

# Stand und Entwicklung von Prüfverfahren zur Bewertung dynamischer Hydrophobieigenschaften polymerer Isolierstoffe für den Hochspannungseinsatz

## State of the art and development of test methods for the evaluation of dynamic hydrophobicity properties of polymeric insulating materials for high-voltage applications

Dipl.-Ing. Alexander Hergert, Technische Universität München, Deutschland, alexander.hergert@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger, Technische Universität München, Deutschland, josef.kindersberger@tum.de

Dipl.-Ing. (FH) Christiane Bär, Hochschule Zittau/Görlitz, Deutschland, c.baer@hszg.de

Prof. Dr.-Ing. Roland Bärsch, Hochschule Zittau/Görlitz, Deutschland, r.baersch@hszg.de

### Kurzfassung

In diesem Beitrag wird zur Weiterentwicklung des Hydrophobietransfer-Prüfverfahrens (HTPV) schwerpunktmäßig der Einfluss der künstlichen Verschmutzungsschicht auf die Transfargeschwindigkeit untersucht. Dabei wird ausgehend von Experimenten mit verschiedenen Verschmutzungsschichtgrundsubstanzen die Robustheit des Verfahrens gegenüber Änderungen der Korngrößenverteilung, eventuell vorhandener Vorbehandlungen und unterschiedlicher Lagerungstemperaturen bewertet. Der Einfluss lokaler Schichtdickenunterschiede, sowie der Trocknungsprozesse der als Schlämme aufgetragenen Verschmutzungsschichten werden diskutiert. Modifizierte Prüfparameter für das Dynamische Tropfen-Prüfverfahren (DTPV) zur Bewertung der Hydrophobiebeständigkeit werden vorgestellt und in Parameterstudien zum Einfluss von Elektrolytleitfähigkeit und Neigungswinkel angewendet. In speziellen Pausenversuchen mit dem DTPV wird die Hydrophobiewiederkehr bewertet.

### Abstract

This contribution shows the ongoing development of test procedures for evaluating the dynamic hydrophobicity properties. In case of the Hydrophobicity Transfer Test method (HTT) the influence of the artificial pollution layer on the transfer speed is investigated. Based on experiments with different pollution layer base materials the robustness of the procedure against variations of grain size distributions, possible pre-treatments and storage temperature is evaluated. The influence of local pollution layer thickness variations and the drying process of the pollution layer slurry are discussed. For evaluating the retention of hydrophobicity modified test parameters for the Dynamic Drop Test (DDT) are proposed and applied in parametric studies, which cover the influence of electrolyte conductivity and inclination angle of the electrode arrangement. Employing special DDT interval tests, the recovery of hydrophobicity is evaluated.

## 1 Einleitung

Der Anteil von Hochspannungsisolatoren mit polymeren Isolierwerkstoffen hat in den letzten Jahrzehnten in allen Anwendungsbereichen und Spannungsebenen stark zugenommen. Die zum Einsatz kommenden Silikonelastomere, Ethylen-Copolymere (EVA, EPDM) und Epoxidharzformstoffe müssen dabei Mindestanforderungen erfüllen, die durch geeignete Prüfverfahren nachzuweisen sind. Für Freiluftisolatoren gibt dazu der Technische Report IEC TR 62039 zwölf wesentliche Eigenschaften an, die mit zwei Ausnahmen alle durch geeignete Verfahren bewertet werden können [1]. Es sind v. a. die Hydrophobieigenschaften, für die bislang keine genormten Prüfverfahren existieren [2]. Die drei dynamischen Hydrophobieigenschaften (Hydrophobietransfer, -beständigkeit und -wiederkehr) sind Schlüsseleigenschaften der äußeren Umhüllungen von Hochspannungsfreiluftisolatoren, da sie die Ausbildung von fremdschichtinitiierten Vorgängen und

Kriechströmen entscheidend unterdrücken [3]. Für die Fähigkeit eines Isolierstoffs seine wasserabweisenden Eigenschaften auf eine angelagerte Verschmutzungsschicht zu übertragen (Hydrophobietransfer), gehen relevante Bewertungsmöglichkeiten auf [4], [5], [6] zurück. Die Hydrophobiebeständigkeit wurde zunächst mit dem Salznebelprüfverfahren [7] und später mit dem Rad-Tauchverfahren [8], [9] untersucht, wobei die Zufälligkeit der dabei auftretenden Beanspruchung zu einer schlechten Reproduzierbarkeit führte [3] und damit die Entwicklung des Dynamischen Tropfen-Prüfverfahrens [10], [2] motivierte. Zahlreiche weitere Arbeiten trugen bereits zu einer Verbesserung der genannten Verfahren und einer Identifizierung zahlreicher Einflussgrößen, wie Zusammensetzung des Basispolymers [11], Füllstoffgehalt [8], Neuorientierung und Diffusion niedermolekularer Bestandteile [12], Rauheit und Oberflächenbeschaffenheit [13], [14] bei. Ausgehend davon werden hier Untersuchungen zur Weiterentwicklung dieser vielversprechenden aber noch

