

Höchstspannungs-Kabeltechnik in Deutschland - HVAC und HVDC Anwendungen beim On-shore Netzausbau im Zuge der Energiewende

*Dr. Johannes Kaumanns
Südkabel GmbH*



OUR LOCATION

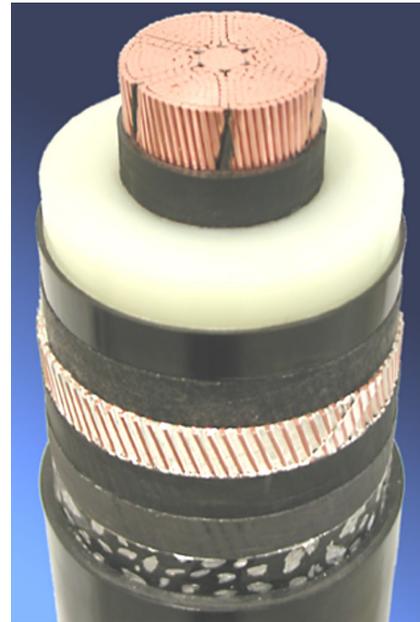
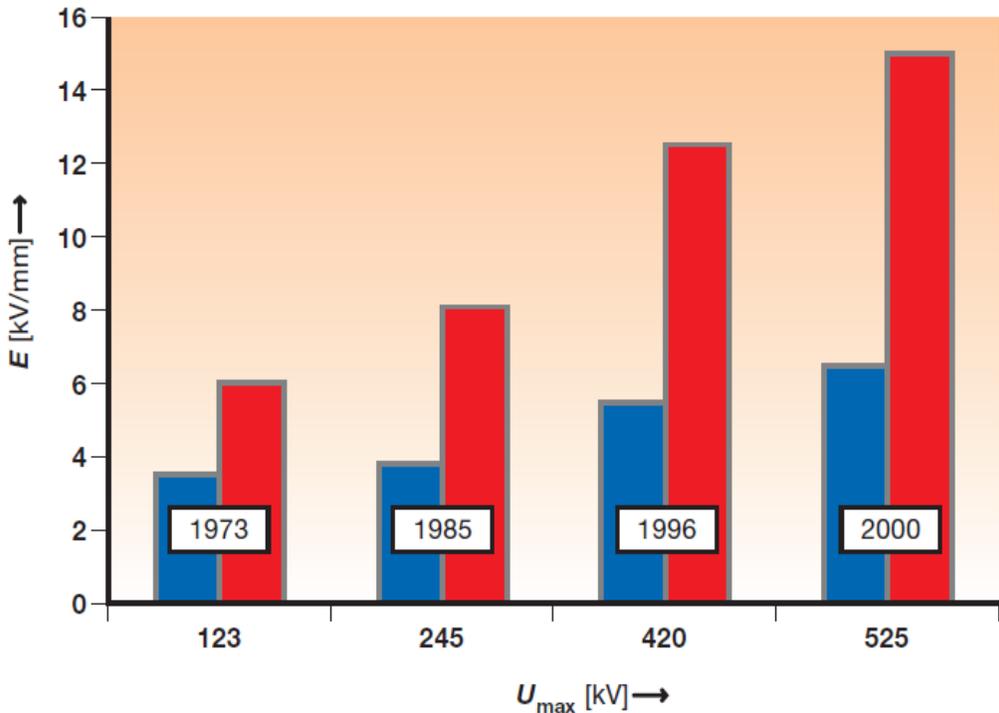
MANNHEIM, GERMANY



Südkabel GmbH
Mannheim

400kV AC Erfahrungen in DE mit VPE-isolierten Kabeln

- 400kV Ebene wurde in den 1990ern erreicht
- Extrem reine Werkstoffe
- Extrusionsprozess optimiert (Trockenvernetzung)
- Qualitätskontrolle, TE-Messtechnik



Kupferleiter aus 6 Segmenten, 2500mm²

Innere Leitschicht, supersmooth

VPE Isolierung, extrem rein

Äußere Leitschicht, supersmooth

Dreifachextrusion

Kupferdrahtschirm, quellfähige Papierbettung, längswasserdicht optional mit zusätzlichen Stahlröhrchen mit Glasfasern

Aluminium Folie, radiale Wassersperre

HDPE Außenmantel, mech. Schutz

Entwicklung der Betriebsfeldstärke,
rot: innere Leitschicht, blau äußere Leitschicht

typisches 400kV Schichtenmantelkabel,
2500mm² Cu-Leiter, 26mm Isolierwandstärke

> 25 Jahre 400kV VPE Kabeltechnologie in DE



400kV 1 Jahr PQ test bei CESI/Mailand 1993-1995



Erste Anwendungen der 400kV VPE-Kabeltechnik in Deutschland
Links: 1996, 400kV Kraftwerk in Altbach , Länge 400m, 800mm² Al-Leiter
Rechts: 1998/2000, 400 kV Tunnelsystem in Berlin für BEWAG,
5,5 km + 6,5 km Systemlänge, 1600 mm² Kupferleiter, 1100 MVA/System

Weltweite Großprojekte 2000-2020 – Südkabel 400+500kV

(Auszug)



Projekt: 420 kV Elstree für National Grid UK
60 km VPE Kabel mit 60 Muffen
Inbetriebnahme: 2005



