



## ISOLATOREN-PRODUKTIONS-SCHULUNG

Januar 1998 / Anton Wermelinger

- Themen:
1. Isolatoren allgemein
  2. Elektrische Feldstärken und deren Wirkung
  3. Schutzarmaturen
  4. - Hohlräume und Teilentladungen (TE)  
- Verbundzone GFK / Silikon und Haftung
  5. Kriechstrecken
  6. Mechanik
  7. Prüfung
  8. Ausblick

### 1. Isolatoren allgemein

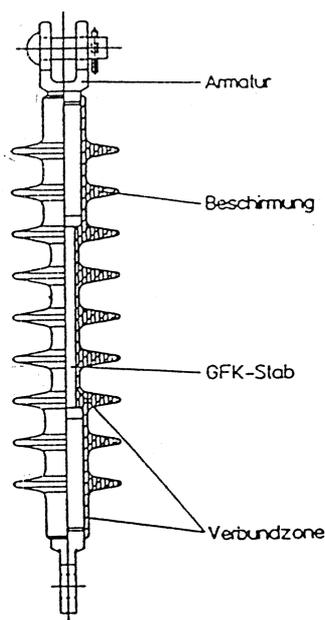
Stromführende Leiter, wie beispielsweise Leitungsseile und Sammelschienen, müssen gegenüber der Tragkonstruktion isoliert werden. Das Isolationsvermögen muss auch bei ungünstigsten Betriebsbedingungen, infolge klimatischer Verhältnisse bei wechselnder Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Tau, Nebel, Regen, Eis, Wind, Schnee- bzw. Eisabwurf, Blitzschlag, aber auch Verschmutzung durch Niederschlag von Staub, Salzen, Verbrennungsprodukten und Industrieabgasen, ausreichend bemessen sein. Neben den hohen mechanischen Anforderungen muss ein Isolator durchschlagfest sein und sich über mindestens 50 Jahre durch einen hohen Kriechstromwiderstand auszeichnen.

Seit der Schaffung des ersten Porzellanisolators durch Werner von Siemens im Jahre 1849 wurden die Isolatoren zu hochwertigen Betriebsmitteln weiterentwickelt.

Wir unterscheiden:

- PORZELLANISOLATOR bestehend aus Kaolin, Feldspat und Quarz
- STEATITISOLATOR bestehend aus Kaolin, Feldspat und Speckstein
- GLASISOLATOR bestehend aus alkali-, kalk- und silikathaltigem Glas
- GIESSHARZISOLATOR bestehend aus Epoxidreaktionsharzen
- TEFLONISOLATOR bestehend aus GFK-Kern und Teflonhülle
- EPDM ISOLATOR bestehend aus GFK-Kern und EPDM-Gummihülle
- SILIKONISOLATOR bestehend aus GFK-Kern und Silikon-Gummihülle

SILIKONVERBUNDISOLATOREN zeichnen sich insbesondere durch ausgezeichnete bzw. einzigartige Kriechstromfestigkeit aus und bieten folgende Vorteile:



- In beliebigen Längen als einteiliger Isolator
- Keine Zwischenarmatur
- Geringere Mastbauhöhe, Kompaktbauweise
- Variable Kriechweglänge
- Keine Beschädigung bei Störlichtbögen
- Hervorragendes Fremdschichtverhalten auch bei Salz und anderen Verunreinigungen
- Perlenbildung von Wasser dank Hydrophobie
- Erhebliche Reduktion von Reinigungsarbeit
- Geringerer Verschleiss in Sandsturmgebieten
- Keine Bruchschäden dank gummielastischer Oberfläche
- Hohe Beschussicherheit
- Geringes Gewicht, Faktor 5 bis 10 im Vergleich zu Porzellan
- Dynamisch belastbar auf Zug, Druck und Biegung
- Ideal für höhere Fahrgeschwindigkeiten
- Durch hohe Elastizität kein Doppelkettenbruch
- Auch Kleinserien für spezifische Problemlösungen
- Problemloser Transport bezüglich Gewicht und Verletzung im Vergleich zu Porzellan. Speziell das Hochziehen auf die Masten ist viel einfacher.

