Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 88 (1997)

Heft: 7

Artikel: Kunststoffisolatoren als Alternative : zum Isoliervermögen von Isolatoren mit polymerem Mantelwerkstoff : am Beispiel von Silikongummi

Autor: Büchner, Heinz / Schmuck, Frank / Zanetti, Arturo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902189

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Aufgrund spezifischer Vorteile werden für Freiluftanwendungen in der Mittelspannungs- und Hochspannungstechnik zunehmend Kunststoffisolatoren eingesetzt. Der vorliegende Beitrag geht den Gründen nach und verweist auf Unterschiede zwischen polymeren und keramischen Isolierstoffoberflächen bei simultaner Spannungs- und Fremdschichtbelastung. Er stellt Modelle zur Beschreibung des Isoliervermögens von Kunststoffisolatoren vor und präsentiert entsprechende Ergebnisse aus Freiluft- und Laborversuchen.

Kunststoffisolatoren als Alternative

Zum Isoliervermögen von Isolatoren mit polymerem Mantelwerkstoff – am Beispiel von Silikongummi

■ Heinz Büchner, Frank Schmuck und Arturo Zanetti

Der Marktanteil von Kunststoffisolatoren für Freiluftanwendungen in der Mittel- und Hochspannungstechnik ist progressiv wachsend. Neben den mechanischen Vorteilen von Kunststoffisolierungen (Explosions-, Erdbeben- und Vandalismussicherheit) unterscheidet sich das Verhalten von vergleichbaren polymeren und keramischen Isolierstoffoberflächen bei simultaner Spannungs- und Fremdschichtbelastung wesentlich. Der folgende Beitrag beschreibt diese Unterschiede. Er stellt bestehende Modelle zur Beschreibung des Isoliervermögens vor und präsentiert auch Ergebnisse aus Freiluft- und Laborversuchen, unter anderem aus dem Bereich «Verstärkte Kunststoffe» der Cellpack AG, der seit rund 38 Jahren faserverstärkte Isolierteile[1)] und seit ungefähr 8 Jahren Kunstoffisolatoren[2)] für eine internationale Klientel in der Hochspannungsisoliertechnik produziert. Die hervorragenden Eigenschaften von Kunststoffisolatoren widerspiegeln sich in den langjährigen positiven Betriebserfahrungen und tragen in zunehmendem Masse zur zuverlässigen Erzeugung und Verteilung von Elektroenergie bei.

Aufbau von Kunststoffisolatoren und Eigenschaften der Materialien

Aufbau

Der konstruktive Aufbau von Kunststoffisolatoren basiert auf Einstoff- oder Mehrstoffsystemen. Typische Isolatoren aus Einstoffsystemen bestehen heute aus Giessharz-Formstoffen, die erfolgreich bis in den Mittelspannungsbereich Anwendung finden. Charakteristisch für das Einstoffsystem ist, dass sowohl die mechanischen (Druck, Zug, Biegung) als auch die elektrischen Funktionen (Kriechweg) von *einem* Material übernommen werden.

Das Mehrstoffsystem ist durch mindestens zwei Materialkomponenten gekennzeichnet. Der klassische Verbundisolator, aus einem faserverstärkten Harzkern (Stab, Rohr) und polymeren Mantelwerkstoff bestehend, vereint verschiedene Ma-

[1)] Markenname: Cevolit
[2)] Markenname: Cevosil

Adresse der Autoren
Dipl.-Ing. *Heinz Büchner,* Verkaufsleiter
Dr.-Ing. *Frank Schmuck,* Produktlinienleiter
und Dipl.-Ing. *Arturo Zanetti,* Produktlinienleiter, Cellpack AG, Verstärkte Kunststoffe
5610 Wohlen

Formelzeichen

1K-System	SR-System, bestehend aus einer Komponente
2K-System	SR-System, bestehend aus zwei Komponenten
D_M	mittlerer Durchmesser, berechnet nach (Strunkdurchmesser + Schirmdurchmesser)/2
k_F	Faktor für Fremdschichtkennlinie
n	Anstiegsparamter
s	Schlagweite
t_s	Prüfzeit
t_{tr}	Transfer-Zeit (Zeit bis zum Erreichen hydrophober Fremdschicht-Eigenschaften)
$U_{ü}$	Überschlagspannung
$U_{ü0}$	Überschlagspannung im Neuzustand
$U_{üf}$	Überschlagspannung im Zustand Filmbelag
U_b	Betriebsspannung
U_S	Prüfspannung
U_{LL}	Leiter-Leiter-Betriebsspannung
$ü_k$	Kriechweg
d	Fremdschichtdicke
Θ_V	dynamischer Vorrückwinkel
Θ_R	dynamischer Rückzugswinkel
κ_e	Volumenleitfähigkeit
κ_N	Nebelleitfähigkeit
κ_s	Schichtleitfähigkeit
κ_{sp}	partielle Schichtleitfähigkeit

terialien mit einer Funktionsteilung entsprechend ihrer optimalen Eignung. In diese Kategorie sind auch bestehende Freiluftisolatoren aus keramischen Werkstoffen einzuordnen, die (vor Erreichen ihrer Armortisationszeit, Lebensdauer) bei Fremdschichtproblemen zum Teil mit sogenannten Coatings (1-Komponenten-Silikongummi-Systeme) beschichtet werden. Diese Massnahme verbessert temporär das Fremdschichtverhalten (Verringerung der Überschlagwahrscheinlichkeit). Die mechanischen Eigenschaften der Porzellanisolierung werden nicht beeinflusst, so dass die Nachteile gegenüber der Verbundisolierung (z. B. Explosions- und Erdbebensicherheit bei Apparateisolatoren) bestehen bleiben. Verbundisolatoren werden bis in höchste Spannungsebenen eingesetzt.

Materialeigenschaften von Kunststoffisolatoren

Einstoffsysteme bestehen heute überwiegend aus Epoxidharz-Formstoffen. Deren Struktur ist als teilkristallin zu bezeichnen. Bei einem bestehenden System sind die mechanischen und elektrischen Eigenschaften beispielsweise über den Gehalt sowie die Art und Behandlung des Füllstoffs einstellbar. Bei Verbundisolatoren (Mehrstoffsystem) werden heute verschiedene Harzsysteme (Vinylester, Epoxidharz) verwendet. Die verstärkenden Fasern bestehen aus E-Glas (Apparate) oder optional aus ECR-Glas (Langstabisolatoren). Der Kern bildet mikroskopisch ein heterogenes System (Fasern, Interface Faser-Harzmatrix, Harzmatrix), sein Verhalten kann im elastischen Bereich als homogen modelliert werden. Die Eigenschaften von Kernwerkstoffen, verstärkt mit ungeschnittenen (sog. endlosen) Fasern, sind durch ein Strukturverhalten geprägt. Die Stäbe für Langstabisolatoren sind im allgemeinen unidirektional (in Achsrichtung) verstärkt, während die Rohre für Apparateisolatoren gemäss dem Anforderungsprofil optimiert werden (Wickelwinkel zwischen 0 und 90°).

Typische Mantelwerkstoffe für Kunststoffisolatoren in den Anwendungsfeldern Mittel- und Hochspannung sind:

- Silikongummi SR (*H*och-*T*emperatur-*V*ernetzend HTV, *R*aum-*T*emperatur-*V*ernetzend RTV, *L*iquid *S*ilicone *R*ubber LSR)
- *E*thylene *P*ropylene *R*ubber EPR (*E*thylene *P*ropylene *M*onomer EPM, *E*thylene *P*ropylene *D*ien-*M*onomer EPDM)
- *Ep*oxidharz EP (Bisphenol, Cycloaliphat)
- Polyolefine (*Poly*ethylen PE, *v*ernetztes *Poly*ethylen VPE)
- Polyurethane
- Polyfluorkarbone (*Poly*tetra*fluor*ethylen PTFE)

Die vorliegenden Ergebnisse aus Freiluft- und Laboruntersuchungen zeigen, dass Silikongummi ausgezeichnete Voraussetzungen für einen Mantelwerkstoff hoher Lebensdauer zeigt [1–3]. Für die Auslegung von Isolatoren mit SR als Mantelwerkstoff sind sowohl Standard- als auch empirische Dimensionierungsregeln zu berücksichtigen – nur die Symbiose «optimales Design + hochwertiger Isolierstoff» sichert eine lange Lebensdauer!

