

## **Porzellan oder Verbundwerkstoffe als Gehäuse von Freiluftwandlern**

H. Büchner, CELLPACK AG, Wohlen, Schweiz

### **1. Einleitung**

Der erfolgreiche und sichere Betrieb von elektrischen Erzeugungs- und Verteilungsanlagen ist abhängig von der Zuverlässigkeit jedes einzelnen Anlagenteiles.

Seit Jahrzehnten arbeiten Elektro-Ingenieure an der Entwicklung von neuen und betriebssichereren Isolierungen für elektrische Apparate in Hochspannungsnetzen.

Das Augenmerk war jedoch primär auf die Verbesserung der inneren Isolierung von HS-Geräten gerichtet.

Dies gilt auch für Freiluftwandler, welche mit Oelpapier-, gasförmiger (SF<sub>6</sub>)- oder Trockenisolierung ausgerüstet sein können.

Der äusseren Isolierung, eine das elektrische und mechanische Verhalten der Hochspannungsapparate, z.B. Wandler, wesentlich bestimmende Komponente, wurde erst in den letzten ca. 10 Jahren mehr Bedeutung beigemessen.

In vermehrtem Masse beeinflusst wurde diese Entwicklung durch erhöhtes Betriebssicherheitsdenken, Verminderung des Schadenfallrisikos, verstärkte Verschmutzung der Umwelt und nicht zuletzt durch den Gedanken an innovative Bauteile mittels modernen, einfachen Anwendungstechniken.

Mit Verbundwerkstoffen, welche auch in sehr anspruchsvollen Gebieten, wie Luft- und Raumfahrt, seit Jahrzehnten einen festen Standplatz einnehmen, lassen sich heute technisch ausgereifte Isoliergehäuse (Verbund-Isolatoren) herstellen.

Bedingt durch die im Aufbau von Verbundwerkstoffen liegenden vorteilhaften Eigenschaften, wie Explosions- und Erdbebensicherheit, niedriges Gewicht und damit verbundenes einfaches Handling und tiefes Transportrisiko, sowie die ausgezeichneten Eigenschaften der Silikonbeschichtung betreffend Spannungsfestigkeit und Kriechstromverhalten, stellt der Verbundisolator eine echte Alternative zum Porzellan dar.

Last but not least stellt der Verbundisolator eine wichtige Komponente für den Freiluft-Wandler der Zukunft dar, da auf einfache Art und Weise eine beliebige Anzahl von Lichtwellen-Leiter gegen mechanische und chemische Beschädigung geschützt im Trägerrohr eingewickelt werden können.

Verbundisolatoren als Leistungsisolatoren sind seit mehr als 20 Jahren bekannt und in Betrieb.

Verbundisolatoren als Gehäuse für alle Arten von elektrischen Apparaten haben heute ihren festen Platz in der Hochspannungsisoliertechnik.

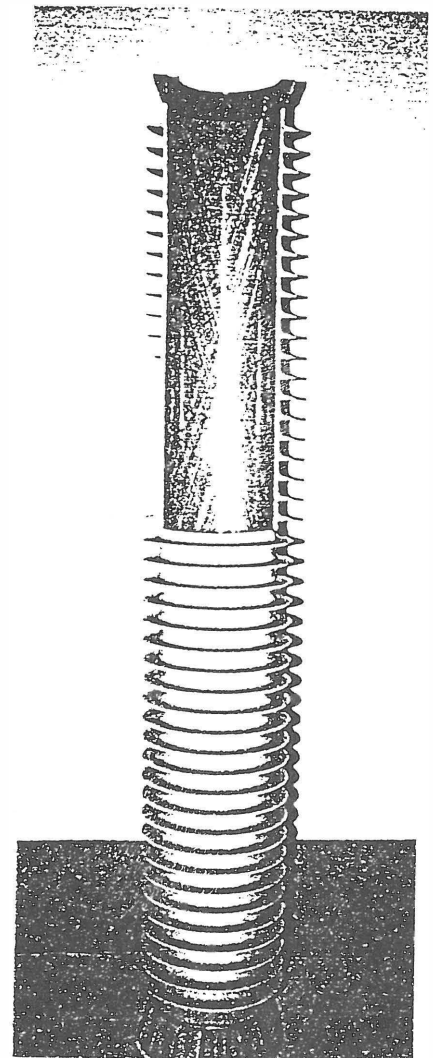
Betriebskenntnisse mit Gehäuse-Verbundisolatoren mit Silikonummantelung liegen seit mehr als 10 Jahren vor und es sind keine negativen Erfahrungen bekannt.

