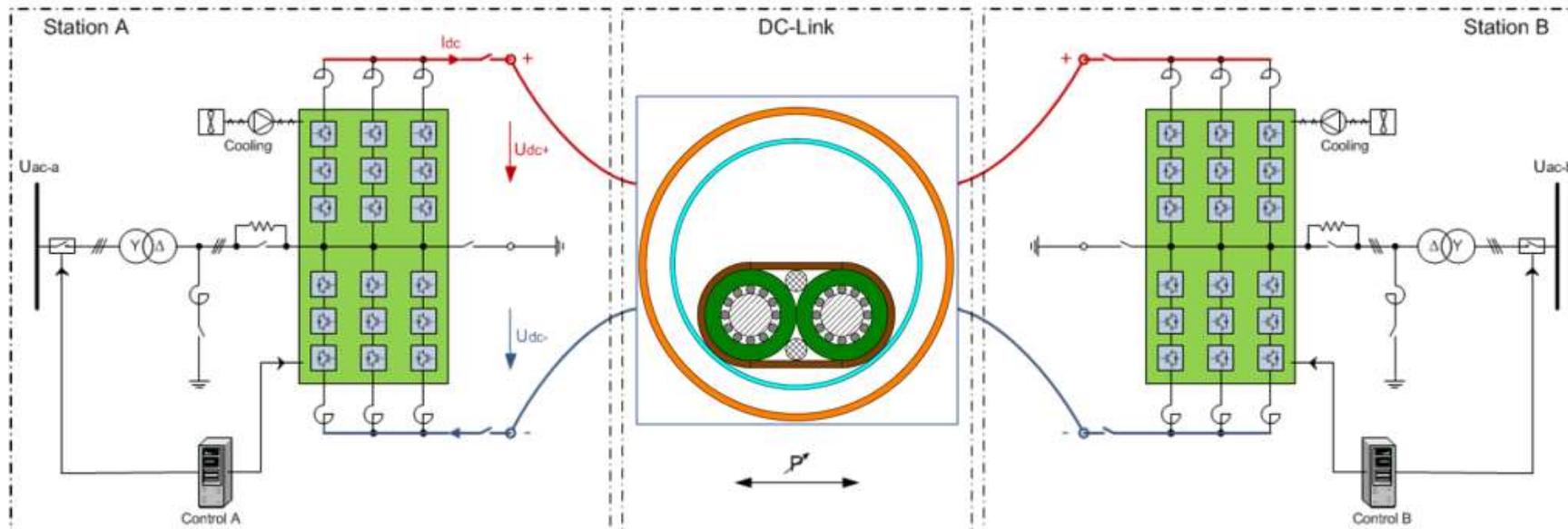


Supraleitende Mittelspannungs-Gleichstromübertragung im Vergleich zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung bei gleicher Leistung

S-MVDC vs HVDC

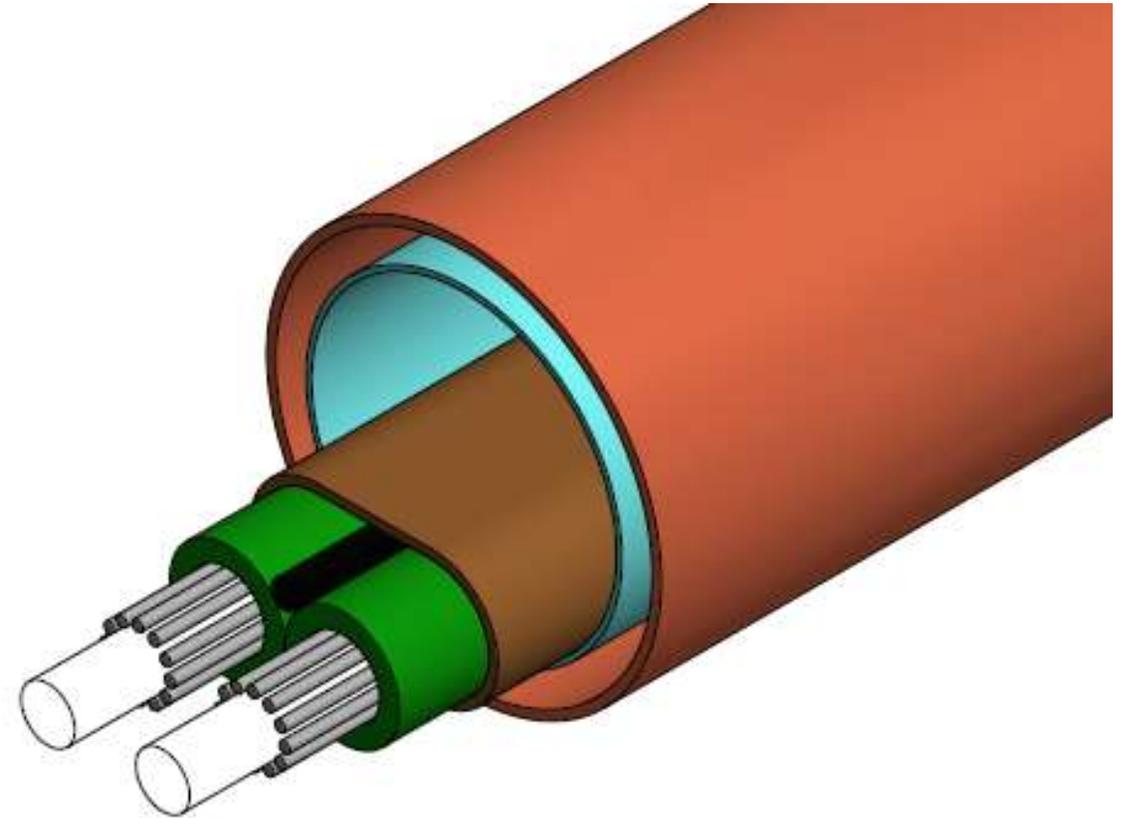


11. Braunschweiger Energieseminar - Supraleiter, Gleichstrom, Wasserstoff



Übersicht

- Motivation und Anwendung
- Stand MVDC
- Was beinhaltet S-MVDC?
- Vergleichende Betrachtungen
- Zusammenfassung



SCHRITT 3: EUROBAR. DAS EUROPÄISCHE OFFSHORE-NETZ

- Von der Plattform zum Gesamtsystem: Eurobar (**European Offshore Busbar**)
- **Ziel:** Vernetzung von Offshore-Windparks der neuen Generation auf europäischer Ebene
- **Vorteile:**
 - **Maximale Nutzung** der Windpotenziale
 - **Versorgung von Industriezentren** mit Windenergie
 - **Land- und seeseitige Optimierung** des Stromsystems
 - Konsequente **Unterstützung der Sektorenkopplung**

NEP2035: 30-40 GW Offshore für D

- Offshore Anschluss
- HGÜ Korridor
- Wasserstoffbedarf
- Offshore Vernetzung

Trassen durch Wattenmeer und zwischen den Friesischen Inseln:

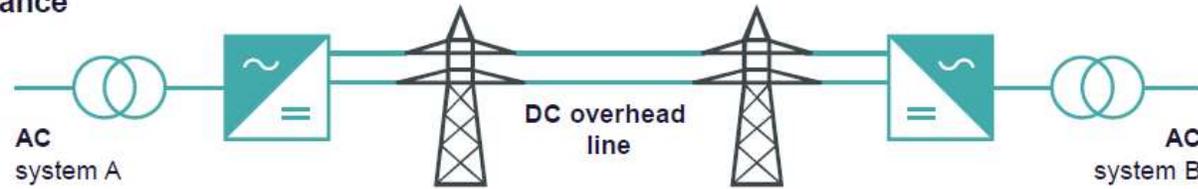
- **Zwei einphasige Seekabel:** ± 500 kVDC, max. 2 GW
- **Ein zweiphasiges Supraleiterkabel:** ± 50 kVDC, 4 – 6 (10) GW



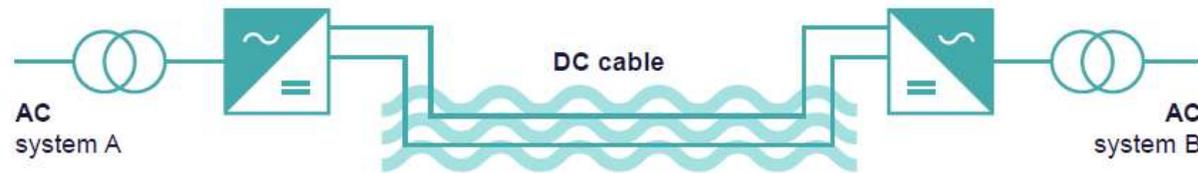
Realisierung mit HVDC



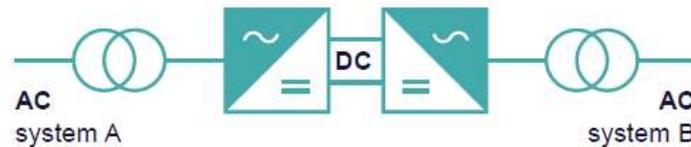
Long distance



DC cable



Back-to-back



- Kabelvorrang – keine neue HS-Freileitung

- Höchstspannung bis ± 525 kV

- Hohe Kosten Konverteranlagen

2020-11-12

German Kuhn | SE T SO PLM-FACTS 3
Siemens Energy, 2020

- Gesellschaftliche Akzeptanz: Bürgerinitiativen, „not in my backyard“
- Umwelt: Abwärme, EMV, Trassenbreite

- Lange Planungshorizonte
- Verzögerung Ausbau und Inbetriebnahme, Beispiel SüdLink: 2011 – 2022 → 2028?

