



Anwendung von Silikonelastomeren bei Durchführungen

Prof. Dr.-Ing. Stefan Kornhuber FH Zittau



Stefan Kornhuber studierte Elektrische Energietechnik an der Technischen Universität Graz. Er erhielt sein Diplom in 2005 und promovierte 2007.

Bis 2006 arbeitete er an der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH an der Technischen Universität Graz im Bereich von Hochspannungsprüfungen, Berechnung und Untersuchung transients Vorgänge in der Energietechnik und dem Upgrading von Freileitungen.

Zwischen 2006 bis 2013 arbeitet er für Lemke Diagnostics GmbH und Doble Lemke GmbH in verschiedenen Bereichen, zuletzt als Engineering Manager und Sales Director.

Ab Februar 2013 war er für ABB AG im Transformatorwerk in Halle tätig und leitet den Bereich Zustandsbeurteilung von Transformatoren und ab März 2014 die Prüffelder im Bereich Engineering Solutions.

Im Oktober 2014 folgte er den Ruf an die Hochschule Zittau / Görlitz - Professur für Hochspannungstechnik / Theoretische Elektrotechnik. Er ist Mitglied von verschiedenen Arbeitsgruppen bei der CIGRE, IEC und dem DKE.





Anwendung von Silikonelastomeren bei Durchführungen

Transformer Life Management Tagung 2015 mit angeschlossener Fachausstellung

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Silikonelastomere bei Transformatordurchführungen – eine äußere „Grenzflächenbetrachtung“

Stefan Kornhuber, Jens Seifert

Kurzfassung

Transformatordurchführungen müssen entsprechend der vorherrschenden Umgebungsbedingungen ihre Funktion aufrechterhalten können. Hierfür stehen seit längerer Zeit neben Porzellandurchführungen auch Durchführungen auf Verbundbasis (Glasfaserverstärkter Aufbau mit Außenmantel aus LSR oder HTV-Silikon) zur Verfügung. Silikonelastomere besitzen aufgrund ihres chemisch-physikalischen Aufbaus eine hydrophobe Eigenschaft, welche ebenso transferiert (Hydrophobietransfer) werden kann, sodass die Eigenschaft der Hydrophobie auf einer Schmutzschicht (welche sich auf dem Silikon gebildet hat) wirkt. Dadurch wird eine feuchte (und somit leitende) Fremdschicht vermieden, welche in Folge zu Kriechströmen und Vorentladungen und einer weiteren möglichen Beschädigung der Oberfläche führen würde (bis zu einem Kriechüberschlag). Porzellandurchführungen besitzen nicht diese hydrophobe Eigenschaft können aber den einwirkenden Energien der Vorlichtbögen widerstehen. Aufgrund sich ändernden äußeren Bedingungen kann es allerdings notwendig sein, die hydrophobe Eigenschaft des Silikons auf Porzellandurchführungen zu transferieren, was durch eine Beschichtung mit RTV-Silikon möglich ist.

In diesem Beitrag werden ausgehend von den grundsätzlichen Unterschieden der (Grenzflächen-)Eigenschaften der Werkstoffe aktuelle Forschungsergebnisse und deren Anwendung diskutiert. Die sich daraus ableitenden praktischen Anwendungsbereiche werden in konkreten Beispielen dargestellt.

Einleitung

Hochspannungsdurchführungen stellen eine wesentliche Komponente von Leistungstransformatoren dar, da das Versagen dieser einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebsfähigkeit und den Schadensverlauf haben kann. In Bezug auf die geeignete und langlebige Spannungssteuerung kommen verschiedene Konzepte zur Anwendung, welche entsprechend den technologischen Fortschritt verbessert wurden. Ebenso erfuhr die äußere und tragende Hülle die Einführung von polymeren Verbundwerkstoffen neben dem Einsatz der bekannten Porzellanwerkstoffe.

In Bild 1 ist der prinzipielle Aufbau einer Porzellandurchführung und einer Durchführung mit

Verbundholisolator dargestellt. Unabhängig von der Wahl des Gehäusewerkstoffes muss die gesamte Durchführung entsprechend der Gesamtbeanspruchung aufeinander abgestimmt entwickelt und ausgelegt werden.



- 1: Stromanschluss
- 2,3: Ölvolumenausgleichseinrichtung
- 4: Hohlisolatorgehäuse (C130-Porzellan oder Silikon)
- 5: Isolieröl
- 6: Steuerwickel
- 7: Anzapfung für Diagnose
- 8: Fussflansch zur Befestigung am Kessel
- 9: Innere Isolation (Trafo)
- 10: Stromanschluss für Transformatorwicklung

Bild 1: C130-Porzellan (braun) und LSR-Silikon durchführungen (grau). Typischer Aufbau einer feingesteuerten Trafo-Durchführung.

