

## **Moderne integrierte Fabrikationsmethoden mit LSR zur Herstellung von Isolations- und Steuerelementen für Mittelspannungsmuffen sowie deren Füllung mit Flüssigsilicon<sup>1</sup>**

Rainer F. Röder (für Vogel moulds and machines AG)  
Ralf F. Meier (Lovink Enertech b.v.)

### **Kurzfassung**

Um den rasch wachsenden Bedarf an dauerhaft zuverlässigen und wasserbeständigen Verbindungen sowohl von Kunststoff- als auch Papierkabeln abzudecken, wurde eine neue Mittelspannungsmuffe entwickelt. Innerer Isolierteil wie Steuerteile werden aus Flüssigsilicon-Kautschuk (LSR) gefertigt. Die Kombination aus diesem elektrisch stückgeprüften Aufschiebebauteil, der Einbettung in einen RTV-1-Kautschuk und dem mechanischen Schutz aus Polyestergehäuse und Gießharz machen die Muffe zu einem der zuverlässigsten Produkte, die auf dem Markt erhältlich sind. Es wird auf die Funktion, die eingesetzten Materialien, die Fertigung und die Montage einer 36 kV-Übergangsmuffe genauer eingegangen. Der Beitrag erlaubt einen Einblick in moderne, effiziente Methoden der Siliconelastomer-Verarbeitung für kleine und mittelgroße Serienfertigung sowie die Stückprüfung der Siliconbauteile und erläutert die vorteilhaften Eigenschaften der verwendeten Materialkombinationen.

---

<sup>1</sup> hier ist ein im normalen Anwendungsfall unverbundener RTV 1-Siliconkautschuk gemeint

# 1 Geschichte der Entwicklung

Die Niederlande blicken auf eine lange Tradition in ihrem Kabelnetz zurück und bauen auf diese Erfahrungen.

## 1.1 Ursprung

Die Niederlande liegen in einem Delta, das aus drei Flüssen gebildet wird. Rund 25 % der Landesoberfläche liegen unterhalb des Meeresspiegels. Überflutungen sind regelmässig vorkommende Ereignisse. Das bedeutet, dass Kabelsysteme einem hohen Wasserdruck ausgesetzt sein können und Muffenmontagen in überfluteten Montagegruben vorkommen. Aus diesem Grund wurde in den Niederlanden eine Norm geschaffen, die abweichend von den benachbarten Ländern einen wesentlich höheren Wasserdruck zur Prüfung von Kabelgarnituren vorschrieb.

Aus den ursprünglich 6 bar, die in der damaligen Kema-Norm genannt wurde, wurden 2 bar im heutigen Standard, daraus rührt die stabile Konstruktion die 40 Jahre überdauern musste.

Da es in den Niederlanden seit 1900 Kabelsysteme gibt und Lovink Ener-tech seit 1919 Kabelgarnituren entwickelt und produziert, kann auf eine grosse Erfahrung gebaut werden.



## 1.2 Warum so wie heute?

Früher wurde zur Verbindung von zwei Massekabeln ein gusseisernes Gehäuse mit Öl gefüllt und mit Bitumen abgedichtet oder nur mit Bitumen als Primärisolation befüllt. Manche Muffen hatten eine bleierne oder kupferne Innenmuffe. Auch allerlei „Eigenkonstruktionen“ waren bei den damaligen EVUs im Einsatz. Diese Art Muffen liegen noch immer zu tausenden im Boden und funktionieren tadellos. Das Kabelnetzwerk in den Niederlanden besteht heute zum grössten Teil aus Masse- und Kunststoffkabeln. Die zur Verbindung dieser Kabel benötigten Übergangsmuffen sind in Anlehnung an die traditionelle Ausführung im Prinzip noch zu vergleichen, allerdings werden moderne Kunststoffe verwendet.