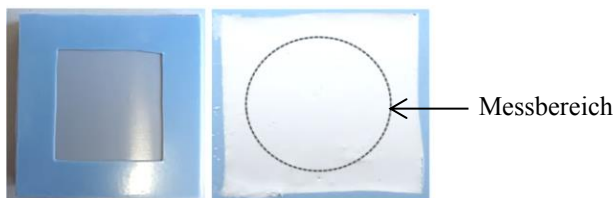
nicht ausgereiften Prüfmethoden vorgestellt, die insbesondere auf eine Erhöhung der Robustheit der Verfahren gegenüber den zahlreichen Einflussgrößen, als auch auf eine Reduzierung der Messwertstreuung abzielen, um damit zur Normbarkeit dieser Verfahren beizutragen.

## 2 Hydrophobietransfer

Die Übertragung der hydrophoben Eigenschaft auf angelegte Verschmutzungsschichten kann bei Silikonelastomeren auf die Migration niedermolekularer unvernetzter Silikonbestandteile (LMWs = low molecular weight components) zurückgeführt werden [4]. Dieser Beitrag zeigt wesentliche Einflussgrößen der Verfahrensparameter auf diesen Migrationsprozess.

### 2.1 Experimentelles

Als Hydrophobietransfer-Prüfverfahren (HTPV) wird das Vorgehen gemäß [15] als Referenzmethode genutzt, mit dem alle neuen Ansätze verglichen werden. Es werden Isolierstoffprüfkörper (50 mm x 50 mm x 6 mm) mit einer Folienmaske der Stärke 0,36 mm beklebt und mit einer Verschmutzungsschicht bestrichen (**Bild 1**). Dabei handelt es sich um eine Suspension aus 7,5 g Siliziumdioxid (Quarzmehl SF600) und 3,5 ml einer Mischung aus destilliertem Wasser und Isopropanol (65%/35%-vol.). Sofern andere Suspensionen verwendet werden, handelt es sich stets um 7,5 g der Grundsubstanz und so viel Wasser, wie nötig ist, um diese darin zu lösen (ca. 2,5 ml). Sofern nicht anders gekennzeichnet, wurden alle hier vorgestellten Messungen mit RTV-2 Prüfkörpern durchgeführt.



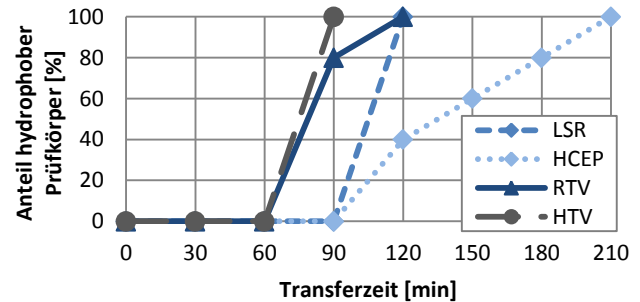
**Bild 1** Prüfkörper mit Maske (links) und Messbereich auf der aufgetragenen Verschmutzungsschicht (rechts)

Sobald die Verschmutzungsschichten aufgetragen sind, werden die Prüfkörper unter Normklimabedingungen (23°C, 50% r. F.) im Klimaschrank gelagert. Zunächst sind die Verschmutzungsschichten hydrophil und aufgesetzte Tropfen werden aufgesogen. Der evtl. stattfindende Hydrophobietransfer kann durch Messung statischer oder dynamischer Randwinkel nachgewiesen werden.

### 2.2 Einflussgrößen auf die Transfergeschwindigkeit

Zahlreiche Parameter des Prüfverfahrens üben Einfluss auf die Transfergeschwindigkeit aus. Für reproduzierbare Ergebnisse der angestrebten vergleichenden Isolierstoffbewertung müssen daher alle potentiellen Einflüsse bekannt sein, damit Unterschiede in der bewerteten Transfergeschwindigkeit auf den geprüften Werkstoff zurückgeführt werden können. Dies gilt auch vorbehaltlich der

Wahl von der Transfergeschwindigkeit abweichender Bewertungskriterien. Die Transfergeschwindigkeit der untersuchten Isolierstoffe kann z.B. mit der Zeit vom Auftragen der Fremdschicht bis zum Überschreiten eines definierten Randwinkels bewertet werden. Untersucht werden in der Regel zehn Prüfkörper. Die gemessenen Zeiten werden gemittelt bzw. der Anteil der Prüfkörper, die den definierten Wert überschritten haben, über der Transferzeit angetragen (**Bild 2**).



