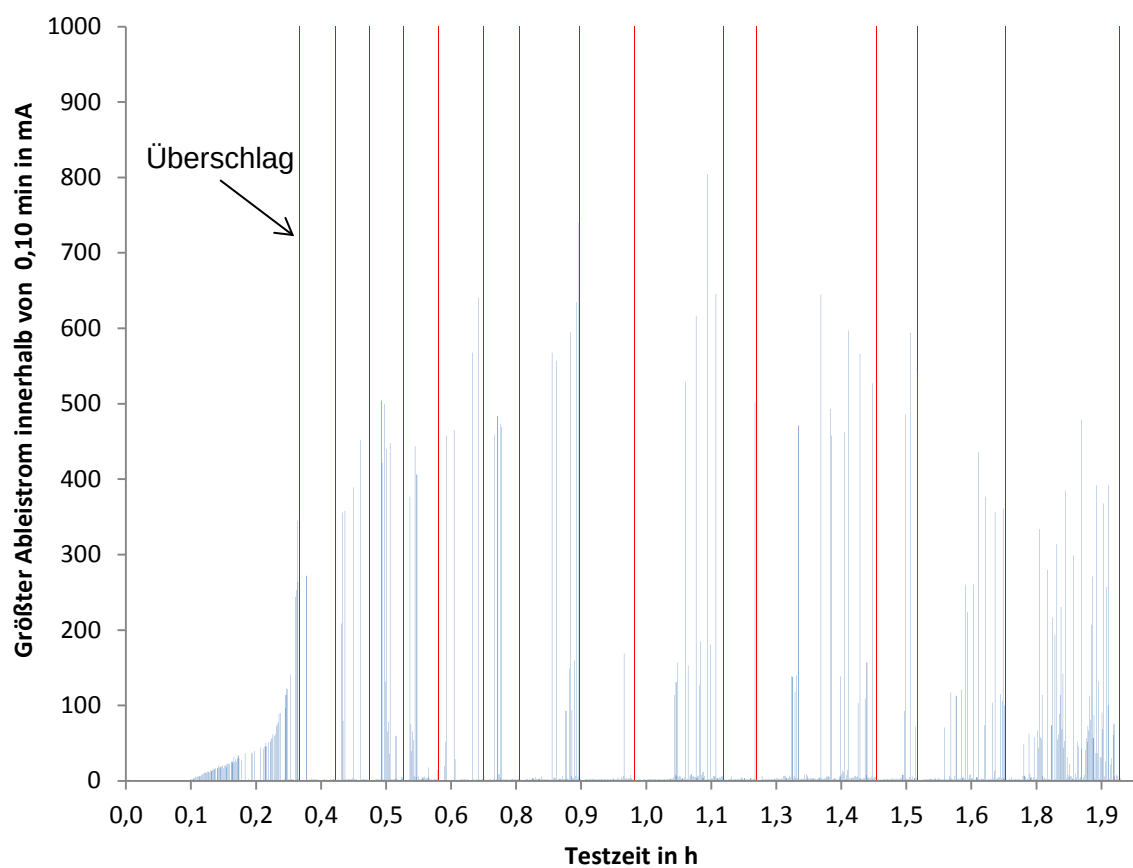


Abbildung 6-37: Ableitströme für den Referenzisolator mit 66 h V2 (oben) und 66 h V6 (unten) Trocknung

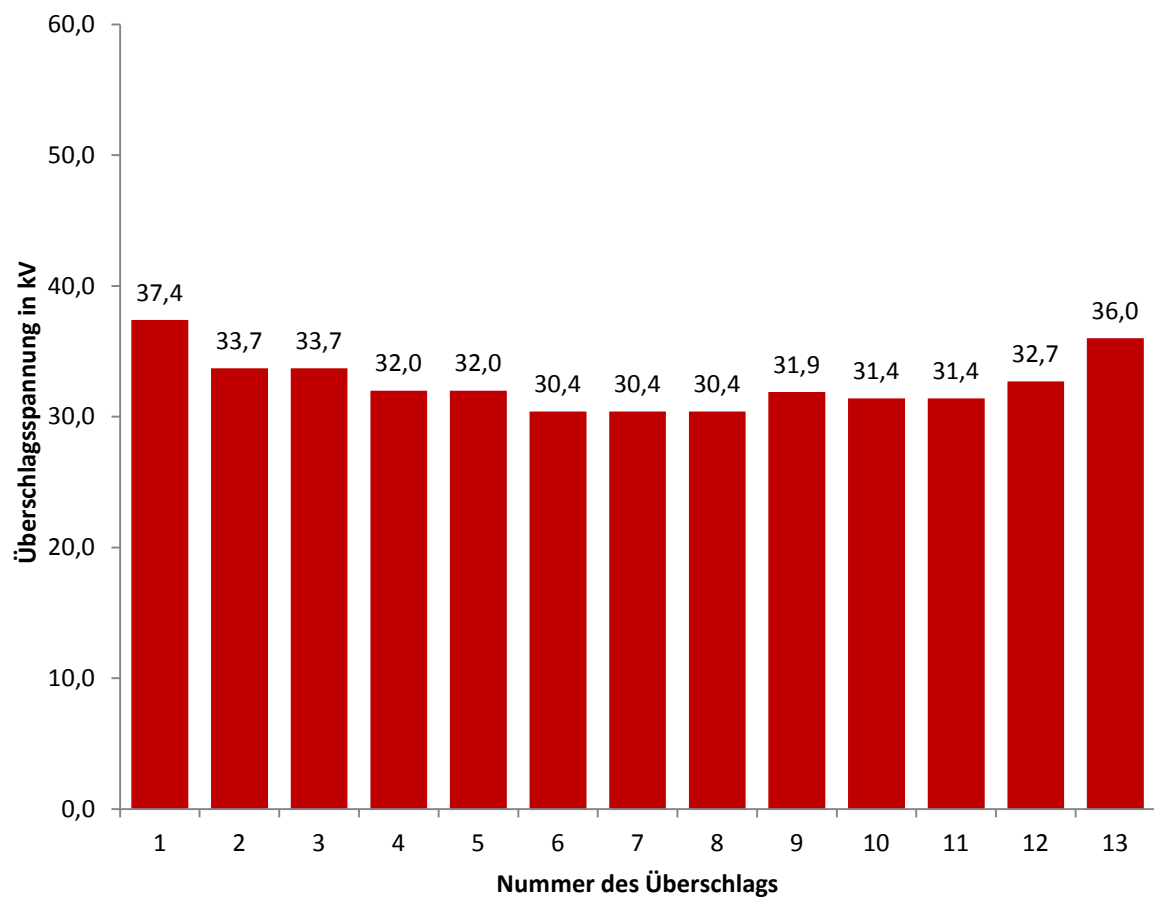
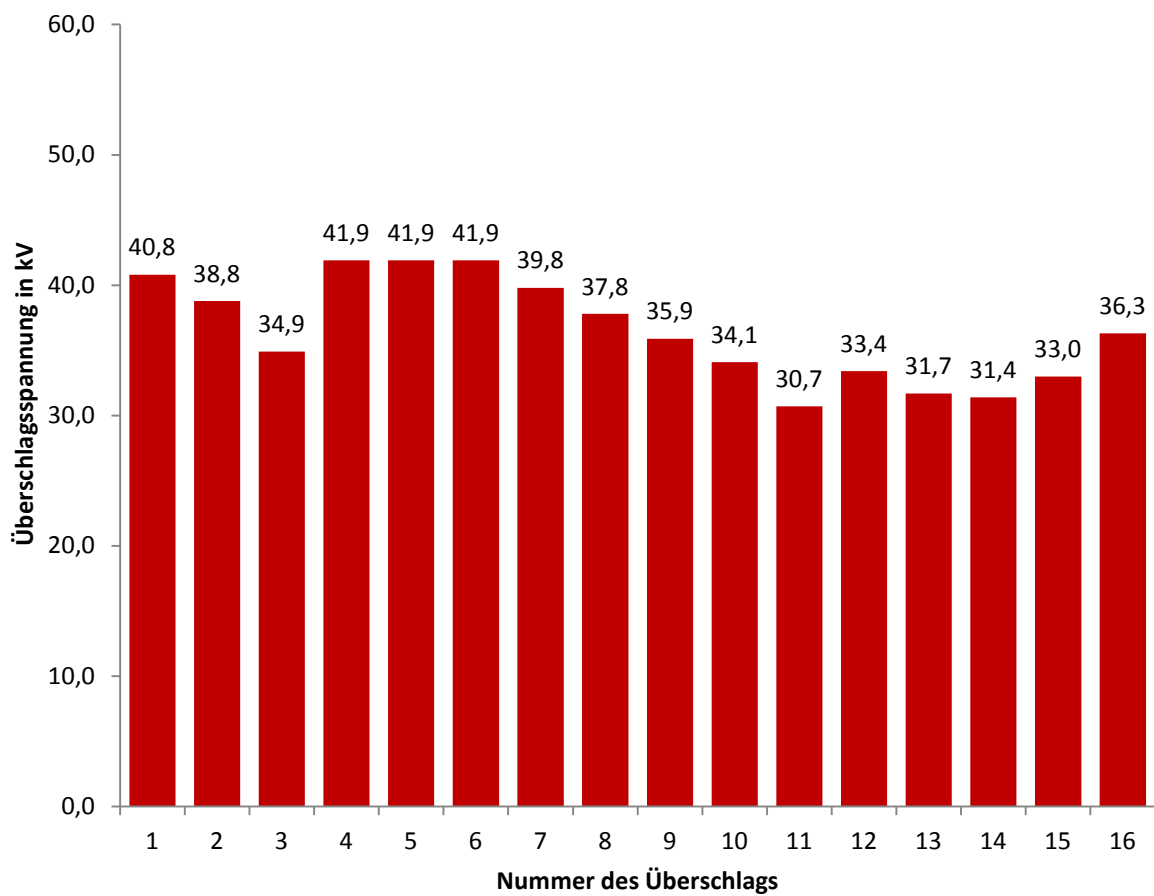