Stand MVDC

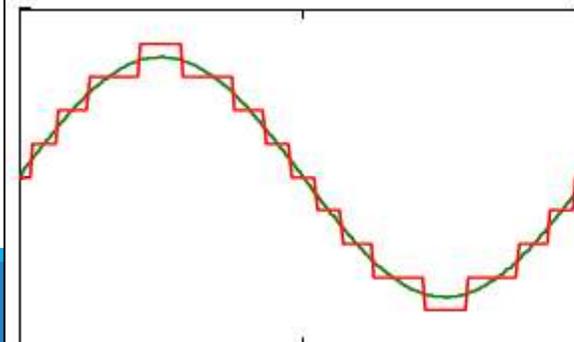
- Downsized HVDC-Technologie mit gleicher Funktionalität
- Niedriger Raumbedarf der Konverterstationen (MV vs HV)
- MV kostengünstiger als HV
- MMC - Modular Multilevel Converter
 - Schwarzstartfähig (alle VSC)
 - Bereitstellung von Blind- und Wirkleistung (alle VSC)
 - Stufenweiser Aufbau des Sinus
 - Geringe transiente Belastung der Bauelemente
 - Geringer Aufwand für Filter und Abschirmung

Topologies: Two-Level Three-Level Multilevel

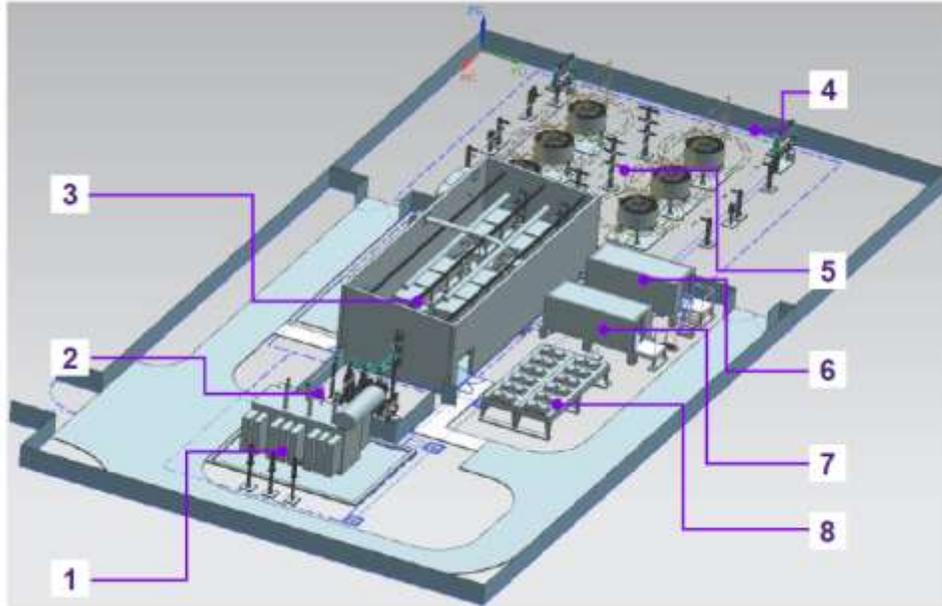
GTO / IGCT IGBT in PP IGBT Module

Power Electronic Devices:

Weiterentwicklung der VSC Technik – HVDC PLUS

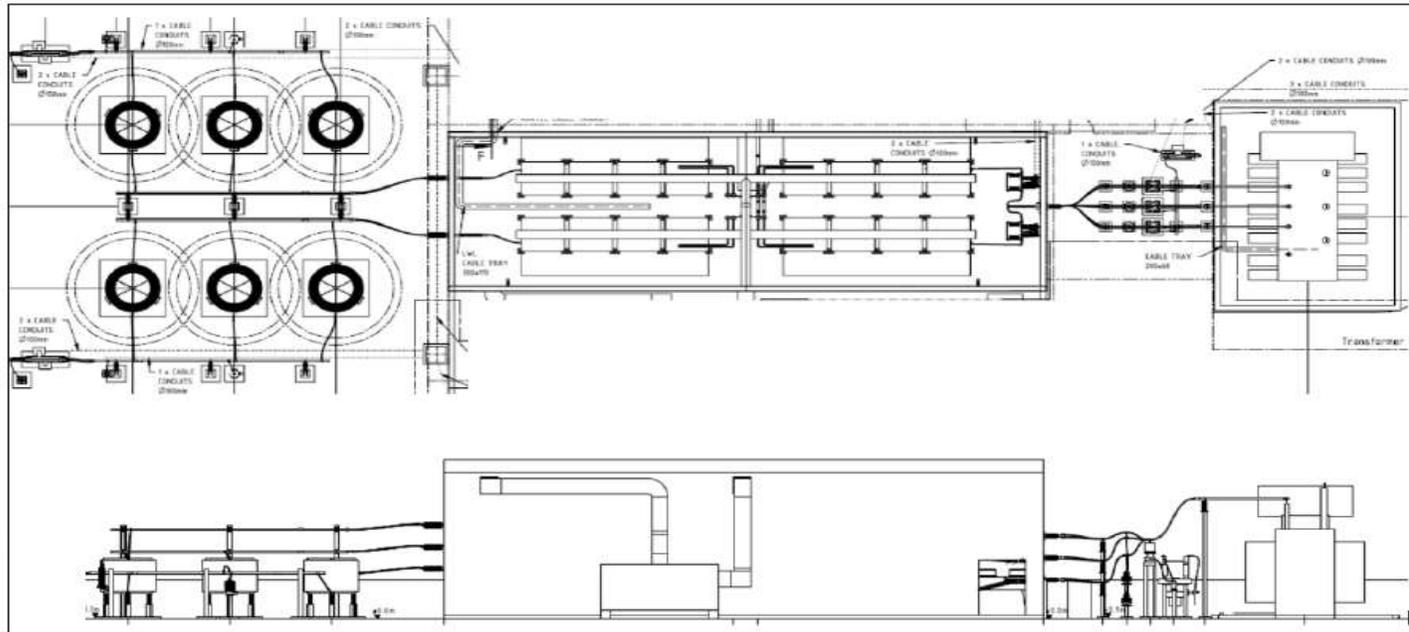


- Small Converter AC Voltage Steps
- Low Rate of Voltage Rise
- Low Generation of Harmonics
- Low HF Noise
- Low Switching Losses
- No Snubbers required**

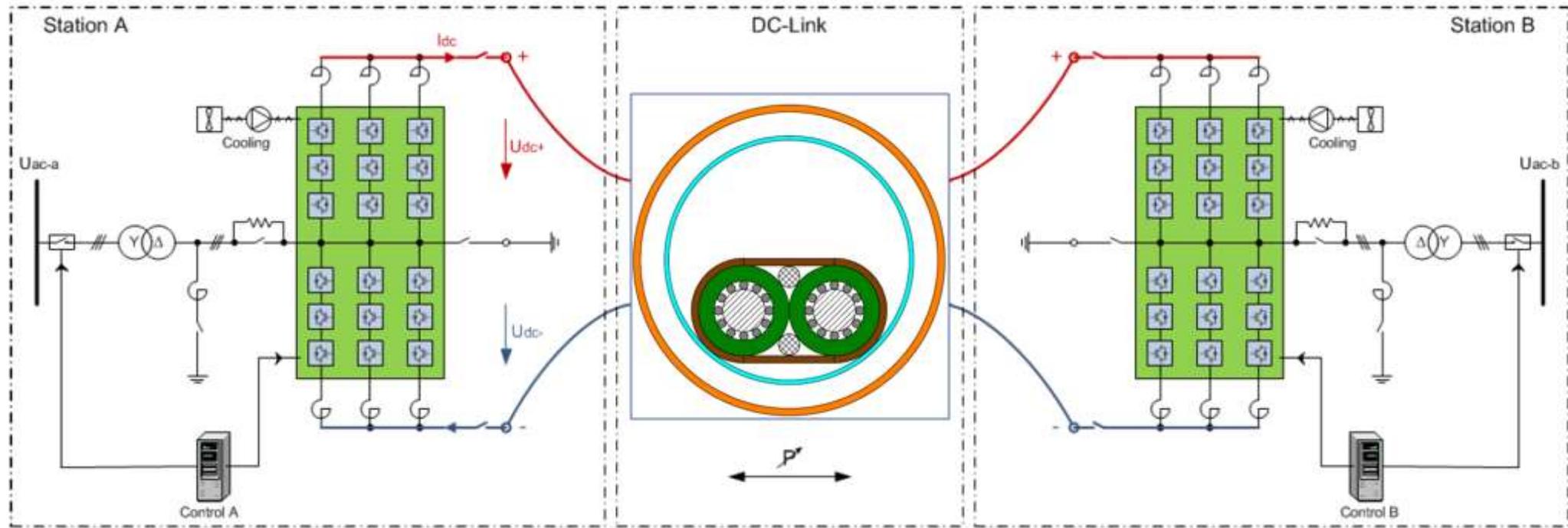


1. Power Transformer
2. AC Yard
3. Converter tower with phase reactors
4. DC Yard
5. Phase Reactors
6. Control & Protection
7. Cooling Container
8. Outdoor Cooler