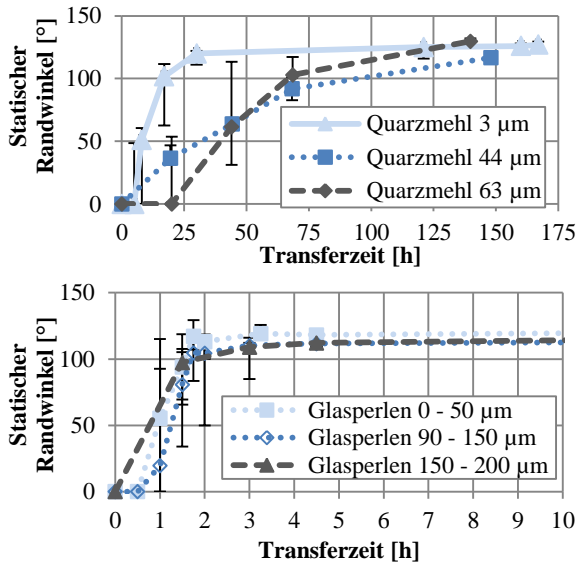
**Bild 2** Transferprozess auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schicht; hydrophobe Prüfkörper bedeutet: Statischer Randwinkel > 100°

#### 2.2.1 Verschmutzungsschichtgrundsubstanz und Grundsubstanzqualität

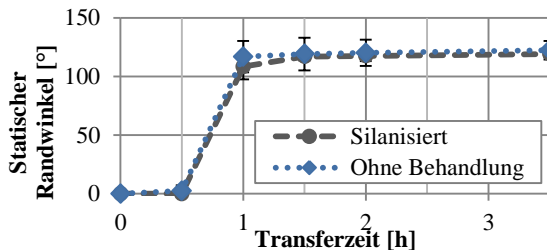
Maßgebenden Einfluss hat die Wahl der Grundsubstanz der Verschmutzungsschicht. Dabei variiert der Zeitbedarf für den Hydrophobietransfer durch eine 0,36 mm dicke Schicht zwischen wenigen Minuten und mehreren Wochen, bzw. ist bei manchen Substanzen überhaupt kein Transfer zu beobachten. Untersucht wurden im Rahmen dieser Arbeit 14 Grundsubstanzen, von denen nur einige exemplarische Ergebnisse (Quarzmehl, Aluminiumoxidpulver, Glasperlen) dargestellt werden. Die grundlegende Anforderung an die Grundsubstanz ist ihre globale und langfristige Verfügbarkeit. Dies ist für das Quarzmehl gegeben, doch können bei einem gemahlten Material Korngröße und Kornstruktur, sowie gegebenenfalls stattfindende Nachbehandlung, Reinigungsverfahren oder chemische Behandlung in Abhängigkeit des Herstellers oder der Charge variieren. Die Robustheit des Verfahrens gegenüber derartigen Änderungen wird experimentell untersucht. Dafür wurden Kaltnatronglasperlen als mögliche Grundsubstanz mit in die Betrachtungen aufgenommen, da diese weltweit mit definierten Korngrößenverteilungen und Behandlungsarten erhältlich sind.

Die Abhängigkeit von der Korngröße bei verschiedenen Grundsubstanzen wird hier am Beispiel von Quarzmehl und Glasperlen gezeigt (**Bild 3**). Während beim Quarzmehl höhere Korngrößen teilweise zu signifikant langsamerem Transferverhalten führen, gibt es bei den Glasperlen keinen nachweisbaren Einfluss der Korngröße. Auch hinsichtlich unterschiedlicher chemischer Nachbehandlungen erweist sich die Verwendung von Glasperlen als äußerst unempfindlich. So sind die in **Bild 4** gezeigten Transferverläufe für silanisierte und unbehandelte Glasperlen identisch. Dass die verwendeten Glasperlen tatsächlich unterschiedliche Oberflächeneigenschaften aufweisen, zeigte sich im Schwimmversuch, wobei die sila-

nierten Glasperlen auf Wasser schwimmen, während die unbehandelten untergehen.