Abbildung 6-38: Überschlüge für den Referenzisolator mit 18,3 V4 (oben) und 17,3 h V8 (unten) Trocknung

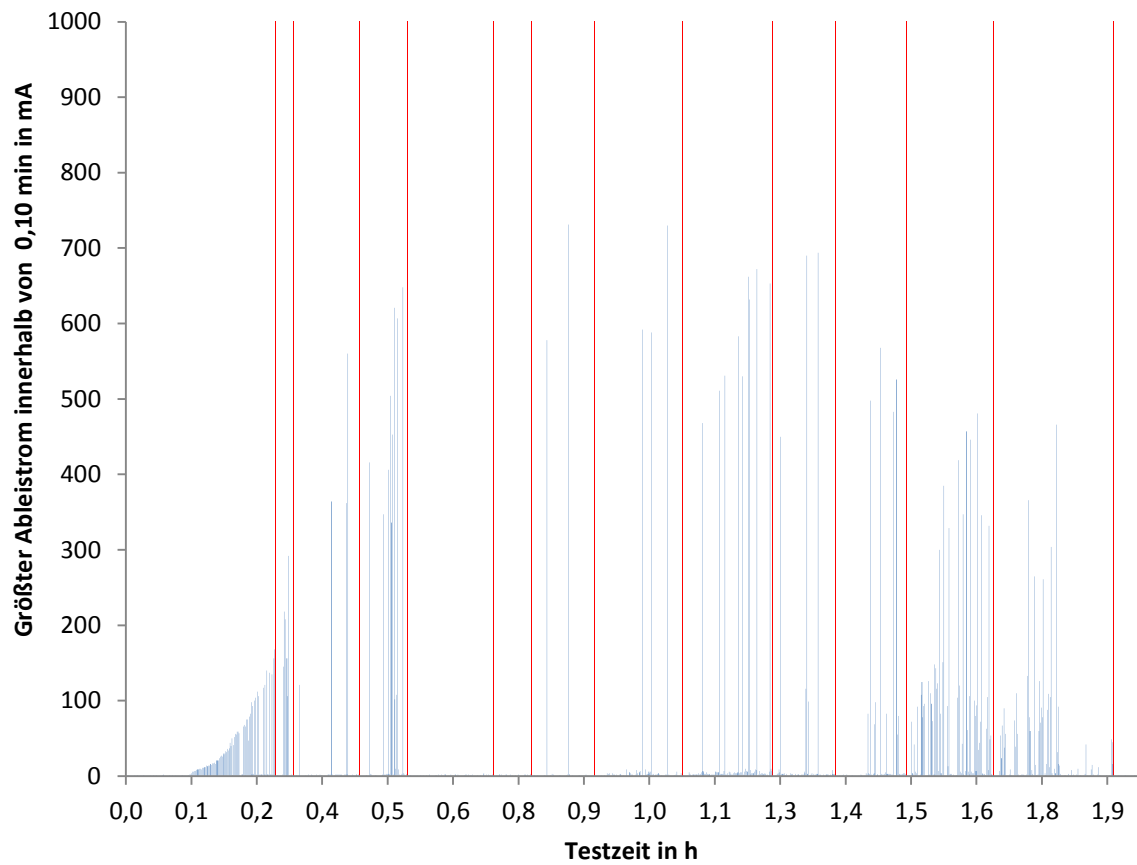
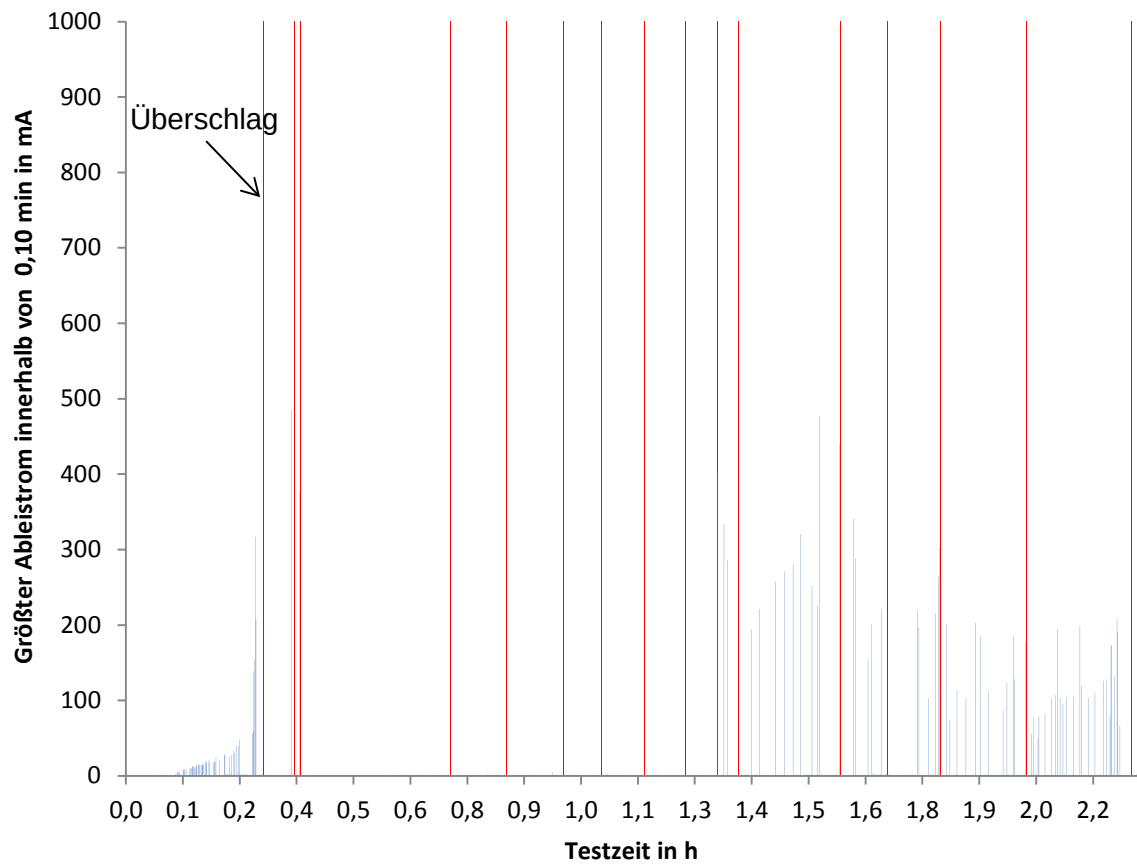


