

Vergleich von MS-Kabelmuffentechnologien (11 kV–33 kV)

Einleitung

MS-Kabelmuffen sind kritische Komponenten in unterirdischen Stromnetzen. Ihre Aufgabe besteht nicht nur darin, zwei Kabelabschnitte miteinander zu verbinden, sondern die elektrische, mechanische und umgebungsbedingte Leistungsfähigkeit möglichst nahe am ursprünglichen Kabelsystem wiederherzustellen (IEEE, 2022; CENELEC, 2019). In der Praxis bedeutet dies, dass eine Kabelmuffe unter thermischer, elektrischer und umweltbedingter Belastung eine zuverlässige Isolierung, stabile Feldsteuerung, mechanischen Schutz und eine langfristige Abdichtung gewährleisten muss (IEEE, 2022; IEC, 2023). Dieses Whitepaper vergleicht die wichtigsten Muffentechnologien für 11-kV- bis 33-kV-Systeme: Warmschrumpf-, Kaltschrumpf-, Harz-, vorgefertigte und hybride Konstruktionen. Der Vergleich basiert auf Normen, Herstellerinformationen und veröffentlichten Untersuchungen zu Kabelgarnituren, Teilentladungen und Materialalterung (IEEE, 2022; IEC, 2023; MDPI, 2025; MDPI, 2024).

Funktionale Anforderungen an eine MS-Kabelmuffe

Eine Mittelspannungs-Kabelmuffe muss drei grundlegende Anforderungen erfüllen. Erstens muss sie den elektrischen Belastungen des Betriebssystems standhalten, ohne lokale Feldüberhöhungen zu erzeugen. Zweitens muss sie die Kabelschnittstelle gegen Feuchtigkeit, Verunreinigungen und mechanische Beschädigungen schützen. Drittens muss sie diese Eigenschaften über die vorgesehene Lebensdauer aufrechterhalten, auch unter thermischen Zyklen und kurzschlussbedingten Belastungen (IEEE, 2022; CENELEC, 2019). In der Praxis gehen Ausfälle in Kabelsystemen häufig eher von Kabelgarnituren als vom Kabel selbst aus. Deshalb sind die Qualität der Schnittstellen, eine gleichbleibend hohe Installationsqualität und die Vermeidung von Hohlräumen von zentraler Bedeutung für die Auslegung von MS-Kabelmuffen (MDPI, 2025; MDPI, 2023). Teilentladungen sind dabei besonders relevant, da sie typischerweise in gasgefüllten Hohlräumen, unvollkommenen Grenzflächen oder kontaminierten Bereichen entstehen und das Isolationssystem im Laufe der Zeit schrittweise schädigen können (MDPI, 2025; MDPI, 2023).

Normen und Prüfrahmen

Für MS-Kabelgarnituren im Spannungsbereich von 11 kV bis 33 kV ist die IEC 60502-4:2023 die wichtigste internationale Referenz. Sie definiert die Typprüfanforderungen für Garnituren von Energiekabeln mit Nennspannungen von 3,6/6 kV bis 18/30 kV sowie allgemein für die von der Norm abgedeckten Systeme bis 30 kV (IEC, 2023). Für den europäischen Markt legt die HD 629-1-S3 Leistungsanforderungen für Kabelgarnituren

an energie-kabeln mit extrudierter Isolierung im gleichen allgemeinen Spannungsbereich fest (CENELEC, 2019). Diese Dokumente sind von Bedeutung, da sie eine gemeinsame technische Grundlage für die Bewertung von Kabelmuffen schaffen, anstatt sich ausschließlich auf Herstellerangaben zu stützen. IEEE 404-2022 definiert ebenfalls elektrische Kennwerte und

Prüfanforderungen für Kabelmuffen an geschirmten Kabeln mit extrudiertem oder laminiertem Dielektrikum und dient als zusätzliche Referenz für Leistungserwartungen und Prüfdisziplin (IEEE, 2022).

Auch die Teilentladungsprüfung spielt eine zentrale Rolle in der Qualitätssicherung. In der Praxis werden Teilentladungsmessungen sowohl bei Werksprüfungen als auch bei der Inbetriebnahme eingesetzt, um beginnende Isolationsfehler und Installationsmängel in MS-Kabelsystemen und Kabelgarnituren frühzeitig zu erkennen (Megger, 2025). Daher ist das Teilentladungsverhalten ein relevantes Bewertungskriterium beim Vergleich verschiedener Kabelmuffentechnologien.

Warmschrumpftechnologie

Warmschrumpf-Kabelmuffen verwenden thermisch aktivierte Materialien, die sich beim Erwärmen um die vorbereitete Kabelschnittstelle zusammenziehen. Sie sind weit verbreitet, mechanisch robust und vielen Kabelmonteuren vertraut (Lovink, o. D.). Ihre größte Stärke liegt in ihrer breiten Anwendbarkeit und dem vergleichsweise einfachen Materialaufbau, insbesondere wenn die Installationsbedingungen gut kontrolliert sind und erfahrene Kabelmonteure zur Verfügung stehen.