Der praktisch ohne grosse konstruktive Änderungen mögliche Einsatz von Verbundisolatoren anstelle von Porzellan macht diesen auch für Freiluftwandler mit jeder Art von innerem Isoliersystem interessant.

## 2. Aufbau des Gehäuse-Verbundisolators

Der Verbundisolator besteht im wesentlichen aus den folgenden drei Teilen (Bild 1):

- **Trägerrohr**  
Das Trägerrohr dient zur Uebernahme der mechanischen und inneren elektrischen Aufgaben.
- **Silikon-Ummantelung**  
Die Silikon-Ummantelung übernimmt die äusseren elektrischen Aufgaben und dient als Schutz gegen Umwelteinflüsse.
- **Metallarmaturen**  
Die Fuss- und Kopfarmaturen dienen als Verbindungselemente zu den Apparate-Teilen und müssen gas- oder oeldicht mit dem Trägerrohr verbunden sein.



## 2.1 Das Trägerrohr

Da die mechanischen, elektrischen und chemischen Anforderungen je nach Anwendungszweck unterschiedlich sein können, muss das Trägerrohr dementsprechend dimensioniert und hergestellt werden.

Der Aufbau des Trägerrohres besteht in der Regel aus mit endlosen Fasern verstärktem Kunststoff.

Im Normalfall werden Glasfasern als Verstärkungsmaterial und Epoxidharz als Matrix verwendet. Für spezielle Anwendungszwecke können aber auch andere isolierende Fasern, wie Polyester- oder Aramidfasern eingesetzt werden.

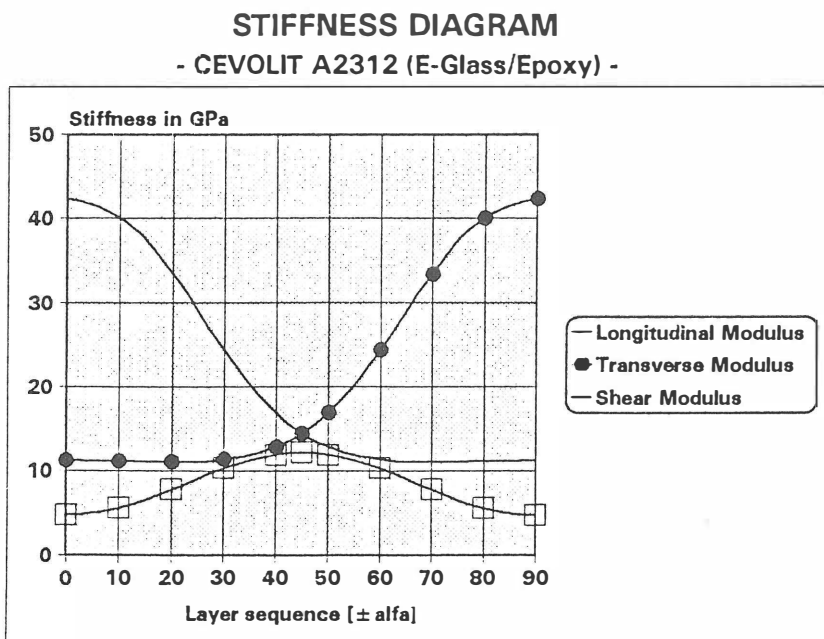
Neben der Wahl des Verstärkungsmaterials und der Harze lassen sich die mechanischen Anforderungen an das Trägerrohr durch die eingebrachte Fasermenge, die Lagenzahl, den Wickelwinkel und das Wickelverfahren sehr gut steuern (Bilder 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8).