Die Vielfalt der verfügbaren Silikongummiarten für Anwendungen in der Freiluftisoliertechnik ist gross. Eine übliche Terminologie zur Unterscheidung ist in Bild 1 dargestellt. HTV-Systeme werden traditionell und aus Kostengründen überwiegend für Langstabisolatoren verwendet. Apparateisolatoren werden abhängig von der Technologie der Beschirmung sowohl mit HTV- als auch mit RTV-2-Komponenten-Systemen (RTV-2K-Systemen) versehen. RTV-1-Komponenten-Systeme (RTV-1K-Systeme) werden als Coatings verwendet. LSR-Systeme sind für diese Anwendung eine

	Silikongummi-Art			
	HTV-1K[1)]	LSR-2K	RTV-2K	RTV-1K
Mischviskosität in mPas	350 000…pastös	60 000…200 000 …350 000	18 000…65 000 …80 000	3000
Verarbeitungstemperatur in °C	150…180…250	100…200	25…200	25
Verarbeitungs-(Topf-)Zeit bei 20 °C	> 1 Monat	> 3 Tage	einige Stunden	< 1 Stunde
chemische Grundreaktion	peroxidisch	Addition	Addition	Kondensation
Reissfestigkeit in N/mm² (Reissdehnung)[2)]	8(600)	5(400)…6(450)	5(340)…5.5(450)	3(250)
Weiterreisswiderstand (N/mm)[2)]	20	20…25	25…20	6
Hydrophobieverhalten (Rückzugswinkel, Dynamik des Wiederkehrs und Transfers)	Die Eigenschaften sind über die Formulierung des Silikongummis, die Art und Behandlung des Füllers, den Füllgrad sowie die Herstellungstechnologie einstellbar. Die Materialstärke des SR-Mantelwerkstoffes beeinflusst bei Unterschreiten eines bestimmten Wertes das Hydrophobieverhalten.			
Erosions- und Kriechspurfestigkeit				

Bild 1 Eigenschaften von SR-Arten für die Isoliertechnik im Mittel- und Hochspannungsbereich

1) mit Füller [Aluminiumtrihydrat ATH oder Kieselsäure $(SiO_2)_n$] angereichert, allgemein >50 Masseprozent; *2)* Eigenschaften sehr stark von Vulkanisationsparametern abhängig. Die quantitative Übersicht entstand nach Informationsschriften der Firmen Bayer und Wacker.

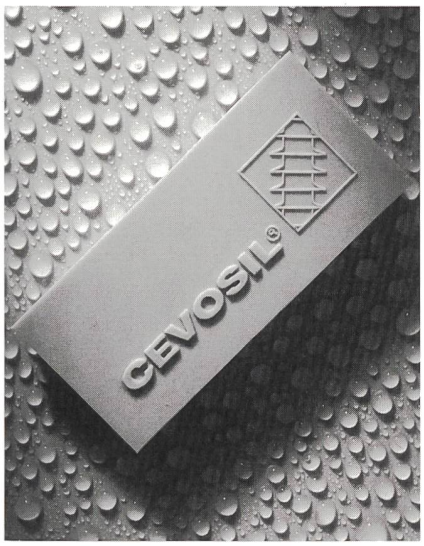


Bild 2 Wirkung der Hydrophobie

vergleichsweise «junge» SR-Art, die hinsichtlich Eigenschaftsbild eine Mittelstellung einnehmen. Die signifikant verschiedenen Mischviskositäten sind eine Ursache für verschiedene Beschirmungstechnologien; mit steigenden Werten sinkt im allgemeinen das in einem Prozess verarbeitbare Volumen. Ein Vorteil der chemischen Grundreaktion «Addition» besteht in der Vernetzung ohne Beiprodukte. Hinsichtlich Hydrophobieverhalten und Erosions- und Kriechstromfestigkeit können sich Tendenzen mit einer gewissen Gegenläufigkeit abzeichnen. Tendenz bedeutet, dass die Materialien eigenschaftsspezifisch optimierbar sind: Die kommerziell verfügbaren Systeme in der Freiluftisoliertechnik zeigen im allgemeinen gute Eigenschaften betreffs beider Kriterien.

Modell des Fremdschichtverhaltens von Isolatoren mit polymeren Mantelwerkstoffen

Überschlagspannung als Bewertungsgrösse des Oberflächenzustandes

Für eine Isolierstoffoberfläche besteht bei gegebener Verschmutzung (Leitfähigkeit der elektrolytisch leitfähigen Fremdschicht) ein direkter Zusammenhang zwischen Benetzungszustand und Überschlagspannung. Polymere Mantelwerkstoffe weisen im Neuzustand eine hydrophobe Oberflächenwirkung auf, die sich in der Bildung von gegeneinander isolierten Tropfen manifestiert (Bild 2). Diese Eigenschaft ist bekanntermassen auf die niedrige Oberflächenenergie von Polymeren zurückzuführen, so dass die Wechselwirkung mit der Grenzflächenspannung des benetzenden Wassers im Vergleich zu keramischen Oberflächen niedriger ist. Die Überschlagspannung im Neuzustand von Kunststoffisolatoren ist allgemein von folgenden Faktoren abhängig:

- hydrophobe Oberflächenwirkung des polymeren Mantelwerkstoffs
- Rauheit der Isolierstoffoberfläche
- Schirmdesign («protected parts»), Einbaulage (geneigt, horizontal, vertikal)
- Verteilung des elektrischen Feldes durch den Gesamtaufbau/Verwendungszweck (z. B. Hängeisolatoren oder Durchführungen)

Im Falle ausgeprägter Hydrophobie kann die Beeinflussung des elektrischen Grundfeldes (ungestörtes Feld im trockenen Zustand) durch einen Fremdschichtbelag auf der äusseren Grenzfläche mit kapazitivem Charakter (Tropfen-Luft-Tropfen-...-Funkenstrecken) modelliert werden und ist oft vernachlässigbar. Im Gegensatz dazu kann bei keramischen Isolierungen das elektrische Grundfeld durch einen ohmschen Belag auf der äusseren Grenzfläche signifikant beeinflusst werden.

Die Messung der Überschlagspannung (Bild 3) einer gegebenen Isolierung mit hydrophobem Mantelwerkstoff führt zu relativ hohen Werten, die abhängig von den Prüfbedingungen (Prüfkörpergeometrie, Prüfparameter) den Wertebereich der Trockenüberschlagspannung erreichen können. Die Abhängigkeit von der Volumenleitfähigkeit (Anstiegsparameter) ist vergleichsweise gering.