Der Aufbau von Silikonverbundholisolatoren ist in Bild 2 dargestellt.

Flansch GFK-Rohr LSR-Schirmhülle



Anwendung von Silikonelastomeren bei Durchführungen

Transformer Life Management Tagung 2015 mit angeschlossener Fachausstellung

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

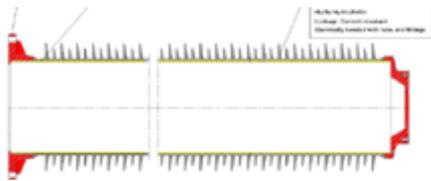


Bild 2: LSR-Silikonverbundhohlisolator

Durch Einflüsse aus der Umgebung wie Ablagerungen durch Staub und Feuchtigkeit können sich durchgängige leitfähige Schichten auf der Oberfläche der Durchführung bilden, welche bei anliegender Spannung entsprechende Kriechströme zur Folge haben und bei entsprechenden Bedingungen und Beanspruchungen zum Überschlag führen [2]. Diese Kriechströme (u.a. Wärme) und entsprechende Teilentladungen an der Isolieroberfläche widerstehen Porzellanwerkstoffe aufgrund ihrer hohen thermischen und chemischen Stabilität, wobei hingegen polymere Verbundwerkstoffe geschädigt werden können, welches bei einer entsprechenden Dauer zum Versagen der Isolierung führen kann.

Beim Einsatz von Silikonwerkstoffen als polymerer Hüllwerkstoff bildet sich aufgrund der Hydrophobie kein geschlossener Feuchtigkeitsfilm aus, sodass sich keine durchgängige Filmbahn bilden kann. Die Eigenschaft der Hydrophobie kann auch auf die anhaftende Fremdschicht transferiert werden, sodass sich in Verbindung mit Feuchtigkeit keine durchgängige leitfähige Beläge und somit keine Kriechströme ergeben können. Die Eigenschaft der Hydrophobie ist allerdings nicht statisch, sondern unterliegt Einflüssen, welche eine reduzierende Wirkung haben können.

In diesem Beitrag soll ein Überblick über die Eigenschaften der äußeren Grenzfläche von polymeren Verbundwerkstoffen (im speziellen Silikon), ausgewählte Prüfverfahren und aktuelle Arbeiten im Rahmen von CIGRE Arbeitsgruppen zur Bestimmung der Eigenschaften und deren Anwendung dargestellt werden.

Grundlagen und Eigenschaften von äußeren Grenzflächen bei polymeren Isolierstoffen

Polymere Silikonverbindungen bestehen aus Silizium - Sauerstoffketten, welche zum Beispiel aus Methylsilanolen durch Polykondensation hergestellt werden. Aufgrund der Vernetzungsstruktur entsteht ein Werkstoff welcher außerordentlich elastisch, formtreu und dehnbar ist. Zusätzlich werden dem Grundpolymere verschiedene (funktionale) Füllstoffe zur Einstellung der gewünschten Eigenschaften beigegeben. Im Bereich der Hochspannungstechnik sind Silikonharze,

Silikonelastomere, Silikongele, Silikonpasten und Silikonflüssigkeiten von Bedeutung. [7]

Das Verhalten der äußeren Grenzflächen wird sowohl von äußeren (zB. Oxidation, Mikroentladungen, ...) als auch inneren Vorgängen (z.B. chemische Vorgänge) und deren verbundenen Eigenschaftsänderungen der Volumen- und Oberflächeneigenschaften bestimmt. Durch innere Vorgänge können die Volumeneigenschaften (zB.: dielektrisches Verhalten, mechanische Eigenschaften) aber auch Oberflächeneigenschaften beispielsweise durch oberflächennahe Wärmedurchschläge, Änderung der Molekülstruktur und/oder eindringende Feuchtigkeit verändert werden. Zusätzlich kann es aufgrund von elektrischen Entladungen zu thermischen Überlastungen kommen und chemische Zersetzungsprodukte bilden, welche anschließend die Oberfläche schädigen und zu flächenhaften oder grabenden Erosionen führen. Polymere Isolierstoffe zeigen im Neuzustand in der Regel eine hydrophobe (wasserabweisende Eigenschaft), welche mit zunehmender Betriebsdauer und bei elektrischer Belastung abnimmt und verloren gehen kann. Auch bei einem Tropfenbelag bei einer wasserabweisenden Schicht kann unter Einfluss hoher elektrischer Feldstärke es zu elektrischen Entladungen zwischen den Wassertropfen kommen (Tropfenkorona, Mikroentladungen), welche über eine längere Beanspruchung zu einer Schädigung (vgl. Bild 3) und zu einem Verlust der Hydrophobie führen kann.