Die größte Einschränkung ist die Sensibilität gegenüber der Installation. Warmschrumpfsysteme erfordern eine korrekte Erwärmung, eine saubere Oberflächenvorbereitung und eine konsequente Einhaltung der Installationsabläufe während der Montage. In Umgebungen, in denen offenes Feuer eingeschränkt ist, Genehmigungen schwer zu erhalten sind oder nur begrenzter Arbeitsraum zur Verfügung steht, kann diese Installationsmethode weniger praktikabel sein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Warmschrumpftechnologie eine robuste Lösung sein kann, bei ungünstigen Bedingungen vor Ort jedoch nur begrenzt fehlertolerant ist.

Kaltschrumpftechnologie

Kaltschrumpfsysteme verwenden elastomere Komponenten, die sich ohne externe Wärmezufuhr um die Kabelschnittstelle zusammenziehen. Dies verbessert die Reproduzierbarkeit der Installation und macht Arbeiten mit offener Flamme überflüssig, was in vielen industriellen Umgebungen von Vorteil ist. Das Verfahren reduziert zudem eine Quelle installateurbedingter Variabilität, da die radiale Anpresskraft in die Geometrie des Zubehörs integriert ist und nicht erst während des Erwärmungsprozesses erzeugt wird. Die zentrale technische Herausforderung ist die langfristige Stabilität der

Schnittstelle. Veröffentlichte Forschungsergebnisse zeigen, dass der Anpressdruck an der Grenzfläche von Silikonkautschuk-Komponenten in Kabelmuffen durch Temperatur und thermische Alterung beeinflusst wird und dass diese Veränderungen das langfristige elektrische Verhalten beeinflussen können (Xia et al., 2023; Du et al., 2024). Das bedeutet nicht, dass Kaltschrumpftechnologie ungeeignet ist; es bedeutet jedoch, dass die Alterung des Elastomers und die Aufrechterhaltung des Anpressdrucks entscheidend für die Leistungsfähigkeit über die gesamte Lebensdauer sind.

Harztechnologie

Harz-Kabelmuffen umschließen die Verbindung mit einer aushärtenden Vergussmasse. Ihr größter Vorteil ist der hohe äußere Schutz: Nach dem Aushärten bildet die Muffe eine starre Barriere gegen Wassereintritt, Bodenbewegungen und mechanische Einwirkungen (Lovink, o. D.). Dadurch eignet sich die Harztechnologie besonders für Anwendungen, bei denen eine zuverlässige Abdichtung und hohe Robustheit im Vordergrund stehen.

Die größte Herausforderung besteht darin, dass starre Systeme auf einen hohlraumfreien Verguss und eine korrekte innere Geometrie angewiesen sind. Nach dem Aushärten des Harzes lassen sich Fehler nur schwer korrigieren, wodurch die Installationsqualität trotz des hohen mechanischen Schutzes weiterhin entscheidend bleibt.

Harzsysteme sind daher aufgrund ihrer Abdichtungseigenschaften und Robustheit attraktiv, gleichen jedoch innere Unregelmäßigkeiten oder Installationsfehler nicht automatisch aus.

Vorgefertigte Technologie

Vorgefertigte Systeme basieren auf werkseitig geformten Isolierkörpern mit kontrollierter Geometrie. Ihre größte Stärke ist die Konsistenz: Das Isolationsprofil und die Feldsteuerungsgeometrie werden unter kontrollierten Fertigungsbedingungen hergestellt, anstatt vollständig vor Ort geformt zu werden (INMR, o. D.). Dies kann eine zuverlässige Feldsteuerung unterstützen, sofern die Kabelgarnitur korrekt auf das Kabel abgestimmt und ordnungsgemäß installiert wird.

Ihre Einschränkung besteht darin, dass die Installationsqualität weiterhin entscheidend ist. Passgenauigkeit, Vorbereitung der Schnittstellen sowie ein eventuell erforderlicher zusätzlicher Außenschutz beeinflussen die spätere Leistungsfähigkeit der Kabelmuffe (INMR, o. D.; IEEE, 2022).

Mit anderen Worten: Vorgefertigte Konstruktionen reduzieren bestimmte Variationen im Installationsprozess, beseitigen jedoch nicht die Bedeutung einer fachgerechten Montage.

Elektrische Feldsteuerung

Die elektrische Feldsteuerung ist eine der zentralen Konstruktionsanforderungen bei MS-Kabelmuffen. An der Stelle, an der die Kabelschirmung zurückgeschnitten wird, konzentriert sich das elektrische Feld. Ohne geeignete Maßnahmen kann diese lokale Feldüberhöhung die Alterung beschleunigen oder zu einem Ausfall der Isolierung führen (Power and Cables, o. D.; IEEE, 2022).