An der ETG-Tagung vom 21. Januar 1998 bei der ABB Wettingen wurde eindrücklich vorgeführt, wie ein dauernd beregneter Porzellanisolator intensiv Teillichtbögen entwickelt, während unter der gleichen Voraussetzung beim Silikonisolator mit halber Schlagweite und halbem Kriechweg keine Lichtbögen auftraten.

Silikonisolatoren werden zunehmend eingesetzt für:

- Freileitungsisolatoren
- Feldabstandhalter
- Bahnisolatoren bis 25 kV
- Stützer für Freileitungen und Schaltanlagen
- Hohlisolatoren für Messwandler, Leistungsschalter, Kondensatoren, Durchführungen, Ueberspannungsableiter

Neben Langstabisolatoren bis  $\varnothing$  32 mm und Stützisolatoren bis  $\varnothing$  76 mm aus Vollstäben, fertigt die SEFAG die SILCOSIL-Hohlisolatoren derzeit in folgenden Abmessungen:

| Bezeichnung | GFK-Rohr               |                         | Schirm                  |
|-------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             | $\varnothing$ innen mm | $\varnothing$ aussen mm | $\varnothing$ aussen mm |
| SIL 83/93   | 83                     | 93                      | 210                     |
| SIL 125/142 | 125                    | 142                     | 260                     |
| SIL 130/142 | 130                    | 142                     | 262                     |
| SIL 154/166 | 154                    | 166                     | 282                     |
| SIL 170/182 | 170                    | 182                     | 298                     |
| SIL 180/206 | 180                    | 206                     | 322                     |
| SIL 198/210 | 198                    | 210                     | 326                     |
| SIL 220/230 | 220                    | 230                     | 344                     |
| SIL 248/260 | 248                    | 260                     | 371                     |
| SIL 300/312 | 300                    | 312                     | 428                     |

Die Länge ist beliebig bis zu 4000 mm wählbar. Auch andere Durchmesser sind ohne grosse Mehrkosten herstellbar.

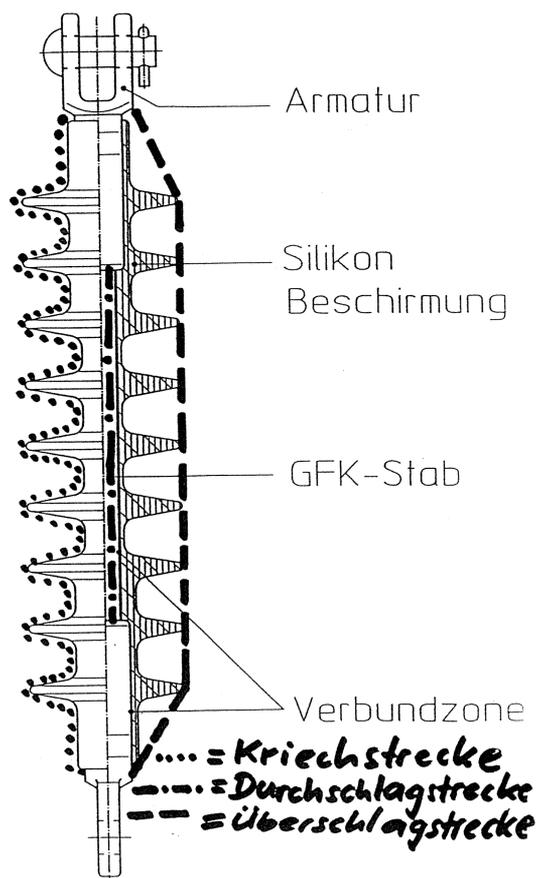
Je nach Verschmutzungsgrad wird der erforderliche Kriechweg bestimmt. Werte von 16 bis 31 mm pro kV Reihenspannung und höher sind problemlos realisierbar.

