

Zustandsbewertung von glasfaserverstärktem Kunststoffkern und Silikonschirmhülle in Verbundisolatoren

Tobias Braunsberger, Arkadiusz Dziubek, Michael Kurrat, Technische Universität Braunschweig
Jens Seifert, Lapp Insulator GmbH und Co. KG, Wunsiedel

Kurzfassung

Der Einsatz von Verbundisolatoren – bestehend aus glasfaserverstärktem Kunststoffstab (GFK-Stab) als Kern und Silikongummi als Hülle – in Freiluftleitungen und -anlagen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Zusätzlich zur elektrischen Beanspruchung (Betriebsspannung und Überspannung) kann durch verschiedene Umwelt- und Witterungseinflüsse jedoch die Langzeitbeständigkeit dieser Isolatoren beeinträchtigt werden. Der Beitrag behandelt grundsätzliche Untersuchungen zur Entwicklung von Diagnosemethoden, die eine Zustandsbeurteilung von Isolatoren und deren Komponenten erlauben. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf Alterung des Materials, die durch Teilentladungen (TE) sowohl an Wassertropfen auf der Oberfläche der Silikonhülle als auch in möglichen Mikro-Hohlräumen des GFK-Kerns auftreten können. Um die Effekte eindeutig zuordnen zu können, werden beide Komponenten getrennt untersucht. Der Alterungsprozess der Materialien im Betrieb wird durch das Zusammenspiel aller Einflussgrößen bestimmt. Diese Einflussgrößen müssen zunächst identifiziert, messtechnisch erfasst und bzgl. möglicher Materialschädigung bewertet werden. Eine geeignete Diagnose sollte daher die messtechnische Erfassung möglicher Schädigungsverursacher (Quellen) als auch die Auswirkungen von expliziten physikalischen Schädigungsvorgängen (Wirkungen) beinhalten. Ziel ist, eine geeignete Diagnostik zur Zustandsbeurteilung von im Betrieb gealterten GFK-Stäben zu entwickeln. Zu ihrer Entwicklung werden eine Reihe von sich ergänzenden Messungen dargestellt: TE-Messungen, dielektrische Messungen sowie Bestimmung des Glasübergangspunktes. Für alle genannten Untersuchungen werden Prüfkörper mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen benötigt, die künstlich beschleunigt gealtert werden. Im Hinblick auf die Silikonhülle wird besonders das Hydrophobieverhalten und dessen Beeinflussung durch elektrische Feldeinwirkungen betrachtet. Einsetzungsfeldstärken von Teilentladungen in Abhängigkeit von Feldrichtung und Material sowie Wassertropfengröße werden dargestellt. Dazu werden Wassertropfen auf eine Probenoberfläche aufgebracht und dann einem homogenen elektrischen Feld ausgesetzt. Als Material werden zwei unterschiedliche Silikonarten benutzt. Der Beitrag schließt mit einem Überblick zu bekannten Betriebsfehlermoden früherer Generationen und Bauarten von Verbundisolatoren, Abhilfemaßnahmen bzgl. geeigneter Materialauswahl und Bauartgestaltung sowie Empfehlungen zu zukünftigen Diagnosemöglichkeiten zur Erkennung von Alterungsfrühphasen.

1 Verbundisolatoren

1.1 Aufbau von Verbundisolatoren

Moderne Verbundlangstabisolatoren (**Bild 1**) bestehen aus einem glasfaserverstärkten Epoxid(EP)-Harzstab zur mechanischen Kraftaufnahme und einer polymeren Schirmhülle aus Silikon oder EPDM zum Schutz des Stabes vor Bewitterung und Feuchtigkeit sowie zur Bereitstellung des erforderlichen Kriechweges. An die beiden Enden dieses Isolierkörpers sind Endarmaturen aus Schmiedestahl oder Gusseisen angebracht. Zwischen dem polymeren Isolierkörper und den Metallarmaturen befinden sich Abdichtungen zum Schutz vor Feuchtigkeit. Die Langzeitbeständigkeit der Abdichtungen sowie aller Materialgrenzflächen wird insbesondere durch das Design, die Materialauswahl und den Fertigungsprozess bestimmt. Hochwertige Verbundisolatoren müssen die Anforderungen nach VDE 0441 und IEC 61109 erfüllen. Ihre Herstellung erfordert ein umfassendes und langjähriges Know-How des Herstellers sowie eine prozessorientierte Qualitätssicherung [1].