# 2 Aktuelles Design

## Silicongefüllte 12 kV-Übergangsmuffe

### 2.1 RTV 1-Silicon

Zur Herstellung der Hauptisolierung wird ein (im normalen Anwendungsfall der Muffe) flüssiger RTV 1-Siliconkautschuk verwendet, um die Vorteile des in der herkömmlichen Muffe verwendeten Isolieröles zu erhalten.<sup>1</sup>

Alle möglichen Kabelkonstruktionen können mit dieser Technologie verbunden werden. Der Nachteil der Feuchteempfindlichkeit des Öles besteht mit dem Siliconkautschuk nicht mehr. Es wird ein RTV 1-Kautschuk eingesetzt, der bei Zutritt von Feuchtigkeit zu einem Siliconelastomer aushärtet und somit als Abdichtung gegen Wasserpenetration fungiert.



## 2.2 Feldsteuerung

Bei 10 kV nominaler Netzspannung kann bei einem dreiadrigen Kabel auf eine einzelne Schirmung der Adern verzichtet werden, da die Feldstärken zwischen den abgerundeten Verbindern nicht in einen kritischen Bereich kommen. Für den Schutz gegen direkten Kontakt zwischen den Aussenleitern werden Abstandhalter und Verbinderröhren eingesetzt. Zur Feldsteuerung an der Absetzkante der Kunststoffkabel werden Deflektoren verwendet.

## 2.3 Mechanischer Schutz



Da die Lebenserwartung einer Mittelspannungs-Muffe bei weit über 30 Jahren liegt, müssen die mechanischen Teile entsprechend robust ausgelegt sein. Die beschriebene Muffe besteht aus einer Innenmuffe aus Polyester, die den flüssigen RTV 1-Siliconkautschuk umhüllt, und einer Aussenmuffe aus Polypropylen (PP), die als Giessform für eine Polyurethan-Abdichtung dient.

## 3 Herausforderungen

Entwicklung einer Übergangsmuffe für 36 kV auf Basis des bestehenden 12 kV-Prinzips.

**3.1 Übergang Öl/Papier - Kunststoff**  
Der flüssige RTV 1-Siliconkautschuk tränkt die Öl/Papier-Seite des Kabels nach und verhindert das Austrocknen der Isolation. Auf der Kunststoffkabelseite fungiert das gleiche Material ebenfalls als Isolation und schmiegt sich der Kunststoffisolation des Kabels nahtlos an, so dass es keine Probleme beim Interface der beiden Kunststoffe gibt. Die hohe Durchschlagsspannung von 21 kV/mm und eine relative Dielektrizitätskonstante von 2,8 machen das Material geeignet für die Anwendung bei höheren Spannungen.

### 3.2 Feldsteuerung

Die Feldsteuerung rund um den Verbinder konnte nicht wie bei der 12 kV-Muffe nur der Geometrie des Schraubverbinders überlassen werden, es musste eine Lösung gefunden werden, die die höheren Feldstärken gezielt steuert.

### 3.3 Abdichtung

Die Abdichtung rund um die innere Polyester-muffe sollte mit einem 2-Komponenten-PUR-Harz realisiert werden, wie es bereits bei den 12 kV-, bzw. 24 kV-Muffen der Fall ist. Dabei werden das Harz und der Härter in Zwei-

kammerbeuteln geliefert, die auf der Baustelle gemischt werden. Beide Komponenten verbleiben in dem gemeinsamen Kunststoffbeutel, der nach dem Mischvorgang aufgeschnitten wird, worauf das PUR-Harz in die Aussenmuffe gegossen wird. Der entscheidende Vorteil dieser Abdichtungsweise ist, dass die Flüssigkeit sowohl die diversen Kabel und die Schirmverbindung als auch die Muffe vollständig umfließt und nach dem Aushärten ein robuster und wasserbeständiger Schutz vorhanden ist.



### 3.4 Upgrading

Durch das höhere Spannungsniveau wurden auch die Kabelisolationen dicker und somit die Kabel grösser. Das Papierkabel ist im Normalfall armiert und mit einem Bleimantel versehen. Das Gewicht des Kabels und die Dimensionen sollten in der Muffe sicher aufgenommen und auch abgedichtet werden. Die Abmessungen sowohl der inneren wie auch der äusseren Muffe würden demnach entsprechend gross ausfallen. Die Montage sollte so einfach wie möglich ablaufen, um auf der

Baustelle die Montagezeit kurz zu halten.