### Bilder 2 + 3

zeigen die Steifigkeit eines Trägerrohres in Funktion des eingebrachten Volumenanteils an Verstärkungsmaterial (Faseranteil)

CEVOLIT A2312 Endlosglasfaser-Nasswickel-Verfahren  
CEVOLIT A2111 Glasgewebe-Vakuumimprägnier-Verfahren

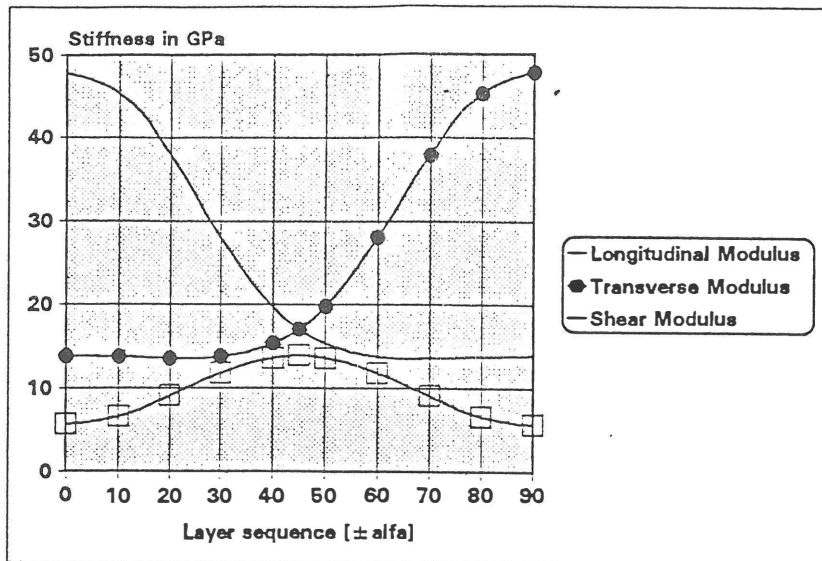
Bild 2



Div. Modulus, 54 v-% Fibers, RT

**STIFFNESS DIAGRAM**  
- CEVOLIT A2312 (E-Glass/Epoxy) -

Bild 3



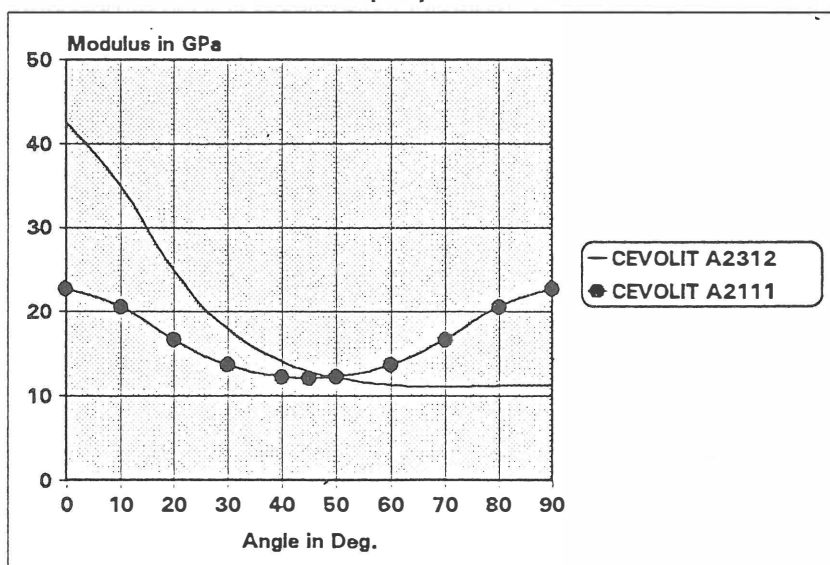
Div. Modulus, 61 v-% Fibers, RT

Bilder 4 + 5

zeigen die Steifigkeit und die Scherfestigkeit eines Trägerrohres aus CEVOLIT A2312 in Funktion des Wickelwinkels im Vergleich zu einem Geweberohr A2111.