Im Gegensatz dazu reagieren technisch saubere keramische Oberflächen bei Befeuchtung mit einer vollständigen Benetzung; es formiert sich ein Filmbelag. Dieser Filmbelag wird durch die Wechselwirkung (Adhäsion) zwischen der Grenzflächenspannung des Wassers und der höheren Grenzflächenenergie des keramischen Materials erzwungen. Eine keramische Isolierung mit vergleichbarer Geometrie zeigt daher eine signifikant niedrigere Überschlagspannung bei elektrolytischer Fremdschichtbelastung. Der Überschlagprozess bei Filmbelag entspricht dem klassischen Fremdschichtüberschlag; zwischen Überschlagspannung und integraler Schichtleitfähigkeit

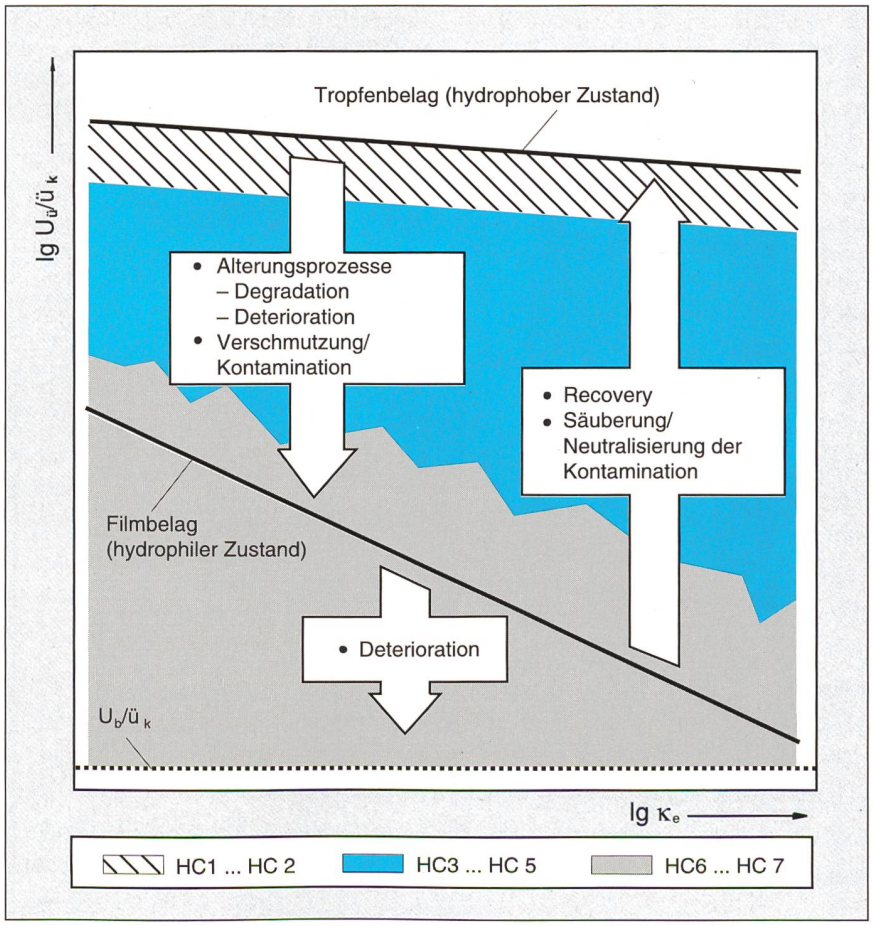


Bild 3 Beschreibung des Oberflächenzustandes mit der Überschlagspannung

$U_ü / ü_k$ bezogene Überschlagspannung
κ_e Volumenleitfähigkeit der Fremdschicht

Bild 4 Grabende Erosion in einem SR-HTV

bestehen empirisch ermittelte, funktionale Zusammenhänge. Im Vergleich zum Neuzustand ist neben den kleineren Absolutwerten die Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad grösser (Anstiegsparameter).

Durch Veränderungen der Isolierstoffoberfläche, beispielsweise durch Alterungsprozesse, kann die Hydrophobie des Neuzustandes verlorengehen, das Isoliervermögen sinkt [4]. Mit Erreichen des Zustandes Filmbelag entsprechen die Werte der Überschlagspannung denen eines vergleichbaren Porzellandesigns. Die Veränderungen der Isolierstoffoberfläche durch Alterungsprozesse (beispielsweise durch Korona, UV-Strahlung, Oberflächen-Teilentladungen, thermo-ionisierte Vorlichtbögen) können einen temporären Charakter (Degradation) zeigen oder von bleibender Natur (Deterioration) sein. Neben den im englischen Sprachraum gebräuchlichen Begriffen «ageing, degradation, deterioration» hat sich im deutschen Sprachraum auch die Terminologie «reversible und irreversible Veränderung» etabliert. Unter letztgenannter ist umgangssprachlich eine «echte», da irreversible Alterung zu verstehen. Natürliche Verschmutzungen im allgemeinen wie auch Kontamination (Zersetzungsprodukte durch Korona, benetzend wirkende Radikale) können zur Absenkung des Isoliervermögens durch verminderte hydrophobe Wirkung des Mantelwerkstoffes führen und durch Reinigung bzw. Neutralisation eliminiert werden. Im Vergleich zu anderen polymeren Mantelwerkstoffen weist SR die Eigenschaft einer Erholung (Recovery) der Hydrophobie auf. Für diesen Vorgang sind zwei wesentliche Prozesse verantwortlich [5]:

- Reorientierung der hydrophob wirkenden Gruppe zur Oberfläche
- Migration/Diffusion von niedermolekularen (ölartigen) Bestandteilen in die Fremdschicht oder auf erodierte Oberflächen

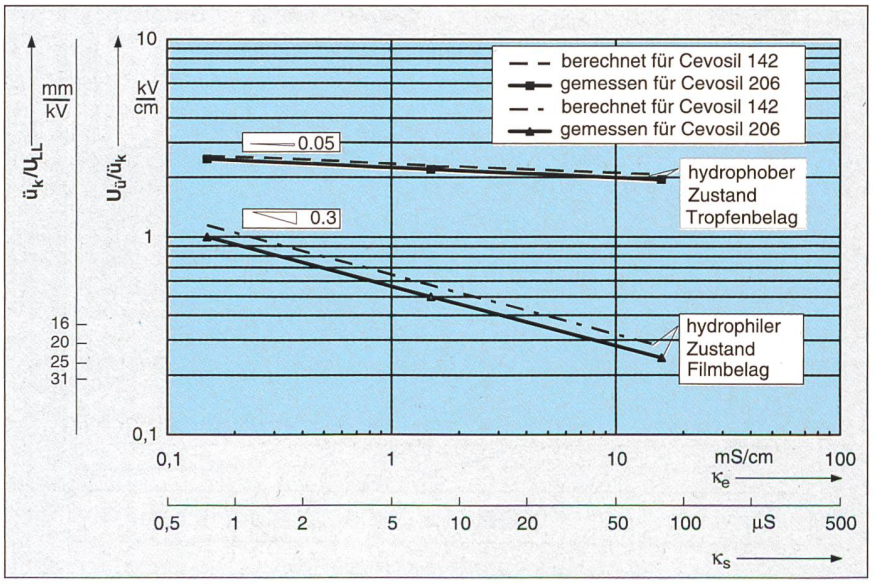


Bild 5 Überschlagspannung im Zustand des Tropfenbelages und Filmbelages

$U_{\ddot{u}}$ / $\ddot{u}_k$ bezogene Überschlagspannung
$\ddot{U}_k/U_{LL}$ spezifischer Kriechweg nach IEC 815
κ_e Volumenleitfähigkeit der Fremdschicht
κ_s integrale (= partielle) Schichtleitfähigkeit

Letztgenannter Prozess ist aufgrund seiner Wirkungsintensität von dominierender Relevanz. Aus der Literatur sind zum Verhalten von SR-Mantelwerkstoffen zusammenfassend folgende Ergebnisse bekannt [2]:

- Isolatoren aus SR zeigen eine höhere Hydrophobie als Mantelwerkstoffe auf der Basis von EPR,
- Isolatoren aus EPR verlieren an Hydrophobie bei obengenannten Alterungsprozessen,
- Isolatoren aus SR können an Hydrophobie bei Oberflächenentladungen verlieren, weitere Alterungsprozesse wie UV-Strahlung oder Anlagerung von Verschmutzung sind vernachlässigbar.

Zur optischen Bewertung des Ist-Zustandes der hydrophoben Oberflächenwirkung eines Kunststoffisolators wurde durch das Swedish Transmission Research Institute (STRI) ein visueller Skalierungskatalog eingeführt. Dieses vergleichsweise subjektive Verfahren erlaubt eine hinreichende qualitative Bewertung des Oberflächenzustandes, um beispielsweise die Notwendigkeit einer Reinigung der Isolatoroberfläche zu definieren. Die Abkürzung HC1 ... HC7 beschreibt die Skalierung in Hydrophobieklassen (Hydrophobicity Class); mit zunehmender Klasse sinkt der Grad der Hydrophobie.

