

# Vergelijking van MS-kabelverbindingstechnologieën (11 kV–33 kV)

## Inleiding

Middenspanningskabelmoffen zijn kritische componenten in ondergrondse elektriciteitsnetten. Hun functie bestaat niet alleen uit het verbinden van twee kabelsecties, maar ook uit het zo goed mogelijk herstellen van de elektrische, mechanische en omgevingsprestaties van het oorspronkelijke kabelsysteem (IEEE, 2022; CENELEC, 2019). In praktische zin moet een mof zorgen voor betrouwbare isolatie, stabiele veldsturing, mechanische bescherming en langdurige afdichting onder thermische, elektrische en omgevingsbelasting (IEEE, 2022; IEC, 2023). Deze whitepaper vergelijkt de belangrijkste kabelverbindingstechnologieën die worden toegepast in systemen van 11 kV tot 33 kV: warmkrimp-, cold shrink-, hars-, voorgevormde en hybride ontwerpen. De vergelijking is gebaseerd op normen, fabrikantinformatie en gepubliceerde onderzoeken naar kabelaccessoires, partiële ontladingen en materiaalveroudering (IEEE, 2022; IEC, 2023; MDPI, 2025; MDPI, 2024).

## Functionele vereisten van een MS-mof

Een middenspanningsmof moet aan drie kernvereisten voldoen. Ten eerste moet zij bestand zijn tegen de elektrische belasting van het bedrijfssysteem zonder lokale veldversterking te veroorzaken. Ten tweede moet zij de kabelinterface beschermen tegen vocht, verontreiniging en mechanische beschadiging. Ten derde moet zij deze eigenschappen behouden gedurende de beoogde levensduur, ook tijdens thermische cycli en foutgerelateerde belastingen (IEEE, 2022; CENELEC, 2019). In de praktijk ontstaan storingen in kabelsystemen vaak in de accessoires en niet in de kabel zelf. Daarom zijn de kwaliteit van de interface, de consistentie van de installatie en het beheer van holtes zo belangrijk bij het ontwerp van MS-moffen (MDPI, 2025; MDPI, 2023). Partiële ontladingen zijn bijzonder relevant omdat zij doorgaans beginnen in met gas gevulde holtes, onvolmaakte interfaces of verontreinigde zones en het isolatiesysteem geleidelijk kunnen aantasten (MDPI, 2025; MDPI, 2023).

## Normen en testkader

Voor MS-kabelaccessoires in het spanningsbereik van 11 kV tot 33 kV is IEC 60502-4:2023 de belangrijkste internationale referentie. Deze norm specificeert de typebeproevingseisen voor accessoires van energiekabels met een nominale spanning van 3,6/6 kV tot 18/30 kV en meer algemeen voor systemen tot 30 kV die onder de norm vallen (IEC, 2023). Voor de Europese markt definieert HD 629-1-S3 de prestatie-eisen voor kabelaccessoires voor energiekabels met geëxtrudeerde isolatie binnen hetzelfde algemene spanningsbereik (CENELEC, 2019). Deze documenten zijn belangrijk omdat zij een gemeenschappelijke technische basis bieden voor het beoordelen van moffen, in plaats van uitsluitend te vertrouwen op productclaims. IEEE 404-2022 legt eveneens elektrische classificaties en testvereisten vast voor kabelverbindingen die worden toegepast op afgeschermd kabels met geëxtrudeerde en gelamineerde isolatie en vormt een nuttig aanvullend referentiepunt voor prestatieverwachtingen en testdiscipline (IEEE, 2022).

PD-testen spelen eveneens een centrale rol in kwaliteitsborging. In de praktijk worden partiële-ontladingstesten tijdens fabrieksproeven en ingebruikname gebruikt om beginnende doorslag en installatiefouten in MS-kabelsystemen en accessoires op te sporen (Megger, 2025). Hierdoor vormen PD-prestaties een relevante maatstaf bij het vergelijken van verbindingstechnologieën.

## Warmkrimptechnologie

Warmkrimpmoffen maken gebruik van thermisch geactiveerde materialen die rond de voorbereide kabelinterface krimpen. Ze worden veel toegepast, zijn mechanisch robuust en vertrouwd voor veel monteurs (Lovink Enertech, n.d.). Hun belangrijkste sterkte ligt in hun brede toepasbaarheid en relatief eenvoudige materiaalopbouw, vooral wanneer de installatieomstandigheden goed beheerst zijn en ervaren monteurs beschikbaar zijn. Hun belangrijkste beperking is installatiegevoeligheid. Warmkrimpsystemen zijn afhankelijk van correcte verwarming, een schone oppervlaktevoorbereiding en voldoende procesbeheersing tijdens de montage. In omgevingen waar open vuur beperkt is, vergunningen moeilijk te verkrijgen zijn of de beschikbare ruimte beperkt is, kan deze installatiemethode minder praktisch zijn. Kortom, warmkrimp kan een robuuste oplossing zijn, maar is niet bijzonder vergevingsgezind wanneer de omstandigheden op locatie ongunstig zijn (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022).