**CEVOLIT A2312 AND A2111**  
- E-Glass/Epoxy Material -

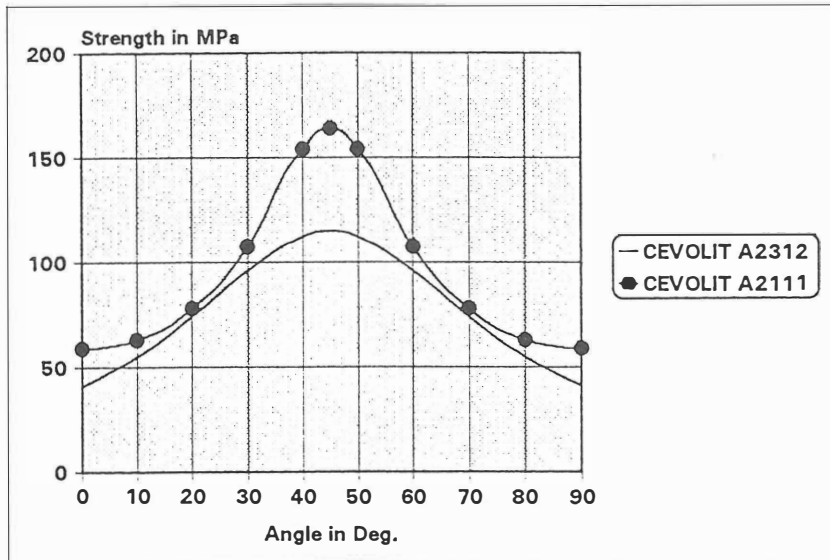
Bild 4



Longitudinal Modulus, 54 v-% Fibers, RT

**CEVOLIT A2312 AND A2111**  
- E-Glass/Epoxy Material -

Bild 5



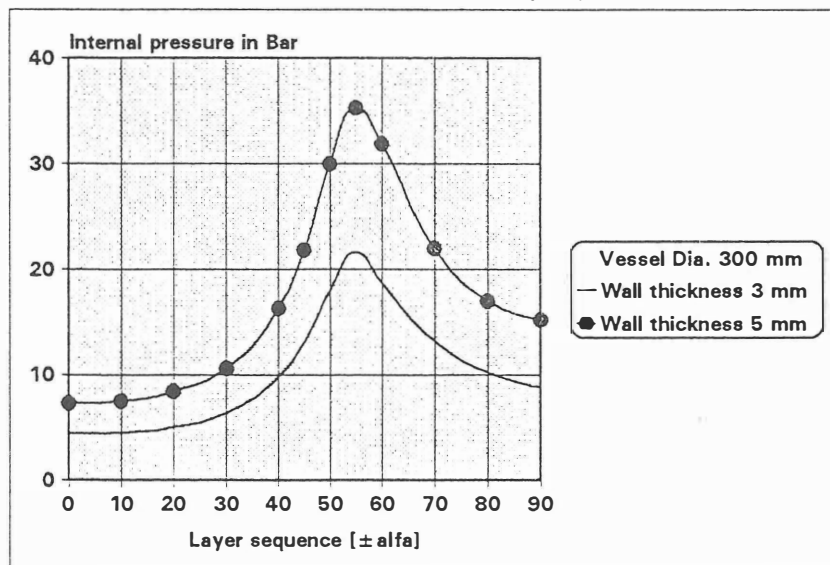
Shear Strength, 54 v-% Fibers, RT

Bild 6 und 7

zeigen den zulässigen Innendruck (First Ply Failure) in Funktion des Wickelwinkels und der Wandstärke. DF = 1,0 Bild 6, DF = 0,3 Bild 7