**Bild 3** Hydrophobietransfer in Abhängigkeit der Korngrößen; Mittelwerte und 95%-KI. aus 10 Messungen

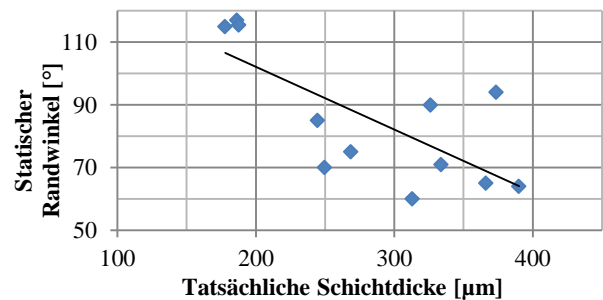


**Bild 4** Hydrophobietransfer bei unterschiedlich vorbehandelten Glasperlen

### 2.2.2 Verschmutzungsschichtdicke

Der Einfluss der Schichtdicke wurde in der Literatur bereits mehrfach untersucht [13], wobei meist die Maskenhöhe mit der Schichtdicke gleichgesetzt oder korrekter der Höhenunterschied zwischen der Maske und der getrockneten Schicht gemessen und von der Maskenhöhe abgezogen wird. Aber auch in letzterem Fall sind erhebliche Abweichungen von dem bestimmten Dickenwert und der tatsächlichen Schichtdicke möglich, da zum einen die Schichten nicht absolut gleichmäßig sind und zum anderen der Isolierstoffkörper selbst in der Regel nicht vollkommen plan ist. Aufgrund der Möglichkeit, dass die Streuungen der Randwinkelmessung mit der Streuung der Verschmutzungsschichtdicke am Messpunkt des Tropfens korreliert, wurde ein Verfahren erarbeitet, mit dem die tatsächliche Schichtdicke gemessen werden kann. Dazu werden Profile des Prüfkörpers mit und ohne Verschmutzungsschicht an einheitlichen Positionen mit einem Laserprofilometer aufgenommen und die Randwinkel von Tropfen an definierten Positionen auf diesen Profilen bestimmt. Damit ist eine exakte Zuordnung von Randwinkeln und Schichtdicke gewährleistet. Die Tropfenrandwinkel werden alle nach einer einheitlichen Transferzeit von 22 h gemessen (**Bild 5**), eine Zeit in der die Randwinkel stark ansteigen, schon gut messbar und die Streu-

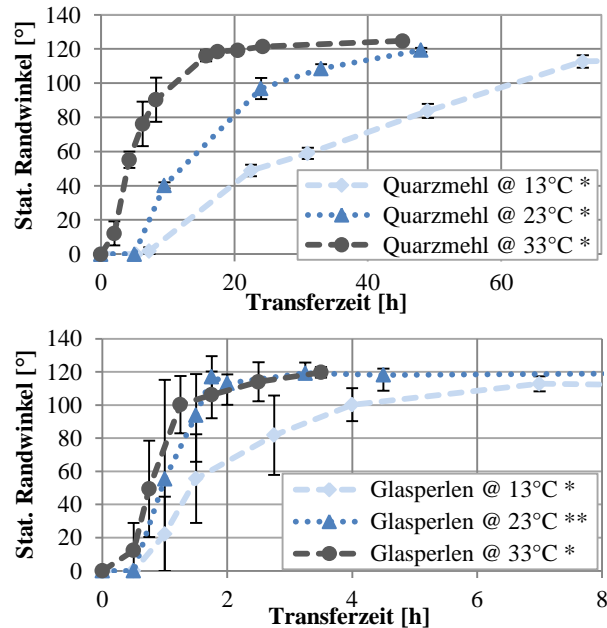
ungen der Messwerte am größten sind. Wie anzunehmen ist, treten bei höheren Schichtdicken niedrigere Randwinkel auf. Doch zeigt sich darüber hinaus, dass Streuungen auftreten, die nicht diesen Unterschieden zugeordnet werden können. Daher werden die aufgenommenen Profile auch dazu herangezogen, die Rauheit am Messpunkt zu bestimmen. Es zeigen sich allerdings nur unbedeutende absolute Oberflächenunterschiede, die nicht ausreichen, um die auftretenden Streuungen zu erklären. Vermutlich sind es auch lokale Dichteunterschiede, welche die Diffusion der LMWs beeinträchtigen.



**Bild 5** Statischer Randwinkel in Abhängigkeit der tatsächlichen Quarzmehlschichtdicke

### 2.2.3 Temperatur

Auch bei der Lagerungstemperatur zeigt sich ein sehr ausgeprägter Einfluss auf die Transferergebnisse bei Quarzmehl.

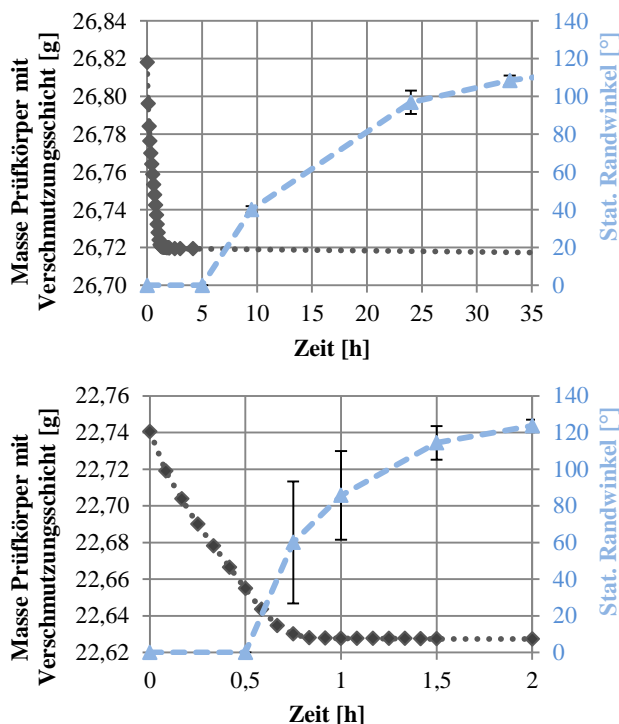


**Bild 6** Hydrophobietransfer in Abhängigkeit der Lagerungstemperatur;\* Mittelwerte und 95%-KI. aus 10 Messungen; \*\*Mediane und Spannweiten aus 5 Messungen