## 4 Konstruktion

### 4.1 Lastenheft

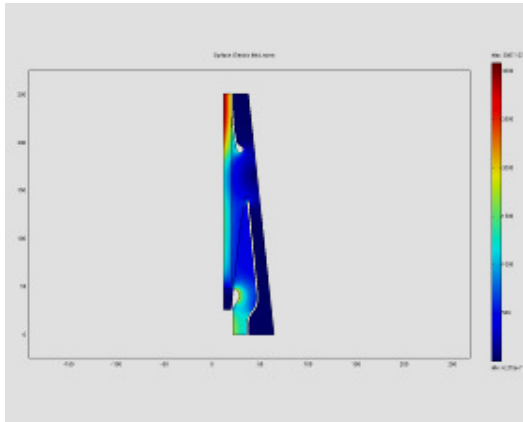
Diese kundenspezifische Entwicklung wurde in engen Grenzen nach den Vorstellungen sowohl der verantwortlichen Planer wie auch der Monteure ausgeführt. Gründe für dieses Upgraden der bestehenden 12 kV-Muffen waren die guten Erfahrungen mit den Garnituren und die daraus resultierenden stark reduzierten Ausfallminuten. Als Vorgaben wurden die gleiche Einfachheit der Montage und Beständigkeit im Feld genannt. Ausserdem sollte sowohl eine Übergangsmuffe für dreidrigige als auch Verbindungsmuffe für einadrigige Kabel realisiert werden. Die Verbindungsmuffe wird nach HD629.1 S2 2006 geprüft, in der eine Teilentladungsmessung vorgeschrieben wird. Somit musste ein entladungsfreies Konzept bedacht werden, das mit dem Aufschiebesteuerer (Sleeve) in die Tat umgesetzt wurde.

### 4.2 Sleeve



Es wurde ein Aufschiebesteuerer (Sleeve) aus POWERSIL®-Flüssigsilikonkautschuken entwickelt, das über den Verbinder geschoben wird und durch seine Formgebung<sup>2</sup> das Feld geometrisch steuert.

Mit dem FEM-Programm Comsol Multiphysics wurden verschiedene Entwürfe geprüft, wovon schlussendlich eine Form übrig blieb.



Hergestellt wird der Sleeve auf zwei Spritzgiess-Einheiten die im Kapitel Produktion näher erläutert werden. Im Prinzip besteht der Aufbau aus einer inneren Elektrode aus elektrisch leitfähigem Flüssigsilikonkautschuk, die durch isolierenden Siliconkautschuk in geeigneter Weise umhüllt ist. Auf der Aussenseite wird eine elektrisch leitfähige Schicht aufgetragen. Die Enden des Sleeve sind trompetenförmig geöffnet, um eine Umspülung mit dem flüssigen RTV 1-Kautschuk und somit eine einfache Komplettierung der Isolation sicherzustellen. Die Funktionsfähigkeit der Muffe wird durch die Füllung mit dem RTV 1-Kautschuk erreicht.



#### 4.3 Technische Lösungen

Wie erwartet, wurden die innere wie auch die äussere Muffe in ihren Abmessungen grösser als alle bisherigen Lovink-Mittelspannungs-Muffen. Durch die Lösung mit den Sleeves werden

die Gehäuse recht gross, sind aber im Vergleich mit anderen Lösungen noch immer handlich. Ausserhalb der Verbinden wurden in kurzen Abständen Stützscheiben in die Muffe integriert, um die Kräfte der Kurzschlussströme zu beherrschen.

#### 4.4 CAD-Designentwurf

Die gesamte Muffe inklusive Sleeves, Stützscheiben, Polyesterermuffe und Aussenhülle wurde in 3-D entworfen. Da die PP-Aussenschalen bei externen Zulieferern bezogen werden, mussten die Formen für den Spritzguss in der eigenen Konstruktionsabteilung schon relativ früh in der Entwicklungsphase definiert werden.



## 5 Material (Silicone)

### 5.1 Siliconkombination

Bei der gemeinsamen Verwendung der verschiedenen isolierenden und elektrisch leitfähigen Siliconformteile und des RTV 1-Silikonkautschukes musste darauf geachtet werden, dass die Funktion der Muffe nicht durch eine mögliche gegenseitige Beeinflussung beeinträchtigt wird. Da das Zusammenspiel von RTV 1 und Flüssigsilikonkautschuk in dieser Form in einer Kabelmuffe auf dem Markt nicht vorkommt, waren grundlegende Laboruntersuchungen notwendig.