Abbildung 6-39: Ableitströme für den Referenzisolator mit 18,3 V4 (oben) und 17,3 h V8 (unten) Trocknung

Der Verlauf der Überschlagspannung sowie der Ableitströme unterliegt verschiedenen Umgebungsfaktoren und -einflüssen, so dass eine Interpretation der Ergebnisse erschwert wird. Aus jeder Kurve der Überschlagspannung ist ersichtlich, dass nach einer anfänglichen Befeuchtungszeit verbunden mit erhöhtem Spannungswert, die Überschlagspannung mit der Dauer der Befeuchtung abnimmt (Abbildung 6-40). Das Maximum an Befeuchtung ergibt die geringste Überschlagspannung. Danach ist wieder ein Anstieg des Spannungswertes zu verzeichnen. Verschiedene äußerliche und werkstoffbedingte (Herstellung, Materialien) Einflüsse wie elektrische Entladungen (Entstehung von Trocknungszonen), Rauheit der Oberfläche, Schwerkraft (Tropfenbildung, das Abtropfen an der Schirmkante oder das Abrollen bei geneigter Oberfläche), Eindringen der Feuchtigkeit, chemische Inhomogenität, wirken sich auf die Prüfergebnisse aus. Des Weiteren können sich durch den Überschlag und den daraus resultierenden mechanischen Kräften auf einer anderen Stelle des Isolators, durch z.B. ungünstige Tropfenbildung, günstige Bedingungen für den Fremdschichtüberschlag bilden. Die Wechselwirkung zwischen der angelegten Spannung, der Feuchtigkeit und der aufgebracht Fremdschicht (SDD und NSDD) unter Berücksichtigung oben erwähnter Einflüsse ergeben sich bei gleichen Isolatoren (gleiche Materialien) abweichende Verläufe der Überschlagspannung sowie der Ableitströme. Die beiden Isolatormodelle (Prototyp und Referenzisolator) zeigen keine signifikanten Unterschiede.

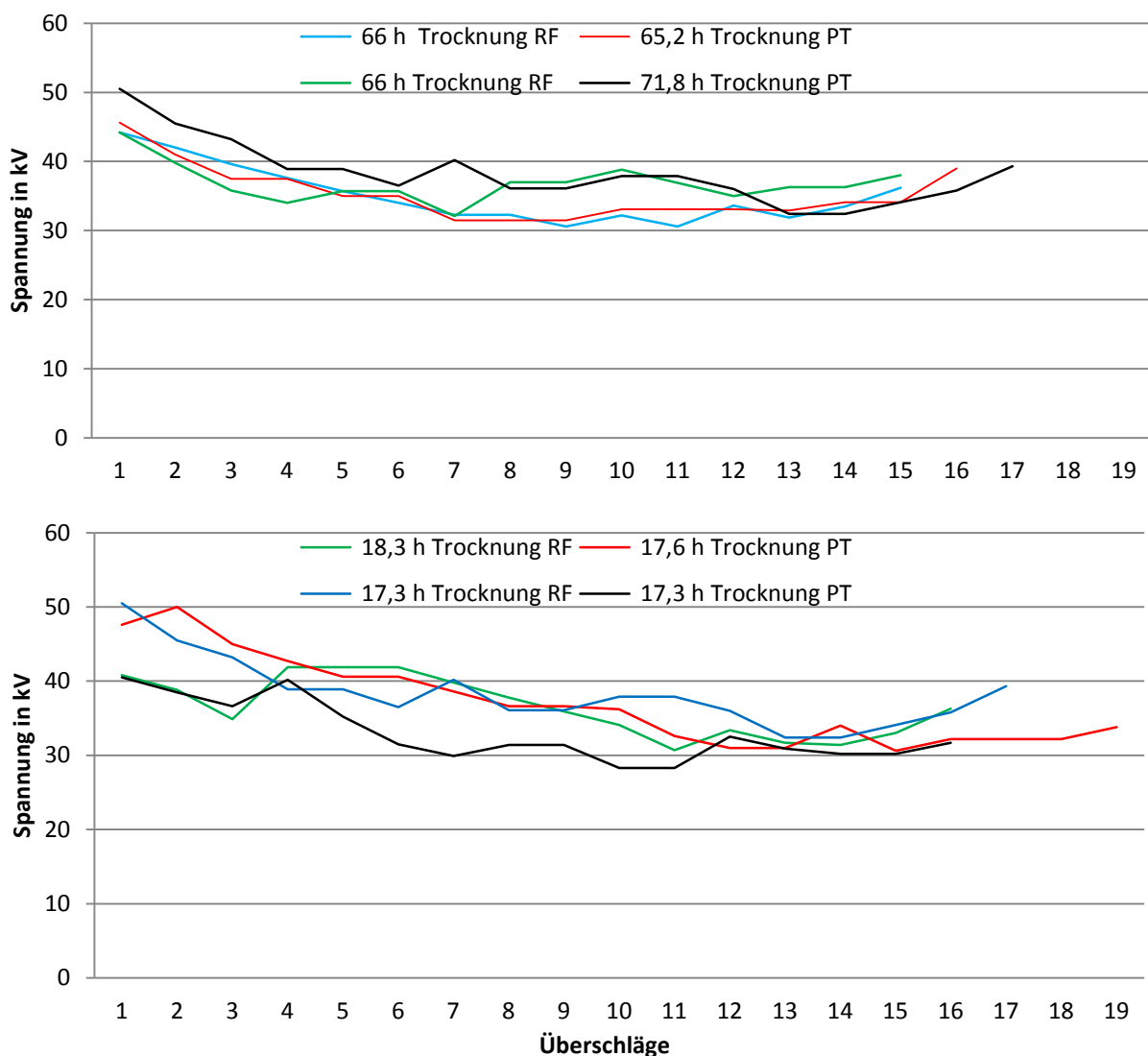


Abbildung 6-40: Darstellung der durchgeführten Prüfungen (unterschieden nach hydrophob (oben) und hydrophil (unten))

Der Vergleich der Isolatoren vor und nach der Prüfung ist in den folgenden Abbildungen festgehalten. Beide Isolatoren zeigen leichte Brandspuren als Folge der Überschlagsfußpunkte.

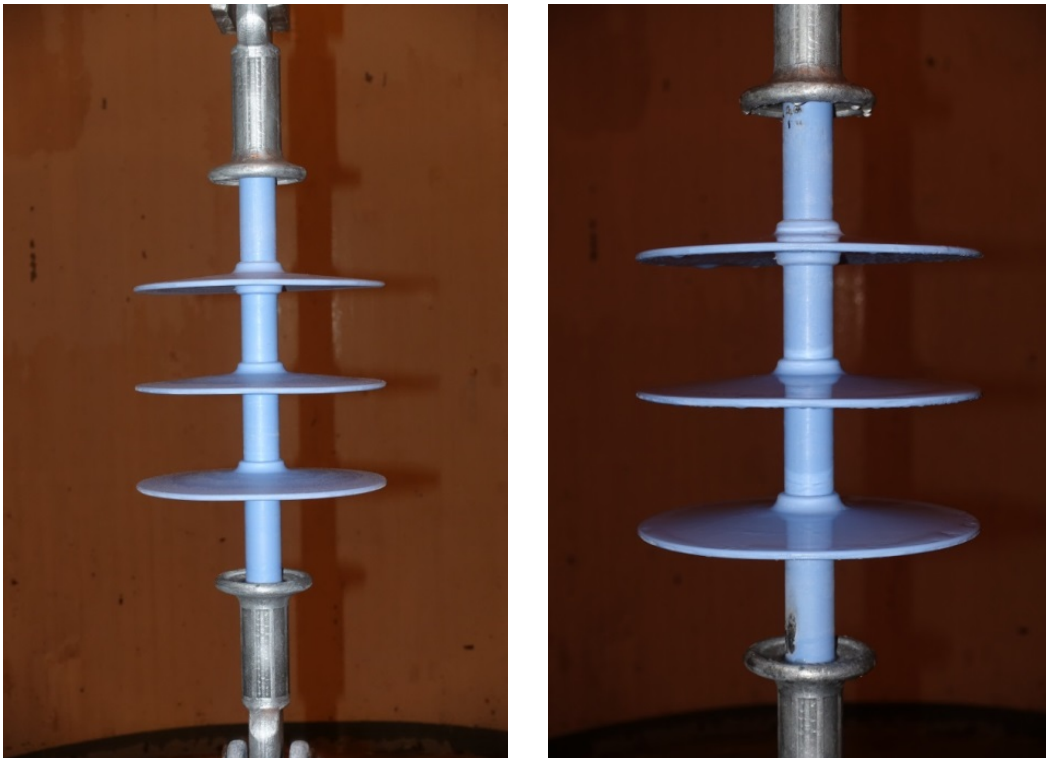


Abbildung 6-41: Prototyp vorher (links) nachher (rechts)