Während bei 33°C die statischen Randwinkel schon nach ca. 10 h die 100° Marke überschreiten, dauert dies bei 13°C ca. sechsmal so lang. Bei Glasperlen ergibt sich für diesen Vergleich der Faktor drei, wobei zwischen 23°C und 33°C kein signifikanter Unterschied besteht. Das Verfahren mit den Glasperlen ist also unempfindlicher bezüglich der Labortemperatur.

## 2.2.4 Trocknungsprozess

Generell sind die Streuungen der Randwinkelmessung beim Quarzmehl kleiner, als bei den Glasperlen. Dies ist möglicherweise auf unterschiedliches Trocknungsverhalten der verschiedenen Verschmutzungsschichtarten zurückzuführen. Um den Trocknungsprozess sichtbar zu machen, wird die Massenabnahme der mit Verschmutzungsschicht bestrichenen Prüfkörper aufgezeichnet. Der Trocknungsprozess der Quarzmehlschichten ist mit ein bis zwei Stunden schnell gegenüber dem Auftreten erster stabiler Randwinkel nach ca. 9,5 h (Bild 7 oben). Der Trocknungsprozess der Glasperlschichten hingegen ist mit 0,5 h bis 1 h im gleichen Zeitfenster wie das Auftreten der ersten Randwinkel (Bild 7 unten).



**Bild 7** Massenabnahme (eine Messung) und Hydrophobietransfer bei Quarzmehl (oben) und Glasperlen (unten); Mittelwerte und 95%-KI. aus 10 Messungen

Experimente mit Glasperlschichten, die nicht als Schlämme aufgetragen, sondern trocken aufgerieselt werden, zeigen einen Hydrophobietransfer in unter zehn Minuten. Bei als Schlämme aufgetragenen Schichten streicht die umgewälzte Luft je nach Lage der Prüfkörper im Klimaschrank mehr oder weniger stark über die Verschmutzungsschichtoberfläche und kann damit zu deutlichen Unterschieden in der Trocknungszeit führen. Falls der Hydrophobietransfer erst nach weitgehend abgeschlossener Trocknung einsetzt, streut der Startzeitpunkt für den „schnellen“ Hydrophobietransfer durch die trockene Schicht, womit die Unterschiede in der Trocknungszeit für einen Großteil der Streuungen der Randwinkelmessung verantwortlich wären. Da beim Quarzmehl der Transfer im Vergleich zur Trocknung langsam ist, spielt dies nur eine untergeordnete Rolle. Experimente zur Belegung dieser Vermutungen werden geplant.

## 2.2.5 Weitere Einflussgrößen

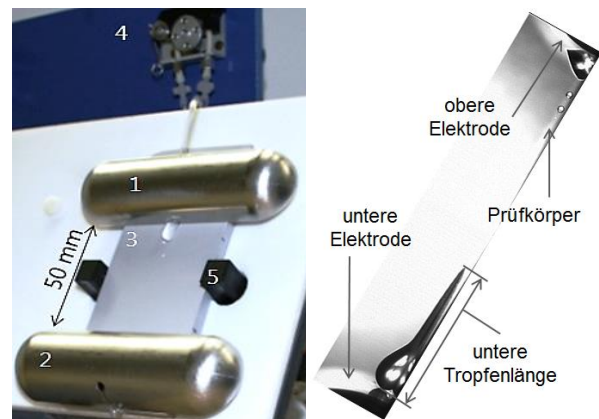
Noch nicht abgeschlossen sind Experimente zum Einfluss verschiedener Qualitäten des verwendeten destillierten Wassers und der PH-Werte der Suspensionen, die sich in Abhängigkeit von Grundschichtsubstanz und Flüssigkeit teils unterschiedlich einstellen. Bisherige Ergebnisse deuten auf signifikante Einflüsse der Wasserqualität hin.

## 3 Hydrophobiebeständigkeit und Hydrophobiewiederkehr

Für die Bewertung dieser beiden dynamischen Hydrophobieigenschaften wird das Dynamische Tropfen-Prüfverfahren (DTPV) (Bild 8) nach [10] verwendet.

### 3.1 Experimentelles

Die zum Einsatz kommenden Prüfparameter aus [2] werden gemäß **Tabelle 1** modifiziert und teils erweitert. Die verwendeten Prüfkörper werden mit Isopropanol und destilliertem Wasser gereinigt und für 24 h unter Laborklimabedingungen gelagert. Die Kenngröße „untere Tropfenlänge“ wird mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera erfasst (Bild 8).