## 5.2 Wechselwirkung

Das Eindringen von Bestandteilen des RTV 1-Füllmaterials in den elektrisch leitfähigen Flüssigsilikonkautschuk würde ggf. dessen Funktion insoweit beeinflussen, als die homogene Abschirmung und Steuerung des elektrischen Feldes nicht mehr funktionieren würde. Deshalb entwickelte der Lieferant einen speziellen Siliconkautschuk, der sich durch hohe Stabilität der elektrischen Leitfähigkeit bei der Wechselwirkung mit dem flüssigen RTV-1-Kautschuk auszeichnet.

Auch der Einfluss von eingeschlossener Feuchtigkeit in den LSR- Steuerteilen ist nicht vernachlässigbar, da diese mit dem in die Muffe eingegossenen RTV 1-Kautschuk reagieren würde. Dieser Effekt ist durch prozesstechnische Massnahmen zu eliminieren.

## 5.3 Stabilität

Die Langzeitstabilität des elektrisch leitfähigen Flüssigsilikonkautschukes wurde mit Hilfe einer Wärmebildkamera qualitativ beurteilt. Dazu wurde die Oberfläche mit zwei Elektroden kontaktiert. Ein genügend hoher Wechselstrom sorgte für eine Erwärmung, deren Homogenität mit der Kamera sichtbar gemacht wurde. Verschiedene Siliconkautschuke wurden so hinsichtlich der Stabilität der elektrischen Leitfähigkeit miteinander verglichen.

## 5.4 Abdichtung PUR

Das im Hause Lovink entwickelte und produzierte Giessharz hat sich in mehr als 20 Jahren bewährt und konnte auch in dieser Anwendung verwendet werden. Die verwendete Menge und die dazugehörigen Zweikammerbeutel wurden der Muffe angepasst. Soll heissen, die Beutel müssen vom Volumen und Gewicht her gut zu handhaben sein.



## 6 Produktion<sup>3</sup>

Die Produktion für die Herstellung von Siliconbauteilen für die Kabelmuffen wurde komplett neu aufgebaut. Nachdem die Versuche im Technikum der Firma Hedrich in Katzenfurt die Machbarkeit und die Auswahl der Maschinen bestimmt hatten, wurden die entsprechenden Komponenten bei der Firma Lovink installiert und in Betrieb genommen.



Die Produktion läuft heute gemäss den Rahmenbedingungen für die Erstmuster und wird jetzt für weitere Typen ausgebaut.

Die beiden installierten Linien unterscheiden sich in der Verwendung der auf ihnen eingesetzten Siliconelastomere und den daraus resultierenden Unterschieden in der Maschinenteknik, vor allem in der Dosiereinrichtung.

Die grossen Unterschiede in der Viskosität resultieren in einem etwas abweichenden Maschinenkonzept für die

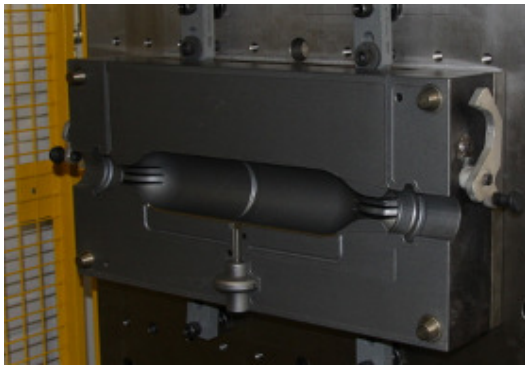
beiden in Linie verwendeten Produktionslinien.

Eine klare Trennung der Produktionslinien ist notwendig, da der elektrisch leitfähige Flüssigsilikonkautschuk nicht auf der gleichen Maschine verarbeitet werden darf wie der isolierende Siliconkautschuk.