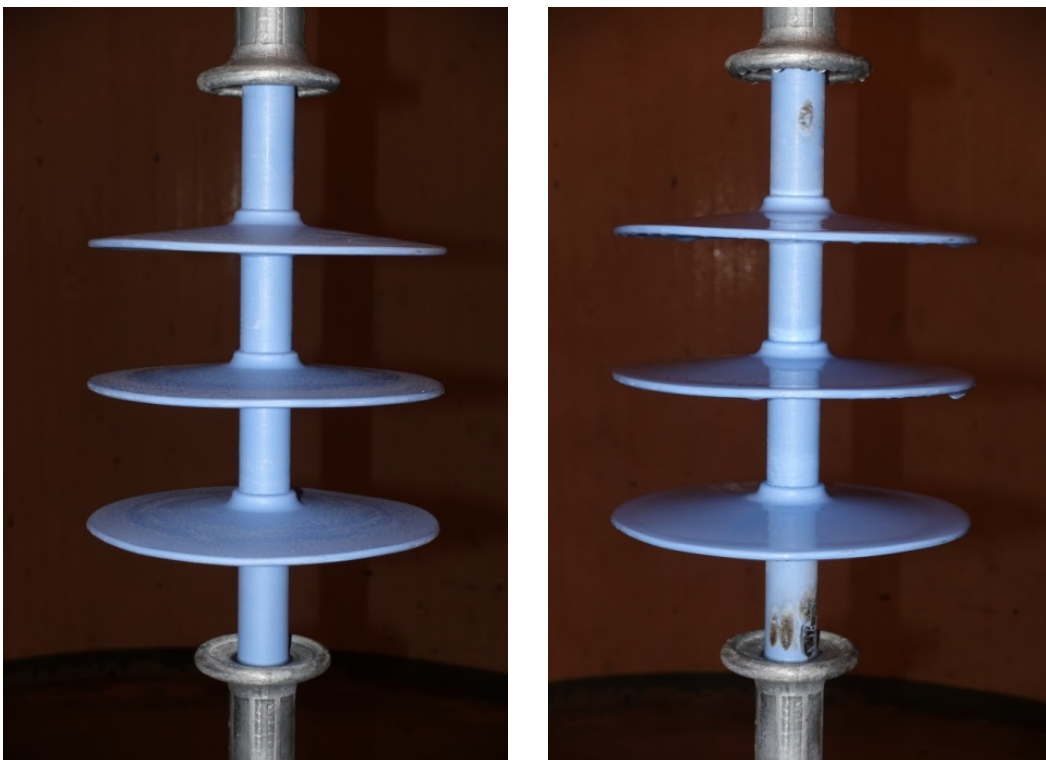


Abbildung 6-42: Referenzisolator vorher (links) und nachher (rechts)

6.3.3 Langzeituntersuchung Hydrophobie

Bei Langzeituntersuchung zur Hydrophobie wurden die Isolatoren (Referenzisolator und Prototyp) mit verschiedenen inerten Stoffen beschmutzt. Es wurden zwei Varianten gewählt:

1. Inerter Stoff ohne Suspension (Tonoko rot, Tonoko weiß, Kaolin und Kieselgur)
2. Inerter Stoff mit Suspension (Kaolin und Kieselgur)

Die Mischung und das Auftragen der Suspension erfolgten analog zu dem bereits beschriebenen Prozess (Untersuchungen an Isolatoren, Kapitel 6.3.2). Bei der Variante ohne Suspension wurde auf die Isolatoren (Schirme) in rotierender Lage (siehe Abbildung 6-29) lediglich das Pulver aufgetragen und verteilt. Bei der Verwendung von Kaolin wurden für die Herstellung der Suspension ebenfalls zwei Varianten gewählt:

1. 7 g Kaolin / 1 Liter entminealisiertem Wasser
2. 40 g Kaolin / 1 Liter entminealisiertem Wasser

Zusätzlich wurde eine Mischung mit Kieselgur realisiert (DIN EN 60507). In der nachfolgenden Abbildung ist die Lagerung der Isolatoren dargestellt.

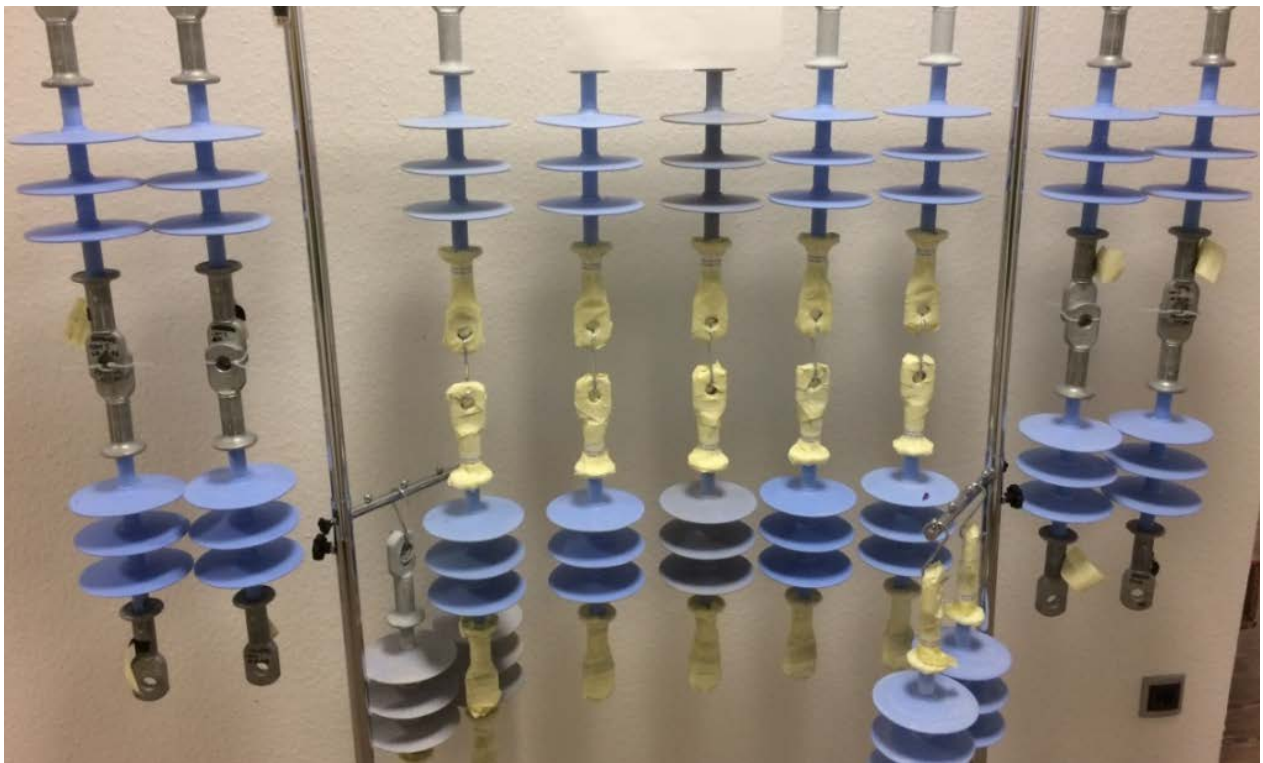


Abbildung 6-43: Lagerung der beschmutzten Isolatoren

Die Aufzeichnung der Temperatur und der relativen Feuchte erfolgt kontinuierlich (Abbildung 6-44, Auszug).