**Bild 8** DTPV Elektrodenanordnung und Tropfenaufnahme (1&2 obere und untere Elektrode, 3 Prüfkörper, 4 Peristaltik-Pumpe, 5 Lichtschranke)

Parameter	Wert
Elektrolytleitfähigkeit	(1,0 – 5,0) mS/cm @ 20°C
Förderrate	(1 ± 0,2) ml/min
Neigungswinkel $\alpha$	30° – 90°
Tropfenfrequenz	(12 ± 1) min <sup>-1</sup> @ $\alpha = 60^\circ$
Abschaltkriterium	$I > 2$ mA über 1 s
Prüfspannung	AC, DC+
Anzahl Prüfkörper	12
Prüfkörperrauheit	$R_z = 5 \mu\text{m}$

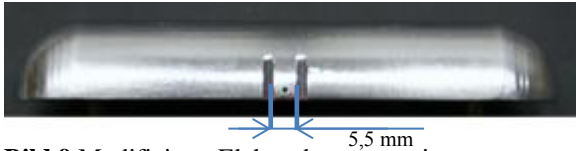
**Tabelle 1** Prüfparameter des DTPV

Zur Bewertung der Hydrophobiewiederkehr werden Pausenversuche im DTPV durchgeführt. Dabei wird unter konstanter Elektrolytbeanspruchung in 30 minütigen Intervallen zwischen angelegter Prüfspannung und Pausenphasen abgewechselt und nach 7 h in die Dauerbeanspruchung übergegangen.

## 3.2 Ergebnisse

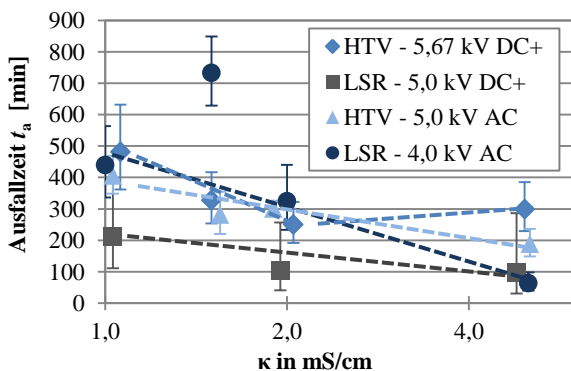
### 3.2.1 Ergebnisse zur Hydrophobiebeständigkeit

Gegenüber [2] wird durch zusätzliche Nuten neben der Austrittsöffnung eine leichte Modifizierung der oberen Elektrode vorgenommen (**Bild 9**). Variationen der Förderrate wirken sich damit primär auf die Tropfenfrequenz und nur vernachlässigbar auf das Tropfenvolumen aus.



**Bild 9** Modifizierte Elektrodengeometrie

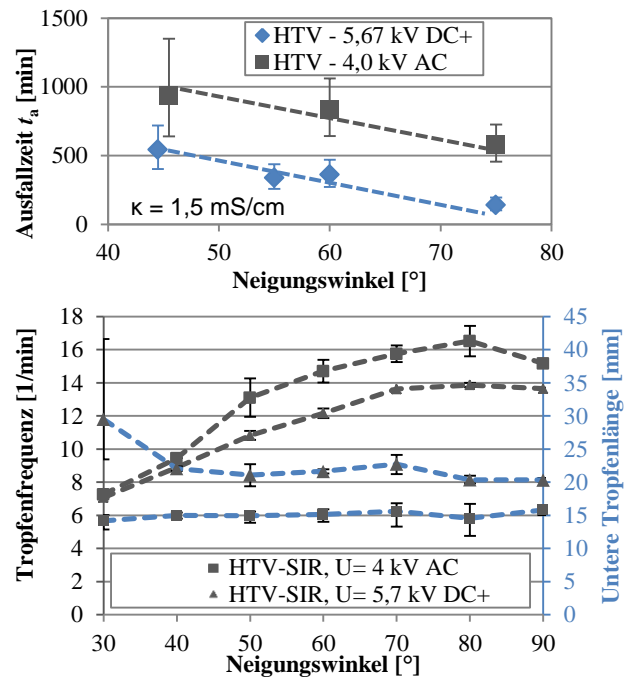
Darüber hinaus wird die Elektrodenkontaktierung vertauscht, so dass die obere die Erdelektrode, die untere die Hochspannungselektrode ist (vgl. Bild 8). Damit sind Tropfenfrequenz und Tropfenvolumen konstanter und werden weniger von Prüfspannungsart und -höhe beeinflusst. Diese Modifikationen werden für Parameterstudien zur Ermittlung des Schärfegrades einzelner Prüfparameter und der Festlegung geeigneter Toleranzen angewendet, von denen im Folgenden der Einfluss der Elektrolytleitfähigkeit (**Bild 10**) und des Neigungswinkels (**Bild 11**) diskutiert wird.