Im Zustand des Filmbelages treten Ableitströme im mA-Bereich auf, die zu thermo-ionisierten Vorlichtbögen, in der Literatur auch als «dry band arcing» bezeichnet, führen. Stabilisiert sich ein entsprechender Vorlichtbogen örtlich (Designproblem) und zeitlich (Wechselwirkung zwischen Verschmutzungsklasse und Feuchtigkeitsfolge/-dauer), kann der polymere Mantelwerkstoff (aber auch Porzellan) thermisch-oxidativ zerstört werden. Typische Schadbilder sind grabende Erosion (Bild 4) und Kriechspurbildung (Tracking). SR zeigt bei einer intensiven Materialschädigung das Schadbild der grabenden Erosion, in deren Folge sich oxidiertes Material (mit hohem SiO_2-Gehalt und niedrigem C-Gehalt) von der Oberfläche abhebt. Die vergleichsweise geringe Leitfähigkeit der Spuren ist ursächlich auf die SR-Struktur (-Si-O-Si-Hauptkette) zurückzuführen. Im Gegensatz dazu bilden polymere Mantelwerkstoffe mit ausgeprägter Kohlenstoffstruktur (-C-C-Hauptkette) typische Kriechspuren mit vergleichsweise hoher intrinsischer Leitfähigkeit. Diese Eigenleitfähigkeit ist unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Fremdschicht und kann ab

einem bestimmten Grad der Kriechwegüberbrückung zum Überschlag führen.

Das folgende Beispiel (Bild 5) beschreibt quantitativ das Verhalten von Verbund-Hohlisolatoren (Cevosil 142 und 206) für die Zustände Tropfenbelag und Filmbelag. Die Volumenleitfähigkeit der Fremdschicht (Abszissenachse) entspricht dem Wert der Nebelleitfähigkeit. Diese Grösse ist als Volumeneigenschaft einfach mit einer Messsonde bestimmbar. Im Neuzustand (Tropfenbelag) ergeben sich die erwartet hohen Werte. Der Anstiegsparameter von 0,05 ist von der materialspezifischen Hydrophobie und der Oberflächengüte abhängig. Typische Werte liegen zwischen 0,01 und 0,1. Erstgenannter Wert wurde für gewachste Glasoberflächen in Laboruntersuchungen erzielt. Aus einem empirischen Datenpool kann auf das Verhalten von Isolatoren mit vergleichbarem Schirmprofil und identischem SR, aber kleinerem/grösserem Durchmesser extrapoliert werden. Die etwas höheren Werte im Neuzustand bei kleinerem Durchmesser sind auf den Flächen- bzw. Volumeneffekt (Eintrittswahrscheinlichkeit für Zündbedingung des Überschlaglichtbogens) zurückzuführen. Im Zustand Filmbelag (künstlich eingestellt) ergibt sich neben den niedrigeren Absolutwerten der Anstiegsparameter von 0,3. Für diesen Zustand sind die Volumenleitfähigkeit κ_e und die partiell oder integral messbare Schichtleitfähigkeit κ_s über die Fremdschichtdicke d (im Beispiel 50 µm) multiplikativ verknüpft ($\kappa_s = \kappa_e \cdot d$). Die Relation der gemessenen Zusammenhänge für beide Zustände zu den Dimensionierungsempfehlungen für Porzellanisolatoren (IEC 815) wird mit der zweiten Ordinatenachse veranschaulicht. Es zeigt sich deutlich die Redundanz im Isoliervermögen eines Kunststoffisolators, wenn die Oberflächenhydrophobie keine signifikante Absenkung während der Lebensdauer der Isolierung erfährt. Weltweite Erfahrungen mit Cevosil-Isolatoren zeigen, dass abhängig von den klimatischen Bedingungen In-situ-Reduktionen des Kriechweges gegenüber Porzellanisolatoren möglich sind. Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist folgende Philosophie zur Auswahl des Mantelwerkstoffs:

(1) hydrophobe Oberflächenwirkung über die Gesamtlebensdauer

(2) schneller Transfer hydrophober Eigenschaften in angelagerte Fremdschichten

(3) angemessene Kriechstromfestigkeit für das temporäre Erreichen des Zustandes Filmbelag

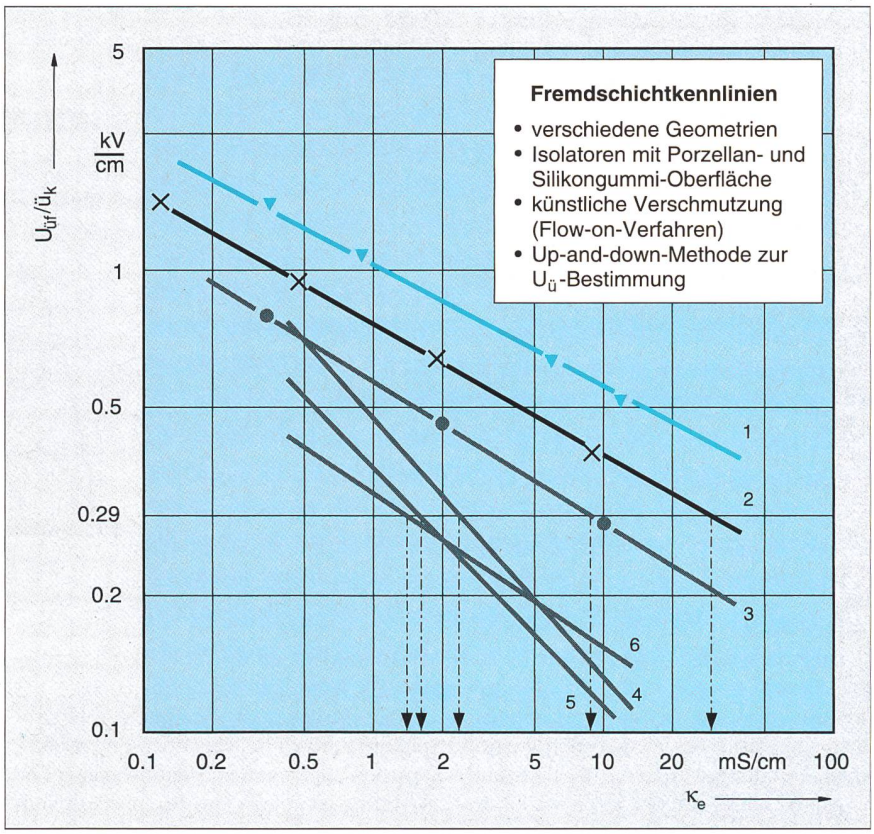


Bild 6 Vergleich verschiedener Geometrien bei Filmbenetzung

$U_{üf}/ü_k$ bezogene Überschlagspannung
κ_e Volumenleitfähigkeit der Fremdschicht
1 Stabisolator, D = 30 mm, $ü_k/s$ = 1
2 Verbundisolator mit SR-Schirmen, D_M = 80 mm, $ü_k/s$ = 2,3
3 Verbund-Hohlisolator, D_M = 254 mm, $ü_k/s$ = 2,2
4 Porzellan-Hohlisolator, D_M = 224 mm, $ü_k/s$ = 3,8
5 Porzellan-Hohlisolator, D_M = 278 mm, $ü_k/s$ = 3,4
6 Porzellan-Hohlisolator, D_M = 303 mm, $ü_k/s$ = 3,6

Die Eigenschaften gemäss (1) und (2) sind die wesentliche Voraussetzung, den Ableitstrom auf niedrige Werte (µA-Bereich) zu begrenzen (sog. suppression mechanism). Damit wird der Einsatz einer intensiven Schädigung (grabende Erosion, Kriechspurbildung) vermieden *und* die Wahrscheinlichkeit eines Überschlags minimiert. Insbesondere Isolatoren für Apparate (relativ grosse Durchmesser) sind auch bei hohem Widerstand gegen intensive Schädigung (Trackingbeständigkeit), aber schlechten Hydrophobieeigenschaften erheblich überschlaggefährdet.