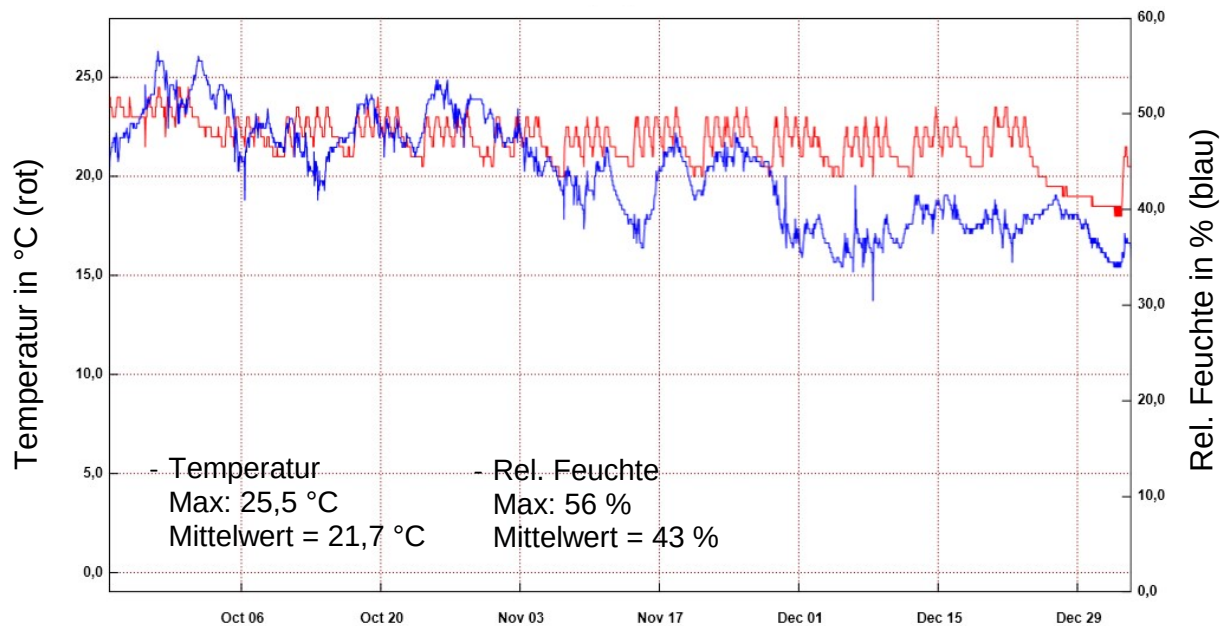


Abbildung 6-44: Kontinuierliche Aufzeichnung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit über eine Dauer von September bis Januar (Ausschnitt von Oktober bis Dezember)

Vor der Beschmutzung wurde der Sprühtest (vgl. Abbildung 6-15) an allen Isolatoren durchgeführt. Die optische Beurteilung der Hydrophobie nach 5 Monaten Lagerung ergab bei der Verwendung von Kaolin noch keine Änderung (Abbildung 6-46). Alle Ergebnisse, mit und ohne Suspension, variierten abhängig vom verwendeten inerten Stoff. Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch drei Ergebnisse der Sprühtests.



Referenzisolator (unbeschmutzt)



Prototyp (unbeschmutzt)

Abbildung 6-45: Referenzisolator und Prototyp vor der Beschmutzung



Referenzisolator (Kaolin 7 g/l)



Prototyp (Kaolin 7 g/l)

Abbildung 6-46: Erste Untersuchung nach 5 Monaten

Kieselgur nach Variante 1 (beide Isolatoren → gleicher optischer Zustand)

Abbildung 6-47: Erste Untersuchung nach 5 Monaten

Die Untersuchung ist eine zusätzliche Betrachtung des Hydrophobietransfers von bereits im Labor geprüften Isolatoren. Die Lagerung der Isolatoren soll über eine längere Dauer (geplant >1 Jahr) erfolgen. In verschiedenen Abständen werden Sprühtests durchgeführt und die optischen Veränderungen beobachtet.

6.3.4 Beurteilung der Ergebnisse

Die Festlegung eines einheitlichen Fremdschichtprüfverfahrens für die Polymerisolatoren bleibt eine große Herausforderung und eine wichtige Aufgabe, welche in naher Zukunft gelöst werden muss. Die Betrachtung verschmutzter Oberflächen von Polymerisolatoren und die damit verbundene Auswirkung auf die Hydrophobie war und ist noch gegenwärtig ein wichtiger Forschungsschwerpunkt [FG01, FG04, FG08, CI99, CI00, CI13]. Dieses Ziel wurde mit Hilfe des Round Robin-Tests [CI13] weiter angenähert.

Die hier erfolgten Untersuchungen und dargestellten Ergebnisse können einen Beitrag für die Herausarbeitung eines einheitlichen Prüfverfahrens leisten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an Plattenproben (Kapitel 6.3.1) zeigen Tendenzen des Hydrophobietransfers in Abhängigkeit des verwendeten Materials und inertem Stoffes. Erwartungsgemäß erfolgte bei mit Kieselgur beschmutzten Plattenproben ein schnellerer Hydrophobietransfer [CI13]. Die Plattenproben mit dem inerten Stoffen Tonoko weiß und Tonoko rot zeigten im Vergleich untereinander ähnliche Ergebnisse. Diese waren bei den meisten Plattenproben zwischen Kieselgur und Kaolin angesiedelt. Die mit Kaolin beschmutzten Plattenproben weisen im direkten Vergleich zu den anderen inerten Stoffen die längste Unterdrückung des Hydrophobietransfers auf.

Bei den Untersuchungen an Isolatoren (Kapitel 6.3.2) konnten diese Tendenzen (Auswirkung unterschiedlicher Trocknungszeiten auf die Hydrophobie) anhand der durchgeführten Prüfungen nicht eindeutig aufgezeigt werden. Dies ist wahrscheinlich u.a. auf die geringe Anzahl untersuchter Isolatoren und der damit fehlenden statistischen Sicherheit zurück zu führen.

Anhand der erzielten Ergebnisse ist die Anwendung eines alternativen inerten Stoffes anstelle von Kaolin zur Erforschung der hydrophoben Eigenschaften hinsichtlich der Prüfung mit haftenden Fremdschichten von Polymerisolatoren, unter Berücksichtigung geeigneter Trocknungszeiten, in Betracht zu ziehen.

Kaolin als inerter Stoff eignet sich hervorragend für die Prüfung der hydrophilen Eigenschaft von Polymerisolatoren, da der Hydrophobietransfer für eine längere Zeit unterdrückt wird.

Die Verwendung von Tonoko, Kieselgur oder eines geeigneten anderen inerten Stoffes für die Prüfung der hydrophoben Eigenschaft, könnte wegen der vergleichsweise kürzeren Transferdauer (für Tonoko und Kieselgur nach Kapitel 6) eine mögliche Alternative sein. Die Eignung eines inerten Stoffes oder die Verwendung zweier verschiedener Stoffe, welche die Berücksichtigung der Hydrophobie im Fokus haben, sollten in zukünftigen Untersuchungen weiter erforscht werden. Für die Prüfung des hydrophilen Zustands kann die Verwendung von Kaolin beibehalten werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass zur konkreten Ausarbeitung einer einheitlichen Vorbehandlung weiterführende Untersuchungen, aufbauend auf den bereits bestehenden Ergebnissen und den in diesem Projekt gewonnen Erkenntnissen, empfohlen werden. Die verschiedenen Einsatzgebiete und Dimensionen der Isolatoren, verbunden mit unterschiedlichen Belastungen (Gleichspannung und/oder Wechselspannung) müssen in zukünftigen Untersuchungen Berücksichtigung finden. Unterschiedliche Vorkonditionierungstechniken, angefangen mit der Auswahl eines geeigneten inerten Stoffes für eine realitätsnahe Berücksichtigung der hydrophilen/hydrophoben Eigenschaft der Polymerisolatoren sowie der Herangehensweise beim Aufbringen der Schmutzsicht können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Die Entwicklung einheitlicher Vorgehensweisen sollte deshalb ebenfalls im Fokus weiterführender Untersuchungen stehen.