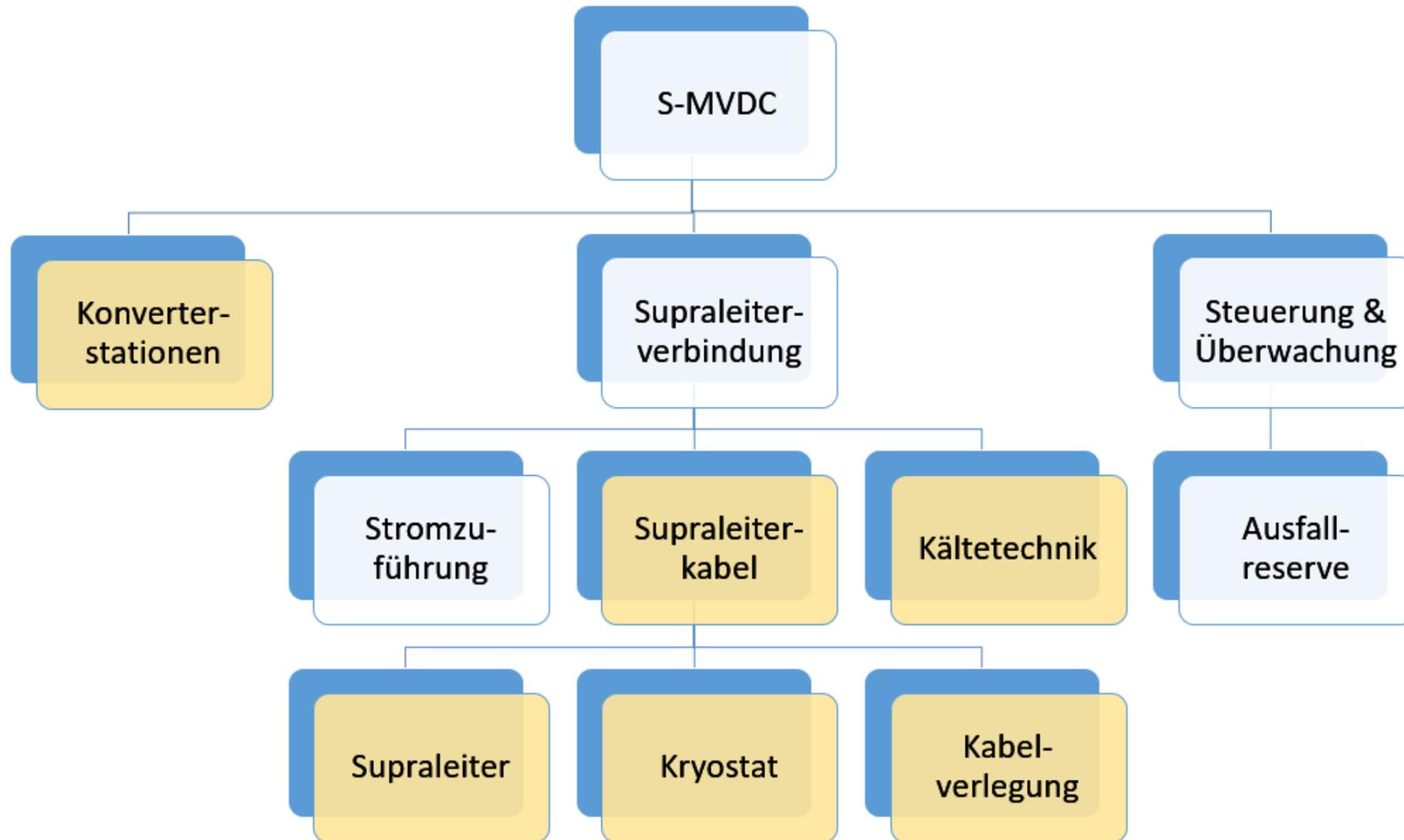
- U: $\pm 25, 30, 50$ kVDC
- I: 1,5 kADC
- P: 70, 90, 150 MW
- Q: 32, 43, 66 MVA
- Leistungsfluss in beide Richtungen durch Stromumkehr
- Kabelwiderstand begrenzt Übertragungsdistanz:
 - ± 25 kV \rightarrow 100 km
 - ± 30 kV \rightarrow 150 km
 - ± 50 kV \rightarrow 200 km