Designeinfluss auf das Überschlagverhalten im Zustand Filmbelag

Um ausschliesslich den Einfluss des Isolatordesigns ohne innere Bauteile oder feldsteuernde Massnahmen auf das Isoliervermögen bewerten zu können, werden verschiedene Fremdschichtkennlinien (hydrophiler Zustand) gegenübergestellt (Bild 6). Die künstliche Verschmutzung wird im sogenannten Flow-on-Verfahren aufgetragen; die Zusammensetzung der Dispersion erzwingt gleichmässige Filmbeläge auf Porzellan- und Kunststoffoberflächen. Messgrössen sind die Überschlagspannung und die integrale Schichtleitfähigkeit, die für die Darstellung in die korrespondierende Volumenleitfähigkeit (Fremdschichtdicke 50 µm) umgerechnet wurde. Der dünne Stab (Kurve *1*) ohne Schirme hat erwartungsgemäss die höchste spezifische Überschlagspannung, die Fremdschichtbreite (Durchmesser) ist klein, und der Ausnutzungsgrad des Kriechweges ist 1. Der Begriff Ausnutzungsgrad quantifiziert das Verhalten des Vorlichtbogens, in seiner Verlängerungsphase den Kriechweg vollständig oder nur teilweise zu nutzen. Die Werte eines Stabes werden im allgemeinen als Referenz verwendet. Kurve *2* beschreibt das Verhalten eines Langstabisolators aus Kunststoff mit einem Strunkdurchmesser von ungefähr 30 mm. Durch die höhere mittlere Fremdschichtbreite (grosse Schirmausladung) liegen die Werte tiefer als die der Kurve *1*. Langstabisolatoren aus Porzellan benötigen mittlere Strunkdurchmesser von ungefähr 75 mm für vergleichbare mechanische Festigkeiten, so dass sich niedrigere Werte einstellen werden.

Die Möglichkeiten des Designs (Schirmform, Ausladung usw.) sind bei Kunststoffisolatoren vielfältiger. Das Verhalten des Hohlisolators Cevosil 206 (entspricht D_M=254 mm) beschreibt Kurve *3*. Aufgrund des grösseren mittleren Durchmessers werden niedrigere Werte als für die Langstabisolatoren gemessen. Aus der Lage der Kurve *3* im Vergleich zur Kurve *1* sowie der durchgeführten optischen Bewertung der Lichtbogen-Verlängerungsphase kann ein Ausnutzungsgrad des Kriechweges von *1* abgeleitet werden. Die Kurven *4–6* quantifizieren das Verhalten von Hohlisolatoren aus Porzellan. Aufgrund der fehlenden hydrophoben Oberflächenwirkung sind diese Isolatoren stark überschlaggefährdet und wurden daher mit einem höheren spezifischen Kriechweg ($\ddot{u}_k/s$=3,4–3,8) ausgestattet. Das führt unter den gewählten Prüfbedingungen zu einem schlechten Ausnutzungsgrad des Kriechweges; die Vorlichtbögen überbrücken nach ihrer Zündung die Schirmteilungen, und der Überschlag tritt bei niedrigeren spezifischen Spannungswerten ein. Der Ausnutzungsgrad hängt von der Stromstärke der Vorlichtbögen ab (proportional dem Verschmutzungsgrad), so dass die Anstiegsparameter signifikant höhere Werte aufweisen. Der eingezeichnete Wert von 0,29 kV/cm entspricht der Dimensionierungsgrösse 20 mm/kV (IEC 815). Es zeigt sich deutlich, dass bei entsprechender Designwahl mit Kunststoffisolatoren grösseren Durchmessers ein besseres Überschlagverhalten auch im Zustand Filmbelag erreichbar ist.

Wirkung von Silikongummi auf angelagerte Fremdschichten

Silikongummi als Mantelwerkstoff ist im Vergleich zu PE oder EPR ein kostenintensiveres Material. Die mittlerweile langjährige Betriebserfahrung mit SR-Isolierungen hat aber gezeigt, dass mit der transferablen Hydrophobie ein Eigenschaftsbild existiert, das in den meisten Anwendungsfällen die Kosten für Wartung (Reinigung) eliminiert und folglich die Unterhaltskosten reduziert.

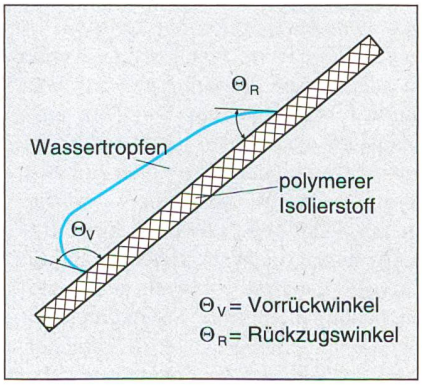
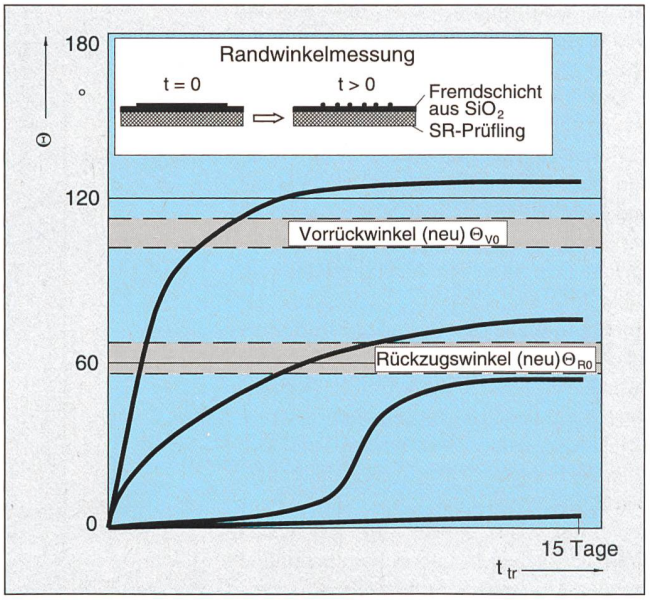


Bild 7 Dynamischer Randwinkel als Messgrösse

Bild 8 Quantitative Verläufe des dynamischen Randwinkels

Θ dynamischer Randwinkel

t_{tr} Recovery-(Transfer-) Zeit



Der Vorgang der transferablen Hydrophobie führt zu hydrophoben Eigenschaften der angelagerten Fremdschicht. Die Wirkung ist beispielsweise mit der quantitativen Bewertung der Tropfenform auf entsprechenden Oberflächen nachweisbar. Ein eingeführtes Verfahren ist die Messung des dynamischen Randwinkels [6] (Bild 7). Die Korrelation zur Fremdschichtbelastung/Befeuchtung unter Betriebsbedingungen (mittlere Feldstärken im Bereich von 0,3 kV/cm) ist modellhaft gegeben; bei geringfügigen Feuchtigkeitsmengen (Taubelag) kann der Vorrückwinkel und bei Erreichen der Fliessgrenze der Rückzugswinkel herangezogen werden. Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass bei erhöhter spezifischer Beanspruchung die Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche durch die Feldwirkung deformiert und dann ebenfalls Rückzugswinkel wirksam werden.