Diese Erfahrungen würden dann einen entscheidenden Beitrag für die Herausarbeitung der geforderten Norm zur Fremdschichtprüfung an Polymerisolatoren leisten.

6.4 Prüfung mit Wechselspannung an trockenen Isolatoren

Für die Auslegung von Hochspannungsisolatoren für Freiluftanwendungen ist die Überschlagspannung von großer Bedeutung. Daher wird die Überschlagspannung von Isolatorprototypen mit einem Referenzisolator verglichen.

Zusätzlich zu den im Antrag vorgesehenen Untersuchungen zur Wechselspannungstehspannung werden Untersuchungen zur Gleich- und Impulsstehspannung bei Blitzstoßbelastung durchgeführt. Dies erhöht die Aussagekraft über den Einfluss der MHK auf die Überschlagspannung und erlaubt ein größeres späteres Anwendungsgebiet der entwickelten Materialien.

Die Untersuchungen werden nach VDE 0303-21, VDE 0303-22 und VDE 0303-23 durchgeführt. Für Untersuchungen der Wechsel- und Gleichspannungstehspannung wird das Stufenverfahren angewendet. Für Untersuchungen der Impulsspannungsfestigkeit wird die Auf- und Ab-Methode angewendet und die 50 %-Überschlagspannung bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen einen geringen Einfluss der MHK auf die Überschlagspannung (Abbildung 6-48). Für AC und DC nimmt die Stehspannung um 2 bis 4 kV ab, was als vernachlässigbar angesehen wird. Die 50 %-Blitzstoß-Überschlagspannung wird durch die Zugabe der MHK nicht verändert.

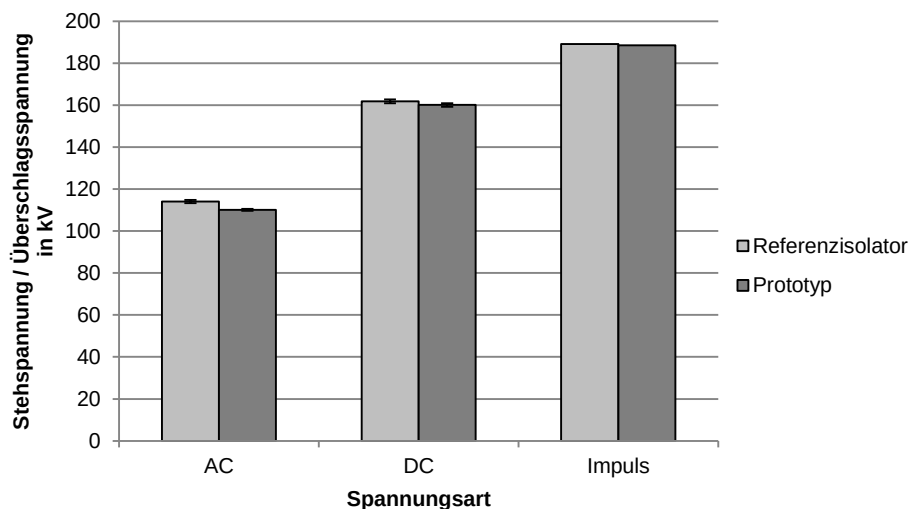


Abbildung 6-48: Vergleich der Steh/Überschlagspannungen eines Referenz- und Prototypisolators

6.5 Gesamtbeurteilung

Die Analyse der Ergebnisse des Prototyps (mit MHK), in Vergleich zum Referenzmaterial, ergab keine signifikanten Unterschiede. Der Prototyp mit MHK erweist sich als eine interessante Möglichkeit für eine gezielte Verbesserung einiger Materialeigenschaften von Polymerisolatoren. Durch weitere Forschung im Bereich syntaktischer Schäume, welche die Optimierung des Füllstoffs im Fokus haben sollen, können in naher Zukunft wichtige Beiträge für den Einsatz von MHK in Polymerisolatoren für Freiluftanwendungen geleistet werden. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die durchgeführten Untersuchungen für die Verwendung von syntaktischem Schaum Potentiale aufzeigen. Eine weiterführende Forschungsaktivität in diesem Bereich wird angestrebt.

7 Ausblick

Die Untersuchungsergebnisse der Materialqualifikation zeigen, dass bei geeigneter Materialauswahl eine Reduktion der Dichte und Materialkosten bei gleichzeitiger Verbesserung z.B. der Lichtbogenbeständigkeit möglich ist. Die Verwendung von Silanen zusammen mit MHK zeigt vielversprechende Ergebnisse in HTV. Daher wird empfohlen, die Materialforschung mit Bezug auf weitere mögliche Oberflächenbehandlungen der Füllstoffe weiterzuführen. Unter Verwendung von oberflächenbehandelten MHK konnte der maximal mögliche Füllgrad nicht ermittelt werden, sondern lediglich der generell positive Einfluss des verwendeten Vinylsilans aufgezeigt werden. Um die Gewichts- und Kostenreduktion zu maximieren, sind weitere Untersuchungen notwendig. Dies schließt Untersuchungen an Materialproben und Prototypen ein.

Aufgrund der geringen verarbeiteten Materialmengen konnte die industriell verwendete Spritztechnik nicht mit dem syntaktischen Schaum getestet werden. Es wird empfohlen, diese Untersuchungen bei einer Weiterentwicklung des syntaktischen Schaumes aufzunehmen.

Die durchgeführten Untersuchungen der Hydrophobieigenschaften und Verschmutzungseigenschaften zeigen deutlich den Bedarf nach standardisierten Prüfverfahren und Grenzwertempfehlungen auf. Dies schließt Untersuchungen der Hydrophobiebeständigkeit, des Hydrophobietransfers und der Hydrophobiewiederkehr ein. Es wird empfohlen, die Entwicklung von zugehörigen Prüfverfahren weiter zu verfolgen.

8 Innovativer Beitrag und Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse

In den Fachgebieten:

- Hauptsächlich Nutzung in „Elektrotechnik und Hochspannungstechnik“
- Mögliche Nutzung in „Werkstoffe, Materialien“ und „Verfahrenstechnik“

In den Wirtschaftszweigen:

- „Energieversorgung“ und
- „Isolatorherstellung“

Die Forderung hoher Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von Anlagen und Netzen der elektrischen Energieübertragung stellt seit jeher einen der wichtigsten Faktoren im Bereich der Energietechnik dar. Seit der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes steht gleichzeitig auch die Wirtschaftlichkeit klar im Fokus. Die gesetzliche Grundlage bezieht sich zwar auf Energieversorgungsunternehmen, gleichwohl folgt hieraus ebenfalls die Notwendigkeit wirtschaftlicher Effizienz zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit für Hersteller energietechnischer Komponenten.

Das Innovationsziel beinhaltet die Verwendung neuer Materialien in dem Bereich der Freiluftisolatoren. Durch die Erforschung alternativer und verbesserter Materialien für einen optimierten Einsatz im Bereich der Freiluftisolatoren auf Basis anwendungsorientierter Modifikation eines syntaktischen Schaums in Schirmisolatoren wird die Herstellung wirtschaftlich effizienterer Isolatoren, bei mindestens gleichbleibenden technischen Vorteilen bzw. teilweise verbesserten Materialeigenschaften (z.B. Verbesserung der Lichtbogenbeständigkeit bei Verwendung der getesteten silanisierten Glas-MHK), ermöglicht. Die Betrachtung des Gesamtgewichts ergab minimale Unterschiede zu Gunsten des Isolators mit syntaktischem Schaum.