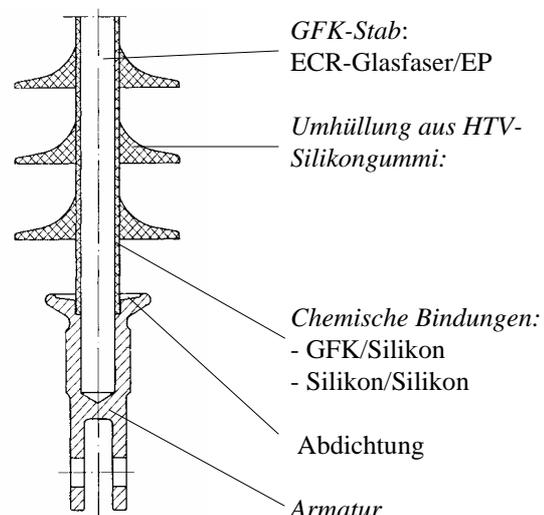


Bild 1: Aufbau eines modernen Verbundisolators

1.2 Gegenstand der Untersuchung

Die in den Verbundisolatoren eingesetzten Werkstoffe in Form von glasfaserverstärkten EP-Harzen vereinen die guten mechanischen, elektrischen und dielektrischen Eigenschaften der verwendeten Einzelkomponenten in einem Werkstoffgefüge. Die resultierenden Werkstoffeigenschaften lassen sich durch Art, Menge und Beschaffenheit der verwendeten Füllstoffe sowie durch den Herstellungsprozess entscheidend beeinflussen.

Da es zur Zeit keine Möglichkeit gibt, die kompletten Isolatoren zu messen, werden die Experimente an den einzelnen Komponenten des Isolators durchgeführt.

Die Glasfasern, die ein Bestandteil der GFK-Stäbe sind, können Fehler in Form von Kapillaren enthalten. Zusätzlich können während des GFK-Herstellungsprozesses in dem Material Lufteinschlüsse und Mikrohohlräume entstehen, die unter den Betriebsbedingungen zu Teilentladungen führen können. Mit der Zeit können sich so Entladungskanäle bilden, die ein Versagen des Isolators zur Folge haben können. Um die Qualität der GFK-Stäbe zu bewerten, werden Untersuchungen mit einem modernen breitbandigen Teilentladungsmesssystem durchgeführt.

Durch Diffusion von Wasser in den Werkstoff können an Grenzschichten chemische Reaktionen ausgelöst werden, wobei Ionen aus Füllstoffverunreinigungen entstehen und die Grenzflächenpolarisation verstärkt wird. Dann steigen die relative Dielektrizitätszahl und der Verlustwinkel, womit die Gefahr des Wärmedurchschlags der Isolierung besteht. Da Hochspannungsgeräte eine Standzeit von Jahrzehnten besitzen, ist eine genaue Kenntnis der Langzeitschädigungsmechanismen und deren Auswirkungen auf die dielektrischen und elektrischen Eigenschaften der Werkstoffe zwingend erforderlich. Alle Untersuchungen mit GFK werden deshalb im Zusammenhang mit der Wasserlagerung des Materials durchgeführt.

Die für die Schirmhülle verwendeten Silikonelastomere besitzen ein wasserabweisendes (hydrophobes) Verhalten, das vor allem im Freiluftbereich vorteilhaft für die Zuverlässigkeit und die Lebenszeit der Isolatoren ist. Befinden sich jedoch Wassertropfen auf der Oberfläche, verändern sie das elektrische Feld. Das führt zu einer Feldüberhöhung und der Entstehung von

Oberflächen-Entladungen, welche die hydrophoben Eigenschaften des Materials zerstören. Dann bilden sich größere Tropfen bzw. zusammenhängende benetzte Gebiete. Die Folge der Benetzung kann unter ungünstigen Umständen der teilweise oder vollständige Verlust der Isolationsfähigkeit der Isolatoroberfläche sein, d.h. ein Überschlag findet statt, der eine Abschaltung der Energieversorgung erzwingt. Die Verschmutzung des Isolators, die auch die Oberflächeneigenschaften beeinflusst, wird in diesen Untersuchungen nicht betrachtet.

2 Glasfaserverstärkter Kunststoffkern

2.1 Aufbau des Experiments

TE-Messungen Die Teilentladungsmessungen werden mit speziellen Prüfkörpern nach **Bild 2** durchgeführt, um die definierte Feldstärke zu erzeugen.

Die Proben werden in 50°C warmem Wasser künstlich gealtert [2]. Um einen Einfluss der TE-Messungen durch Treeing auf die Proben zu vermeiden, werden für jeden Messtag 5 wassergelagerte, aber elektrisch unbelastete Prüfkörper untersucht. Vor der Messung ist eine 2-stündige Trocknung erforderlich.