Bei bestimmten polymeren Werkstoffen wie zum Beispiel Silikonelastomeren kann die hydrophobe Eigenschaft auch auf Fremdschichten aufgrund von leicht beweglichen niedermolekularen Anteilen (LMW – low molecular weight) transferiert werden. Die Vorgänge auf äußeren Grenzflächen von Kunststoffisolatoren ist nach (vgl. Bild 4) zusammenfassend für Freiluftisolatoren dargestellt. [3]



Bild 3: Schirmerosion an einem 420 kV Stromwandler nach kurzer Betriebszeit [5]

Anwendung von Silikonelastomeren bei Durchführungen

Transformer Life Management Tagung 2015 mit angeschlossener Fachausstellung

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

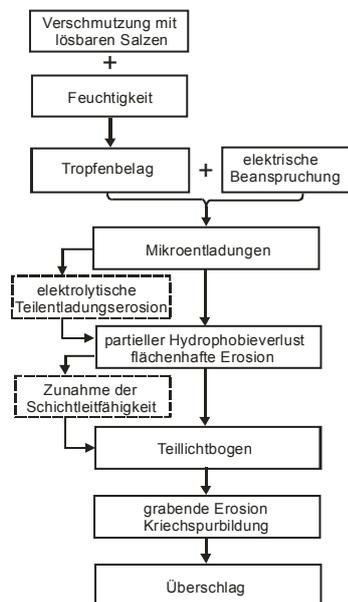


Bild 4: Vorgänge auf äußeren Grenzflächen von Kunststoffisolatoren bei Freiluftanwendungen [3]

Prüfverfahren

Zur Bewertung der Verwendbarkeit und Anwendbarkeit von Werkstoffen und der Konstruktion stehen unterschiedliche Prüf- und Bewertungsverfahren zur Verfügung. Seitens der normativen Seite sind die Verfahren dargestellt und im Folgenden ausgewählt dargestellt:

- IEC 60587: Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Kriechwegbildung und Erosion von Elektroisierstoffen, die unter erschwerten Bedingungen eingesetzt werden
- IEC 61621: Trockene feste Isierstoffe – Prüfung der Lichtbogenbeständigkeit bei hoher Spannung und niedrigem Strom
- IEC 61302: Prüfverfahren zur Beurteilung des Widerstandes gegen Kriechwegbildung und Erosion – Zyklische Prüfung

Neben den normativen Verfahren werden verschiedene Fragestellungen in Bezug auf die Werkstoffprüfung in CIGRE Arbeitsgruppen (vgl. WG D1.14 – TB 478, WG D1.27 – TB 611 und WG D1.58) bearbeitet.

Hochspannungskriechstromtest nach IEC 60587

Für den Hochspannungskriechstromtest nach IEC 60587 wird im Folgenden das Schiefe Ebene Prüfverfahren dargestellt. In Bild 5 ist der Aufbau dargestellt.

- 1 HS-Anschluss
- 2 HS-Elektrode
- 3 Fließpapier
- 4 EP-Harz-Träger
- 5 Prüfkörper
- 6 Flüssigkeitsspur
- 7 Erdelektrode
- 8 Erdzuführung
- 9 Vorlichtbogen

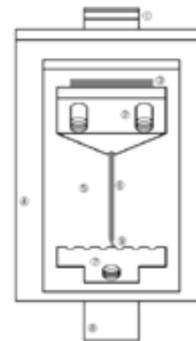


Bild 5: Schiefe-Ebene-Prüfanordnung nach IEC 60587 [6]

Zwischen den Elektroden wird eine entsprechende Prüfwechselspannung angelegt und zusätzlich wird eine elektrolytische Fremdschicht auf den Prüfkörper aufgebracht. Durch diese kombinierte Prüfbeanspruchung kommt es zur Beanspruchung durch Teilentladungen und thermische Zersetzung. Die Bewertung der Werkstoffproben nach durchgeführter Beanspruchung (6h) erfolgt über verschiedene Kriterien wie Ableitstrom und Erosionstiefe (zB. auch Lochfraß).

Hochspannungslichtbogentest nach IEC 61621

Beim Hochspannungslichtbogentest wird die Oberfläche durch Lichtbögen mit niedrigen Strömen mit einem Aufbau nach Bild 6 entsprechend der definierten Parameter vorwiegend thermisch belastet.