Die Dynamik des Randwinkelanstiegs ist ein Mass für die Fähigkeit der untersuchten SR, die hydrophobe Oberflächenwirkung bei Verschmutzung wieder herzustellen. Folgende Einflüsse können diesbezüglich getrennt werden:

- Art (Formulierung) des SR
- Technologie der Herstellung (Vulkanisationsprozess)
- Menge und Art/Behandlung des Füllstoffs
- Intensität und Qualität der Fremdschichtbelastung
- klimatische Bedingungen

Auswertungen der Literatur sowie eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass für einen gegebenen SR-Typ mit zunehmendem Anteil des anorganischen Füllers die Dynamik sinken kann. Typische Verläufe für eine definierte Fremdschicht sind im Bild 8 gezeigt. Die Fremdschicht wurde in der Art zusammengestellt, dass zum Zeitpunkt t=0 die Randwinkel den Wert 0 annehmen (keine hydrophobe Wirkung). Die dargestellten Verläufe entsprechen dem gemessenen Verhalten verschiedener SR-Typen. Während der Verlauf der einzelnen Vorrückwinkel quantitativ vergleichbar ist, reagiert der Rückzugswinkel vielfältiger. Das Überschreiten der Ausgangswerte ohne Fremdschicht Θ_{V0} und Θ_{R0} ist auf die Rauhigkeit der Fremdschicht zurückzuführen. Werte unter 30° gelten als hydrophiles Verhalten.

Die Phänomene des Hydrophobietransfers sind noch nicht umfänglich geklärt. Abschätzungen zur Lebensdauer sowie zum Teil eine mehr als 20jährige Betriebserfahrung lassen die Schlussfolgerung zu, dass diese Eigenschaft in dem technisch relevanten Bereich von 30 bis 40 Jahren bestehen bleibt. Die verbreitete Theorie, dass niedermolekulare Bestandteile aus dem SR in die Fremdschicht diffundieren, gilt als sehr wahrscheinlich. Gesamthaft hat diese Eigenschaft das Verhalten von SR-Freiluftisolierungen so positiv beeinflusst, dass EPR-Anwender mit der Formulierung von SR/EPDM-Mischelastomeren (Alloys) diese Charakteristik ebenfalls integrieren möchten.

Freilufterfahrungen mit SR-Isolatoren

Nachfolgende Ergebnisse stammen aus einer rund 20monatigen Versuchsinstallation in einem Freiluftversuchsfeld in einem extrem verschmutzten Gebiet. Hauptemittent war ein nahegelegenes

Werk zur Herstellung von Düngemitteln. In der Verteilstation 123 kV/30 kV mussten die Porzellanisolatoren für Fremdschichtklasse 4 (pollution level IV= 31 mm/kV) ausgelegt werden. Das zyklische Behandeln mit Silikonfett war zur Vermeidung von Überschlägen unbedingt notwendig. Die ausgesetzten Modellisolatoren waren aus einem niedriggefüllten SR-HTV hergestellt. Die spezifische Spannungsbeanspruchung betrug im Gegensatz zu jener der Porzellanisolatoren erhöhte 0,29 kV/cm (=20 mm/kV – pollution level II).

Bewertungsgrössen für diesen Versuch waren die partielle Schichtleitfähigkeit und die visuelle Einschätzung von Vorlichtbogen-Aktivitäten. Bei Messungen der partiellen Schichtleitfähigkeit mit einer Saugstreifensonde wird auf einem Oberflächenquadrat die Benetzung erzwungen; der Anstieg der Ausgangsleitfähigkeit ist ein Mass für die dissoziierfähigen Fremdschichtbestandteile. Dieses Verfahren ist für Porzellan- und Kunststoffisolatoren anwendbar. Die Messzeiten sind bei SR-Isolierungen durch die hydrophobierten Fremdschichten grösser; es werden auch nicht alle ionischen Bestandteile für den Anstieg der Ausgangsleitfähigkeit wirksam. Bild 9 dokumentiert die Einzel- und Maximalwerte über den Zeitraum der Messung. Ab Juli 1992 war der Emittent geschlossen, was seine Widerspiegelung in einer kontinuierlichen Verringerung der Fremdschichtbelastung fand. Während der gesamten Betriebszeit wurden keine Vorlichtbögen beobachtet. Das korreliert mit dem Ergebnis der visuellen Bewertung der Isolierstoffoberflächen nach dem Freiluftversuch, dass keine Erosion oder Kriechspurbildung nachweisbar war.

Die Prüfkörper wurden mit den natürlichen Fremdschichten einer Bewertung zugeführt. Messgrösse ist die Überschlagspannung (Bild 10) nach 2stündiger Nebelbelastung ohne Spannungsbeanspruchung. Die Volumenleitfähigkeit des Nebels wurde mit κ_e=0,15 mS/cm (clean fog) festgelegt, um den Anstieg durch dissoziierfähige Bestandteile in der Fremdschicht bewerten zu können. Die Isolatoren wurden mit Zwischenarmaturen versehen, um die Überschlagspannung auf adäquate Werte zu begrenzen. Die im Neuzustand gemessenen Werte liegen im erwarteten Bereich. Aber auch mit der natürlichen Fremdschicht zeigen die Oberflächen ein vergleichsweise hohes Isoliervermögen. Visuell wurde festgestellt, dass die Verschmutzungsschicht nur unvollständig benetzbar ist – eine eindeutige Indikation für hydrophobe Eigenschaften. Das Erscheinungsbild des Überschlagsmechanismus bestätigte ebenfalls die hydrophobe Wirkung – spontaner Überschlag ohne sichtbare Vorlichtbögen (keramische Oberflächen zeigen im allgemeinen eine ausgeprägte Vorlichtbogenaktivität). Die Oberfläche der Isolatoren wurde nach dem Versuch manuell gereinigt; ein signifikanter Unterschied zum Isoliervermögen im Neuzustand konnte nicht nachgewiesen werden. Folgender theoretischer Vergleich ist interessant: Unter der Annahme, dass sich auf der Isolierstoffoberfläche ein Filmbelag mit einer für die mittlere partielle Schichtleitfähigkeit repräsentativen Volumenleitfähigkeit befindet, kann ein spezifischer Wert für den Zustand Filmbelag von <0,5 kV/cm abgeleitet werden. Die Differenz zu den tatsächlich gemessenen Werten >1 kV/cm ist ein weiterer Beweis für die Wirksamkeit des Hydrophobietransfers.