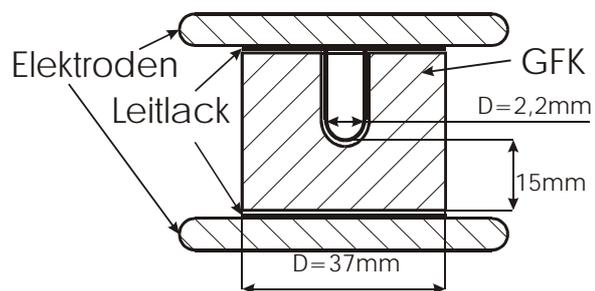


Bild 2 TE-Prüfkörper

Um Überschläge zu vermeiden, befinden sich die Prüfkörper während der Messungen in einem Gefäß mit erhöhtem Druck unter SF₆-Atmosphäre. Die Versuche werden an einer Produktions-Charge von GFK-Stäben durchgeführt (Glasgehalt von 64-70%). Außerdem werden Messungen mit einem Prüfkörper ohne Bohrung durchgeführt, um auszuschließen, dass es sich bei den Messungen um äußere Teilentladungen handelt. Bis zu der Spannung von 50kV werden keine Teilentladungen detektiert. Der Grundstörspegel beträgt 0,4pC bei 50kV.

Nach der Kalibration wird die Wechselprüfspannung angelegt, die von 0 kV bis zur TE-Einsatzspannung gesteigert wird. Die entstehenden TE werden über eine Minute mit einem TE-Messsystem aufgenommen und weiter offline bearbeitet.

Dielektrische Messungen Dielektrische Messungen werden an Prüfkörpern nach **Bild 3** durchgeführt. Es werden der Verlustwinkel ($\tan\delta$) und die Dielektrizitätszahl (ϵ_r) in Abhängigkeit von der Wasserlagerungsdauer bestimmt.

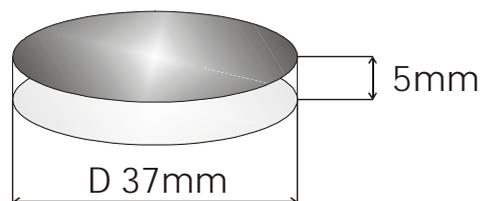


Bild 3 Platten Prüfkörper für dielektrische Messungen

DSC-Messungen Um die Veränderung und die Degradationsprozesse des Materials in Zusammenhang mit der Wasserlagerung zu ermitteln, wird der Glasübergangspunkt mit der Methode der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) bestimmt. Das in den Untersuchungen verwendete Wärmestrom-DSC bestimmt die aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge einer Probe im Verhältnis zu einer Referenzprobe und weist diese Differenz als Funktion der Temperatur aus. Eine Differenz in den gemessenen Temperaturen (Referenz- und Proben-Temperatur T_R, T_P) lässt Rückschlüsse auf die in der Probe ablaufenden Prozesse zu. Handelt es sich um endotherme Vorgänge, so nimmt die Probe Energie auf, ohne ihre Temperatur zu erhöhen und bleibt somit unter der Referenztemperatur. Bei exothermen Vorgängen wird Energie von der Probe abgegeben und führt zu einer Differenz zwischen T_R und T_P . Aus dieser Differenz lässt sich auf eine Wärmestromänderung schließen, die bei einer festgelegten Heizrate ($10^\circ\text{C}/\text{min.}$) über der Zeit in einem Diagramm aufgetragen wird. Dies dient zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur. Mit Hilfe der Software ist eine Auswertung der Diagramme nach DIN 51007 möglich.

2.2 Ergebnisse GFK

Die Ergebnisse zur TE-Einsatzspannung sind im **Bild 4** dargestellt. Die Proben, deren TE-Einsatzspannung mehr als 45kV beträgt, sind nicht berücksichtigt. Es wird SF_6 als Isoliergas benutzt. Die TE-Einsatzspannung fällt bei der Wasserlagerung rasch auf 60% der ursprünglichen Werte ab. Es besteht die Möglichkeit, dass während der TE-Messung (Dauer ca. 5 min.) SF_6 in die Hohlräume diffundiert und auch in geringer Konzentration zu einer deutlichen Erhöhung der Einsatzspannung führt. Dies soll durch Vergleich mit Stickstoff in nachfolgenden Messungen untersucht werden.