**Bild 10** Einfluss der Elektrolytleitfähigkeit  $\kappa$ ; 63% Quantile und 95%-KI; HTV: Hochtemperaturvernetztes Silikon, LSR: Flüssigsilikon

Für die untersuchten SIR-Varianten resultiert eine Erhöhung der Leitfähigkeit mehrheitlich in tendenziell sinkenden Zeiten bis zum Hydrophobieverlust ( $t_a$ ). Dies gilt für AC- und DC-Beanspruchung und ist mit einer zunehmenden Intensität Hydrophobie abbauender Mikroentladungen zu erklären. Die Ergebnisse sind mit denen aus [16] in Einklang. Die stärkste Abhängigkeit der Ausfallzeit zeigt das LSR unter Wechsellastbeanspruchung ( $\kappa$  1:5  $\rightarrow$   $t_a$  7:1). Bei den anderen Messreihen ist die Abhängigkeit vergleichsweise gering (z.B. LSR 5 kV DC+  $\kappa$  1:5  $\rightarrow$   $t_a$  2:1). Die Streuung ist unabhängig von den Leitfähigkeiten. Die Ergebnisse geben damit keinen Anlass eine andere als die bisher verwendete Leitfähigkeit von  $(1,5 \pm 0,2)$  mS/cm zu verwenden. Sie zeigen jedoch auf, dass das Verfahren gegenüber kleinen Abweichungen der Elektrolytleitfähigkeit robust ist und mit welchem Fehler im Falle einer Abweichung zu rechnen ist.

Mit steigendem Neigungswinkel des Prüfkörpers gegenüber der Horizontalen verringerten sich beim untersuchten HTV-SIR die Ausfallzeiten sowohl für AC als auch für DC+. Der gleichartige Anstieg der Ausgleichsgeraden unter AC und DC+ deutet auf einen einheitlichen Beschleunigungseffekt hin. Eine mögliche Ursache ist Bild 11 zu entnehmen. Während der Überbrückungsgrad (gemessen durch die untere Tropfenlänge) unabhängig vom Neigungswinkel konstant bleibt, nimmt die Tropfenfrequenz zu und führt damit bei gleichbleibender Intensität zu einer erhöhten Frequenz der hydrophobieabbauenden Mikroentladungen.



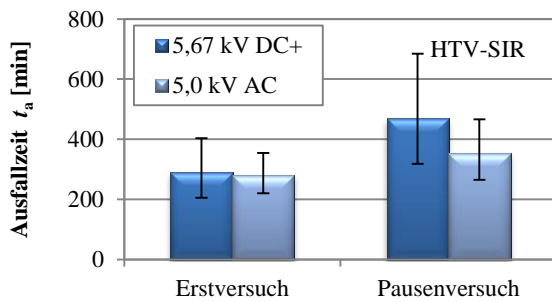
**Bild 11** Einfluss des Neigungswinkels auf Ausfallzeit (oben); 63% Quantile und 95%-KI, Tropfenfrequenz und untere Tropfenlänge (unten); Mittelwerte und Spannweiten aus je vier Messungen

Die Zunahme der Tropfenfrequenz mit steigendem Neigungswinkel ist zwischen  $30^\circ$  und  $50^\circ$  am stärksten. Im Sinne der Robustheit des Verfahrens gegenüber leichten Variationen des Neigungswinkels, z. B. bei Änderung des Aufstellortes des Prüfgerätes, sollte der Neigungswinkel in einen möglichst flachen Bereich der Kennlinie gelegt werden. Aus weiteren Experimenten zum Einfluss des Neigungswinkels (hier nicht dargestellt) wird ersichtlich, dass das Tropfenvolumen ab  $70^\circ$  nicht mehr vom Neigungswinkel abhängt. Eine modifizierte Festlegung von  $60^\circ$  auf  $70^\circ$  wird in Erwägung gezogen.

### 3.2.2 Ergebnisse zur Hydrophobiewiederkehr

Erste orientierende Pausenversuche im DTPV wurden mit hochtemperaturvernetztem Silikonelastomer sowohl unter Wechsel- als auch unter Gleichspannungsbelastung durchgeführt (**Bild 12**). In beiden Fällen zeichnet sich mit den genannten Prüfparametern tendenziell ein Erholungseffekt für das HTV ab. Eine Bewertung der Hydrophobiewiederkehr mit dem Pausenversuch ist möglich. Es

wird angestrebt, durch eine Weiterentwicklung der Prüfparameter den Effekt noch deutlicher sichtbar zu machen.



**Bild 12** Bestimmung der Hydrophobiewiederkehr mit Pausenversuchen

## 4 Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt den Stand der Entwicklung der Prüfverfahren zur Bewertung der dynamischen Hydrophobieigenschaften wieder.