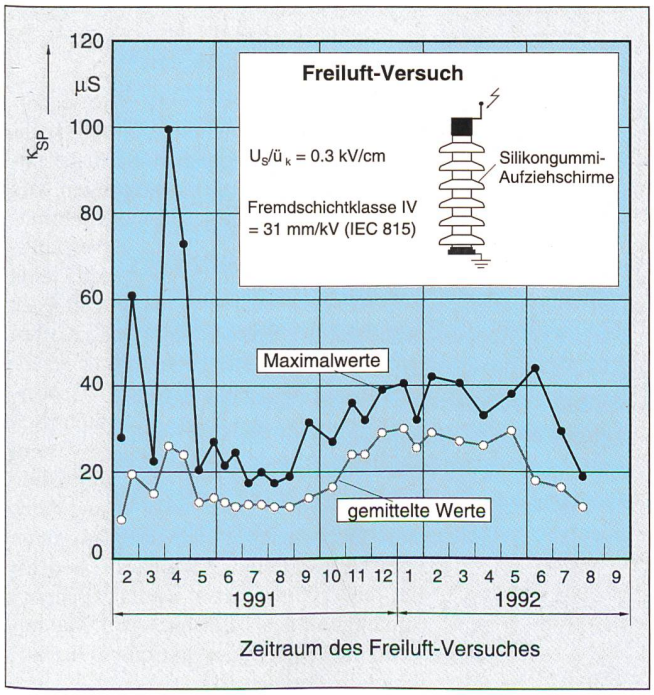


Bild 9 Werte der partiellen Schichtleitfähigkeit

κ_{SP} partielle Schichtleitfähigkeit

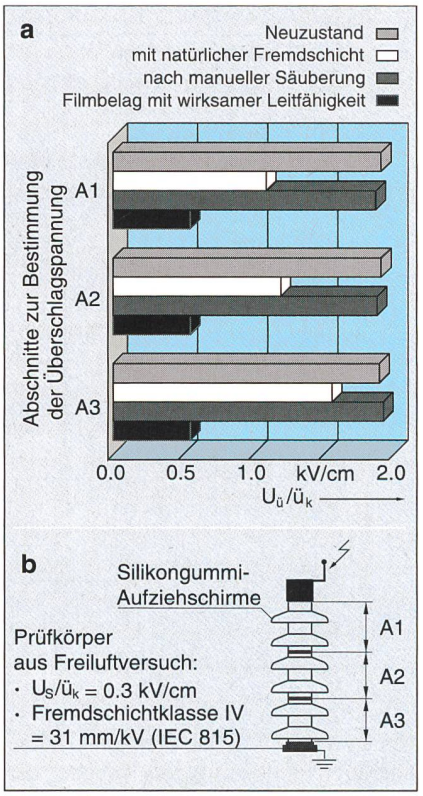


Bild 10 Überschlagspannung nach Freiluftbewitterung

a Überschlagspannung bei verschiedenen Oberflächenzuständen

b Abschnitte des Prüfkörpers zur Bestimmung der Überschlagspannung

Zeitraffende Alterungsversuche von SR-Isolierungen unter Laborbedingungen

Die folgenden Ergebnisse wurden zum Teil am identischen Material (SR-HTV) des im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Freiluftversuches gemessen. Zur Bewertung der Alterungsbeständigkeit von Kunststoffen oder Kunststoffisolatoren wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt; Fragen zur Strenge der Prüfbedingungen sowie Übertragbarkeit der Messergebnisse sind nicht umfänglich geklärt. Dieser Umstand ist auch auf die ständige Entwicklung neuer eigenschaftsoptimierter Isolierstoffe zurückzuführen. Ein oft verwendetes Verfahren zur Skalierung von Isolierstoffen ist der Salznebelversuch. Unter simultaner Nebelbelastung und Spannungsbeanspruchung

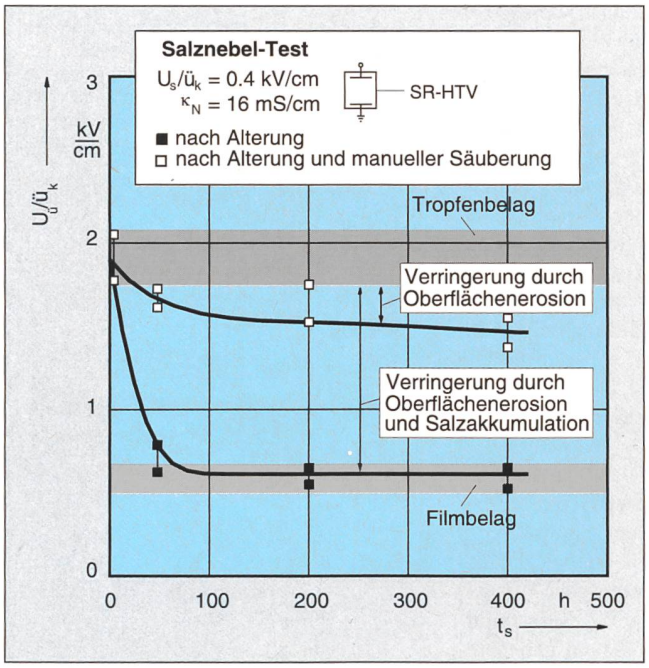


Bild 11 Verlauf der Überschlagspannung über der Prüfzeit

$U_ü / ü_k$ bezogene Überschlagspannung
t_s Prüfzeit

werden die Prüfkörper «gealtert». Diese Alterung führt zu einem Abbau der hydrophoben Oberflächenwirkung oder auch zur Bildung intensiver Schadbilder (siehe auch Bild 4). Einen typischen Verlauf der Überschlagspannung über der Prüfzeit zeigt Bild 11. Die Nebelleitfähigkeit für diesen Versuch entspricht dem in IEC 1109 genormten Wert und führt bei der einfachen Geometrie der Prüfkörper zu einem schnellen Verlust der Hydrophobie. Die Schädigung der Oberfläche erfolgt durch flächenhafte Erosion, die Überschlagspannung bleibt nach Erreichen des Zustandes Filmbelag konstant. Nach manueller Reinigung und unmittelbar anschliessender Nebelbelastung (2 h) und Messung der Überschlagspannung ist gegenüber dem Neuzustand eine Absenkung nachweisbar. Diese ist auf die erhöhte Rauhigkeit durch erosiven Abtrag zurückzuführen. Nach heutiger Kenntnis der dynamischen Vorgänge ist zu erwarten, dass nach Reinigung und einer gewissen Pausenzeit ohne Nebel die ursprünglichen Werte nahezu erreicht werden können. Problematisch ist die Übertragbarkeit derartiger Messergebnisse auf Freiluftbedingungen, wenn in situ der hydrophile Zustand nicht erreicht wird. In Anlehnung an das dynamische Verhalten von SR-Isolierungen mit Hydrophobietransfer wurden zum Teil Testverfahren mit zyklischen Versuchsabläufen (Trockenzeiten/Pausenzeiten) eingeführt. Der im oben beschriebenen Freiluftversuch an natürlichen Fremdschichten nachgewiesene Hydrophobietransfer kann auch nach Salznebelprüfungen gemessen werden (Bild 12). Für Vergleichszwecke erfolgte der Bezug der Überschlagspannung auf den Wert des Neuzustandes ($U_{ü0}$). Die Prüfkörper aus LSR A+B sind Schirmisolatoren, LSR B ist ein höher gefülltes Material. SR-HTV besteht aus plattenförmigen Prüfkörpern. Die Werte der Schirmisolatoren sinken während der Prüfzeit von 115 h nicht auf die des Zustandes Filmbelag. Neben möglichen Materialunterschieden verlängert die Schirmgebung die Zeit bis zum Erreichen des hydrophilen Zustandes im Vergleich zur einfachen plattenförmigen Geometrie. Nach Testende und 24 h Pausenzeit ohne Nebelbelastung wird ein Anstieg der Überschlagspannung gemessen (Hydrophobietransfer). Nach manueller Reinigung und unmittelbar folgender Nebelbelastung (2 h) erreicht die Überschlagspannung zwischen 70 und 80% des Ausgangswertes. Diese Verringerung ist ebenfalls mit der Wirkung erosiver Vorgänge und der nicht abgeschlossenen Reorientierung hydrophober Gruppen erklärbar.

Im Vergleich zur Freiluftbewitterung ist festzustellen, dass die nachweisbaren Phänomene vergleichbar sind. Die Laborprüfung ist aber härter – es können durchaus Belastungssituationen auftreten, die unter natürlichen Bedingungen nicht existent sind.

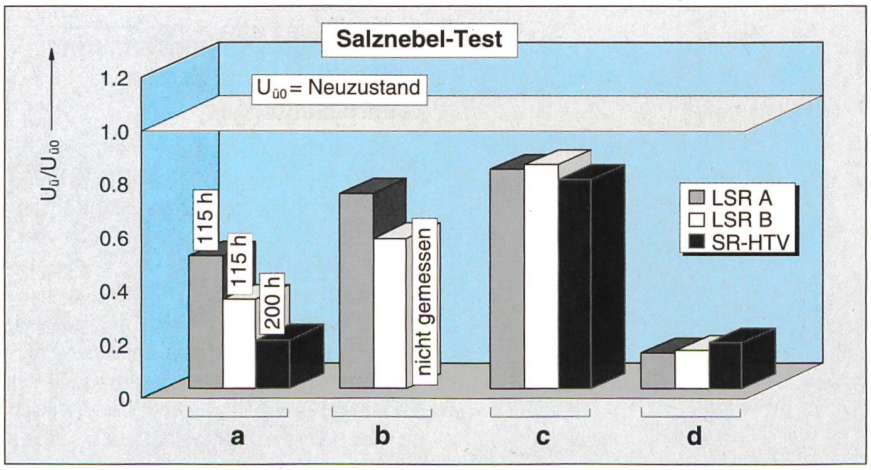


Bild 12 Bezogene Überschlagspannung für verschiedene Oberflächenzustände nach Laboralterung