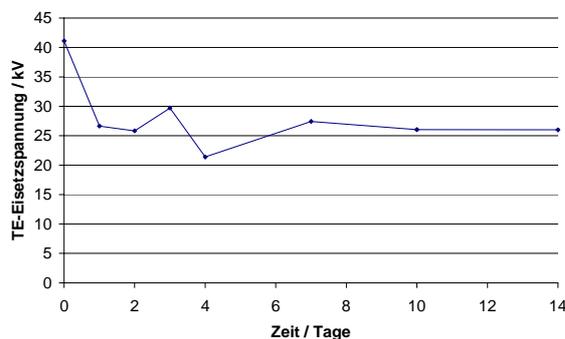


Bild 4 Mittlere TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit der Wasserlagerungsdauer

Bild 5 zeigt Beispiele von Mustern der gemessenen scheinbaren Ladungen aufgetragen über der Phasenlage. Die Messungen werden an den unterschiedlichen gleich gealterten und nicht elektrisch belasteten Proben von einer 7 Produktions-Charge durchgeführt. Die TE-Einsatzspannung beträgt von 25,8 bis 46,4kV.

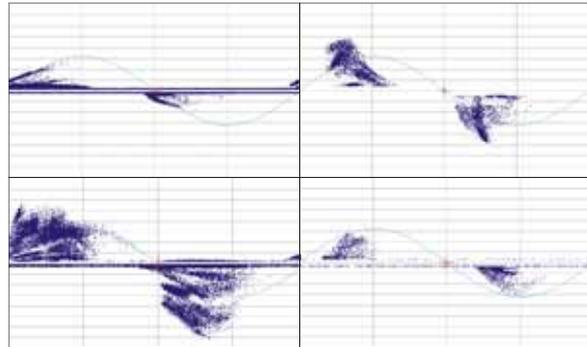


Bild 5 Beispielbilder für phasenaufgelöste TE-Messungen.

Auf Grund der großen Anzahl unterschiedlicher Muster lassen sich zur Zeit noch keine eindeutigen Schlüsse über das TE-Verhalten ziehen.

Um die Ergebnisse weiter bearbeiten zu können, wird die mit der Ladung q gewichtete Häufigkeits-Randverteilung eingesetzt [3]:

$$h_{nq}(\varphi) = \sum_{i=k}^k \{N(\varphi, q_i) \cdot q_i\}$$

Beispieldiagramme auf dieser Verteilung basierend sind im **Bild 6** gezeigt. Weitere Auswertungen der Ergebnisse sind nach dieser Methode geplant. Eine deutliche Veränderung der Verteilung mit zunehmender Wasserlagerungsdauer ist zu erkennen.

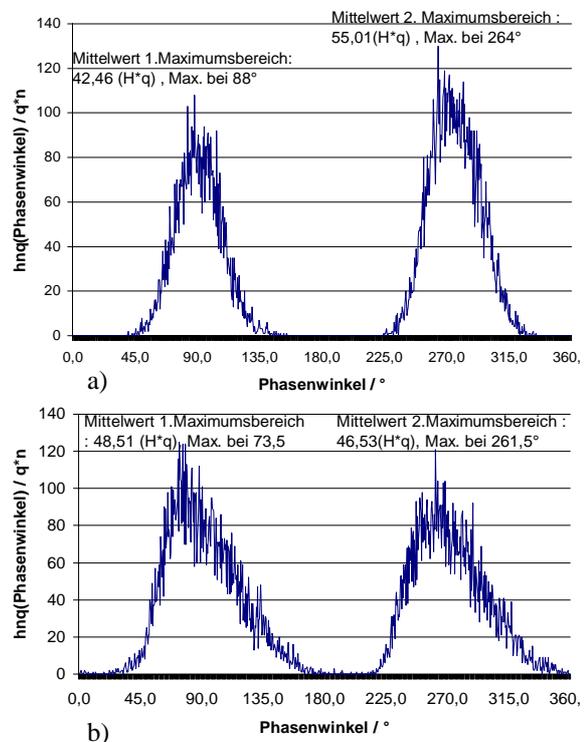


Bild 6 Mit der Impulsladung gewichtete Häufigkeits-Randverteilung
a) Tag 0
b) Tag 14

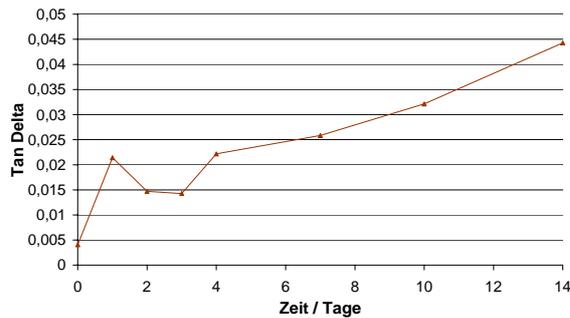


Bild 7 Änderung von $\tan\delta$ in Abhängigkeit der Wasserlagerungsdauer

Ergebnisse zu dielektrischen Messungen sind im **Bild 7** gezeigt. Es ergibt sich ein typischer Verlauf von $\tan\delta$ für das gealterte EP-Material. Es wird erwartet, dass ein minimales Qualitätskriterium für EP-Harze erfüllt wird ($\tan\delta < 0,2$ nach 50 Tagen).