Burullus-Projekt: 20 Kabelsysteme für drei Gasturbinenkraftwerke in Ägypten
29km 500kV Kabel, 120 Endverschlüsse
Inbetriebnahme: 2017



700km 400kV/2500mm² Infrastruktur Projekte im Nahen Osten
>1300 Muffen



project name	year of comm.	cable km	sheath type	no. joints	no. GIS term.	no. outd. term.
Jeddah North to North West	2014	26	Lead	45	6	
Al Fardous	2015	137	Lead	258	21	
Princess Noura	2016	73	Al-foil Cu wire	140	18	
Sultanah	2016	101	Al-foil Cu wire	186	21	
Wha-Jam	2018	48	Lead	108	15	
Madinah	2019	124	Lead	207	18	
Al Adel	2019	99	Lead	192	15	12
Sohar Free Zone, Oman	2018	93	smooth welded Al	198	24	12
Total		701		1334	138	24



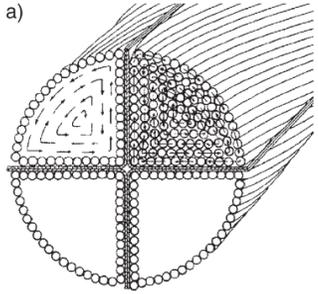
Projekt: London Cable Replacement
200 km 400kV Kabel, 174 Muffen
Inbetriebnahme: 2015 + 2018



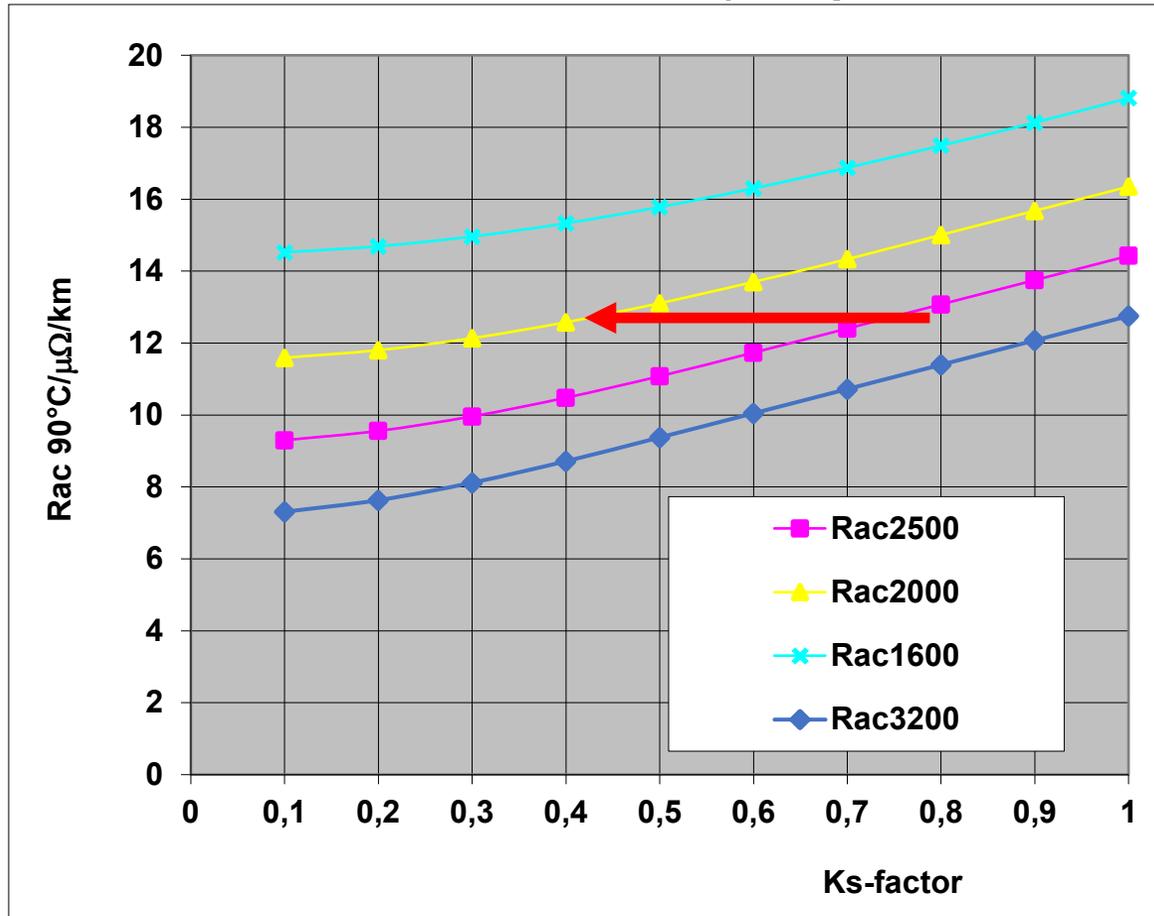
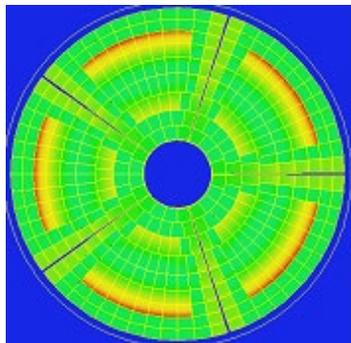
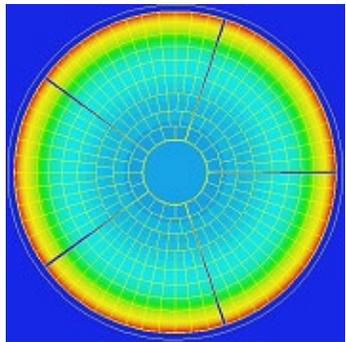
500kV Projekt Skolkovo
70km Kabel 140 Muffen
Russland 2011