Der Nutzen dieser Ergebnisse ist bei der Herausarbeitung einer einheitlichen Prüfnorm für Kunststoffisolatoren relevant. Bisher wurden die für Keramikisolatoren existierenden, genormten Prüfverfahren nur teilweise auf Verbundisolatoren angepasst. Insbesondere für Prüfverfahren zu haftenden Fremdschichten ist eine Übertragung der Prüfvorschriften nicht ohne weiteres möglich, da die hydrophobische Eigenschaft der Silikone zu einem anderen Verhalten bezüglich Fremdschichten im Vergleich zu Keramik führt. Somit ist eine Anpassung oder ggfs. ein Neuentwurf der haftenden Fremdschichtprüfungen für polymere Freiluftisolatoren notwendig. Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse können für die Herausarbeitung einer allgemeingültigen Norm (Prüfung mit haftenden Fremdschichten an Kunststoffisolatoren) eine informative Quelle sein. Die Erarbeitung dieser Prüfvorschrift erfordert jedoch weiterführende Untersuchungen, welche durch entsprechende Gremien angestoßen werden müssen bzw. bereits in Bearbeitung sind. Die hier ausgearbeiteten Ergebnisse könnten durch zusätzliche weiterführende Forschung unter Berücksichtigung von

- Hydrophobie
(einheitliche Vorbehandlungstechniken → hydrophiler/hydrophober Zustand)
- unterschiedlicher Isolatormaße (Form, Größe usw.)
- Belastungsart (Wechselspannung und/oder Gleichspannung)

einen wichtigen Beitrag leisten.

9 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2014:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Vorstellung der (Zwischen-) Ergebnisse auf den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses	Steuerung des Entwicklungsprozesses durch Rückmeldung der beteiligten Unternehmen Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	12.06.2014 11.11.2014
2	Information des FGH-Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	05.11.2014

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2015:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Vorstellung der (Zwischen-) Ergebnisse auf den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses	Steuerung des Entwicklungsprozesses durch Rückmeldung der beteiligten Unternehmen Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	12.05.2015 20.10.2015
2	Information des FGH-Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	25.03.2015 27.10.2015
3	Konferenzbeitrag (19 th International Symposium on High Voltage Engineering): <i>Basic Investigation of the Tracking and Erosion Resistance of Silicone Syntactic Foam</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	24.-28.08.2015

Durchgeführte Transfermaßnahmen 2016:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Konferenzbeiträge (International Conference on High Voltage Engineering and Application): <i>Investigation of Mechanical Properties of Silicone Syntactic Foam for Outdoor Applications</i> und 2 <i>Investigation of Hydrophobicity Transfer and Recovery of Silicone Syntactic Foam for Outdoor Applications</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	19.-22.09.2016
3	Tagungsbeitrag (ETG-Fachtagung): <i>Durchschlagsfestigkeit von silikonbasiertem syntaktischem Schaum für Freiluftanwendungen</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	14.-16.11.2016
4	Peer-Review-Paper (IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation): <i>Resistance of Silicone Syntactic Foam against Arc Discharges, Tracking and Erosion</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	Eingereicht November 2016 Rückmeldung steht aus

Durchgeführte Transfermaßnahmen 2016:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
5	Vorstellung der Ergebnisse auf den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses	Steuerung des Entwicklungsprozesses durch Rückmeldung der beteiligten Unternehmen Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	05.07.2016

Geplante Transfermaßnahmen:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum	Realisierbarkeit
1	Konferenzbeitrag (International Electrical Insulation Conference): <i>Influence of Water Absorption and Hydrolysis on Dielectric Properties of Silicone Syntactic Foam for Outdoor Applications</i>	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	16.-18.05.2017	Beitrag ist eingereicht
2	Tagungsbeitrag (Conference on Silicone Insulation)	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche und industrielle Fachkräfte	27.-28.06.2017	Beitrag ist eingereicht
4	Vorlesung „Hochspannungstechnik – Isoliersysteme“ am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	ca. 12 Mon. nach Projektende	sicher
5	Publikation im Internet auf der FGH-Homepage	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	nach Abgabe des Schlussberichts an AiF	sicher
6	Publikation in Fachzeitschriften, z.B. etz, ew, Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	innerhalb 2 Jahren nach Projektende	sehr wahrscheinlich
7	Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter / Technische Regelwerke	Vereinheitlichung von Begriffen und Prozessen der Datenerfassung und Ereignisdokumentation	sofort nach Projektende	sehr wahrscheinlich
8	Übernahme in die akademische Lehre der RWTH Aachen	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	ca. 12 Monate nach Projektende	sicher

Die geplanten Transfermaßnahmen sind insgesamt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit realisierbar. Einige Maßnahmen befinden sich bereits in der Umsetzung (z.B. eingereichte Konferenz- und Tagungsbeiträge). Die Umsetzung anderer Maßnahmen sind als gesichert (z.B. Übernahme in die Lehre, Publikation auf Homepages der Forschungsstellen) oder zumindest als sehr wahrscheinlich einzuschätzen, da Publikationen und auch die Mitarbeit bei der Neu- bzw. Weiterentwicklung von Technischen Regelwerken zu den Kernkompetenzen der Forschungsstellen gehören.

10 Literaturverzeichnis

- [3M07] 3M: 3M Glass Bubbles S Series K Series, 2007
- [AD98] Amarasekera, J.; Doin, J. E.: Silicone compositions for high voltage insulator applications, Nr. EP0928008 A2: General Electric Company, 1999
- [Bä99] Bärsch, R.; Jahn, H.; Lambrecht, J.; Schmuck, F.: Test methods for polymeric insulating materials for outdoor HV insulation. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Volume 6, Nr. 5. Seite 668–675, 1999
- [Bo15] Bozau, E.; Figueroa, A. A.; Licha, T.; Wiegand, B.: Chemische Zusammensetzung des atmosphärischen Eintrags – Messstation Clausthal-Zellerfeld (Harz), Oktober 2013 bis November 2014. In: Grundwasser. Volume 20, Nr. 3. Seite 163–168, 2015
- [FG16] FGH Engineering & Test GmbH: Versuchsbericht Nr. H 16058, Fremdschichtprüfung mit haftenden Fremdschichten, 2016
- [FG16] FGH Engineering & Test GmbH: Versuchsbericht Nr. H 16043, 1000-h Salznebelprüfung, 2016
- [CI99] Cigré Task Force 33.05.07: Natural and Artificial Aging and Pollution Testing of Polymeric Insulators. 1999
- [CI00] Cigré Task Force 33.04.01: Pollutes Insulators: A Review of Current Knowledge. 2000
- [CI10] Cigré Working Group D1.14: Evaluation of dynamic hydrophobicity properties of polymeric materials for non-ceramic outdoor insulation. TB 442, 2010
- [CI13] Cigré Working Group C4.303: Artificial Pollution Test for polymer Insulators. results of Round Robin Test. TB 555, 2013
- [CI16] Cigré Working Group D1.58: Retention of hydrophobicity under AC and DC voltage stress, 11.02.2016
- [DE09] Dornfalk, A.; Gutman, I.; Nefedov, A.; Seifert, J.: Pollution test methods for polymeric insulators: simulation of coastal environment and recovery of hydrophobicity. International Symposium of Voltage Engineering, 2009
- [DI06] DIN EN 62217 (VDE 0441-1000): Polymerisolatoren für Innenraum- und Freiluftanwendung mit Nennspannungen über 1 kV - Allgemeine Begriffe, Prüfverfahren und Annahmekriterien, 2006
- [DI07] DIN IEC 60815-1 (VDE 0446-201): Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für verschmutzte Umgebungen - Teil 1: Begriffe, Definition und allgemeine Grundlagen (IEC 36/252A/CD:2006). 2007
- [DI08] DIN IEC 60815-3 (VDE 0446-203). Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für verschmutzte Umgebungen - Teil 3: Polymerisolatoren für Wechselspannungssysteme (IEC 36/266/DTS:2007). 2008
- [DI12] DIN EN 60507 (VDE 0448-1): Fremdschichtprüfungen an Hochspannungsisolatoren zur Anwendung in Wechselspannungssystemen, 2012
- [DI13] DIN EN 62217 (VDE 0441-1000): Hochspannungs-Polymerisolatoren für Innenraum- und Freiluftanwendungen - Allgemeine Begriffe, prüfverfahren und Annahmekriterien (IEC 62217:2012); Deutsche Fassung EN 62217:2013
- [DI14] DIN EN 60507 (VDE 0448-1): Fremdschichtprüfungen an Hochspannungsisolatoren aus Keramik und Glas zur Anwendung in Wechselspannungssystemen (IEC 60507:2013); Deutsche Fassung EN 60507:2014