**PRESSURE DIAGRAM**  
- CEVOLIT A2312 (E-Glass/Epoxy) -

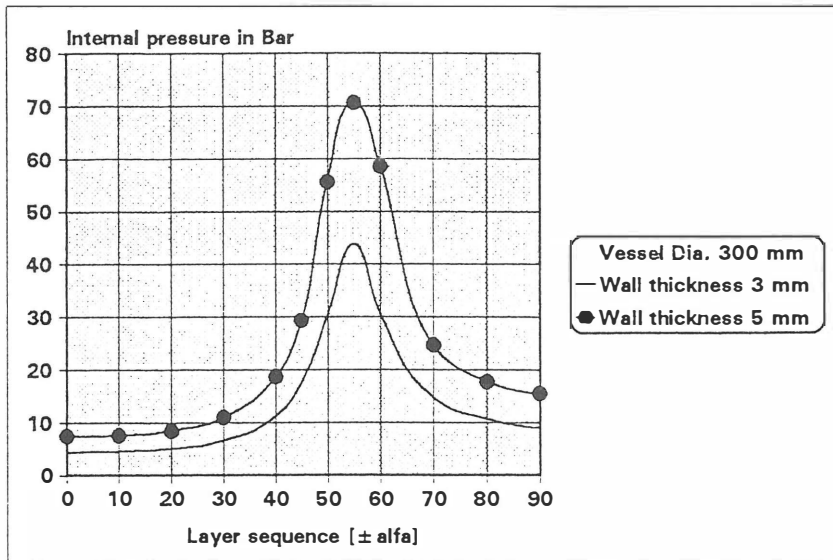
Bild 6



Pressure at FPF (DF = 1.0), 54 v-% Fibers, RT

**PRESSURE DIAGRAM**  
- CEVOLIT A2312 (E-Glass/Epoxy) -

Bild 7



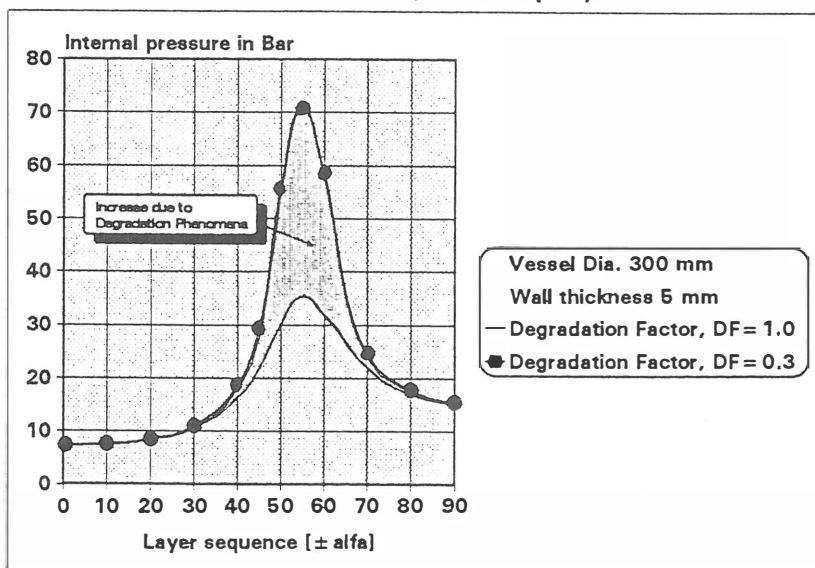
Pressure at FPF (DF=0.3), 54 v-% Fibers, RT

Bild 8

zeigt den zulässigen Innendruck einer bestimmten Rohrgröße in Funktion des Degradationsfaktors (DF).

**PRESSURE DIAGRAM**  
- CEVOLIT A2312 (E-Glass/Epoxy) -

Bild 8



Pressure at FPF, 54 v-% Fibers, RT

Was die chemische Beanspruchung betrifft, stellen die gebräuchlichsten flüssig- oder gasförmigen Isoliermedien keine besonderen Anforderungen an den Verbundwerkstoff des Trägerrohres.

In Fällen, wo SF<sub>6</sub> Zersetzungsprodukte (Flusssäure) auftreten, wird bei glasfaserverstärkten Trägerrohren ein Schutzinnenliner aus Polyester eingewickelt.

## 2.2 Die Silikonkautschuk-Ummantelung

Seit mehr als 25 Jahren sind Polymere wie Giessharze, EPDM, PTFE und Silikonkautschuk als Schirm- resp. Ummantelungsmaterial bekannt und in der Hochspannungs-Isolier-Technologie eingeführt. Während alle anderen Materialien mit eher wechselnden Erfolgen eingesetzt wurden, hat sich Silikon dank seiner ausgezeichneten Eigenschaften erfolgreich auch bei Gehäuse-Isolatoren seit mehr als 10 Jahren erfolgreich durchgesetzt.

An die Qualität solcher Silikone werden, bedingt durch unterschiedliche Erfahrungen mit anderen Polymeren, hohe Anforderungen gestellt.