Der Glasübergangspunkt wird mit einem DSC Messgerät gemessen. Es werden jeweils 3 Messungen für jede Material-Probe durchgeführt.

Die Ergebnisse sind im **Bild 8** zu finden. Die DSC-Messung zeigt einen nahezu konstanten Glasübergangspunkt, denn die Messunsicherheit kann erfahrungsgemäß mit 2K angegeben werden.

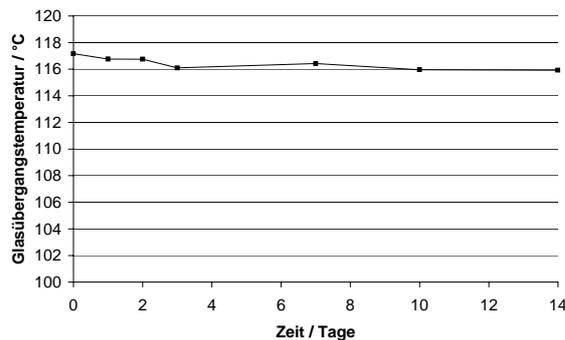


Bild 8 Glasübergangspunkt in Abhängigkeit der Wasserlagerungsdauer

3 Silikonschirmhülle

3.1 Aufbau des Experiments

Um die Feldverläufe auf dem realen Isolator nachzubilden, werden zwei unterschiedliche Messanordnungen benutzt. Die erste, mit der zu der Oberfläche des Prüfkörpers normalen Feldrichtung ist im **Bild 9a** dargestellt. Sie besteht aus zwei Flachelektroden mit einem Durchmesser von 60mm. Die Elektroden sind mit Gießharz vergossen, um Überschlüge zu vermeiden. Der Silikon-Prüfling liegt auf der unteren Elektrode. Die zweite Anordnung, mit der zu der Oberfläche des Prüfkörpers tangentialen Feldrichtung ist im **Bild 9b** dargestellt. Hier wird der Prüfling mit den Abmessungen von 10mm x 30mm x 50mm zwischen

die gleichen Elektroden wie in der ersten Anordnung gespannt. In den beiden Anordnungen werden Wassertropfen auf die Oberfläche des Silikons mit Hilfe einer Mikropipette aufgesetzt. Die Anzahl, das Volumen und die Position der Tropfen werden bei den Untersuchungen variiert. An die Elektroden wird Wechselspannung angelegt.

Die Entwicklung der TE in Abhängigkeit von Spannung, Tropfengröße und -anzahl sowie der Art des Silikons wird ermittelt.

Durch den Einsatz einer Klimakammer sollen die Freiluftverhältnisse simuliert werden. Damit kann das Hydrophobieverhalten realitätsnah untersucht und mit den Ergebnissen anderen Autoren verglichen werden [4],[5].

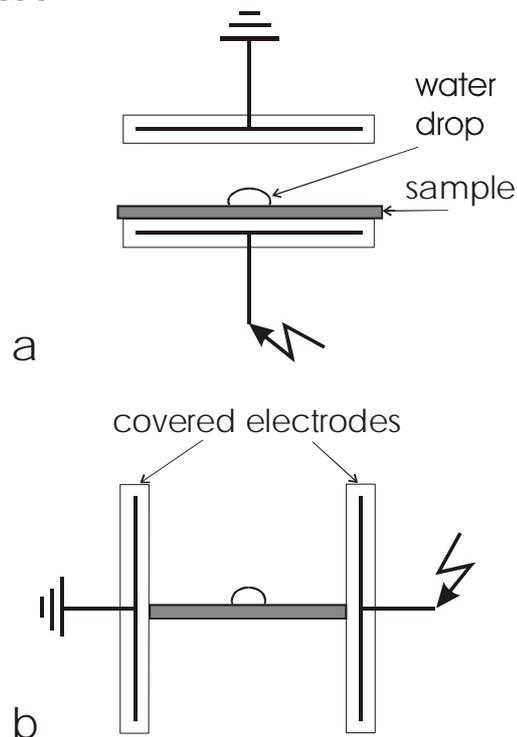


Bild 9: Schematische Darstellung der Messanordnung

Der Prüfling wird an das Teilentladungsmesssystem angeschlossen. Der Messaufbau wird vor dem Anfang der Messung kalibriert, der Grundstörpegel liegt bei 0,4pC. Die Größe und die Phasenlage der Teilentladungen unter Wechselspannung werden von dem Messsystem über 1 Minute gespeichert. Die Messergebnisse können auf verschiedene Art dargestellt und weiter bearbeitet werden.