Project: 550kV VPE Kabel für Staudammprojekt in China
150m senkrechter Schacht, 2001

Reduzierung Leiterverluste, seit 2010



Seit 2000 immer größere Leiterquerschnitte, bei 400kV sind 2500mm² Standard
 Aber: Skin effekt erhöht Leiterverluste
 Optimierte Leiter (Milliken Design (links) + oxidierte oder lackierte Drähte)
 reduzieren Verluste um > 20% (entspricht eine Leiterquerschnittsprung)



Millikendesign bei extrudierten Kabeltypen	Ks-Faktor
Kupfer, Drähte im Gegenschlag verseilt	0,8
Kupfer, Drähte im Gleichschlag verseilt	0,62
Kupfer, oxidierte Einzeldrähte	0,35
Kupfer, Lackdrähte	0,35
Aluminium	0,25
Nicht-Milliken Typen	1,0

Reduzierung Leiterverluste - Auswirkung auf 400kV - Projekt in DE

14.4km Route, 400kV Doppelsystem	Normal Milliken segmental copper conductor 2500mm ²	Skin effect optimized copper conductor 2500mm ² oxidized	Skin effect optimized copper conductor 2000mm ² oxidized
Ks factor, IEC 60287-1-1	0.8	0.35	0.35
AC resistivity @ 40°C/mΩ/km	11.88	8.92	10.67
current / A per 6000h/year	1000 A	1000 A	1000 A
Lifetime / years	40	40	40
Losses/40years/kWh	246.3 10 ⁶	184.9 10 ⁶	221.2 10 ⁶
Savings/kWh		61.4 10 ⁶	25.1 10 ⁶
		25.1%	10.2%
Savings losses @ 0,05€/kWh		3.07 M€	1.26 M€
total copper weight	2000ton	2000ton	1600ton
Copper savings @8€/kg			3.2 M€

=> Einsparungen im Kupfereinsatz oder Leitungsverlusten oder CO₂ footprint Kupfer ist beim CO₂ footprint die dominante Größe (>80%) beim Kabel

Netzausbau 400kV AC - Teilverkabelung



**Teilverkabelung erhöht die Akzeptanz für neue 400kV Trassen
Systeme sind aber komplexer Rechts: Übergabebauwerk Kabel-
Freileitung
(Reflexionen von Transienten, Impedanzunterschiede, Schutz,
Schalten, etc.)**

Netzausbau 400kV AC – typisches Beispiel (Amprion)

**Vorher - Tiefbauaktivitäten
möglich**



Nachher – grüne Wiese, Ackerbau



Netzausbau 400kV AC – typisches Beispiel Rohrverlegung



Herausforderung für Transport und Verlegung



Schwerlasttransport bis 100to



Spezial-trailer zum Kabeleinzug

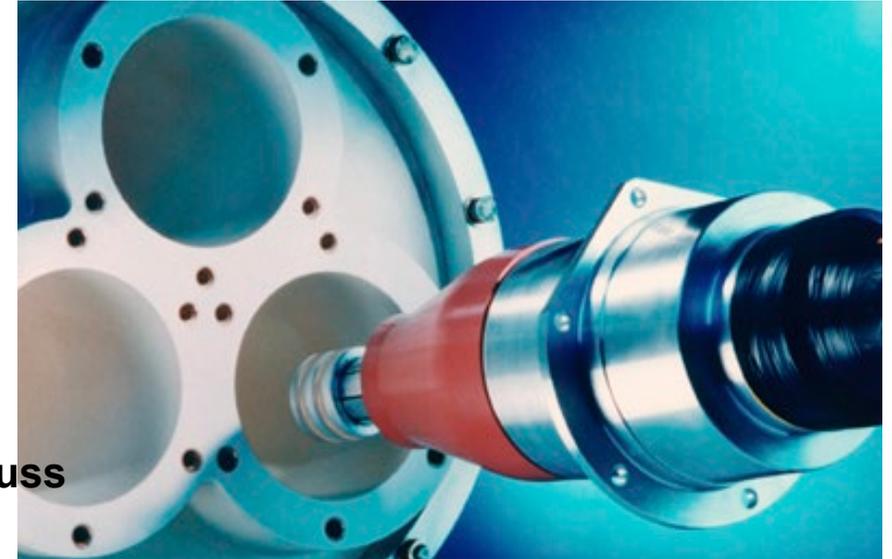
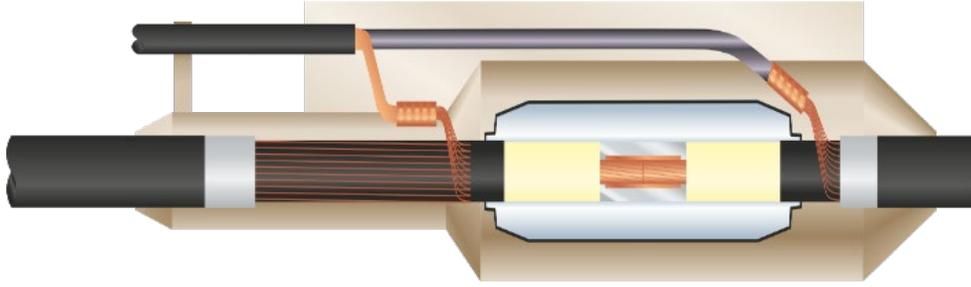