Gute Silikone zeichnen sich aus durch hohe Kriechstromfestigkeit und Lichtbogenbeständigkeit, gutes Witterungs- und Alterungsverhalten und ausgezeichnete Hydrophobie (Wasserabstossung) auch bei starker Verschmutzung.

Als besonders wichtiger Faktor zur Verbesserung der Isolatoroberfläche ist der rasche Hydrophobie-Transport vom Silikon-Material zum Verschmutzungs-Belag durch Ausdampfen von niedermolekularen Komponenten zu erwähnen. (1) (2) (3) (4) Diese niedermolekularen Komponenten sind in der Lage die Partikel des Verschmutzungsbelages einzubetten, resp. mit einem dünnen Silikonfilm zu bedecken und dadurch die Leitfähigkeit des Verschmutzungsbelages zu verändern. Als besonders schnell reagierend haben sich die weichen Silikon-Kautschuke herausgestellt.

Gemäss VDE 0441, Teil 1, müssen Mantelwerkstoffe für Freiluft-Isolatoren betreffend

- Hochspannungs-Kriechstromfestigkeit (HK)
- Hochspannungs-Lichtbogenfestigkeit (HL)
- Hochspannungs-Diffusions-Durchschlagfestigkeit (HD)

mindestens die Klasse 1 erreichen.

Silikon-Ummantelungen liegen bei

- HK in Klasse 2 (3.5 kV \_ 6 Std.)
- HL in Klasse 3 ( \_ 300 Sek.)
- HD in Klasse 2 (12 kV, 1 Min.)

Die geforderten Werte werden mit hoher Sicherheit erfüllt.

Tritt bei Silikonkautschuk eine thermische Zerstörung durch Lichtbogen auf, bildet sich nichtleitendes SiO<sub>2</sub> als Zersetzungsprodukt.



Seit geraumer Zeit werden Silikone zur Erhöhung der Kriechstrom- und Ueberschlagfestigkeit an Porzellanisolatoren bestehender Anlagen in Gebieten mit extremer Verschmutzung eingesetzt.

Eine solche Nachbesserung stellt nur eine zeitlich begrenzte Verbesserung dar und ist mit hohen Kosten, periodischem Abschalten der Anlage, Reinigung und Silikonisierung der Porzellane verbunden.

Die Vorteile einer Silikon-Ummantelung bei Gehäuse-Isolatoren liegt jedoch, neben den guten elektrischen Eigenschaften, in einer generell möglichen Verkürzung des Kriechweges (5) und Reduktion des Isolatorgewichtes.

Vorteilhaft werden heute additionsvernetzende Silikone eingesetzt, mit niedrigen Verarbeitungsviskositäten und hoher Elastizität über den gesamten Temperaturbereich.

Damit wird eine spannungsfreie Verbindung zwischen Trägerrohr mit Armaturen und der Ummantelung gewährleistet.

Die Qualität der Haftung der Silikonummantelung stellt bekanntlich für den Verbundisolator eine lebensnotwendige Grösse dar.

Es muss daher gewährleistet sein, dass mit chemischen Mitteln eine dauerhafte untrennbare Verbindung zum Trägerteil entsteht.

Diese Verankerung wird auf dem Trägerteil mit Metall-Armaturen mittels sogenannten Haftvermittlern (Primer), welche reaktionsfähige Silangruppen enthalten und mit dem reaktiven Silikon-Kautschuk chemisch abbinden, erreicht.

Auf bereits vulkanisiertem Silikon-Kautschuk wird mittels spezieller Silikon-Kautschuk-Dispersion eine Verankerung mit gleicher Elastizität, jedoch höherer mechanischer Festigkeit als das Beschirmungsmaterial selbst, erzielt.

Mittels geeigneter Beschirmungsanlagen kann die Anzahl von Verbindungsstellen (Lagebindung) des Beschirmungsmateriales je nach Isolatorlänge von 0 (Schlagweite \_ 1700 mm) bis auf max. 3 (Schlagweite \_ 4500 mm) begrenzt werden.

Der Herstellungsprozess bedingt peinliche Sauberkeit und hohe Qualitätsüberwachung, da am fertig ausvulkanisierten Bauteil eine Haftungskontrolle nur noch bedingt möglich ist.