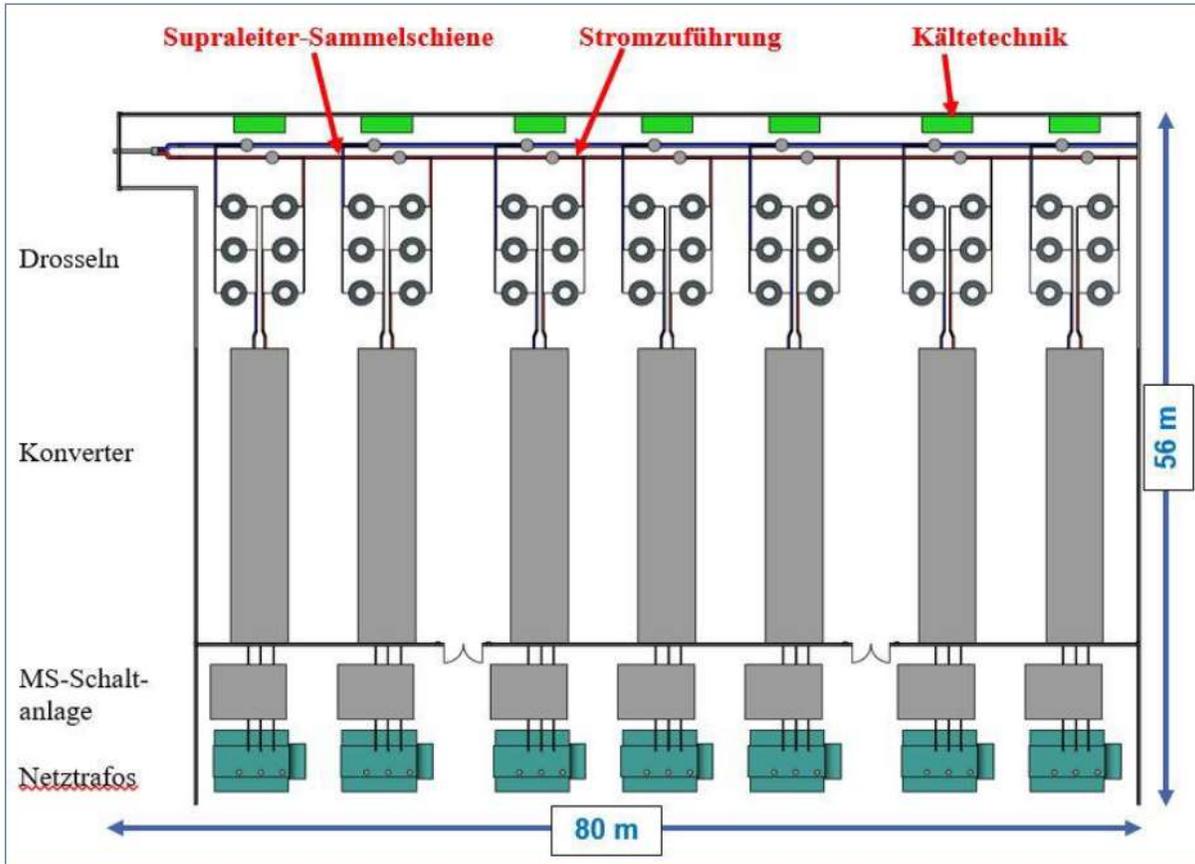
Supraleiter + MVDC → S-MVDC



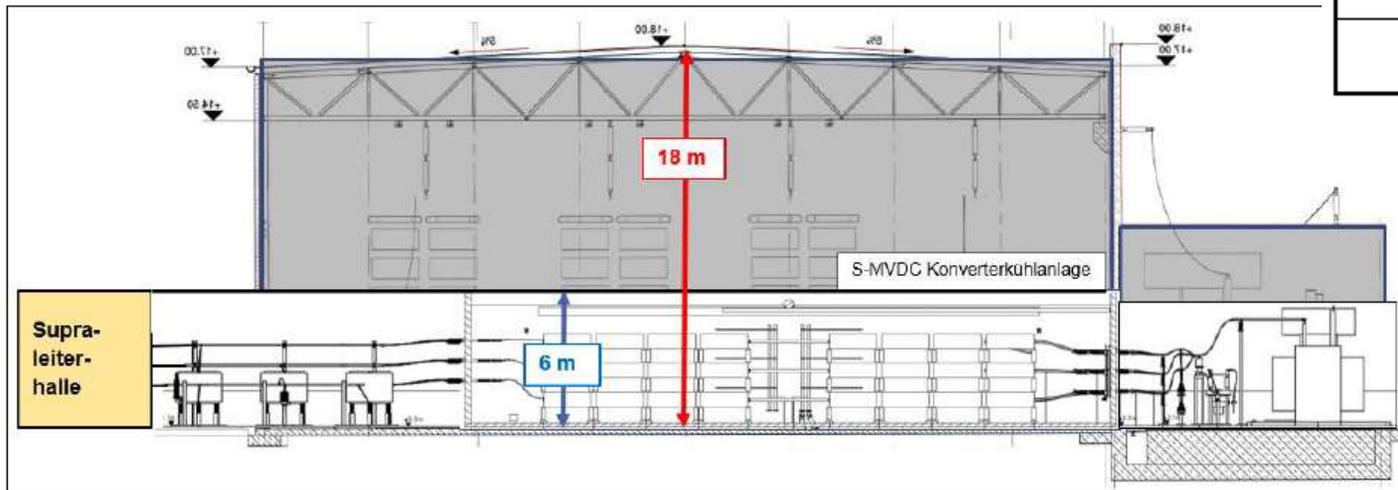
- Mehrere MVDC-Konverter parallel → GW-Bereich mit Mittelspannung
- Bevorzugte Spannungsebene: ± 50 kVDC
- Widerstand Supraleiterkabel incl. Stromzuführung, Kupplungen: $< 1\%$ vs MV-Cu-Kabel
- Theoretische Reichweite einer Verbindung: > 20.000 km



Konverter



Flächen und Volumina	HVDC - 1 GW - S-MVDC	
DC-Spannung	± 320 kV	± 50 kV
Flächen in m ²		
Halle	4.800	3.300
Freiluft	1.000	1.000
Gesamtflächenbedarf	5.800	4.300
	100%	75%
Hallenhöhen (Konverter)	18 m	6 m
Hallenvolumen in m ³	90.000	22.500
	100%	25%



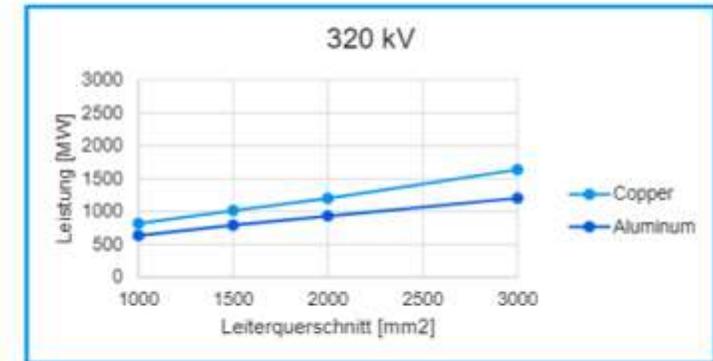
Vergleich der 1 GW Konverter
HVDC 320 kV vs S-MVDC 50 kV

DC-Kabel 320 / 525kV

Kunststoff-isolierte Gleichstromkabel bis 320 kV

Kunststoff-isolierte Gleichstromkabel hatten bisher folgende Eigenschaften:

- Max. Betriebsspannung: 320 kV
- Max. Übertragungsleistung:
~ 1.000 MW (Aluminium)
~ 1.500 MW (Kupfer)



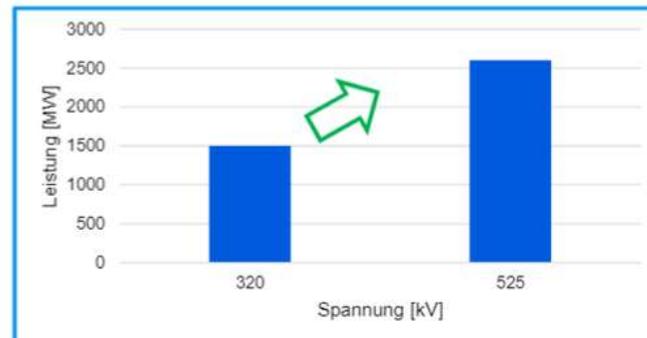
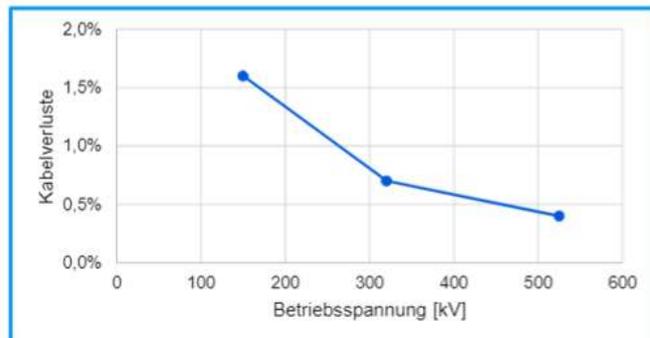
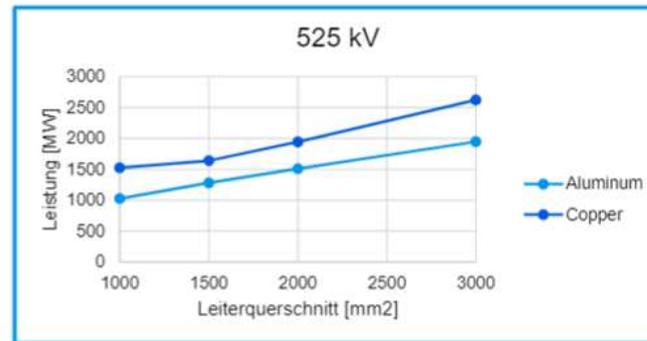
• Alle Berechnungen basieren auf folgenden grundlegenden, typischen Annahmen:

- 1,5 m Verlegetiefe
- 1 K*m/W thermischer Widerstand
- 15°C Bodentemperatur
- „nahe“ Verlegung (mit Ausnahme bei 3.000 mm² Kupfer, → 0,5 m Abstand)

Kunststoff-isolierte Gleichstromkabel bis 525 kV

Neue kunststoff-isolierte Gleichstromkabel haben folgende Eigenschaften:

- Max. Betriebsspannung: 525 kV
- Max. Übertragungsleistung:
 - bis zu 2.000 MW (Aluminium)
 - bis zu 2.600 MW (Kupfer)

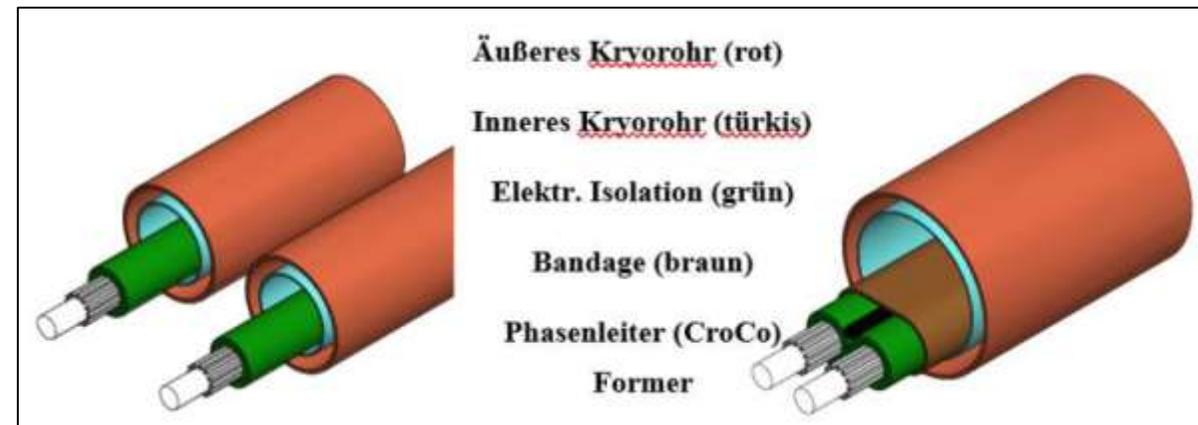


- Verlustleistung bei 1000 km, I_Nenn
 - 320 kV → 6 – 7%
 - 500 kV → 3,5 -4%
- Zum Vergleich: S-Kabel → < 0,1%



- Supraleiterkabel in zwei Ausführungen
 - Einphasig, jede Phase im eigenen Kryostat
 - Zweiphasig, beide Phasen in einem Kryostaten
- Ausführung beeinflusst Kältetechnik, Montage & Verlegung, Magnetfeld