Detaillierte Informationen können den beigelegten Aufsätzen entnommen werden:

- Erfahrung und Einsatz von Verbundisolatoren
- Silikonbeschirmte Kunststoffisolatoren für die Mittel- und Hochspannungstechnik
- Untersuchung von glatten Brüchen

Nach unserem Wissensstand ist SEFAG der beweglichste Anbieter von Silikonverbundsystemen, weil wir giessen, extrudieren und spritzen können. Für die Rohrummantelung mittels Extrudieren sind wir zur Zeit die einzigen Anbieter. Diese Ausgangslagen macht SEFAG bei Neuentwicklungen zum interessanten Partner.

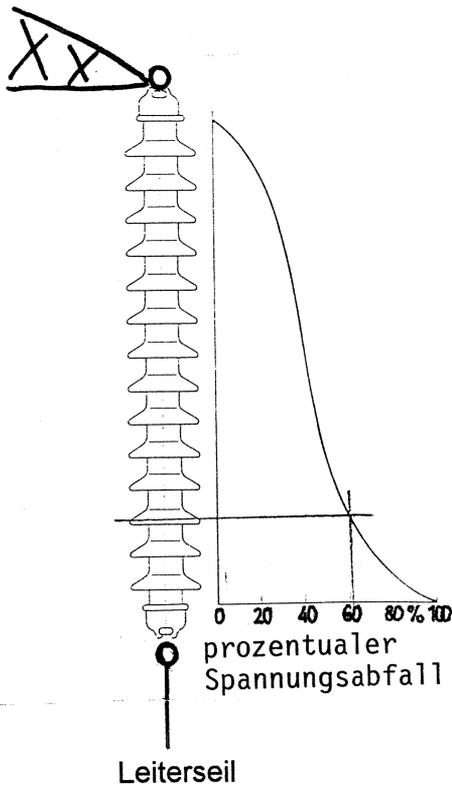
Die qualitativen Anforderungen an einen Isolator sind enorm. Die Folgen eines Isolatorbruchs sind, von den Kosten abgesehen, dramatisch.



## 2. Elektrische Feldstärken und deren Wirkung

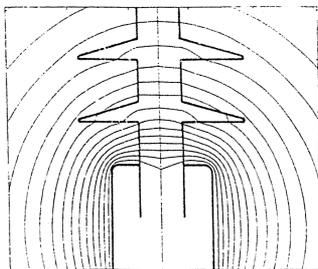
Isolatoren sind am einen Ende, d.h. an der mastseitigen Befestigung, geerdet und auf der Gegenseite auf Hochspannung.

Mast erdseitig



Der Spannungsabfall entlang der Isolierstrecke ist, wie man auf dem Bild sieht, nicht proportional.

Aus der Kurve lesen wir, dass bereits auf einer kurzen Isolatorenlänge 40 % der Spannung abfällt.



Feldlinien ohne oder mit falsch angeordneter Schutzarmatur

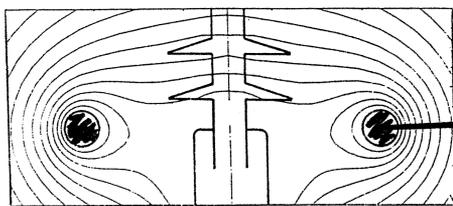
Auf diesem Bild sehen wir den Spannungsabfall an der seilseitigen Armatur. Erdseitig ist die elektrische Beanspruchung geringer.

Die elektrische Feldstärke, in Volt pro mm, ist ein Mass für einen örtlichen betrachteten Spannungsabfall entlang des Isolators. Sie ist an der Hochspannungsarmatur am höchsten, nimmt aber dann auf der freien Länge ab und an der Erdarmatur wieder etwas zu. Die Feldstärke kann man berechnen. Eine zu hohe zerstört das Isoliermaterial.