Die Experimente werden an 2 unterschiedlichen Arten von Silikon durchgeführt: HTV und RTV. Um die statistische Auswertung zu ermöglichen werden jeweils 10 Proben untersucht.

3.2 Ergebnisse Silikon

Die Ergebnisse (**Bild 10** und **Bild 11**) stammen von Messungen an den Prüfanordnungen nach Bild 9 mit jeweils 1 Tropfen unterschiedlicher Größe.

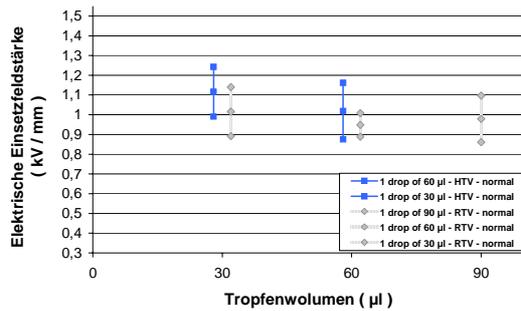


Bild 10: Elektrische Einsetzfeldstärke für senkrechte Feldbelastung

Das Tropfenvolumen beträgt 30 bis 90 µl. Es ist zu bemerken, dass die Tropfen Rückwirkungen auf die Feldverteilung zwischen den Elektroden haben. In den Diagrammen wird der Effektivwert der Feldstärke angegeben, die ohne Berücksichtigung der Tropfen herrscht.

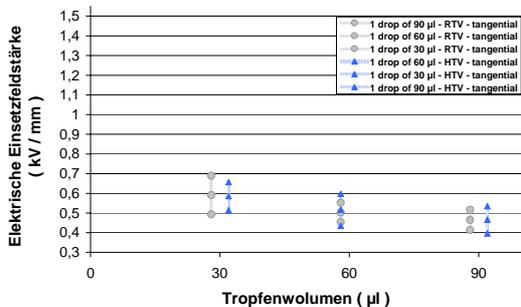


Bild 11: Elektrische Einsetzfeldstärke für tangentielle Feldbelastung

In der Anordnung mit senkrechter Feldbelastung werden mittlere Einsetzfeldstärken von 1 bis 1,1 kV/mm gemessen, und zwar sowohl bei RTV- als auch bei HTV-Material.

Bei den Versuchen mit tangentialer Feldbelastung führt in dem genannten Bereich das steigende Tropfenvolumen zu einem leichten Abfall der Werte. Die Einsetzfeldstärken betragen 0,5 bis 0,6 kV/mm.

4 Betriebsfehlermoden: Diagnose und Abhilfemaßnahme

Seit ihrer betriebsmäßigen Einführung in Deutschland im Jahr 1967 haben Silikonverbundisolatoren in den letzten 36 Jahren eine umfassende Weiterentwicklung bzgl. Bauartgestaltung, Materialauswahl und Prüfnormen erfahren [1]. Die Fachliteratur [6] unterteilt die heute in Freileitungen installierten Isolatorbauarten in Kollektive, die 3 Generationen zugeordnet werden können:

Generation	Material	Bauart	Prüfnormen
I bis ca. 1978	Nicht optimiert	Nicht optimiert	Keine
II bis ca. 1985	Optimiert	Nicht optimiert	t.w. VDE 0441
III ab 1985	Optimiert	Optimiert	VDE, CAN, IEC, ANSI u.a.

Die aufgetretenen Ausfälle von Isolatoren, die explizit auf Design- oder Materialfehler zurückzuführen sind, beschränken sich auf die Generationen I und II. Die dabei beobachteten Fehlermoden wurden in den 1980er Jahren intensiv untersucht und führten zur Entwicklung von Prüfverfahren (Bauartprüfungen), die z. T. Eingang in verschiedene nationale und internationale Normen fanden. Die bekannten und in [6] ausführlich beschriebenen Fehlermoden sind in **Bild 12** zusammenfassend dargestellt.