Schubgeräte zur Reduzierung der Zugkräfte



XXL-Trommeln, >10m Breite

Garniturentechnik

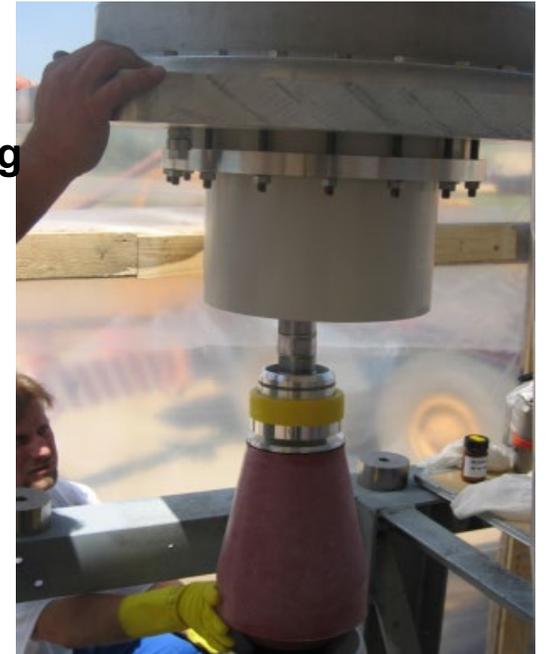


GIS Endverschluss



Muffe

steckbare Freiluft-Bushing



- vorgefertigte Isolierkörper aus Silikon oder EPDM, stückgeprüft
- GIS Endverschlüsse in trockener Stecktechnik,
- auch Anwendbar als Freiluft EV

Garniturenmontage



Links: Freiluftendverschluss

Rechts: Muffengrube vor/nach der Montage



EHV AC Referenzen in DE im Rahmen der Energiewende in DE

380 kV Kabelprojekt für – Amprion, Borken, 2017

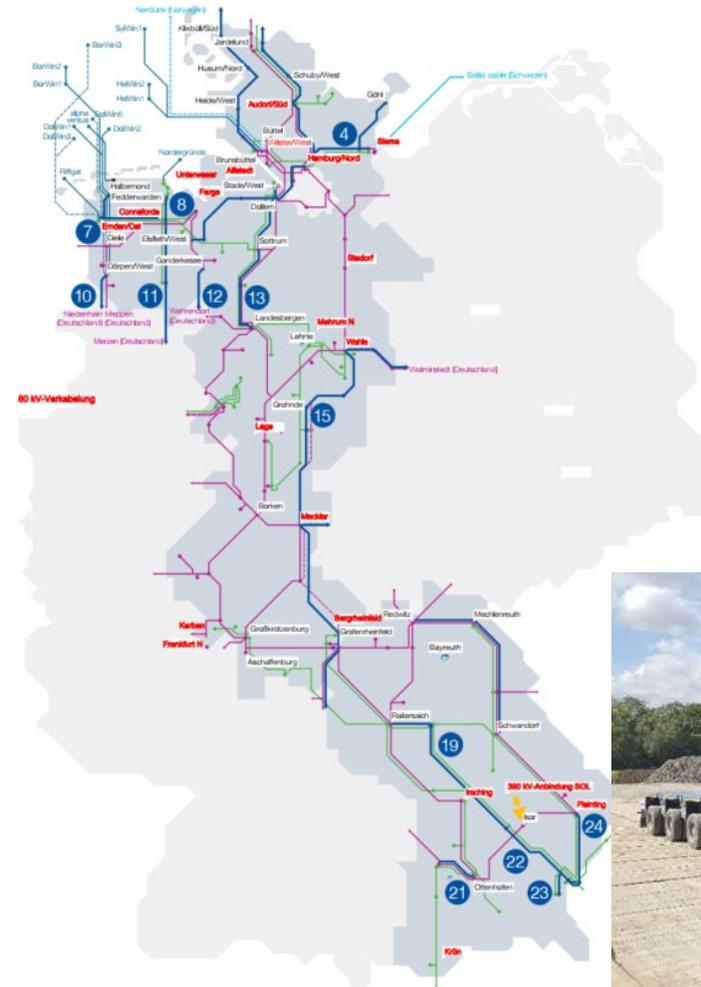
380kV Kabelprojekte für die Energie-wende in Deutschland, Tennet, seit 2019

Projekte:

WiCo, EmCo, WaMe_A, WaMe_C, Ganderkesee

Teilverkabelung von AC Freileitungsverbindungen

- > 200km 380kV Kabel
- > 200 Muffen
- > 50 Endverschlüsse



Projekt:
Borken

Teilverkabelung von AC Freileitungsverbindungen

Verlegung in Rohren
Einzellängen von 1250m

24km 380kV Kabel
12 Muffen
12 Endverschlüsse

Inbetriebnahme
2017



HVDC Übertragung Vorteile

- Keine netzfrequenten Umladeströme – lange Systeme sind möglich
- Keine Wirbelstromverluste im Leiter
- Keine Wirbelstromverluste im Schirm
- Höhere Ausnutzung des Isoliermaterials, typisch: $E = U/w = 20\text{kV/mm}$
(Vgl. AC: Wirkleistungsübertragung erfolgt mit $\hat{U}/\sqrt{2} = U_0$
DC: Wirkleistungsübertragung mit U_{dc} = Scheitelwert)
- Bsp: Übertragung von 2000MW in Erde, 2500mm^2 Cu-Leiter, 26mm Isolierwand

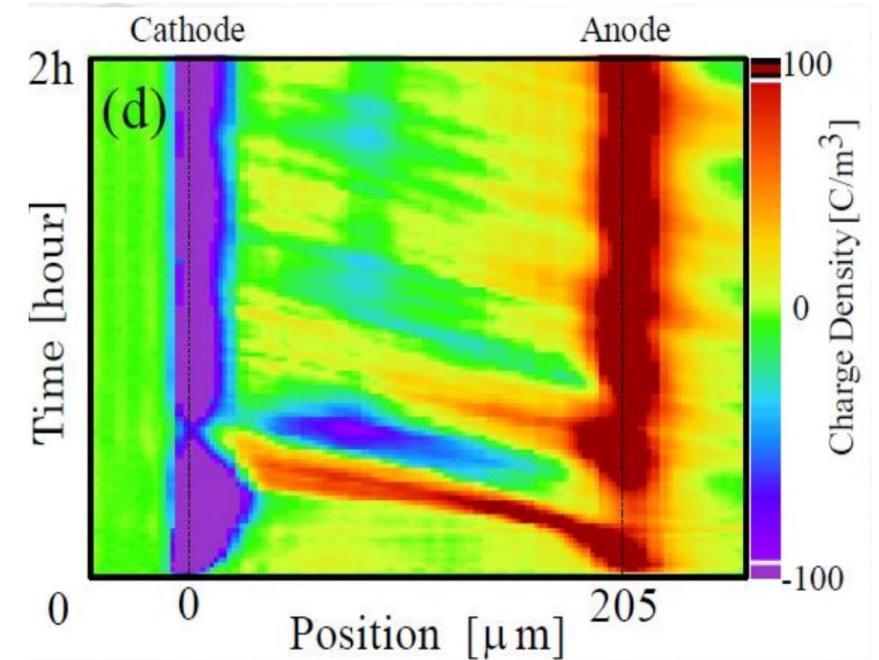
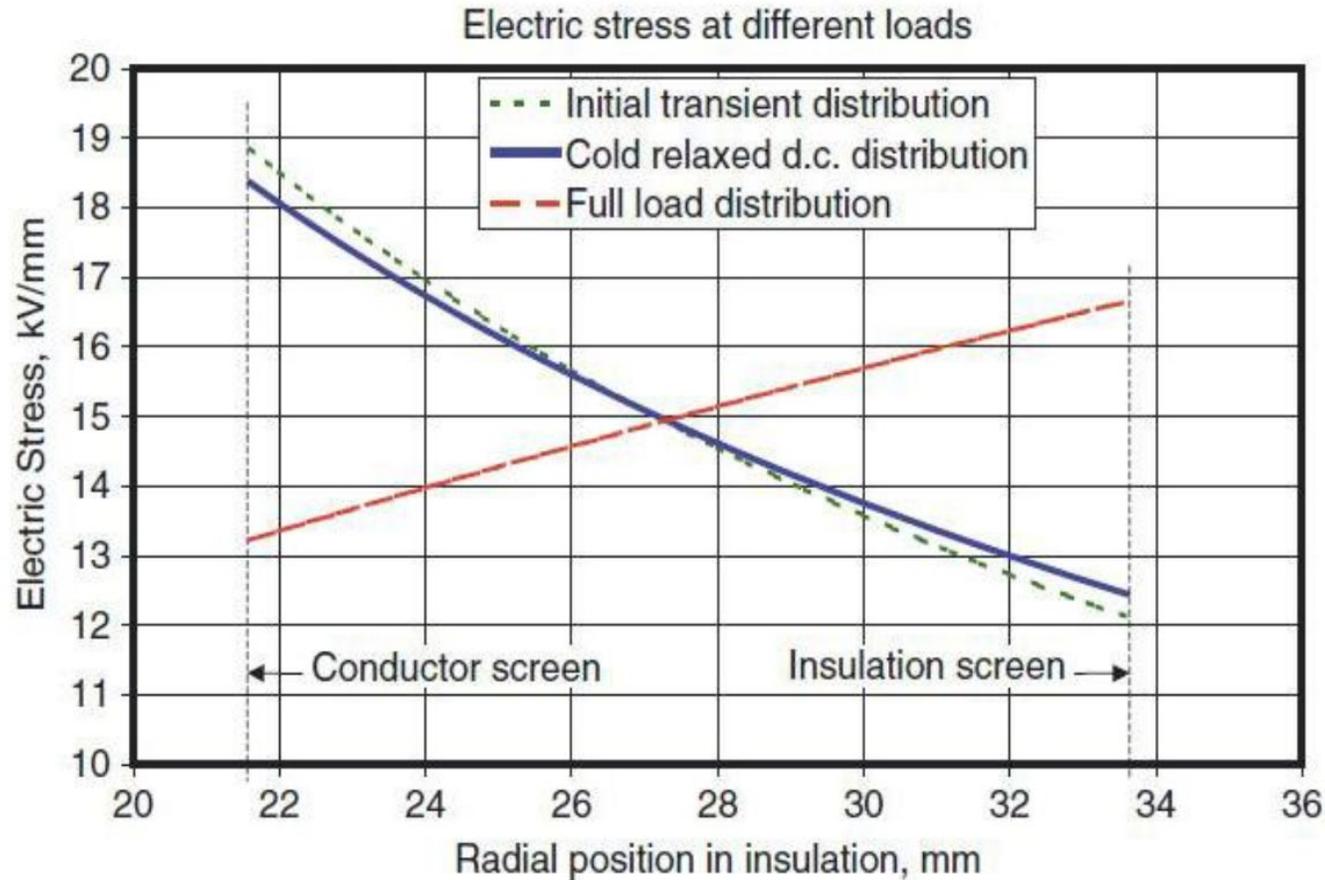
AC: Doppelsystem 380kV/220kV