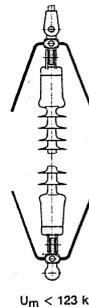
Umso kleiner der Abstand der feinen Linien, desto höher die Feldstärke. Das Verhältnis Abstand zu Feldstärke ist umgekehrt proportional (reziprok).

### 3. Schutzarmaturen

Schutzarmaturen dienen einerseits dazu, die Isolierung am Stabaustritt von hohen Feldstärken zu entlasten. Das nachfolgende Bild zeigt, wie die Abstände der feinen Linien am Armaturende gross werden und umgekehrt die elektrische Feldbelastung klein. An der umlaufenden Armatur sind die Abstände klein; somit haben wir die grossen Feldstärken dorthin gesteuert. Der Stab ist somit entlastet. Nebenbei bemerkt dürfen die Feldstärken auch an den Schutzarmaturen nicht zu hoch sein, weil dies dann zu hörbarem Rauschen bzw. zu Radiostörspannung führt (= äussere Teilentladung; auch Glimmen oder Korona genannt).



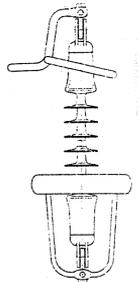
Schutzarmatur



$U_m < 123 \text{ kV}$



$U_m \geq 123 < 245 \text{ kV}$



$U_m \geq 245 \text{ kV}$

Andererseits dienen die Schutzarmaturen dazu, bei einem Lichtbogenüberschlag als Lichtbogenfussbrennpunkt, die Armatur zu schützen.

Nur richtig positionierte Schutzarmaturen haben die zugeordnete Wirkung!

### 4. Hohlräume, Teilentladung (TE) und Verbundzone

Teilentladung ist in der Hochspannungstechnik ein gefürchtetes und sehr gefährliches Phänomen.

Hohlräume wie Lunker, Spalte (Zwickel oder Spitzen) werden zur Bildung von Teilentladungen vorausgesetzt. Beispielsweise sind Hohlräume in der Isolierstrecke äusserst gefährlich. Durch den existierenden, hohen Spannungsabfall über einen kleinen von aussen nicht sichtbaren Hohlraum (z.B. Step, Step-Übergang) oder entlang einer Spalte (keine Haftung) kann Teilentladung entstehen. Z.B. Gas in einem kleinen Hohlraum kann durch den hohen Spannungsabfall pro mm (elektr. Feldstärke) ionisieren. Positiv bzw. negativ geladene Ionen wechseln dann mit der Frequenz (50 mal pro Sekunde) die Orientierung zum Minus- bzw. Pluspol. Da es sich bei den Ionen auch um Materie handelt und diese somit Gewicht (Masse) hat, wird sie durch die Umpolung dauernd beschleunigt und durch Aufschlag an der Hohlraumwand gebremst. Dadurch entsteht Erosion und letztlich der Durchschlag. Wenn dann noch Wasser durch den Silikon in diese Hohlräume und Spalten gelangt (diffundiert), wird die Zerstörung auf andere Weise noch beschleunigt, indem Oxalsäure und Salpetersäure entstehen. Diese Säuren zerfressen die Glasfasern, was letztlich zum mechanischen Isolatorenbruch führt.