Nennspannung AC, 50 Hz		Hochspannung zwischen 110 und 400 kV									
Nennleistung	MW	500		1.000			2.000		4.000		
Nennspannung DC	± kVDC	25	50	25	50	100	25	50	100	50	100
Nennstrom DC	kA	10	5	20	10	5	40	20	10	40	20



Technische Daten Supraleitendes Kabel

■ Kryostat

- Verlegung wie Pipeline
- Wellrohr, auf Haspel, bis 500 m
- Glattrohr, Länge bis 16 m
- Vor Ort verschweißen, L = ca. 1 km
- Wechsel der Anordnung durch Übergangselemente

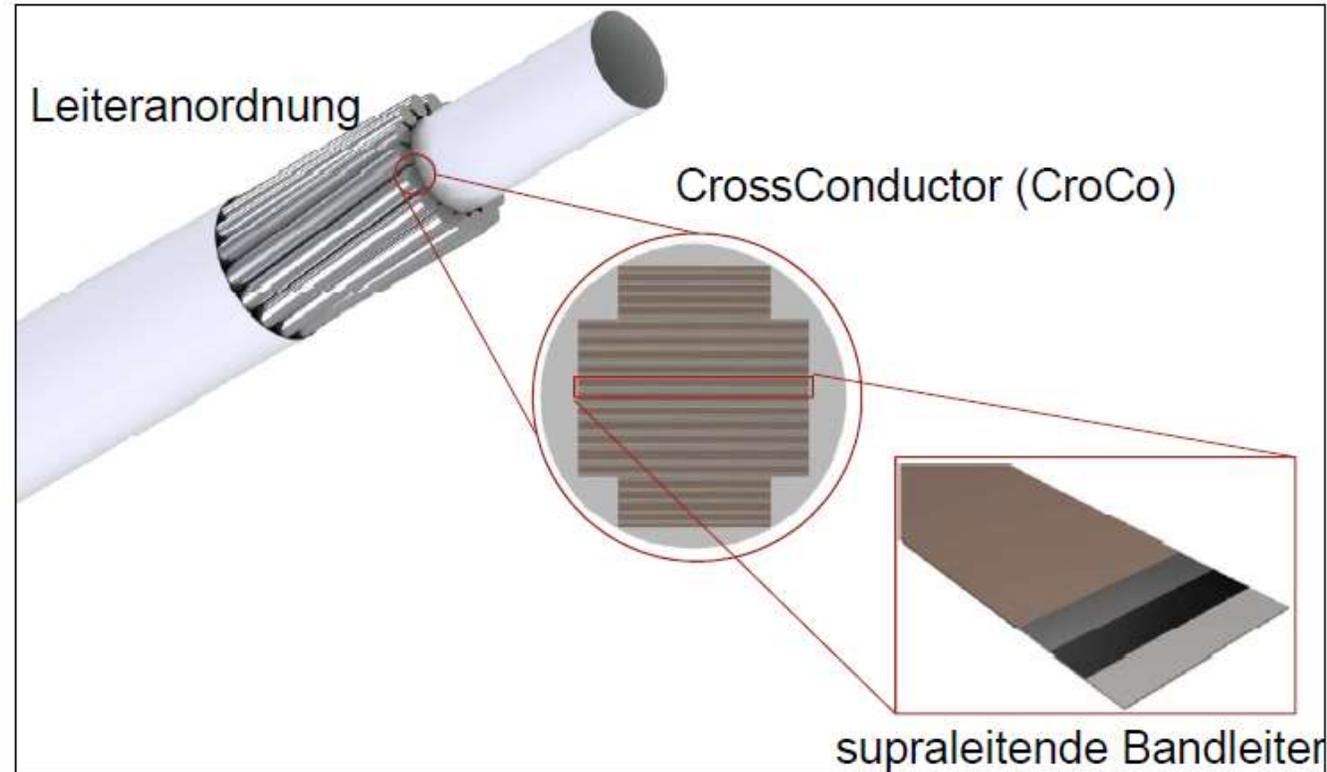
■ Phasenleiter

- Transport auf Haspel, L = 1 - 5 km
- Incl. elektr. Isolation, mechan. Schutz
- Optional mit HTS-Schirm
- Anordnung 1: Standardkabeleinzug
- Anordnung 2 mit Gürtel (Aufnahme der Stromkräfte) und Zugseilen

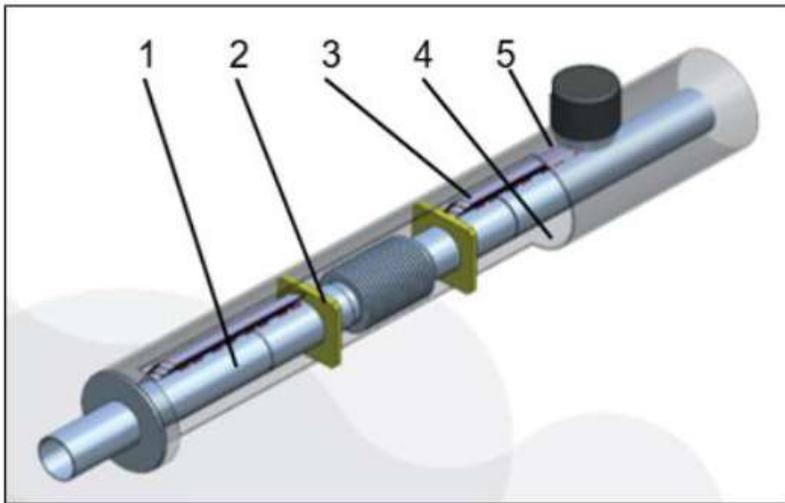
- Anordnung nach Anforderung schlanker oder voluminöser

Leistung 1 GW				Anordnung 2			
bei 3 Spannungsebenen							
Anordnung 1							
Nennspannung / kV	25	50	100	25	50	100	
Strom pro Phase / kA	20	10	5	20	10	5	
D4 = Durchmesser Phasenleiter mit Isolation / mm	58	64	84	58	64	84	
D5 = Durchmesser Kryorohr innen / mm	90	100	120	160	170	210	
D6 = Durchmesser Kryorohr außen / mm	140	150	170	210	220	260	
D8 = Phasenabstand lichte Weite / mm	80	80	80	0	0	0	
D9 = Phasenabstand Mitte-Mitte / mm	220	230	250	58	64	84	
Breite der Verlegetrasse (Fuß) / m	0,5			0,3			
KS-Kräfte Phasenleiter / kN/m	1,45	0,78	0,5	5,5	2,8	1,5	

- Aufbau
 - N CrossConductors (CroCos) um einen Former angeordnet
 - CroCo: verlötete HTS- und Cu-Bänder (Zwischenlagen)
 - Optimierungsaufgabe zwischen Kompaktheit und Wirtschaftlichkeit (I_c -Leiter vs I_c - HTS-Band)
- Anforderungen / Eigenschaften
 - Kontinuierliche integrierte Kompensation der Kältekontraktion der Metalle
 - Auf Haspel aufrollbar
 - Herstellung auf verfügbaren Maschinen (keine Sondermaschinen)



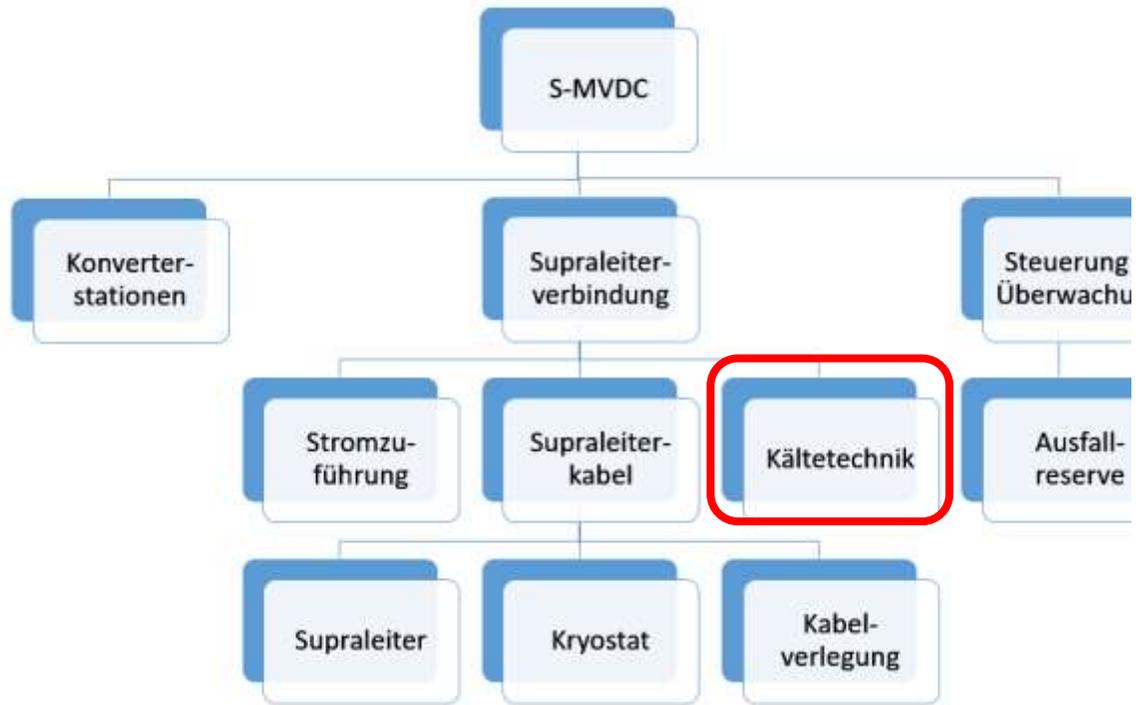
Reduktionsfaktoren gegenüber den einzelnen HTS-Bänder zwischen 70% und 35%, abhängig von den Cu-Zwischenlagen und den CroCo-Abständen



- 1 – inneres Prozessrohr
- 2 – Abstandshalter
- 3 – Superisolation
- 4 – Vakuum
- 5 – äußeres Kryostatrohr
- 6 – PE-Außenmantel (opt.)