DC: 1 System +/-525kV

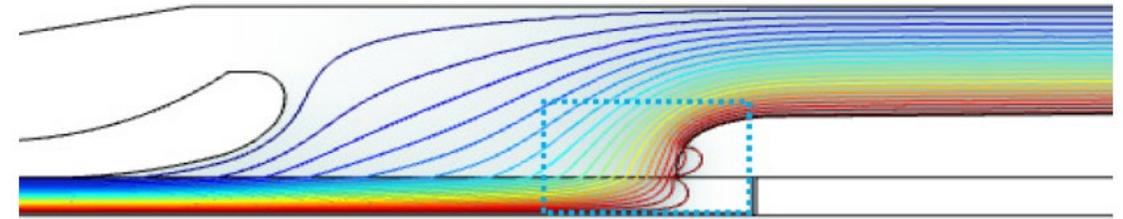
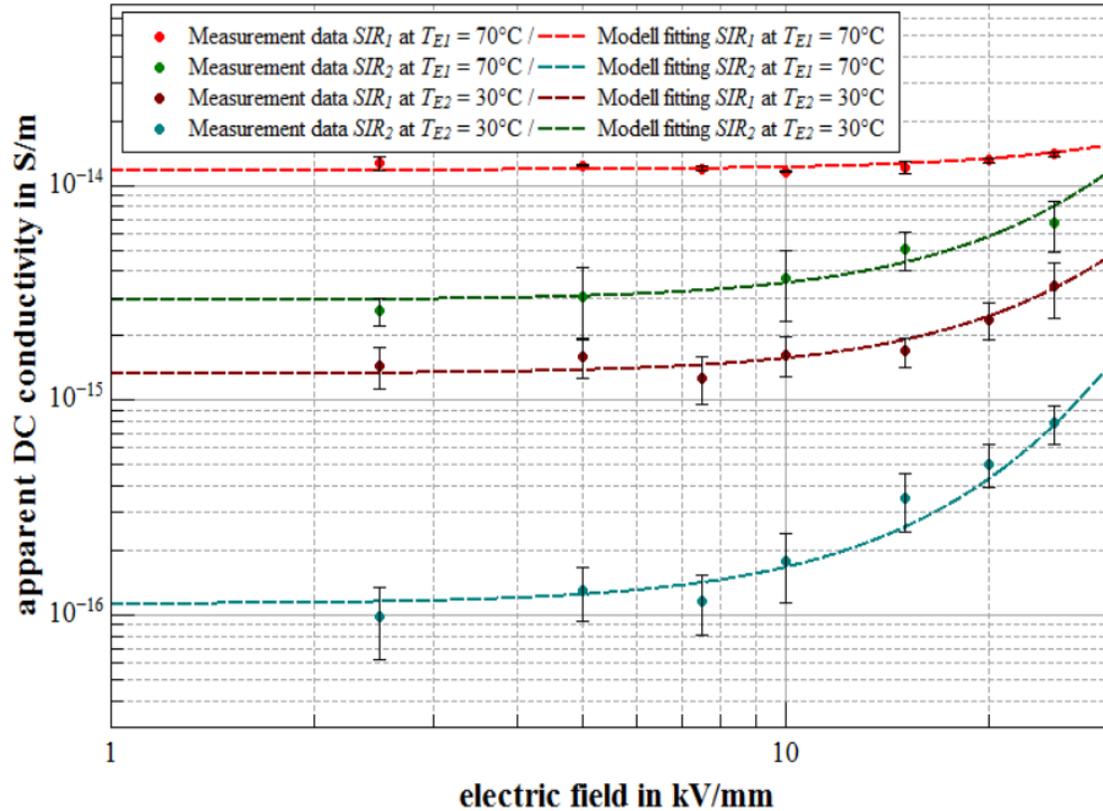