## Cold shrink-technologie

Cold shrink-systemen maken gebruik van elastomere componenten die zonder externe warmte rondom de kabelinterface samentrekken. Dit verbetert de reproduceerbaarheid van de installatie en maakt werken met open vuur overbodig, wat aantrekkelijk is in veel industriële omgevingen. De methode vermindert bovendien een bron van installateurafhankelijke variatie, omdat de radiale kracht in de geometrie van het accessoire is ingebouwd in plaats van tijdens het verwarmen wordt gecreëerd. Het belangrijkste technische aandachtspunt is de langetermijnstabiliteit van de interface. Gepubliceerd onderzoek toont aan dat de interfaciale druk in kabelaccessoires van siliconenrubber wordt beïnvloed door temperatuur en thermische veroudering en dat deze veranderingen het elektrische gedrag op lange termijn kunnen beïnvloeden (Xia et al., 2023; Du et al., 2024). Dit betekent niet dat cold shrink ongeschikt is; het betekent wel dat de veroudering van het elastomeer en het behoud van contactdruk bepalend zijn voor de prestaties gedurende de levensduur.

## Harstechnologie

Harsgebaseerde moffen kapselen de verbinding in een uitgeharde massa in. Hun voornaamste voordeel is een sterke uitwendige bescherming: na uitharding vormt de mof een starre barrière tegen vochtindringing, grondbewegingen en mechanische impact (Lovink Enertech, n.d.). Daardoor is hars vooral relevant waar omgevingsafdichting en robuustheid prioriteit hebben. De belangrijkste ontwerpuitdaging is dat starre systemen afhankelijk zijn van een gieting zonder holtes en van een correcte interne geometrie. Zodra de hars is uitgehard, zijn defecten moeilijk te corrigeren. Dit betekent dat installatiewaarde kritisch blijft, ook al is de uitwendige bescherming mechanisch sterk. Harssystemen zijn daarom aantrekkelijk vanwege hun afdichting en robuustheid, maar compenseren interne imperfecties niet automatisch (IEEE, 2022; Lovink Enertech, n.d.).

## Voorgevormde technologie

Voorgevormde systemen maken gebruik van in de fabriek gevormde isolatielichamen met een gecontroleerde geometrie. Hun grootste kracht is consistentie: het isolatieprofiel en de vorm voor veldsturing worden onder gecontroleerde productieomstandigheden vervaardigd in plaats van volledig op locatie te worden gevormd (INMR, n.d.). Dit kan een betrouwbare veldsturing ondersteunen wanneer het accessoire correct op de kabel is afgestemd en juist wordt geïnstalleerd. Hun beperking is dat installatiewaarde belangrijk blijft. Pasvorm, voorbereiding van de interface en eventuele aanvullende uitwendige bescherming beïnvloeden allemaal de uiteindelijke prestaties van de mof (INMR, n.d.; IEEE, 2022). Met andere woorden: voorgevormde ontwerpen verminderen bepaalde variaties, maar nemen het belang van vakmanschap niet weg.

## Elektrische veldsturing

Elektrische veldsturing is een van de centrale ontwerp vraagstukken bij MS-moffen. Op het punt waar de kabelafscherming wordt verwijderd, concentreert het elektrische veld zich. Zonder maatregelen om dit te beheersen kan deze lokale veldconcentratie veroudering versnellen of het falen van de isolatie veroorzaken (Power and Cables, n.d.; IEEE, 2022). Veldsturing wordt daarom bereikt door een combinatie van geometrie, veldsturende materialen en zorgvuldig ontworpen interfaces (IEEE, 2022; INMR, n.d.). Ook materiaalcompatibiliteit speelt hierbij een belangrijke rol. Wanneer de diëlektrische eigenschappen van de mofisolatie sterk verschillen van die van de kabelisolatie, kan het elektrische veld bij de interface vervormen. Lovink stelt dat LoviSil is ontworpen met een diëlektrisch gedrag dat vergelijkbaar is met XLPE om dit effect te verminderen; in deze whitepaper dient dit als een fabrikantclaim te worden gepresenteerd, tenzij dit wordt ondersteund door onafhankelijke metingen (Lovink Enertech, n.d.). Technisch gezien is het uitgangspunt valide: een stabiele permittiviteit en een goede interfacecompatibiliteit ondersteunen een betere veldsturing.

## Partiële ontladingen en betrouwbaarheid op lange termijn

Partiële ontladingen worden algemeen erkend als een van de belangrijkste degradatiemechanismen in kabelaccessoires (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Megger, 2025). Ze ontstaan doorgaans in holtes, luchtbellens, verontreinigingen of onvoldoende gecontroleerde interfaces en kunnen de isolatie geleidelijk aantasten totdat een storing optreedt. Daarom is de kwaliteit van de interne elektrische interface vaak belangrijker dan het externe uiterlijk van de mof.