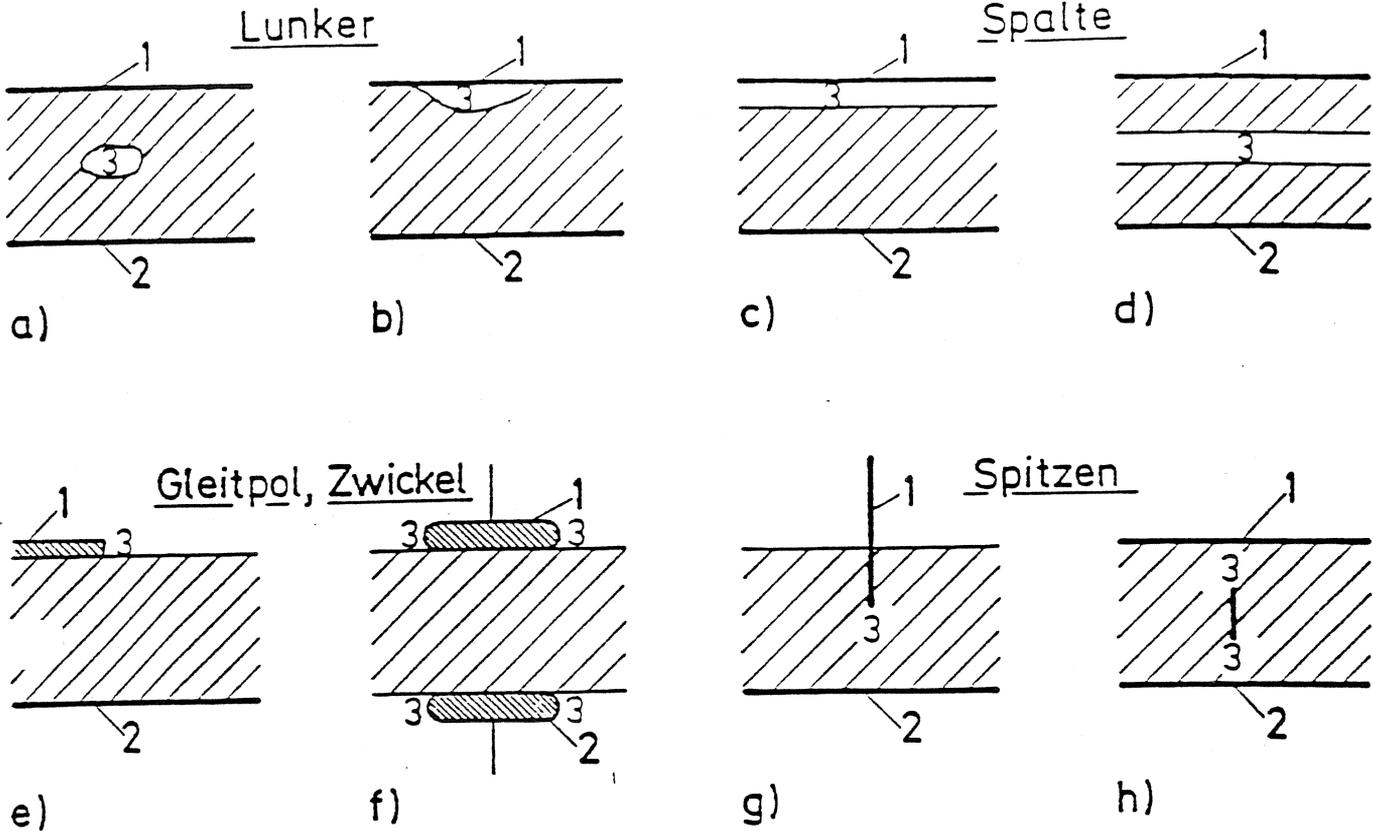
Wenn mangels Haftung Wasser in die Spalte zwischen Silikon und Stab (Rohr) eindringt, kann in dieser Spalte ein kapazitiver Strom fließen. Dieser Vorgang kann ebenfalls nachweislich zu Kriechspuren (Brandspuren) führen bzw. Oxalsäure bilden, was dann wiederum mit dem mechanischen Bruch oder dem elektrischen Durchschlag endet.

Je höher die Feldstärken, desto grösser die Neigung zu Teilentladung.

Die Qualität des Primerns ist von entscheidender Bedeutung: Perfekte Stabreinigung, reiner Primer, Kontrolle des Ablaufdatums für den Primer, Primer kühl und dunkel lagern, z.B. im Kühlschrank, Primer nie zurückleeren, Fertigungsvorschrift genauestens einhalten, gewissenhaftes Auftragen des Primers, saubere Umgebung, sorgfältige Handhabung beim Einlegen in die Spritzform, Dichtpartien in der Form sauber halten, vor Staub schützen (z.B. beim Wischen), nicht berühren, Raumtemperatur min. 20°C und dies jeweils 10 Stunden vor Produktionsbeginn, dauernde Kontrolle von sich selbst und der Mitarbeiter bezüglich aller Einflussgrößen. Für eine hochwertige Primerschicht sind dies sehr positive Beiträge von jedem Beteiligten bei der Herstellung von Verbundisolatoren! Diese Anforderungen gelten selbstverständlich auch beim Extrudieren, Giessen und Beschirmen.