HVDC Problematik

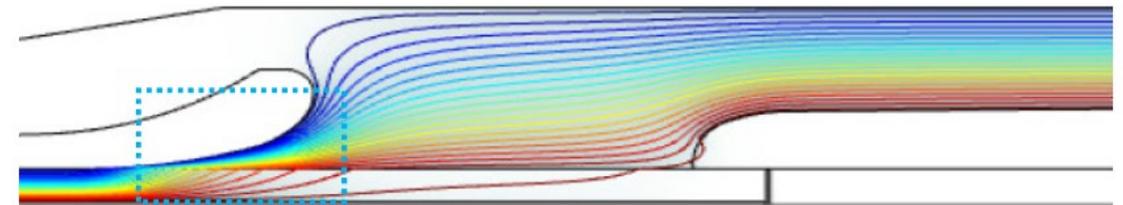


Links: Feldverteilung bei HVDC Anwendung Umkehrung des Feldverlaufs bei hohen Temperaturen
Rechts: Raumladungssakkumulationseffekte und Wanderung von polaren Bestandteilen im Kabel

HVDC Feldverteilung in den Garnituren



Fall a: Resistive Potentialverteilung für $\sigma_{\text{Kabel}} < \sigma_{\text{Muffe}}$



Fall b: Resistive Potentialverteilung für $\sigma_{\text{Kabel}} > \sigma_{\text{Muffe}}$

links: Materialeigenschaften der Garnitur $s = f(T, E)$

rechts: Feldverlauf in der Muffe in Abhängigkeit der Leitfähigkeit

=> Abgestimmte Materialsystem Kabel/Garnitur notwendig für alle Anwendungsfälle, kalt, warm

HVDC Qualifizierung



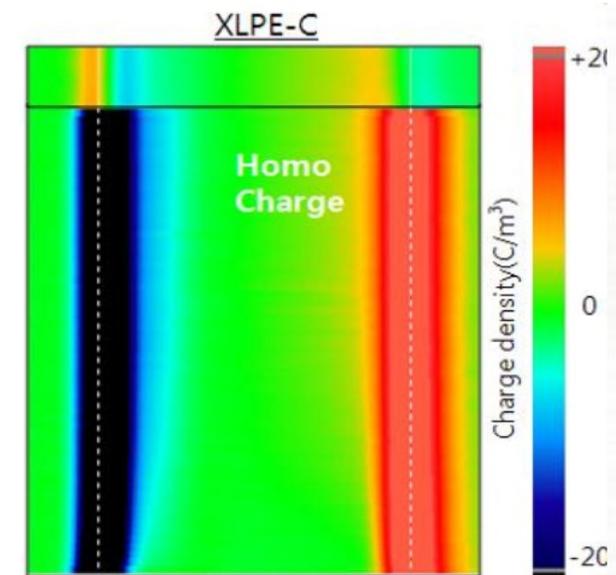
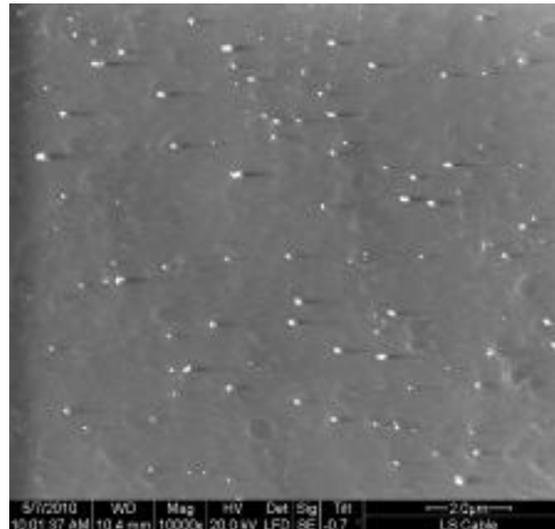
links: HVDC 525 kV Type Test ,
nach DIN VDE 62895, cigre brochure 852 und TSO Vorgaben