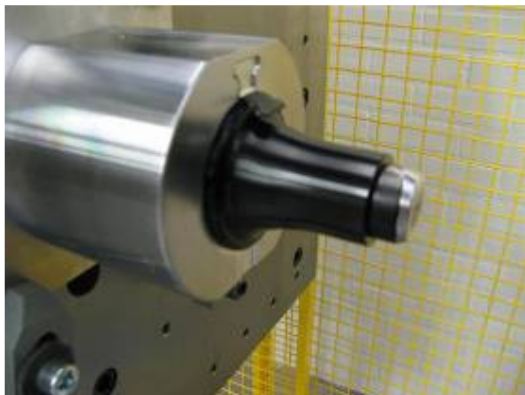
#### 6.1 Linie 1 (isolierender LSR)

Diese Linie ist ausgerichtet auf die Produktion von Siliconformteilmteilen aus elektrisch isolierendem Flüssigsilikonkautschuk.

Die Produktionslinie besteht aus Dosiereinrichtung, einer Schliessmaschine und der entsprechenden Form für den Siliconelastomerverguss.



#### 6.2 Linie 2 (leitfähiger LSR)



Im Unterschied zur Linie 1 ist die Linie 2 mit einer Dosiereinrichtung ausgestattet, die die Verarbeitung des elektrisch leitfähigen Siliconkautschukes gestattet, der eine etwas höhere Vis-

kosität hat als der elektrisch isolierende Kautschuk.

Die zu verarbeitenden Mengen sind relativ klein, deshalb wird der Siliconkautschuk aus 20-Liter-Fässern gefördert. Auch ist diese Dosiereinrichtung für kleine Fördermengen ausgelegt, da für eine Formfüllung nur 100 ml bis 200 ml benötigt werden.



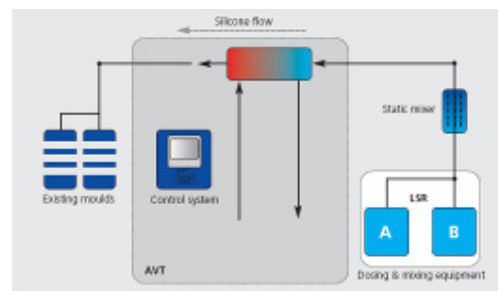
Alle Einrichtungen sind so ausgelegt, dass zu einem späteren Zeitpunkt, wenn von der Kapazität her notwendig, auch grosse 200 Liter Fässer verwendet werden können.

#### 6.3 Ausblick AVT<sup>4</sup>

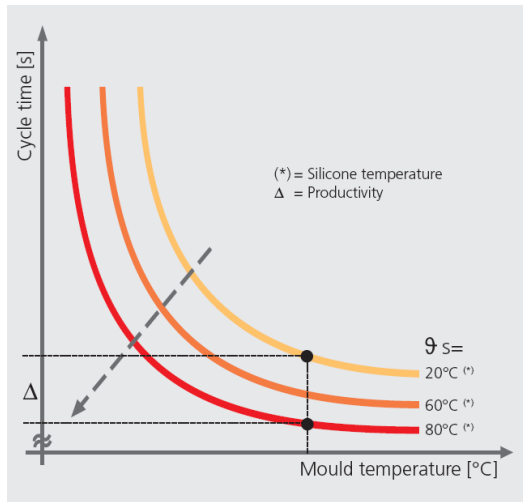
Die heute bestehende Produktion kann, wenn die Auslastungsgrenze erreicht ist, durch die Verwendung eines AVT (Advanced Vulcanization Technology), der den Ausstoss der Produktion um 30% steigern kann, ergänzt werden.

Das Prinzip basiert auf einem Patent der Firma Hedrich, welche diese Methode, dort UFC, schon seit langem für Epoxyd-Verfahren verwendet.

Die prinzipielle Wirkungsweise ist die Erwärmung des Silicons vor Füllung in die Form.



Dadurch muss die notwendige Wärmeenergie nicht über die Heizung der Form in das Silicon übertragen werden, was zu einer Zykluszeitreduktion führt.



Dieses Verfahren zeigt gute Resultate nicht nur für Siliconformteile in der Kabelgarniturenherstellung, sondern auch in der Produktion von Kunststoff-Hohlisolatoren und ebenso bei Langstabisolatoren.

Das Verfahren wurde zusammen mit der Firma Wacker Chemie AG speziell für POWERSIL®XLR®-Silicone entwickelt und getestet.