- [DH15] Dörr, M.; Hoakstra, H.: Technical specification composite long-rod insulators for overhead lines, 2015
- [Ex09] Exl, F.: Einflussfaktoren auf die Bewertung der Hydrophobieigenschaften von Isolierwerkstoffen. Dissertation, Technische Universität München, München, 2009
- [FG01] FGH e.V.: Langzeitverhalten von Silikonisolierungen. Technischer Bericht, 2001
- [FG04] FGH e.V.: Freiluftverhalten von Silikonisolatoren. Technischer Bericht, 2004
- [FG08] FGH e.V.: Silikonisolatoren unter Betauungsbeanspruchung - Betriebsverhalten und Prüfung der Langzeitbeständigkeit. Technischer Bericht, 2008
- [Fa12] Farhadinejad, Z.; Ehsani, M.; Ahmadi-Joneidi, I.; Shayegani, A.; Mohseni, H.: Effects of UVC radiation on thermal, electrical and morphological behavior of silicone rubber insulators. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Volume 19, Nr. 5. Seite 1740–1749, 2012
- [Ha99] Hackam, R.: Outdoor HV composite polymeric insulators. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Volume 6, Nr. 5. Seite 557–585, 1999
- [Hi01] Hillborg, H.: Loss and recovery of hydrophobicity of polydimethylsiloxane after exposure to electrical discharges. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, 2001
- [IE05] IEC 62217 Ed.1/2005-10: Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage greater than 1000 V - General definitions, test methods and acceptance criteria; 2005
- [IE07] IEC: TR 62039, Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress, Geneva, 2007
- [Ka77] Kawakami, M.; Sato S.; Takishima, T.: Silicosis in Workers Dealing with Tonoko . Case Reports and Analyses of Tonoko. Chest, Official publication of the American College of Chest Physicians, 1977
- [Ke10] Keßler, M.: Einsatz von elastischen syntaktischen Schäumen in der Hochspannungstechnik. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2010
- [Ki03] Kindersberger, I. J.: Silikonelastomere für Kabelgarnituren, Isolatoren und Überspannungsableiter–Profil einer Werkstofffamilie. In: ETG-Fachtagung, 2003
- [Ku05] Kurrat, M.: Einfluß der inneren Grenzflächen auf die Lebensdauer gefüllter oder glasfaserverstärkter Isolierstoffe unter Freiluftbedingungen. In: ETG-Fachtagung. Grenzflächen in elektrischen Isolierstoffen, 2005
- [Ma10a] Mashkin, A., et al.: Einfluss der inneren Feldstärkeverteilung auf die elektrische Durchschlagfestigkeit von syntaktischem Schaum, ETG-Fachbericht-Isoliersysteme bei Gleich-und Mischfeldbeanspruchung, 2010
- [Ma10b] Mashkin, A.; et al.: Investigation on inverse volume effect of syntactic foam under uniform dc field stress, IEEE International Symposium on Eletrical Insulation ISEI, San Diego, USA,2010
- [Ma13] Mashkin, A.: Analyse der elektrischen Eigenschaften von syntaktischem Schaum unter Gleichspannungsbelastung. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2013
- [MGM99] Montesinos, J.; Gorur, R. S.; Mobasher, B.: Mechanical performance of GRP rods used in nonceramic insulators after exposure to acid attack. In: International Symposium on High Voltage Engineering. ISH 99, 1999
- [Om11] Omega Minerals: Omega-Spheres W100, 2011
- [PF08] PFISTERER SEFAG AG: Technische Fakten Silcosil Silikonisolatoren. Freileitungen, Luzern, 2008

- [PS12] Papailiou, K. O.; Schmuck, F.: Silikon-Verbundisolatoren. Springer, Berlin, 2012
- [RCV81] RODHE, H.; CRUTZEN, P.; VANDERPOL, A.: Formation of sulfuric and nitric acid in the atmosphere during long-range transport. In: Tellus. Volume 33, Nr. 2. Seite 132–141, 1981
- [Ro11a] Roggendorf, C.; et al.: Influence of the filling degree of microspheres on the breakdown voltage of syntactic foam, International Symposium on High Voltage Engineering, 2011, Hannover, Germany
- [Ro11b] Roggendorf, C.; Kessler, M.; Schnettler, A.: Modification of the mechanical properties of epoxy resin with polymeric microspheres, International Symposium on High Voltage Engineering, 2011, Hannover, Germany
- [Ro12] Roggendorf, C.: Einsatz syntaktischer Schäume in Zündsystemen unter extremen Umgebungsbedingungen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2012
- [Sc15] Schumann, S.; Lehretz, F.; Schnettler, A.; Puffer, R.: Basic investigation of the tracking and erosion resistance of silicone syntactic foam. In: International Symposium on High Voltage Engineering. ISH 2015, 2015
- [Sc16] Schumann, S.; Lehretz, F.; Görlich, J.; Schnettler, A.; Puffer, R.: Investigation of electric breakdown of silicone syntactic foam for outdoor applications. ETG-Fachtagung, 2016
- [SLG16a] Schumann, S.; Lehretz, F.; Görlich, J.: Investigation of mechanical properties of silicone syntactic foam for outdoor applications. In: International Conference on High Voltage Engineering and Application. ICHVE 2016, 2016
- [SLG16b] Schumann, S.; Lehretz, F.; Görlich, J.: Investigation of hydrophobicity transfer and recovery of silicone syntactic foam for outdoor applications. In: International Conference on High Voltage Engineering and Application. ICHVE 2016, 2016
- [St08] Strauchs, A., et al.: Mechanische Untersuchungen zum Vergleich der Haftung an inneren Grenzflächen in syntaktischem Schaum, ETG-Fachbericht-Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, 2008
- [St09] Strauchs, A.: Bewertung der Haftungsqualität an inneren Grenzflächen in syntaktischem Schaum bestehend aus Epoxidharz gefüllt mit Glas-Mikrohohlkugeln, RCC Polymertechnik Tagung: Werkstoffe - Forschung und Entwicklung neuer Technologien zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik, 2009
- [St10a] Strauchs, A.; et al.: The impact of electrical field stress on the volume conductivity of syntactic foam, IEEE International Symposium on Electrical Insulation ISEI, 2010, San Diego, USA
- [St10b] Strauchs, A.; et al.: Einfluss von Temperatur und elektrischer Feldstärke auf die elektrische Leitfähigkeit und Spannungsfestigkeit von syntaktischem Schaum, ETG-Fachbericht-Isoliersysteme bei Gleich-und Mischfeldbeanspruchung, 2010
- [St11] Strauchs, A., Mashkin, A.; Schnettler A.: Effects of SiO₂ Nanofiller on the Properties of Epoxy Resin Based Syntactic Foam, 17th International Symposium on High Voltage Engineering 2011. Hannover, Germany
- [St12a] Strauchs, A.; Schnettler A.: Effects of SiO₂ Nanofiller on the Properties of Epoxy Resin Based Syntactic Foam. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012
- [St12b] Strauchs, A.: Anwendungsorientierte Modifikation syntaktischer Schäume zum Einsatz in Hochspannungsisoliersystemen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2012

- [Tr09] Tröger, K. A.: Analyse der elektrischen Durchschlagmechanismen in syntaktischen Schäumen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2009
- [VD11] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb, 2011
- [Ve87] Verhoeven, W.; Herrmann, R.; Eiden, R.; Klemm, O.: A comparison of the chemical composition of fog and rainwater collected in the Fichtelgebirge, Federal Republic of Germany, and from the South Island of New Zealand. In: Theoretical and Applied Climatology. Volume 38, Nr. 4. Seite 210–221, 1987
- [Wi14] Winkel, D.: Untersuchung des Durchschlagverhaltens von syntaktischem Schaum bei kryogenen Temperaturen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2014
- [Wa00] Shaowu, W.; Xidong, L.; Zhicheng, G.; Xun, W.: Hydrophobicity Transfer Properties of Silicone Rubber Contaminated by Different Kinds of Pullutants. Conference on electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000
- [Xu98] Xu, S.; Lehmann, R. G.; Miller, J. R.; Chandra, G.: Degradation of Polydimethylsiloxanes (silicones) as influenced by clay minerals. In: Environmental Science & Technology, Volume 32, Nr. 9. Seite 1199–1206, 1998