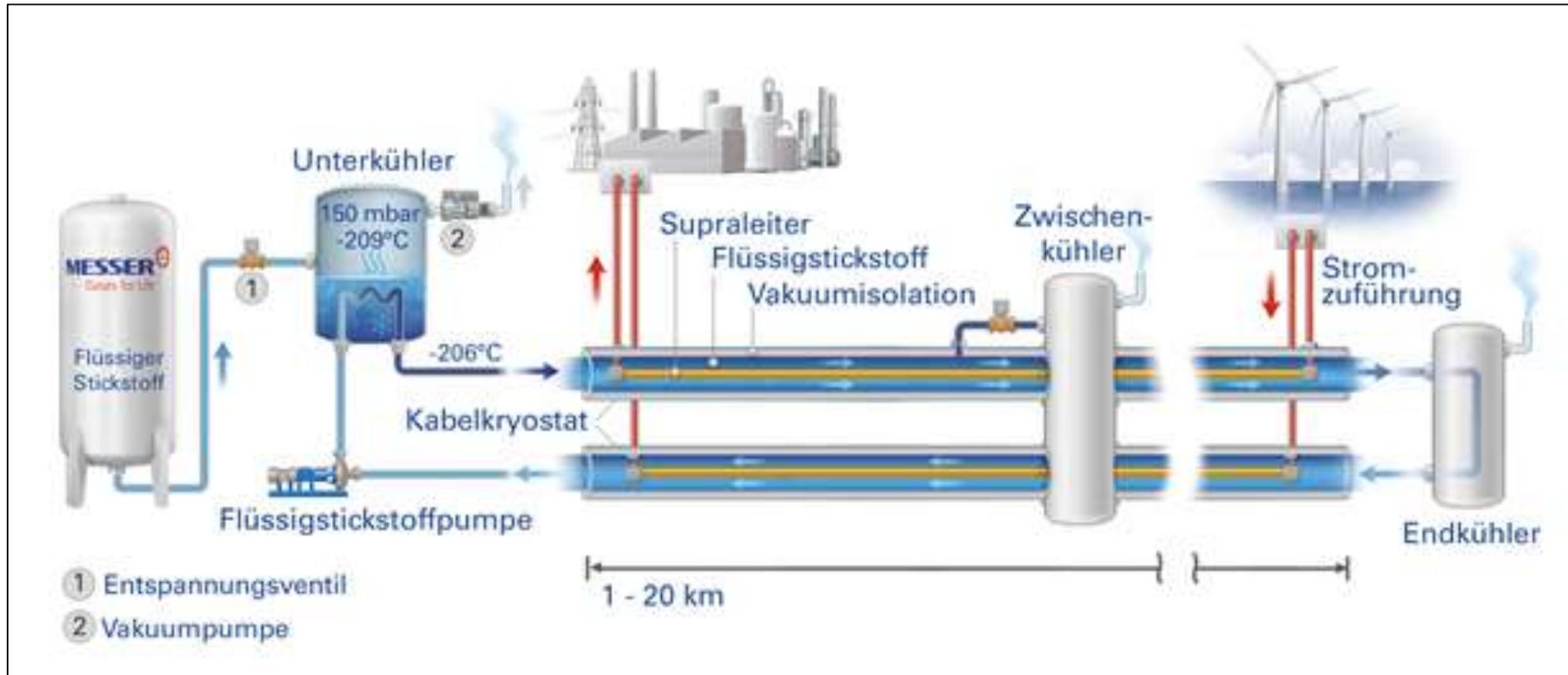
Vergleich Kryostaten	Glattrohr	<u>Wellrohr</u>
Durchmesser	ohne Einschränkung	AD max. 300 mm
Herstellkosten	niedriger als <u>Wellrohr</u>	höher als Glattrohr
Montagekosten	höher als <u>Wellrohr</u>	niedriger als Glattrohr
Lieferlänge	bis zu 50 m	bis zu 500 m
Druckstufen	keine Einschränkung	bis 20 bar
Richtungsänderung	durch Formelemente	mit Biegeradius
Einzug in Leerrohre/ Microtunnel	eingeschränkt möglich	möglich

Wellrohr bis 220 mm kann eingepflügt werden.



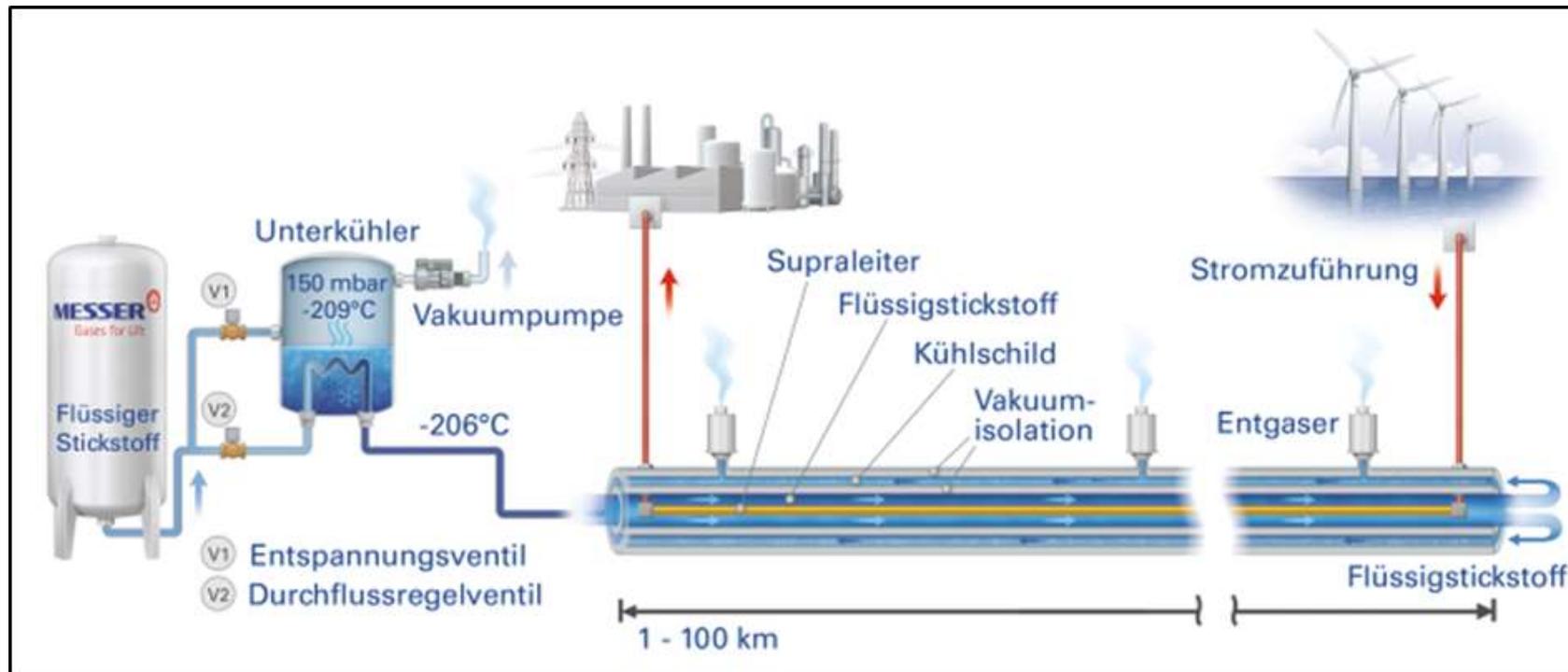
Geschlossener Kältekreis	Offener Kältekreis
Kältemaschinen und Pumpen	LN2-Unterkühler und Pumpen
Carnot- / Maschinenwirkungsgrad	Verdampfungsenthalpie des Stickstoffs
Investitionskosten (1kW@70K ≈ 100 T€)	Investitionskosten gering < 30%
Betriebskosten = Wartung + Strom	Betriebskosten = Wartung + LN2
Redundanzen notwendig	Regelmäßige LN2-Anfuhr
Notstromsystem notwendig	Zusätzlicher LN2-Tank
Rückkühlung über Kältemaschinen	Rückkühlung durch erhöhten Massefluss