Onderzoek naar kabelaccessoires van siliconenrubber toont aan dat thermische veroudering en mechanische compressie de interfaciale druk en het materiaalgedrag in de loop van de tijd kunnen veranderen (Xia et al., 2023; Du et al., 2024; RSC, 2026). Dit betekent dat betrouwbaarheid op lange termijn niet alleen afhankelijk is van het oorspronkelijke ontwerp, maar ook van hoe het accessoire zich gedraagt na jaren van thermische cycli en blootstelling aan omgevingsinvloeden. Om deze reden moeten uitspraken over "PD-immuniteit" worden vermeden, tenzij deze worden ondersteund door onafhankelijk bewijs onder relevante testomstandigheden.

## Hybride architectuur

Een hybride verbindingsarchitectuur scheidt de elektrische en mechanische functies van het accessoire. In het Lovink-concept wordt vloeibare siliconen gebruikt voor de elektrische isolatie en de interfacezone, terwijl een buitenlaag van hars zorgt voor mechanische sterkte en omgevingsafdichting (Lovink Enertech, n.d.).

De ontwerpgedachte is aantrekkelijk omdat één materiaal niet beide functies even goed hoeft uit te voeren. Vanuit technisch oogpunt is dit een logische benadering. De vloeibare siliconen kunnen het beheer van holtes en veldcompatibiliteit bij de interface ondersteunen, terwijl de buitenste harslaag een robuuste bescherming biedt tegen vocht, verontreiniging en mechanische belasting. Lovink beschrijft dit als een mofconcept met een lange levensduur, praktijkervaring en gestandaardiseerde testen, maar deze uitspraken moeten duidelijk als fabrikantclaims worden gepresenteerd tenzij zij worden ondersteund door onafhankelijke testgegevens (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022; IEC, 2023).

## Vergelijkende beoordeling

De technologieën verschillen het duidelijkst op vier gebieden: installatiegevoeligheid, stabiliteit van de elektrische interface, mechanische robuustheid en verouderingsgedrag. Warmkrimp is een bewezen allroundoplossing, maar is sterker afhankelijk van installatiediscipline en beheersing van het thermische proces (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022).

Cold shrink verbetert de reproduceerbaarheid van de installatie, maar de prestaties op lange termijn zijn afhankelijk van de veroudering van het elastomeer en het behoud van de interfaciale druk (Xia et al., 2023; Du et al., 2024). Harssystemen bieden een sterke uitwendige bescherming en afdichting, maar zijn afhankelijk van een hoogwaardige gietkwaliteit en compenseren interne holtes niet automatisch nadat de hars is uitgehard (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022). Voorgevormde systemen bieden een gecontroleerde geometrie en consistente veldsturing, maar blijven afhankelijk van een nauwkeurige passing en correcte installatie (INMR, n.d.; IEEE, 2022). Hybride systemen bieden een evenwichtige architectuur door holtebeheer aan de elektrische zijde te combineren met een starre bescherming aan de mechanische zijde (Lovink Enertech, n.d.).

## Selectiecriteria per toepassing

De keuze van een technologie moet gebaseerd zijn op de toepassingsomstandigheden en niet op één algemene voorkeur. Wanneer een installatie zonder open vlam vereist is, bieden niet-thermische systemen een duidelijk praktisch voordeel. Wanneer bodembewegingen, blootstelling aan vocht of externe mechanische belasting dominant zijn, wordt een buitenbescherming op basis van hars bijzonder relevant.

Wanneer de belangrijkste zorg ligt bij de langetermijnkwaliteit van de elektrische interface, veldsturing en onderdrukking van partiële ontladingen, wordt het ontwerp van de interface zelf de doorslaggevende factor (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Megger, 2025).

In die context verdienen hybride systemen aandacht omdat zij het beheer van de elektrische interface combineren met een robuuste externe afdichting en bescherming. Voor veeleisende MS-toepassingen is de beste technologie doorgaans de technologie die het beste aansluit bij de werkelijke bedrijfsomgeving, installatiebeperkingen en betrouwbaarheidsdoelstellingen (IEEE, 2022; CENELEC, 2019).

## Conclusie

Er bestaat geen enkele verbindingstechnologie die voor iedere MS-toepassing de beste keuze is. Warmkrimp-, cold shrink-, hars- en voorgevormde systemen hebben elk een legitieme plaats, afhankelijk van de projectcontext, installatieomstandigheden en betrouwbaarheidseisen (IEEE, 2022; IEC, 2023).

De technische literatuur laat zien dat partiële ontladingen, interfacekwaliteit en verouderingsgedrag bepalend zijn voor prestaties op lange termijn. Daardoor zijn holtebeheer en veldsturing bijzonder belangrijk bij het ontwerp van kabelaccessoires (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Xia et al., 2023). Een hybride architectuur op basis van vloeibare siliconen en hars is technisch verdedigbaar omdat deze de elektrische en mechanische functies van de mof scheidt. Deze benadering kan de balans tussen interfacestabiliteit, afdichting en robuustheid verbeteren, mits het ontwerp wordt gevalideerd volgens relevante normen en waar mogelijk wordt ondersteund door onafhankelijk bewijs (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022; IEC, 2023).