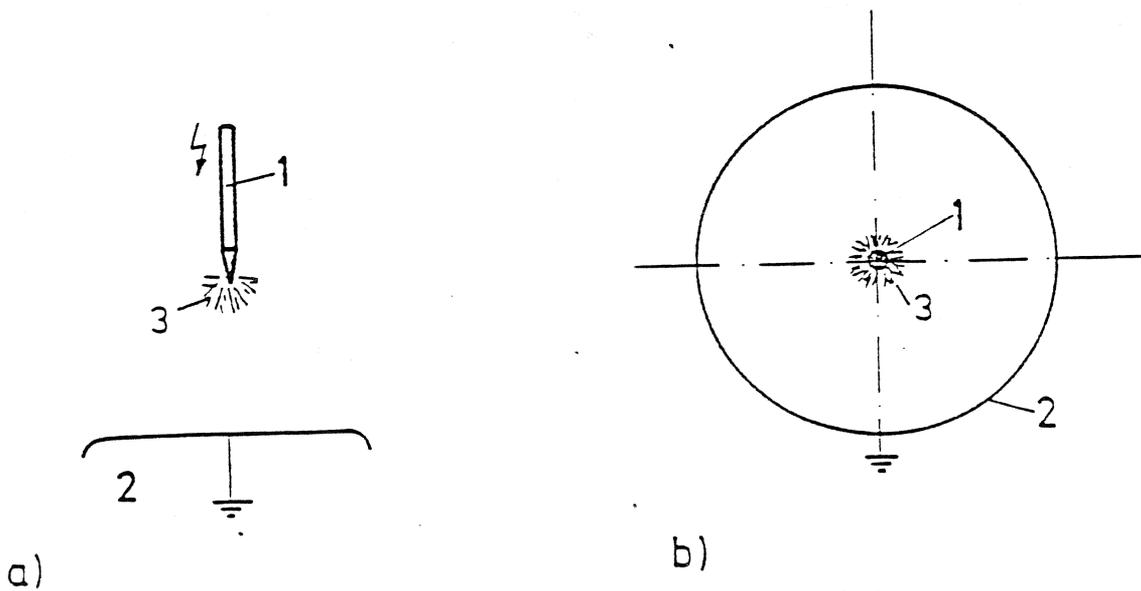
#### Folgerung

Erfahrungsgemäss kann man heute davon ausgehen, dass hohlraumfreier GFK und hohlraumfreies Silikon mit perfekter Haftung den problemlosen Einsatz von Verbundisolatoren garantieren.