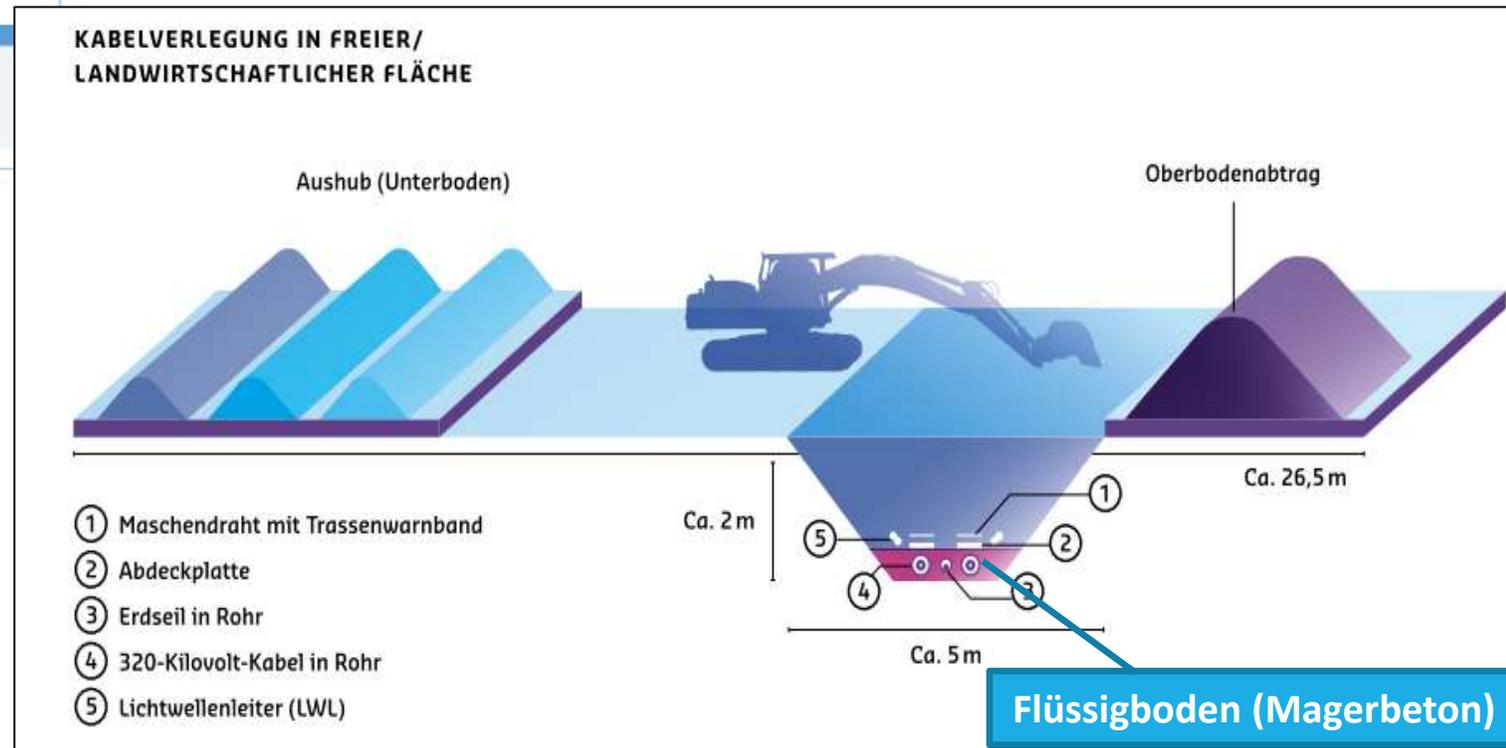
- Anordnung 1: Zwei Kryostate → Hin- und Rücklauf des LN2
- Geschlossener und offener Kältekreis (im Bild gezeigt) möglich



Kältekonzept – Kryostat mit Kälteschild

- Keine Rückführung und Rückkühlung von flüssigem Stickstoff
- Ausnutzen der Verdampfungsenthalpie zur Kühlung des Prozessrohrs
- Abführen des gasförmigen Stickstoffs durch Entgaser entlang der Strecke
- Bis 100 km ohne Pump- und Kältestation, abhängig von Geländetopologie



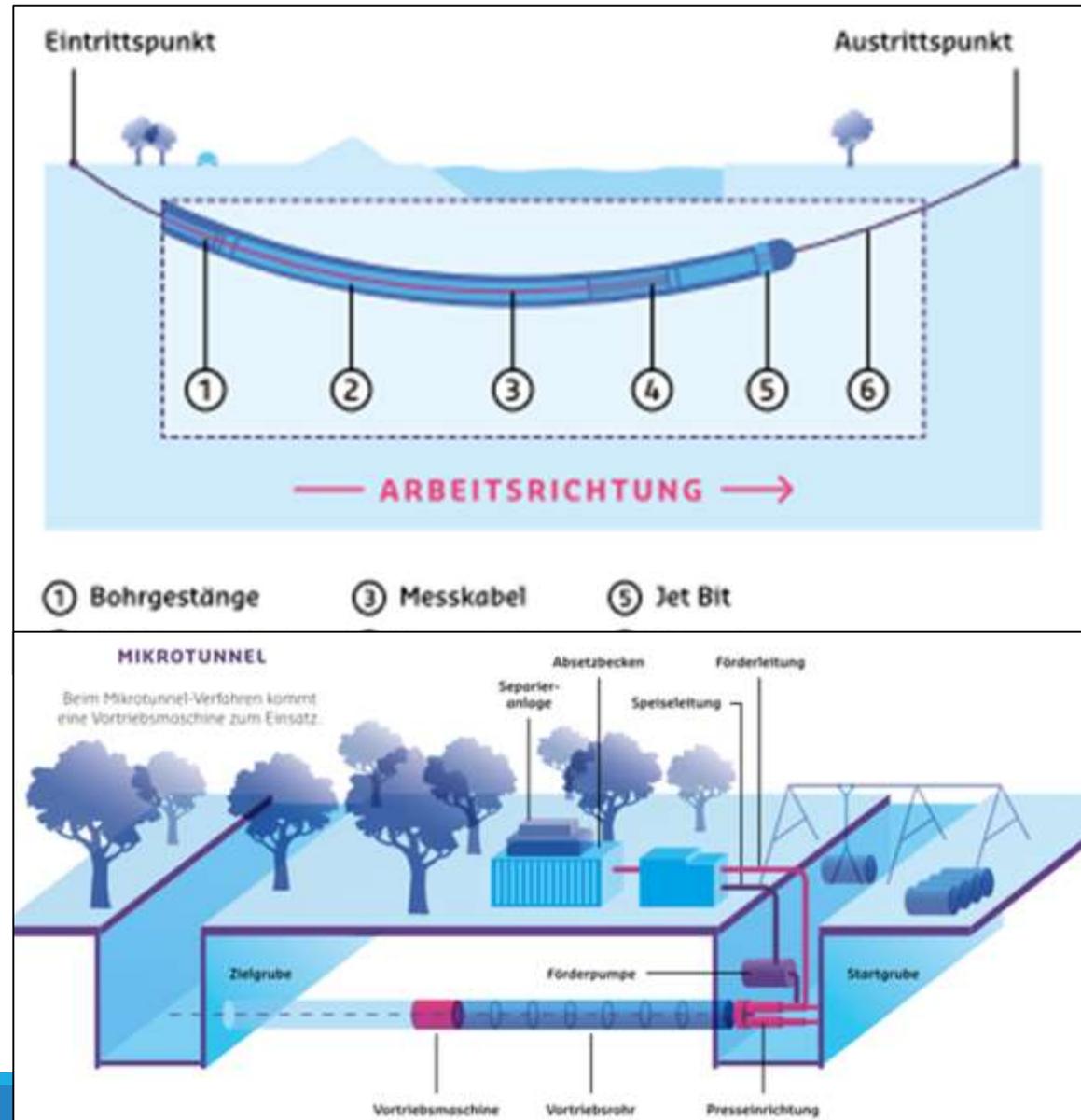


Verfahren

- 70 – 80% offene Verlegung
- 10 – 20% HDD- oder Spülbohrung
- 5 – 15% Mikrotunnel
- Einpflügen, ca. 50% der offene Verlegung