$U_ü/U_{ü0}$ bezogene Überschlagspannung
a nach zeitraffender Alterung gemäss IEC 1109 (16 mS/cm, 0,29 kV/cm)
b nach Recovery-Zeit von 24 h
c nach manueller Reinigung
d nach totalem Verlust der Hydrophobie (aus Fremdschichtkennlinie)

Zusammenfassung

Kunststoffisolatoren sind eine technische Alternative zur eingeführten Technologie des Porzellanisolators. Insbesondere kritische Einsatzbedingungen wie erhöhte Anforderungen an Verschmutzungsverhalten oder Erdbeben-/Explosionssicherheit sind heute bereits eine Domäne der neueren Technologie. Eine gesamthafte Betrachtung der Kosten (Beschaffung *und* Betrieb) spricht ebenfalls für die Verwendung von Kunststoffisolierungen. Eine Reihe von technisch interessanten Fragestellungen zum Langzeitverhalten bzw. zu sinnvollen Prüfverfahren sind noch ungeklärt und Gegenstand von internationalen Forschungsarbeiten. Weltweit positive Betriebserfahrungen charakterisieren Silikongummi als erfolgreichen Mantelwerkstoff auch unter extremen Fremdschichtbedingungen.

Verdankung

Die Autoren danken den Herren Prof. Dr. R. Bärsch und H. Jahn der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen in Zittau (Deutschland) für ihren Beitrag.

Literatur

[1] *J. Kindersberger, M. Kuhl and R. Bärsch:* Evaluation of the conditions of non-ceramic insulators after long-term operation under service conditions. 9. ISH, 1995, Graz P3193.

[2] *R. Gorur:* Experience with different materials for weathersheds. 2. Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology, 1996, Singapore.

[3] *R. Gorur, W. D. Shead and A. Shead:* Evaluation of naturally aged non-ceramic insulators. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 1996, San Francisco.

[4] *H. Büchner, F. Schmuck, A. Zanetti, A. Zingg, R. Bärsch and H. Jahn:* Impact of filler to silicone rubber basing on RTV-2- and LSR-systems. 10. ISH, 1997, Montreal, eingereicht.

[5] *S. Kim, E. Cherney, R. Hackam and K. Rutherford:* Chemical changes at the surface of RTV silicone rubber coatings on insulators during dry-band arcing. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, 1994.

[6] *R. Bärsch, J. Lambrecht and H. Jahn:* On the evaluation of the hydrophobicity of composite insulator surfaces. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 1996, San Francisco.

Les isolateurs en matière synthétique: une alternative

Pouvoir isolant des isolateurs à gaine polymère à l'exemple du caoutchouc silicone

Les isolateurs en matière synthétique représentent une alternative technique à la technologie déjà bien introduite de l'isolateur en porcelaine. Certaines applications critiques, comme les exigences particulières de tenue à l'encrassement ou la sécurité en cas de tremblement de terre et d'explosion, sont déjà un domaine de cette technologie récente. Une évaluation globale des coûts (tant d'achat que d'exploitation) est également favorable à l'utilisation d'isolants synthétiques. Etant donné ces avantages, les isolateurs en matière synthétique sont de plus en plus utilisés sur les lignes aériennes et dans la technique à haute tension. Les expériences positives réalisées en service dans le monde entier font apparaître le caoutchouc silicone comme un matériau de gaine particulièrement intéressant, même dans des conditions extrêmes de couches parasites.

L'article analyse les différences entre les surfaces isolantes polymères et céramiques lors de sollicitations par la tension et les couches parasites. Il présente des modèles de description du pouvoir isolant d'isolateurs en matière synthétique et les résultats obtenus lors d'essais sur lignes aériennes et en laboratoire. L'article montre cependant aussi que de nombreuses questions sont encore sans réponse quant au comportement à long terme et aux méthodes d'essai à appliquer, qui font actuellement l'objet de travaux de recherche sur le plan international.

ETG
SEV/ASE

Kennen Sie die ETG?

Die Energietechnische Gesellschaft des SEV (ETG) ist ein *nationales Forum* zur Behandlung aktueller Probleme der elektrischen Energietechnik im Gesamtrahmen aller Energieformen. Als *Fachgesellschaft des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins* (SEV) steht sie allen interessierten Fachleuten und Anwendern aus dem Gebiet der Energietechnik offen.

Auskünfte und Unterlagen erhalten Sie beim Schweizerischen Elektrotechnischen Verein, Luppmenstrasse 1, 8320 Fehraltorf, Telefon 01 956 11 11.

VIP System3

Das bewährte, robuste, vielseitige, tragbare und preiswerte System für das Messen, Registrieren und Beurteilen von Belastung, Verbrauch und Oberschwingungsgehalt elektrischer Netze.

ISO 9001 SQS

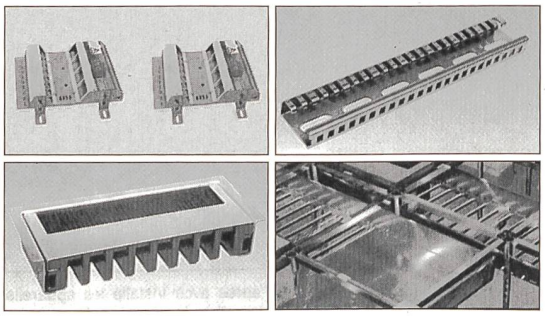
detron ag

Industrieautomation - Zürcherstrasse 25 - CH4332 Stein
Telefon 062-873 16 73 Telefax 062-873 22 10

40% der Leser bewahren alle Ausgaben des Bulletin SEV/VSE auf.

Ihre Werbung am richtigen Platz.
Wir beraten Sie gerne. **Tel. 01/448 86 34**

SEV ASE VSE UCS



LANZ Doppelboden – Installationsmaterial

Vom führenden Hersteller das modernste Installationsmaterial für den Doppelboden:

- Boden-Anschlussdosen für Strom/Daten/Telefon in vielen Ausführungen
- LANZ Kabeldurchlässe 8-fach
- LANZ Multibahnen **mit spez. Trägermaterial** zur Kabelführung unter Doppelböden
- Luftauslässe rund und rechteckig
- Stützen schwer und schwerlast für Schalt- und Kommandoräume
- Erdleitungsbriden LANZ für Stützen

Wir haben Erfahrung und beraten Sie gerne. Rufen Sie an, wenn Sie Dopelböden planen oder bauen:
lanz oensingen 062/388 21 21 Fax 062/388 24 24

☐ Das **LANZ Doppelboden-Installationsmaterial** interessiert mich!
Bitte senden Sie mir Unterlagen.

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!
Name/Adresse/Tel.: _____

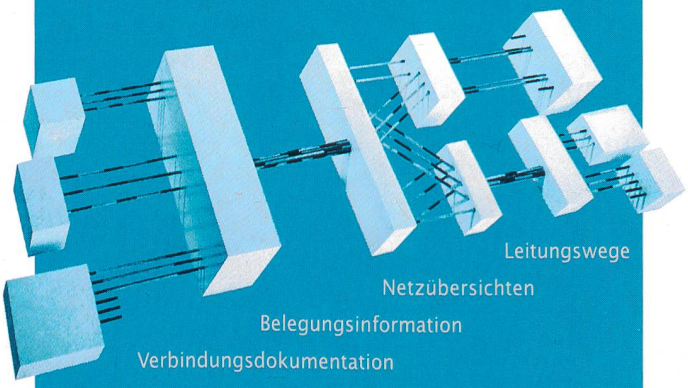
IN-DOBO

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 388 21 21

projektieren ▪ dokumentieren ▪ verwalten

Nutzen Sie Ihr Kommunikationsnetz wirtschaftlich?

http://www.dynamic-design.com



CONNECT MASTER®

Physical Network Management

Dynamic Design AG, InformationSystems, Durisolstr. 11, CH-5612 Villmergen
Info-Telefon 056 6198 677, Fax 056 6210 292