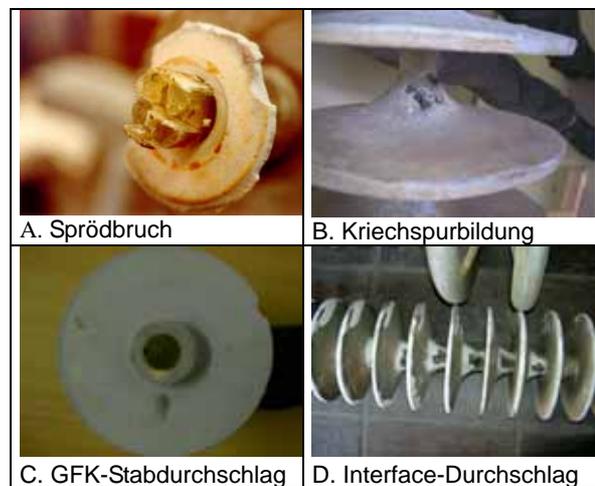


Bild 12: Fehlermoden der Generationen I und II

A. Sprödbruch („Brittle Fracture“):

Der Alterungsmechanismus, der zum GFK-Sprödbruch führt, ist heute vollständig aufgeklärt und sein Auftreten im Betrieb kann durch die Auswahl eines entsprechenden säurebeständigen ECR/GFK-Stabes sicher ausgeschlossen werden [7]. Zur Überprüfung der Säurebeständigkeit des GFK-Stabes (Kern) einer Isolatorbauart existieren einschlägige Prüfverfahren [6, 7]. Eine Zustandsdiagnose von im Betrieb befindlichen Isolatoren hinsichtlich Sprödbruchgefahr ist derzeit nur mit dem mechanischen 96h-Standzeittest möglich [7]. Die Überprüfung der Säurebeständigkeit einer neuen Bauart muss daher zur Zeit in jedem Fall vor deren Installation erfolgen (Empfehlung: Mech. 96 h-Standzeittest mit einer spez. GFK-Materialbelastung von 340 MPa unter 1N-HNO₃-Säurebeeinflussung).

B. Kriechspurbildung („Tracking and Erosion“):

Die Symptome und Auswirkungen von Kriechspurbildungsmechanismen sind heute sehr gut bekannt. Mit den HK-Verfahren nach VDE 0441 und VDE 0303-T10 (IEC 60857) gibt es Möglichkeiten, Mini-

malanforderungen an ein Material zu spezifizieren und zu überprüfen. Die Auswahl eines kriechstromfesten Materials (Empfehlung: $HK \geq 2$) garantiert allerdings in keiner Weise den Schutz vor Kriechstrombildung an der Schirmhülle im Betrieb, da Isolatordeformationsinflüsse stark sind und durch die Materialprüfungen nicht erfasst werden. Die individuellen physikalischen Ursachen für ein Versagen einer Isolatorschirmhülle aufgrund von Kriechspurbildung können folgender Art sein:

- **Bauartbedingte Unzulänglichkeiten:** ungeeignete Materialien, Fehlstellen aufgrund ungeeigneter Prozesstechnik (axiale durchgängige Spritzgussnähte, Materialinhomogenitäten und innere mech. Spannungen), ungünstige Schirmprofilgestaltung.
- Partieller oder vollständiger **Verlust der Hydrophobie** (bedingt durch stark elektrisch leitfähige Verschmutzung oder aber auch initiiert durch Wassertropfenkorona bei hoher Feldbelastung)
- **Materialvorschädigung** durch Wassertropfenkorona (speziell durch die begleitende UV-Strahlung und TE-Entladungsenergie)

Zur Aufklärung und Diagnostik der letzten beiden Schädigungsmechanismen besteht die Möglichkeit spezielle Verfahren (UV-Tageslichtkameras, TE-Messung u.a.) anzuwenden sowie die grundlegenden Erkenntnisse aus Kapitel 3 bei der Auslegung und Anwendung der Isolatoren zu nutzen.

C. GFK-Stabdurchschlag:

GFK-Stabdurchschläge im Betrieb sind ausgesprochene Langzeiteffekte, die mehrere Ursachen haben können. Vollständige Durchschläge wurden bei Kernen der Generation I beobachtet, wobei die Ursache nicht-hydrolysebeständige EP-Matrixsysteme waren. Die Hydrolysebeständigkeit wird heute durch die Bauartprüfung für das Kernmaterial nach VDE 0441 und IEC 61109 überprüft (Empfehlung: $HD \geq 2$). Weiterhin kann eine Zustandsbeurteilung bzgl. Feuchtigkeitseinflüssen durch eine Diagnose der dielektrischen Parameter (ϵ_r und $\tan \delta$) sowie der Glasübergangstemperatur T_g nach Kapitel 2 erfolgen. Wichtig hierfür ist, dass die Initialwerte im ungealterten Zustand bekannt sind bzw. aufgenommen wurden. Feuchtigkeitsbedingte Alterungsmechanismen reduzieren die Glasübergangstemperatur sowie die Durchschlagsfestigkeit und erhöhen die dielektrischen Parameter. Nach Ermittlung kritischer Grenzwerte für die entsprechenden Parameter kann mit diesen Verfahren eine effektive Zustandsdiagnose durchgeführt werden, mit welcher Isolatorenkollektive aus dem Betrieb anhand von repräsentativen Prüflingen (zerstörend) bewertet werden können. Weitere Ursache für Durchschläge, Teildurchschläge und damit verbundenen Teilentladungen können Kapillare oder Hohlräu-