Vergleich Verlegearbeiten

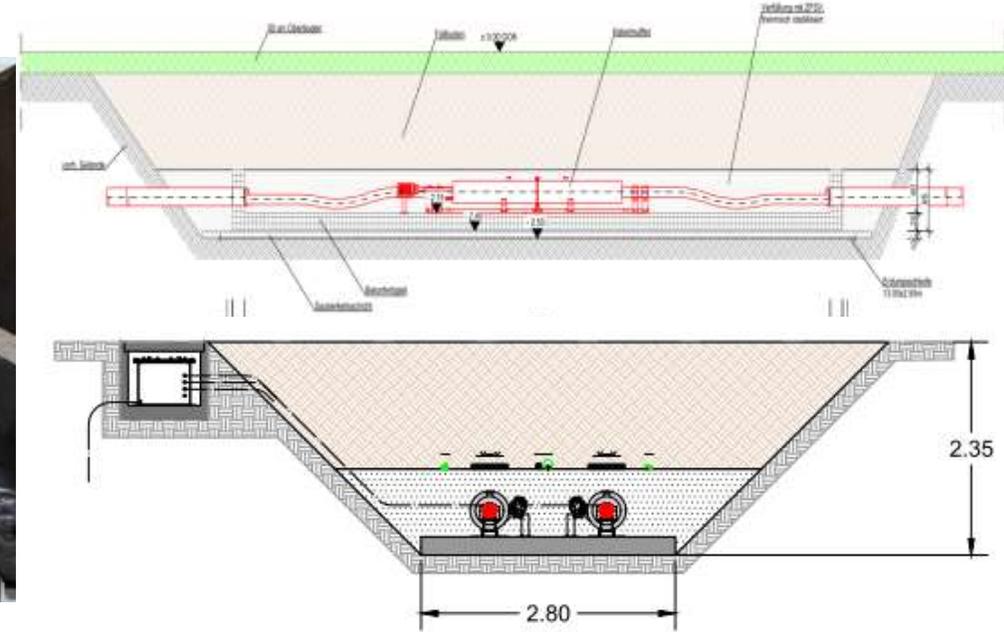
	HVDC-Kabel	Supraleiter-Kabel
Offene Grabenverlegung in	Flüssigboden	Aushub
HDD- oder Spülbohrung	gleicher Aufwand & Kosten	
Mikrotunnel	gleicher Aufwand & Kosten	
Einpflügen	nicht möglich	möglich
Gesamtkosten	100%	40 - 60%



Muffenbauwerk

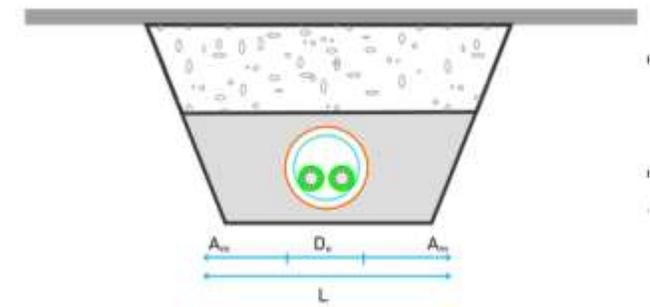
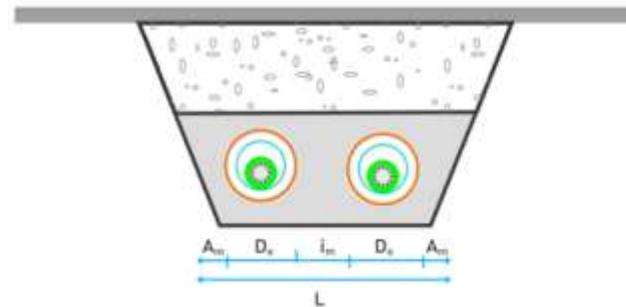
■ Kabel 320 kVDC

- Aufbau mit Sauberkeitsschicht und 12m Betonfertigteile
- Enthält Muffen, LWL, TE-Messbox und Erdungsschleife
- Kabelverlauf mit Bremsbögen
- Verfüllung mit Flüssigboden



■ HTS-Kabel 50 kVDC

- Kein Muffenbauwerk
- Verschweißen und verlegen

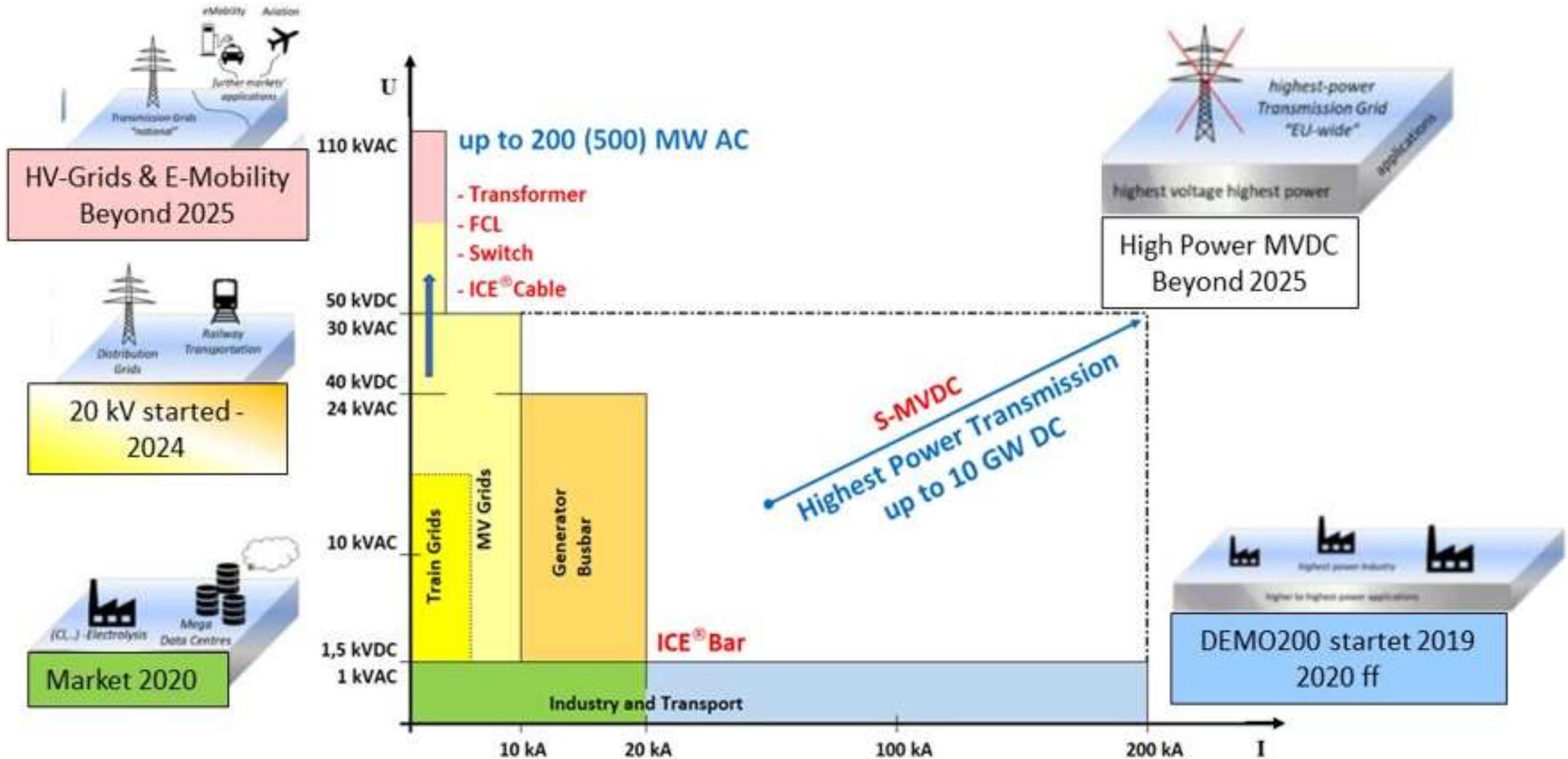


Rohrverlegung im offenen Graben



- Motivation für S-MVDC
 - Offshore-Wind in den Süden
 - Kompakt mit hoher Leistungsdichte
 - Lösung für Trassenengpass „Wattenmeer & fries. Inseln“
- Realisierung der Trassenplanung
 - Gesellschaftliche Akzeptanz
 - Geringste Umweltbeeinträchtigung
 - Kürzere erwartete Umsetzungszeit (was kostet das Jahr Verzögerung?)
- Konverterstationen
 - Volle HVDC-Funktionalität
 - Geringerer Flächenbedarf 75%
 - Kleinere Konverterhallen 25%
 - Vorteil für S-MVDC wird bei 500 kV größer
- Kompakte HTS-Kabel
- Vorteilhafte Verlegung
- Investitionskosten
 - Konverterstationen günstiger
 - HTS-Kabel heute teurer, bei Menge günstiger
 - Kältetechnik zusätzlich
 - Verlegung deutlich günstiger
 - Gesamtinvestition: Heute gleich mit HVDC für hohe Leistungen oder große Distanzen
 - Zukunft deutlich günstiger
- Betriebskosten
 - Etwas höhere Wartung
 - Geringere Verluste
 - Weitestgehend niedriger, abhängig von Leistung und Länge

Ausblick: S-MVDC bis 10 GW



Vielen Dank !

Dr. Wolfgang Reiser
Vision Electric Super Conductors GmbH

Tel. 0631 / 627 983-0 Mob. 0173 / 6633 232
reiser@vesc-superbar.de
www.vesc-superbar.de