Die Feldsteuerung wird daher durch eine Kombination aus Geometrie, feldsteuernden Materialien und sorgfältig ausgelegten Schnittstellen erreicht (IEEE, 2022; INMR, o. D.). Auch die Materialverträglichkeit spielt hierbei eine wichtige Rolle. Unterscheiden sich die dielektrischen Eigenschaften der Muffenisolierung deutlich von denen der Kabelisolierung, kann es an der Grenzfläche zu Feldverzerrungen kommen.

Lovink gibt an, dass LoviSil® mit einem dielektrischen Verhalten entwickelt wurde, das dem von VPE ähnelt, um diesen Effekt zu reduzieren. Im Rahmen dieses Whitepapers sollte dies als Herstellerangabe dargestellt werden, sofern keine unabhängigen Messungen vorliegen (Lovink, o. D.).

Aus technischer Sicht ist dieser Zusammenhang nachvollziehbar: Eine stabile Permittivität und eine gute Kompatibilität der Schnittstellen unterstützen eine gleichmäßige Feldsteuerung.

Teilentladungen und Langzeitzuverlässigkeit

Teilentladungen gelten als einer der wichtigsten Alterungs- und Ausfallmechanismen bei Kabelgarnituren (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Megger, 2025). Sie entstehen typischerweise in Hohlräumen, Lufteinschlüssen, Verunreinigungen oder unzureichend kontrollierten Schnittstellen und können die Isolierung fortschreitend schädigen, bis es zum Ausfall kommt. Deshalb ist die Qualität der inneren elektrischen Schnittstelle häufig wichtiger als das äußere Erscheinungsbild der Kabelmuffe.

Untersuchungen an Kabelgarnituren aus Silikonkautschuk zeigen, dass thermische Alterung und mechanische Kompression den Anpressdruck an den Schnittstellen sowie das Materialverhalten im Laufe der Zeit verändern können (Xia et al., 2023; Du et al., 2024; RSC, 2026). Das bedeutet, dass die Langzeitzuverlässigkeit nicht nur von der ursprünglichen Konstruktion abhängt, sondern auch davon, wie sich die Kabelgarnitur nach Jahren thermischer Zyklen und Umwelteinflüssen verhält.

Aus diesem Grund sollten Aussagen über eine „Teilentladungsimmunität“ vermieden werden, sofern sie nicht durch unabhängige Nachweise unter relevanten Prüfbedingungen belegt sind.

Hybridarchitektur

Eine hybride Kabelmuffenarchitektur trennt die elektrischen und mechanischen Funktionen der Kabelgarnitur voneinander. Im Lovink-Konzept wird Flüssigsilikon für die elektrische Isolierung und den Schnittstellenbereich eingesetzt, während eine äußere Harzschicht die mechanische Festigkeit und die Abdichtung gegenüber Umwelteinflüssen gewährleistet (Lovink, o. D.).

Der Konstruktionsansatz ist überzeugend, da nicht ein einzelnes Material beide Aufgaben gleichermaßen erfüllen muss. Aus technischer Sicht ist dies ein sinnvoller Ansatz. Das Flüssigsilikon kann die Vermeidung von Hohlräumen und die Kompatibilität an der elektrischen Schnittstelle unterstützen, während die äußere Harzschicht einen robusten Schutz gegen Feuchtigkeit, Verunreinigungen und mechanische Belastungen bietet.

Lovink beschreibt dies als ein langlebiges Kabelmuffenkonzept mit Praxiserfahrung und normgerechter Prüfung. Diese Aussagen sollten jedoch eindeutig als Herstellerangaben gekennzeichnet werden, sofern sie nicht durch unabhängige Prüfdaten ergänzt werden (Lovink, o. D.; IEEE, 2022; IEC, 2023).

Vergleichende Bewertung

Die Technologien unterscheiden sich vor allem in vier Bereichen: Installationssensibilität, Stabilität der elektrischen Schnittstelle, mechanische Robustheit und Alterungsverhalten. Warmschrumpftechnologien sind bewährte Allround-Lösungen, hängen jedoch stärker von einer fachgerechten Installation und einer kontrollierten thermischen Verarbeitung ab (Lovink, o. D.; IEEE, 2022).

Kaltschrumpftechnologien verbessern die Wiederholbarkeit der Installation, ihre langfristige Leistungsfähigkeit hängt jedoch von der Alterung des Elastomers und dem dauerhaften Erhalt des Anpressdrucks an der Schnittstelle ab (Xia et al., 2023; Du et al., 2024).