rechts: 525kV HVDC PQ test, 1 Jahr, 100m Kabel,

Lösungsansätze für extrudierte HVDC Kabelisolierungen

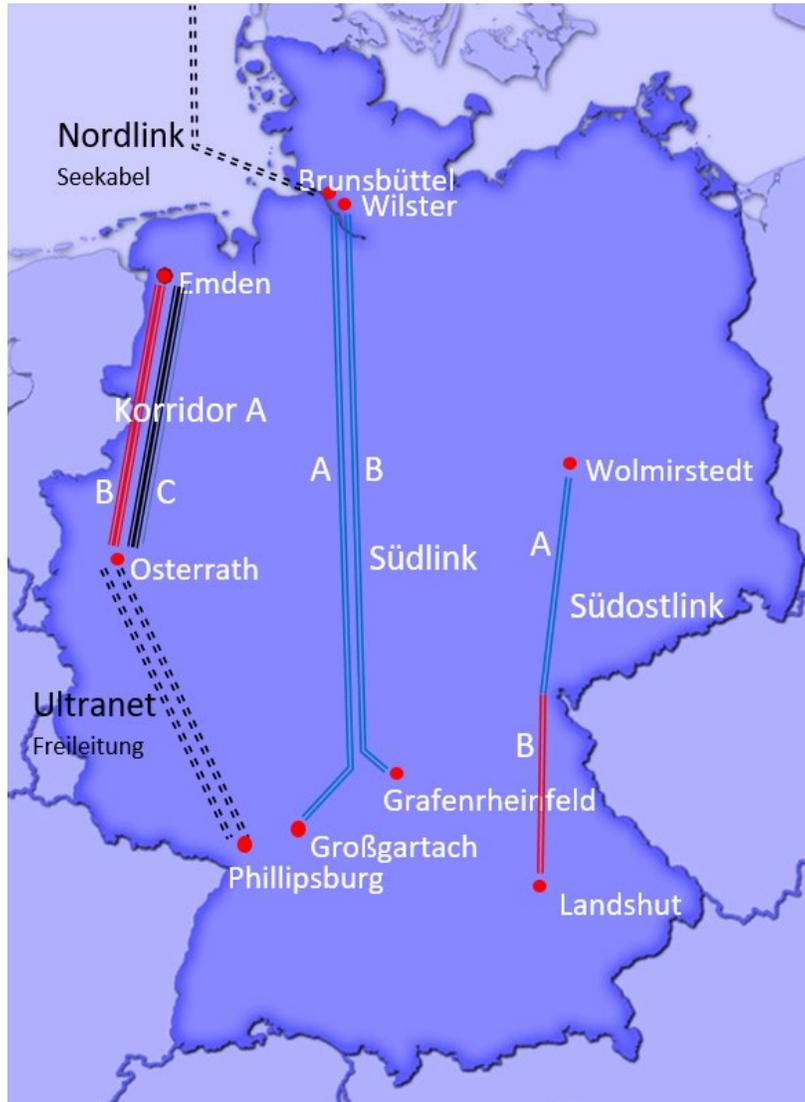
- **Optimierte HVDC VPE Werkstoffe mit reduzierten polaren Bestandteilen und verringerter Leitfähigkeit**
Reduzierung der polaren Vernetzungsprodukte, Erfahrung bis 320kV

- **VPE Werkstoffe mit nano-fillern**
Erfahrung bis 400kV



- **PP basierte Isolierstoffe mit Zusatzpolymeren (HPTE – High Performance Thermoplastic Extruded)**
Erfahrung im MV Bereich, Vorteil: keine polaren Vernetzungsprodukte

Ist-Projekte HVDC, 3 Korridor-Projekte total ca. 5000km Kabel, Vergabe 2020



Projekt	Südlink 2 x 2GW, 525kV West: 750km Ost: 700km HVDC Kabel: 2900km	Süd-Ost Link 1 x 2GW, 525kV Nord: 275km Süd: 250km HVDC Kabel: 1050km	Korridor „A“ 2 x 1GW, 400kV 2 x 320km DMR Kabel: 640km HVDC Kabel: 1280km
Lieferant			
A, 2050km nkt	1500km DC-VPE	550km DC-VPE	
B, 2540km Prysmian	1400km DC VPE	500km HPTE	640km HPTE
C, 640km SEI/Südkabel			640km Nano-filler

Status:
Fertigung läuft,
viele Kabel liegen im Zwischenlager,
Verlegung startet in 2024



Planprojekte – aktuell von den TSO's vergebene 525kV HVDC und 400kV HVAC (nicht vollständig)

Projekte, Ausführung bis ca. 2030 Fertigung bis ca. 2030	Betreiber	Lieferant	Trassen km	AC / DC	Kabel km
Korridor B, DC25	Amprion	nkt	430	DC	860
SOL+	50Hertz/Tennet	nkt	220	DC	440
Ostwind 4	50Hertz/Tennet	nkt	170	DC	345
Nord-Ostlink, DC32	50Hertz/Tennet	nkt	170	DC	375
LANWIN 6	50Hertz/Tennet	nkt	450	DC	900
Bornholm Energy(dt)	50Hertz/Tennet	nkt	210	DC	420
NOR 11-1	50Hertz/Tennet	Prysmian	290	DC	580
DC31	50Hertz/Tennet	Prysmian	210	DC	420
DC34	Amprion	Prysmian	700	DC	2100
BalWin 1	Amprion	Prysmian	371	DC	1100
BalWin 2	Amprion	Prysmian	376	DC	1100
Korridor B, DC21	Amprion	Sumitomo-Südkabel	270	DC	540
DC35	Amprion	Sumitomo-Südkabel	461	DC	1350
Rheinquerung	Amprion	nkt	20	AC	120
LÜS/CCM	Amprion	Südkabel	50	AC	300
Ostküstenleitung	Tennet	Südkabel, Taihan	8	AC	100
		total	4416		11110

Zusammenfassung

- **400kV VPE Kabel Erfahrungen existieren in DE seit 1996**
- **Optimierte Systeme mit reduzierten Verlusten seit 2010 verfügbar**
- **Netzausbau wird bei AC mit Teilverkabelungsprojekten umgesetzt**
- **HVDC Technologie ist für 525kV qualifiziert und wird für die HVDC Projekte eingesetzt**
- **Es gibt 3 unterschiedliche Lösungsansätze für HVDC Kabelsysteme (optimiertes VPE, VPE mit nanofiller, HPTE Materialien)**
- **Erfahrungswerte liegen bei HVDC bis zur 400kV Spannungsebene vor**
- **Produktionskapazitäten sind in der Kabelindustrie vorhanden**
- **Engpässe bestehen im Montagebereich, Projektleitern, Bauleitern, Projektabwickler, etc. sowohl auf der Herstellerseite als auch auf der Kundenseite. Hier kommt der große Gradient erst noch auf uns zu**

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION



Your opinion matters.
Feel free to rate our presentation.



Stay connected.
Check out our socials for the latest updates.