Typische Anordnungen mit inneren Teilentladungen

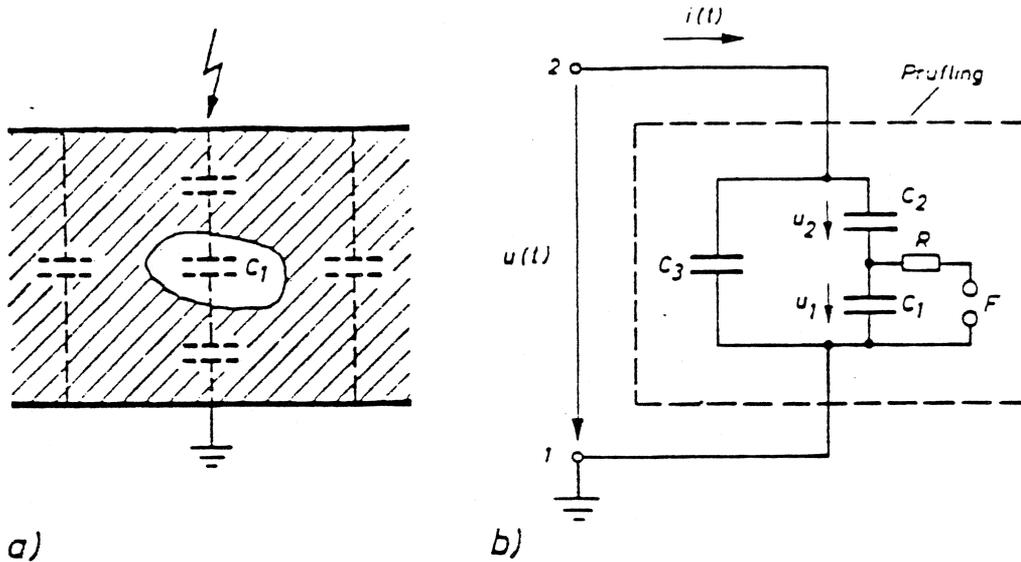
- 1, 2: Elektroden  
3: Teilentladungsgebiet



Typische Anordnungen mit äusseren Teilentladungen

- a) Spitze-Platte  
b) Koaxiale Funkenstrecke ("Koronareuse")

- 1, 2: Elektroden  
3: Teilentladungsgebiet



Zur Ableitung des "klassischen" kapazitiven Ersatzschaltbildes eines Dielektrikums mit innerer Fehlstelle

- a) Schematische Darstellung des Dielektrikums
- b) Ersatzschaltbild

## 5. Kriechstrecke

Unter der Kriechstrecke eines Isolators versteht man den kürzesten Weg, welchen der Strom entlang der Oberfläche von der metallischen Hochspannungsarmatur bis zur metallischen Erdarmatur zurücklegen muss. An Gebieten mit hohem Verschmutzungsgrad (salziges Meeresklima oder aggressive Industrieluft) muss die Kriechstrecke extrem lang sein. Kriechströme, die durch Feuchtigkeit, Niederschlag oder Verschmutzungen hervorgerufen werden, können Erosion verursachen und leitfähige Spuren hinterlassen, vergleiche äussere Teilentladung. In diesem Punkt hebt sich Silikon von allen handelsüblichen Isolatoren ab, aber auch SEFAG, indem mit dem Beschirmungsautomat die Schirmanzahl und somit die Kriechstrecke je nach Forderung des Kunden variiert werden kann.

Silikon ist hydrophob, d.h. die Anziehungskraft gegenüber Wasser ist geringer als die innere Zusammenhangskraft von Wasser. Aus diesem Grund entstehen auf Silikon Wasserperlen. Dies im Gegensatz zu einer gleichmässigen Oberflächenbenetzung auf anderen Isoliermaterialien. Hervorgerufen wird diese Wirkung durch freie niedermolekulare Siloxane, welche physikalisch bedingt an die Oberfläche wandern und sogar den Schmutz anreichern und diesen auch hydrophob machen. Die Wasserperlen unterbrechen den Strompfad dauernd. Nicht so bei gleichmässig benetzten Oberflächen, wo ein ununterbrochener Strompfad gegeben ist.

Fremdschichtklasse

Umgebungs-kennzeichnung

I - leichte Verschmutzung

- Gebiete ohne Industrie und mit einer geringen Bebauungsdichte von Häusern mit Heizungsanlagen
  - Gebiete mit wenig Industrie oder Häusern, die aber häufigen Winden und/oder Regenfällen ausgesetzt sind
  - landwirtschaftliche Gebiete
  - bergige Gebiete
- Alle diese Gebiete müssen mindestens 10 bis 20 km von der Meeresküste entfernt liegen und dürfen nicht direkten Seewinden ausgesetzt sein.