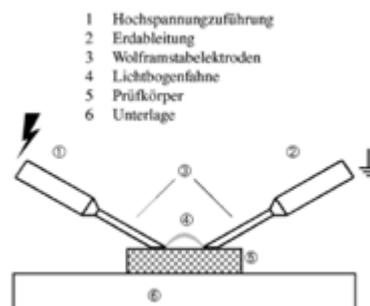


Bild 6: Elektrodenanordnung für das Hochspannungs-Lichtbogen-Prüfverfahren nach IEC 61621 [6]

Dynamisches Tropfenprüfverfahren

Anwendung von Silikonelastomeren bei Durchführungen

Transformer Life Management Tagung 2015 mit angeschlossener Fachausstellung

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Mit dem dynamische Tropfenprüfverfahren kann eine beschleunigte Bewertung der Beständigkeit der Hydrophobie durchgeführt werden. In Bild 7 ist der Aufbau des Prüfverfahrens dargestellt.



Bild 7: Abbildung der Anordnung des dynamischen Tropfenprüfverfahrens [4]

Tabelle 1 Prüfparameter des dynamischen Tropfenprüfverfahrens [4]

Parameter	Wert
Elektrodenabstand	50 mm
Leitfähigkeit des Elektrolyten k	(1,5 ± 0,1) mS/cm bei 20°C
Schrägstellung	60° ± 3°
Durchflussrate	(1,0 ± 0,15) ml/min
Abschaltkriterium	Ableitstrom $I_t > 2$ mA für eine Dauer von 1 s
Tropfenfrequenz	(12 ± 0,2) Tropfen / min bei 0 kV
Prüfspannung	(4 – 6) kV ac (rms), (5-6) kV dc, obere Elektrode geerdet
Anzahl der Prüflinge	12

Bei dieser Anordnung wird eine Prüfspannung zwischen den Elektroden angelegt und gleichzeitig die Probe mit einer Prüflüssigkeit mit einer bestimmten Durchflussrate belastet. Diese kombinierte Belastung führen zu Mikroentladungen, welche über die Belastungszeit zu einer Reduktion und/oder Verlust der Hydrophobie führen. Dieser Verlust der Hydrophobie wird im Rahmen des Ableitstromes ermittelt und die Zeit bis zum Verlust der Hydrophobie als Bewertungskriterium herangezogen. Das Prüfverfahren wird in der aktuellen CIGRE WG D1.58 in einem Round Robin Test in Bezug auf die internationale Wiederholbarkeit überprüft. In Bild 8 ist auszugsweise ein Ergebnis über die Beständigkeit von verschiedenen Werkstoffen beim dynamischen Tropfentest dargestellt. Bei diesen Untersuchungen konnten entsprechende Unterschiede im Bereich der Beständigkeit der Hydrophobie vor allem zwischen Silikonelastomere (HTV, LSR, RTV-2) und hydrophoben Epoxidharz gefunden werden.

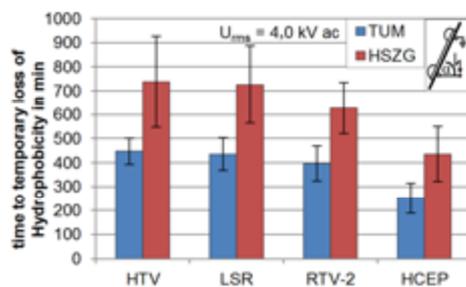


Bild 8: Verlust der Hydrophobie bei Konstantsspannungsbelastung an zwei Forschungsstellen (TUM und HSZG) [4]

Prüfung des Hydrophobietransfers

Die Übertragung der Hydrophobie auf eine mögliche Fremdschicht stellt eine wesentliche Eigenschaft von Werkstoffen dar. Im Rahmen des Hydrophobietransfertests wird eine reproduzierbare Fremdschicht aufgebracht und der Transfer auf diese Fremdschicht mittels Randwinkelmessungen (statische und dynamische Randwinkel) bewertet. Der Aufbau ist in Bild 9 dargestellt.

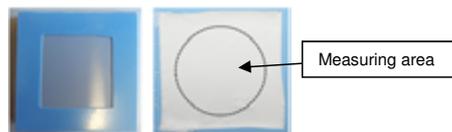


Bild 9: Testobjekt mit Maske (links) und mit aufgetragener Fremdschicht (rechts) [4]

Bei den Ergebnissen (Bild 10) kann der zeitliche Einfluss des Hydrophobietransfers erkannt werden, wobei über den dynamischen Rückzugwinkel eine Einstufung zwischen HTV, RTV-2 und LSR durchgeführt werden konnte.