Für das Hydrophobietransfer-Prüfverfahren wurde eine erhöhte Robustheit des Verfahrens bei Verwendung von Glasperlen hinsichtlich Korngrößenunterschieden, Vorbehandlungen und Temperaturunterschieden aufgezeigt. Demgegenüber stehen insgesamt geringere Streuungen bei den Randwinkelmessungen auf Quarzmehlschichten, die zum größten Teil auf lokale Schichtdickenunterschiede zurückzuführen sind. Die größeren Streuungen bei Verwendung von Glasperlen stehen aller Wahrscheinlichkeit nach mit dem im Vergleich zum Trocknungsprozess schnellen Hydrophobietransfer durch Glasperlen in Zusammenhang.

Für das Dynamische Tropfen-Prüfverfahren wurde eine modifizierte Elektrodenanordnung und -kontaktierung vorgestellt, die zur erhöhten Reproduzierbarkeit der Elektrolytzuführung beiträgt. Eine Erhöhung der Elektrolytleitfähigkeit bzw. des Neigungswinkels der Elektrodenanordnung verringert die Zeiten zum Hydrophobieverlust. Schließlich wurde gezeigt, dass mit Pausenversuchen die Hydrophobiewiederkehr bewertet werden kann.

## 5 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17001 BG der Forschungsvereinigung Elektrotechnik im ZVEI e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



## 6 Literatur

- [1] IEC TR 62039, Ed. 1 (2007-03): Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress
- [2] CIGRE WG D1.14: Material Properties for non-ceramic outdoor insulation: State of the art. Electra Nr. 217, S. 29-35, Dezember 2004

- [3] Kindersberger, J.; Bärsch, R.: Grenzfläche Feststoff-Gas – Beanspruchungen, Wechselwirkungen, Design, Prüfverfahren, Lebensdauer. ETG-Fachbericht 99, S. 7-26, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, 2005
- [4] J. Kindersberger, M. Kuhl: Effect of Hydrophobicity on Insulator Performance, 6<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, LA, USA, 1989
- [5] H. Janssen: Ursache und Lebensdauer der Hydrophobie polymerer Werkstoffe für Hochspannungs-Freiluftisolatoren, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1999
- [6] H. Jahn: Zur Bewertung stofflicher und herstellungsbedingter Einflußgrößen auf das Hydrophobie- und Erosionsverhalten von Silikonelastomeroberflächen, Dissertation, TU Dresden, 2003
- [7] F. Schmuck: Zur zeitraffenden Alterungsprüfung von Silikongummi-Oberflächen unter Fremdschichtbelastung und simultaner 50-Hz- Spannungsbeanspruchung, Dissertation, TH Zittau, 1992
- [8] Bärsch, R.; Lambrecht, J.; Winter, H.-J.: On the Evaluation of the Early Period of Polymer Insulator Surfaces During Accelerated Aging Tests, 9. ISH, Beitrag 3023, Graz, Österreich, 1995
- [9] J. Lambrecht: Über Verfahren zur Bewertung der Hydrophobieigenschaften von Silikonelastomer-Formstoffen, Dissertation, TU Dresden, 2001
- [10] R. Bärsch: Bewertung der Hydrophobie sowie des Kriechstromverhaltens von Silikonelastomeren für Hochspannungs-Freiluftisolatoren, ETG-Fachbericht 93, pp. 97-108, 2003
- [11] R. Hackam: Outdoor HV Composite Polymeric Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Ins., Vol. 6 Nr 5, SS. 557-585, Oktober 1999
- [12] H. C. Hillborg: Loss and Recovery of Hydrophobicity of Polydimethylsiloxane after Exposure to Electrical Discharges, PhD Thesis, Royal Institute of technology, Stockholm, Schweden, 2001
- [13] Exl, F.: Einflussfaktoren auf die Bewertung der Hydrophobieigenschaften von Isolierwerkstoffen, Diss. TU München, 2010
- [14] A. Hergert, J. Kindersberger, C. Bär, R. Cervinka, R. Bärsch: Hydrophobiebeständigkeit polymerer Isolierwerkstoffe mit dem Dynamischen Tropfen-Prüfverfahren - Vergleich zwischen AC- und DC-Beanspruchungen, 5. RCC-Fachtagung, Berlin, 2012
- [15] Kindersberger, J.; Bärsch, R.; Exl, F.; Gorur, R.; Haverkamp, W.; Janssen, H.; Kornmann, X.; Maßen, U.; Nagao, M.; Windmar, D.; Winter, H.-J. (CIGRE WG D1.14): Evaluation of dynamic hydrophobicity properties of polymeric materials for non-ceramic outdoor insulation – Retention and transfer of hydrophobicity. CIGRE Technische Broschüre Nr. 442, ISBN: 978-2-85873-130-5, Dezember 2010
- [16] R. Cervinka, R. Bärsch, F. Exl, J. Kindersberger, H.-J. Winter: Untersuchungen zur Beständigkeit der Hydrophobie von polymeren Isolierstoffoberflächen und ihrer Wiederkehr mit dem Dynamischen Tropfen-Prüfverfahren, ETG- Fachbericht Nr. 112, S. 55-62, 16.-17. September 2008