Harzsysteme bieten einen hohen Schutz gegenüber Umwelteinflüssen und eine zuverlässige Abdichtung, setzen jedoch eine qualitativ hochwertige Vergussausführung voraus und gleichen innere Hohlräume nach dem Aushärten nicht automatisch aus (Lovink, o. D.; IEEE, 2022).

Vorgefertigte Systeme bieten eine kontrollierte Geometrie und eine konsistente Feldsteuerung, sind jedoch weiterhin auf eine präzise Passform und eine fachgerechte Installation angewiesen (INMR, o. D.; IEEE, 2022).

Hybride Systeme bieten eine ausgewogene Architektur, indem sie Hohlraummanagement auf der elektrischen Seite mit einem starren mechanischen Schutz auf der Außenseite kombinieren.

Auswahlkriterien nach Anwendung

Die Wahl der Technologie sollte auf den Anwendungsbedingungen basieren und nicht auf einer allgemeinen Präferenz für eine bestimmte Lösung. Wo eine Installation ohne offene Flamme erforderlich ist, bieten nichtthermische Systeme einen klaren praktischen Vorteil. Wo Bodenbewegungen, Feuchtigkeitseinwirkung oder externe mechanische Belastungen dominieren, gewinnt ein harzbasierter Außenschutz besonders an Bedeutung. Liegt der Schwerpunkt auf einer langfristig hochwertigen elektrischen Schnittstelle, Spannungssteuerung und der Unterdrückung von Teilentladungen, wird die Auslegung der Schnittstelle selbst zum entscheidenden Faktor (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Megger, 2025). In diesem Zusammenhang verdienen Hybridsysteme besondere Beachtung, da sie das Management der elektrischen Schnittstelle mit einer robusten äußeren Abdichtung und Schutzfunktion kombinieren. Für anspruchsvolle Mittelspannungsanwendungen ist die beste Technologie in der Regel diejenige, die am besten zu den tatsächlichen Betriebsbedingungen, den Installationsanforderungen und den Zuverlässigkeitszielen passt (IEEE, 2022; CENELEC, 2019).

Fazit

Keine einzelne Muffentechnologie ist für jede Mittelspannungsanwendung die beste Lösung. Warmschrumpf-, Kaltschrumpf-, Harz- und vorgeformte Systeme haben jeweils ihre Berechtigung, abhängig vom Projektkontext, den Installationsbedingungen und den Zuverlässigkeitsanforderungen (IEEE, 2022; IEC, 2023). Die technische Fachliteratur zeigt, dass Teilentladungen, die Qualität der Grenzfläche und das Alterungsverhalten entscheidende Faktoren für die langfristige Leistungsfähigkeit sind. Dadurch gewinnen die Vermeidung von Hohlräumen und eine wirksame Spannungssteuerung bei der Auslegung von Kabelmuffen besondere Bedeutung (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Xia et al., 2023).

Eine Hybridarchitektur auf Basis von Flüssigsilikon und Harz ist technisch nachvollziehbar, da sie die elektrischen und mechanischen Funktionen der Kabelmuffe voneinander trennt. Dieser Ansatz kann das Gleichgewicht zwischen Grenzflächenstabilität, Abdichtung und mechanischer Robustheit verbessern, sofern die Konstruktion nach relevanten Normen validiert wird und, soweit möglich, durch unabhängige Nachweise gestützt ist (Lovink Enertech, o. D.; IEEE, 2022; IEC, 2023).

Literatuurverzeichnis

CENELEC. (2019). *HD 629-1-S3: Test requirements for accessories for use on power cables of rated voltage from 3.6/6(7.2) kV up to 20.8/36(42) kV – Part 1: Accessories for cables with extruded insulation.*

Du, B., et al. (2024). *Compression stress relaxation characteristics and failure mechanism of silicone rubber cable accessories.* Polymer Degradation and Stability.

IEEE. (2022). *IEEE Standard for Extruded and Laminated Dielectric Shielded Cable Splices Rated 2.5 kV to 500 kV (IEEE Std 404-2022).*

IEC. (2023). *IEC 60502-4:2023 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV up to 30 kV – Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV up to 30 kV.*

INMR. (o. D.). *Material design requirements for MV cable accessories.*

Lovink Enertech. (o. D.). *LoviSil technology.*

Lovink Enertech. (o. D.). *Resin cable splice kits.*

Megger. (2025). *Partial discharge testing for MV, HV & EHV cables and accessories.*

MDPI. (2023). *A review on partial discharge diagnosis in cables.* Sensors.

MDPI. (2025). *Medium-voltage AC cable splices: A review of testing methods.* Sensors.

Power and Cables. (o. D.). *MV cables: Electric field stress control.*

RSC. (2026). *Accelerated ageing of silicone rubber and VPE used in HV cable accessories.*

Xia, et al. (2023). *Effect of temperature and thermal ageing of cable silicone rubber accessories on interface pressure of cable splices.* Applied Sciences.