me im Kern sein. Ein geeignetes Verfahren zur Zustandsbeurteilung für derartige Fehler ist die TE-Diagnose nach Kapitel 2. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, welche TE-Intensitäten und -Muster speziellen Fehlstellen zugeordnet werden und ob Grenzwerte festgelegt werden können.

D. Grenzflächendurchschlag (GFK-Schirmhülle):

Ursachen und Auswirkungen dieses Fehlermodus sind sehr gut bekannt. Der Fehler kann durch die Wahl geeigneter Materialien, Prozesse und Haftvermittler heute sicher vermieden werden. Eine Überprüfung erfolgt mit der Bauartprüfung nach IEC 61109 („Tests on Interfaces...“).

5 Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt zusätzliche Diagnosemöglichkeiten für Materialien und Komponenten von Verbundisolatoren auf. Die Qualität und Langzeitbeständigkeit des Kernes kann mit Hilfe thermischer und dielektrischer Diagnoseverfahren sowie anhand von TE-Untersuchungen bewertet werden. Die TE-Einsatzfeldstärken im GFK-Kern sind selbst nach Feuchtigkeitslagerung größer als 4 kV/mm. In GFK-Materialien von Verbundisolatoren treten im Betrieb dagegen nur elektrische Maximalfeldstärken unter 1kV/mm auf. Die für die Langzeitbeständigkeit der Schirmhülle wichtige Eigenschaft der Hydrophobie wird durch elektrische Felder beeinflusst. Im ungünstigsten Fall (Tangentialfeld) kann eine TE-Einsatzfeldstärke an Wassertropfen von 0,45 kV/mm (eff.) experimentell gefunden werden. Bzgl. der Schirmhülle muß bzgl. der Auslegung (Gestaltung von Isolierabstand, Koronaring und Schirmprofil) berücksichtigt werden, dass die Oberflächenfeldstärken an keiner Stelle einen Wert von 0,45 kV/mm überschreiten. Die aufgezeigten Verfahren können sowohl an neuwertigen als auch an betriebsgealterten Materialien bzw. Komponenten durchgeführt werden. Zur Zustandsbewertung und Festlegung alterungsrelevanter Grenzwerten sind umfangreiche Daten an neuen und betriebsgealterten Isolatoren zu ermitteln. Die Fehlerhäufigkeit im Betrieb von Verbundisolatoren ist mit der Einführung der 3.Generation vernachlässigbar klein geworden. Die erwähnten Diagnoseverfahren können die Aufklärung bisher nicht vollständig verstandener Ausfallursachen bzgl. Kernversagen oder Kriechspurbildung jedoch wesentlich unterstützen.

6 Literatur

- [1] Kunde, K.; Hennings, R.; Kuhl, M.; Schütz, A.; Janssen, H.; Stietzel, U.: New Experiences With

Composite Insulators, Paper 15-206, 37 th CIGRE Session, Paris, 1998

- [2] CIGRE-WG 15.14 „Interfacial Phenomena Affecting Electrical Insulating Properties in Composites“, ELECTRA 39, Juni 2002
- [3] Schnettler, A.: “Über den Einsatz Multivariater Statistik und Neuronaler Netze zur Teilentladungsdagnostik“, Shaker Verlag, Dortmund 1992, S.41.
- [4] Braunsberger, T.; Dziubek, A.; Kodoll W.; Schümann U.; Kurrat M.; “PD between water drops influencing hydrophobic processes on SI and EP-resin systems“, ISH August 2003, Tagungsband
- [5] STRI Guide 92/1, Hydrophobicity Classification Guide
- [6] Dietz, H.; Kärner H.C. Müller, K. H. u.a.: Latest Developments and Experience with Composite Longrod Insulators, 27 th CIGRE Session, Paris, 1986
- [7] Kuhl, M.: “FRP Rods for Brittle Fracture Resistant Composite Insulators“, Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No.2, April 2001, pp. 182-190.