## **2.3 Metallarmaturen**

Der Gehäuse-Verbundisolator ist im Normalfall an beiden Enden mit Metallarmaturen ausgerüstet. Sie dienen der Befestigung von Apparatebauteilen, dem Aufbau des Isolators auf das Hochspannungs-Gerät, z.B. Freiluft-Wandler, sowie der Kraftübertragung der am Isolator auftretenden Lasten.

Die Metallarmaturen können individuell dem HS-Apparat angepasst werden. Wichtig ist

jedoch eine mechanisch starke, gas- und flüssigkeitsdichte Verbindung zum Trägerrohr, welche mit einer speziellen Schrumpf- und Klebetechnik erreicht wird.

Die unterschiedliche Ausdehnung von Verbundwerkstoffen und Metallen über einen grossen Temperaturbereich bei der Herstellung der Isolatoren und im Betrieb muss besonders berücksichtigt werden. Heute wird für die Armaturen mehrheitlich Aluminium-Guss verwendet.

### **3. Anwendung des Gehäuse-Verbund-Isolators in der Hochspannungs-Isoliertechnik generell und für Freiluft-Wandler im speziellen**

Grundsätzlich kommt heute der Verbundisolator auf allen HS-Geräten, wie Durchführungen, Schaltern, Ableitern, Kabelendverschlüssen und Mess-Wandlern, etc., unabhängig vom inneren Isoliermedium, zum Einsatz.

(6) (7)

Die Vorteile gegenüber Porzellan sind:

- Explosionssicherheit, d.h. Sicherheit für Personal und Anlagen im Schadenfall.
- Hohe Erdbebenfestigkeit
- Sicherheit gegen Vandalismus
- Niedriges Gewicht und damit verbunden einfaches Handling und reduziertes Transport- und Bruchrisiko.
- Kleine Fabrikations-Toleranzen
- Ausgezeichnete elektrische Eigenschaften aufgrund der Silikonbeschirmung, siehe auch Abschnitt 2.2.
- Die Möglichkeit, auf einfache Art und Weise Lichtwellen-Leiter, gegen mechanische und chemische Beschädigung geschützt, im Trägerrohr einzubringen.

#### **3.1 Porzellan oder Verbundwerkstoffe als Gehäuse von Freiluftwandlern**

Die bekannten Bauarten von Freiluft-Wandlern sind Stromwandler, induktive und kapazitive Spannungswandler sowie kombinierte Wandler.

Der Aufbau des Aktivteiles dieser Bauarten von Freiluftwandlern kann je nach Hersteller im Konstruktionsprinzip und Isoliermedium verschieden sein.

Eines haben jedoch alle Bauarten gemeinsam, es wird zum Schutze des Aktivteiles eine dauerhaft zuverlässige, dichte und die mechanischen Aufgaben erfüllende "Hülle" benötigt.

Eine solche "Hülle" muss neben dem Schutz des Aktivteiles gegen Umwelteinflüsse und Beschädigung auch die äusseren elektrischen und thermischen Aufgaben übernehmen.

Traditionsgemäss wurden und werden auch noch heute Porzellane als Gehäuse verwendet. Porzellan als Gehäusematerial hat sich auch über viele Jahrzehnte bewährt und seine Funktion als Schutz des Aktivteiles bestens erfüllt.

Hochspannungsgeräte weisen jedoch trotz verbesserter innerer Isolierungen immer ein gewisses Restrisiko auf, wovon auch Freiluft-Wandler leider nicht ausgeschlossen sind.

Im Falle eines Isolationszusammenbruches verbunden mit einer energiereichen Entladung kommt es insbesondere bei öl/papierisolierten Wandlern durch Verdampfen des Oels in sehr kurzer Zeit zu einem hohen Druckanstieg im Gerät.

Isolieroele sind inkompressibel und die Druckwelle wirkt sofort auf das Gehäuse, was im Falle von Porzellan zum explosionsartigen Bersten führt. Druckentlastungseinrichtungen kommen dabei oft zu spät.

Beim gasisolierten Wandler liegt der Fall etwas anders, da wegen der Kompressibilität des SF<sub>6</sub>-Gases der Druckanstieg langsamer vor sich geht.