II - mittlere Verschmutzung

- Gebiete mit Industrie, die nicht besonders verschmutzenden Rauch erzeugen und/oder mit einer mittleren Bebauungsdichte von Häusern mit Heizungsanlagen
- Gebiete mit hoher Bebauungsdichte von Häusern und/oder Industrie, die aber häufigen Winden und/oder Regenfällen ausgesetzt sind
- Gebiete, die Seewinden ausgesetzt sind, aber nicht zu nahe an der Küste liegen (Mindestabstand mehrere Kilometer)

III - schwere Verschmutzung

- Gebiete mit hoher Industriedichte und Vororte grosser Städte mit hoher Dichte von Heizungsanlagen, die Verschmutzung verursachen
- Gebiete nahe der Meeresküste oder die jedenfalls relativ starken Seewinden ausgesetzt sind

IV - sehr schwere Verschmutzung

- Gebiete mit begrenzter Ausdehnung, die leitfähigem Staub und Industrierauch ausgesetzt sind, wodurch besonders dicke, leitfähige Ablagerungen entstehen
- Gebiete mit begrenzter Ausdehnung, sehr nahe der Küste, die Meerwasser-Sprühen oder sehr starken und verschmutzenden Seewinden ausgesetzt sind
- Wüstengebiete, die gekennzeichnet sind durch lange Perioden ohne Regen, starken Winden mit Sand und Salz und die regelmässiger Kondensation unterworfen sind

Fremdschichtklasse:

Spezifische Mindestkriechstrecke  
zwischen Leiter und Erde in mm / kV:

|     |             |    |
|-----|-------------|----|
| I   | leicht      | 28 |
| II  | mittel      | 35 |
| III | schwer      | 43 |
| IV  | sehr schwer | 54 |

## 6. Mechanik

Während die elektrischen und chemischen Anforderungen von der geschlossenen Silikonbeschirmung übernommen werden, sind die mechanischen Funktionen dem Glasfaserstab und der Metallarmatur zugeordnet. Um gleichbleibende Bruchkräfte zu erreichen, sind Armaturen und Stäbe dauernd auf Masshaltigkeit zu prüfen. Die mechanische Stückprüfung im Flugzeugwerk Emmen ist zwingend und international vorgeschrieben.

Merkmale und Anforderungen an die Mechanik:

- Kraffteinleitung
- Kraftumlenkung
- Wechsellastfestigkeit
- Langzeitverhalten
- Beherrschung unterschiedlicher Materialeigenschaften
- Temperaturwechsel und Temperaturkompensation
- geeignete Formgebung zur elektrischen Feldsteuerung
- Schwingungsfestigkeit
- schlagartige Wechselzugbelastung - Belastungsänderungen (z.B. Eisabwurf)
- optimale Gestaltung der Anschlussarmaturen, nach IEC, internationalem Standard
- max. Betriebssicherheit

Armierte Stäbe dürfen nur, gemäss Fertigungsvorschrift, den maximal zugelassenen Temperaturen ausgesetzt werden, sonst wird die Ausziehungskraft stark reduziert.

## 7. Prüfung

Ergänzend zur mechanischen Stückprüfung erfolgt die Sichtprüfung nach der Fertigungsvorschrift! Als weitere qualitätssichernde Massnahme wird der Haftungstest eingeführt. Pro Fertigungslos sind 1 % der Stückzahl bzw. mindestens 1 Stück pro Los dem Haftungstest durch Zerstörung zu unterziehen. Diese Prüfung gilt nur beim RTV-Giessen und beim Spritzen, beim Extrudieren nicht, und zwar weil beim Abschälen der Armierungspartie die Haftung automatisch geprüft wird. Kochtest's sind sporadisch anzuordnen, jedoch mindestens jeweils im Januar und im August (auch an extrudierten Stäben). (Ausnahmen jeweils gemäss Rückfrage.)

8. **Ausblick**

Silikonverbundisolatoren gewinnen weltweit dauernd an Bedeutung und verbuchen zunehmend Marktanteile bei Neu- und Weiterentwicklungen!

22. Januar 1998 A. Wermelinger/tss