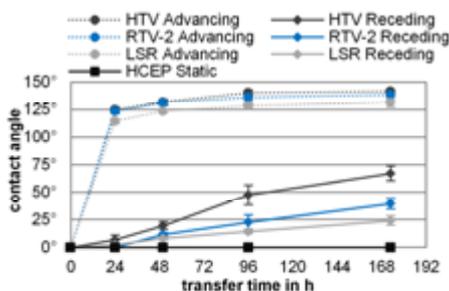


Bild 10: Dynamischer Kontaktwinkel in Abhängigkeit der Transferzeit bei verschiedenen Materialien (Messung an TUM) [4]

Prüfung von Komponenten



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Anwendung von Silikonelastomeren bei Durchführungen

Transformer Life Management Tagung 2015 mit angeschlossener Fachausstellung

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Neben den Werkstoffprüfungen stehen verschiedene Prüfverfahren für konkrete Betriebsmittel (bzw. Teile der Betriebsmittel) wie die 1000h-Salznebelprüfung oder die Ermittlung des Fremdschichtüberschlages neben den typischen Abnahmeprüfverfahren zur Verfügung.

Zusammenfassung

Durchführungen stellen eine wesentliche Komponente von Transformatoren dar. Neben dem inneren Aufbau, welche hinsichtlich thermischer und elektrischer Beanspruchungen optimiert werden, muss auch der Hüllstoff geeignete Eigenschaften besitzen und auch unter Berücksichtigung und Abstimmung auf die Aktivteilauslegung angepasst werden. Neben Porzellan stehen auch Verbundholisolatoren mit polymeren Isolierstoffe als Hüllmaterial zur Verfügung. Durch den Einsatz von Silikonelastomeren (als polymerer Werkstoff) können hydrophobe Eigenschaften erreicht werden, welche auch auf Schmutzschichten übertragbar sind. Dadurch kann eine Durchfeuchtung und somit Entstehung von leitfähigen Fremdschichten verhindert werden, welche sich wiederum in einer geringeren Beanspruchung durch Kriechströmen darstellt. Neben den Prüfverfahren zur Bewertung der Kriechstromfestigkeit und der Bauteilprüfung stehen zur Zeit keine normativen Prüfverfahren zur Bewertung des Hydrophobietransfers und beständigkeit zur Verfügung, wobei diese gegenständliche Untersuchungen im Rahmen von CIGRE Arbeitsgruppen sind. Aus der Praxis kann gezeigt werden, dass die Verwendung von Silikonelastomeren bei Hochspannungs-isolationssystemen eine gute Langzeitbeständigkeit aufweisen.

Literaturhinweise

- [1] J. Kindersberger, R. Bärsch; Grenzfläche Feststoff-Gas – Beanspruchungen, Wechselwirkungen, Design, Prüfverfahren, Lebensdauer. *ETG - Fachbericht*, 99.
- [2] F. Obenaus: Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge, Dtsch. Elektrotechnik (1958) Heft 4
- [3] J. Kindersberger: Silikonelastomere für Kabelgarnituren, Isolatoren und Überspannungsableiter – Profil einer Werkstofffamilie. *ETG-Fachbericht 93 „Silikonelastomere“*, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, 2003
- [4] C. Bär, R. Bärsch, A. Hergert, J. Kindersberger; Evaluation of dynamic hydrophobicity properties with the dynamic drop test under AC and DC stress and the hydrophobicity transfer test; 19th International Symposium on High Voltage Engineering, 2015

- [5] K. O. Papailiou, F. Schmuck; *Silicone Composite Insulators – Materials, Design, Applications*, Springer Verlag 2013, ISBN 978-3-642-15319-8
- [6] R. Cervinka, S. Kühnel, R. Bärsch, J. Seifert, J. Lambrecht; Zur Bewertung der Erosions- und Kriechstromfestigkeit von polymeren Isolierfeststoffen unter AC- und DC-Beanspruchungen; *ETG – Grenzflächentagung, Dresden* (2013)
- [7] A. Küchler; *Hochspannungstechnik*; Springer Verlag 2009, ISBN 978-3-540-78413-5

Autorenanschrift

Hochschule Zittau/Görlitz
Prof. Dr.techn. Stefan Kornhuber
Hochwaldstr. 2a, 02763 Zittau
Tel.: +49 3583 1365
FAX: +49 3583 1330
E-mail: s.kornhuber@hszg.de

LAPP Insulators GmbH
Dr.-Ing. Jens Martin Seifert
Bahnhofstr. 5, 95632 Wunsiedel
Tel.: +49 9232 50195
Fax: +49 9232 50204
E-mail: jseifert@lappinsulators.com