Trotzdem lässt sich auch hier ein Schaden mit Bersten des Porzellanen nicht völlig ausschliessen, da eine mechanische Vorbeschädigung des Isolators beim Transport oder Einbau in die Anlage auftreten kann, welche nicht bemerkt wird.

Ebenso können sich innere Spannungen im Porzellan bei Temperaturzyklen, starke einseitige Sonnenbestrahlung mit rascher Abkühlung durch Gewitterregen, lösen und zu Spannungs-Rissen führen.

Nicht auszuschliessen sind auch thermisch-mechanische Beschädigungen in Form von Rissen durch äussere Ueberschläge bei Ueber-Spannungen.

Alle diese Faktoren führten immer wieder in die Richtung, einen Gehäuse-Isolator einsetzen zu können, welcher eine hohe mechanische Festigkeit mit gleichzeitiger Elastizität und dadurch vor allen Dingen die so wichtige Berstsicherheit aufweist.

Verbundwerkstoffe erlauben solche Isolatoren herzustellen und machen diese auch für Erdbebengebiete zu einem sicheren Bauteil.

Die Möglichkeit faserverstärkte Kunststoffe einzusetzen existierte schon lange, das Problem bestand jedoch darin, diese auch freilufttüchtig zu machen.

Mittels den seit mehr als 10 Jahren verwendeten Ummantelungen aus Silikonkautschuk werden auch diese Anforderungen heute bestens erfüllt.

Der Verbundisolator ist jedoch nicht nur wegen der Sicherheitsaspekte für den Wandlerbauer interessant. Sein wesentlich niedrigeres Gewicht - bei Grossisolatoren bis 1 zu 4 des Porzellangewichtes - sowie die kleinen Mass-Toleranzen verglichen mit Porzellantoleranzen, geben dem Wandlerbauer die Möglichkeit, die den Isolator tragenden Bauteile einfacher und kostensparender zu konstruieren. Als Folge davon kann auch das den Wandler tragende Gestell in der Anlage kostengünstiger ausgelegt werden.

Dämpfungselemente in Erdbebengebieten sind nicht mehr nötig.

Die Frage, Porzellan oder Verbundwerkstoff als Gehäuse von Freiluftwandlern, kann aufgrund der beschriebenen Eigenschaften und den bis dato bekannten ausgezeichneten Betriebserfahrungen mit Isolatoren aus Verbundwerkstoff auf Freiluft-Wandlern und anderen HS Apparaten jeder Bauart bis zu den höchsten Betriebsspannungen, klar mit "ja" für den Verbundisolator beantwortet werden.

Der heute noch oft angesprochene Kostenfaktor muss im Zusammenhang mit der

Anwendung, wie z.B. druckbeaufschlagte Gehäuse, gleichbedeutend mit möglichst einteiligen und dickwandigen, daher teuren Porzellanen sowie auch der generellen Kosteneinsparung bei der mechanischen und konstruktiven Auslegung des Gerätes und der Anlagenteile, gesehen werden.

## **Literatur:**

- 1.) J. Kindersberger, M. Kuhl:  
Effect of Hydrophobicity on Insulator Performance, Sixth International Symposium on High Voltage Eng. Aug. 28 Sept. 1, 1989.
- 2.) F. Hammer, A. Küchler, G. Mäueler:  
Behavior of Bushings with Silicone rubber sheds, Sixth International Symposium on High Voltage Eng. Aug. 28 - Sept. 1, 1989.
- 3.) R. S. Gorur and J. W. Chang:  
Surface Hydrophobicity of Polymers used for outdoor insulation, 90 WM 023-2 PWRD, IEEE/PES 1990 Winter Meeting, Atlanta.
- 4.) Antonios E. Vlastos, Stanislaw M. Gubanski:  
Surface Structural Changes of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators.
- 5.)  
Bewährte Silikonschirmdurchführungen für erhöhte Sicherheit.
- 6.) W. B. Freeman, K. Froehlich, B. Fluri:  
Application of RTV-Composite Insulators for High Voltage Bushings.
- 7.) R. Amsinck:  
Hollow Composite Insulators for Outdoor Instrument Transformers and other Equipments.