Zwischenzeitlich wurden erfolgreich Versuche durchgeführt, was die Einsetzbarkeit für Materialien zur Herstellung von grossen Siliconbauteilen bis 60 Liter Füllvolumen möglich macht.

## 7 Qualitätssicherung

Sowohl die Übergangs- als auch die Verbindungsmuffen sind im elektrischen MS-Netz ( $U_n = 33 \text{ kV}$ ) des Kunden an hohe Qualitätsstandards gebunden und die Anforderungen an die Qualitätssicherung in Fertigung und Stückprüfung sind entsprechend hoch.

### 7.1 Hochspannungsnorm und TE

In der IEC 60840, dem Standard für Hochspannungskabel und deren Gar-

nituren bis 170 kV ( $U_{\max}$ ), wird eine elektrische Stückprüfung der Steuerteile vorgeschrieben. In Anlehnung an diesen Standard wurden die Anforderungen auf das 36 kV-Niveau heruntergerechnet und auf die Sleeves angewendet.



Bei jedem einzelnen Aufschiebesteuer-teil wird eine erhöhte Wechselspannung angelegt und dabei eine Teilentladungsmessung durchgeführt. Somit ist sichergestellt, dass die Steuerteile keine Luftschlüsse oder sonstige Fehlstellen beinhalten.

### 7.2 Prüfadapter

Durch den Hybridbau der Isolation in der Muffe, bestehend aus flüssigem RTV 1-Silicon und vernetzten Flüssigsiliconkautschuken, musste für die Stückprüfung ein entsprechender Prüfadapter entwickelt werden, der aus einem zweikomponentigen RTV hergestellt wird. Der Adapter kann durch die hohe Prüfungsbeanspruchung im Laufe der Zeit Schaden nehmen. Daher ist ein gewisser Vorrat nötig um die Kontinuität der Produktion sicher zu stellen.

### 7.3 Integration in die Fertigung

Die Stückprüfung wird als Teil des Fertigungsprozesses integriert. Nach der Produktion werden die Sleeves der Sicht- und elektrischen Stückprüfung unterzogen und in aluminiumbeschichtete, diffusionsdichte Schutzbeutel verpackt.

## 8 Zusammenfassung

Ein Upgrade von bestehenden 12 kV-Mittelspannungsmuffen auf 36 kV geschieht nicht einfach nur durch Vergrössern des Massstabes der Zeichnungen. Bedingt durch komplexere Kabelkonstruktionen, höhere Feldstärken und die Forderung nach entladungsfreien Steuerteilen werden hohe Anforderungen an die verwendeten Isolierstoffe und deren Verarbeitung gestellt. Im Spritzguss-Verfahren hergestellte Steuerteile haben den entscheidenden Vorteil, dass sie nach der Fertigung elektrisch stückgeprüft werden können und somit ein grosser Teil der Zuverlässigkeit der montierten Muffe garantiert werden kann.

Moderne flüssige Isoliermaterialien, wie z. Bsp. der hier eingesetzte RTV 1-Kautschuk dienen im Feld der sicheren Montage, da sie sich durch Befüllung einfach in die Muffe einbringen lassen.

Die Kombination von Flüssigsilicon-Kautschuken und PUR mit intelligenten Gehäusekonzepten aus Polyester und Polypropylen sorgen für zuverlässige Kabelverbindungen, die 40 Jahre und länger ihren Dienst tun.

## 9 Literatur

<sup>1</sup> Advances in Fluid Silicone Jointing Technology for MV Cables; Jeroen Krak, Ralf F. Meier; Cablewire Mumbai 2008

<sup>2</sup> Optimization techniques for electrode design ; Frank C. van Minnen, Bert L. Brus; Lovink Energetech Publication 2005

<sup>3</sup> Moderne Produktionsprozesse für die Produktion von Hohlisolatoren aus LSR für den Einsatz bei elektrischen Apparaten in der Hochspannungstech-

nik; Rainer F. Röder; 1. BIK, Burghausen 2007

<sup>4</sup> Equipment Manufacturer Aims to Boost Productivity of Insulator Molding Cycle; INMR Q2/2008