

# Einsatz supraleitender DC-Kabel im Energieübertragungsnetz

---

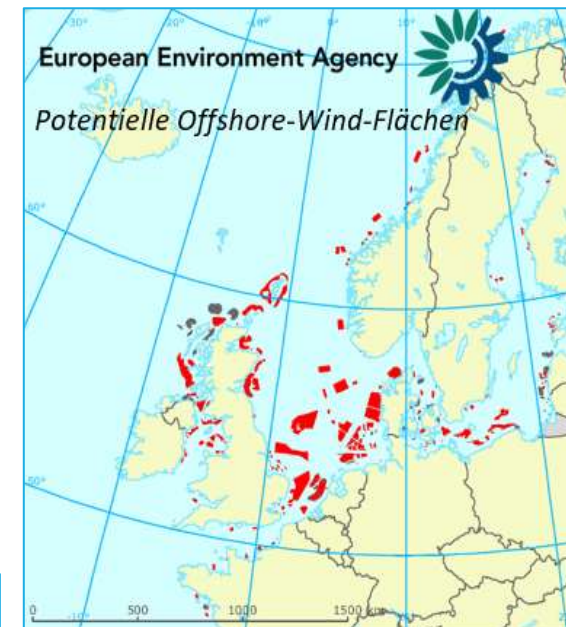
DR. WOLFGANG REISER

VISION ELECTRIC SUPER CONDUCTORS

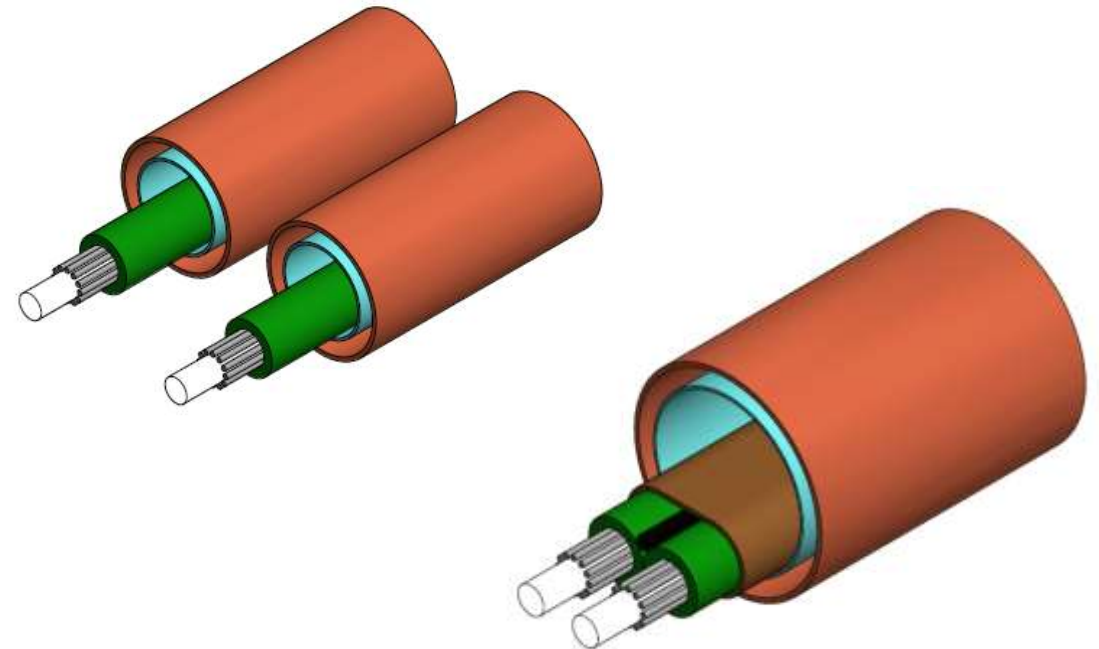
## Herausforderung der nächsten Jahre

- NEP 2035, bestätigt von der BNetzA, Jan.2022
  - Ausbau der erneuerbaren Energien verändert die Energielandschaft grundlegend
  - Stromerzeugung nicht am Bedarfsort und zur Bedarfszeit, sondern wo und wann verfügbar
  - Stromüberschüsse und –defizite sind neu verteilt
  - Herausforderung an Netzstrukturen
- Ausbau der Offshore-Windenergie ist strategisches Ziel der Europäischen Kommission
  - Ausbau von heute 12 GW auf 300 GW in 2050 \*
  - Bedarf von weiteren HVDC Verbindungen
- Frage, die in einer Studie beantwortet werden soll:  
**Kann die Supraleitung zum Netzausbau einen Beitrag leisten und wenn ja, welchen?**

\* [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_20\\_2096](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_2096)



- S-MVDC: Studie über den Einsatz von DC Gigawatt Leitungen mit Supraleitung
- Machbarkeitsstudie im Auftrag von Amprion
- Mitwirkung: KIT, Messer, Siemens, Vorwort von Dr. Bednorz
- Inhalt
  - Motivation und Systemanforderungen
  - Konverterstationen
  - Supraleitendes Kabel
  - Aufbau
  - Eigenschaften
  - Kältekonzepte
  - Verlegung
  - Kosten



## ■ Elektrische Werte

- Übertragungsleistungen von 1, 2 und 4 GW, perspektivisch bis 10 GW
- Spannungen von  $\pm 25$ ,  $\pm 50$  und  $\pm 100$  kV DC
- Ströme zwischen 5 und 40 kA
- Kurzschlussfest
- Überspannungsfest

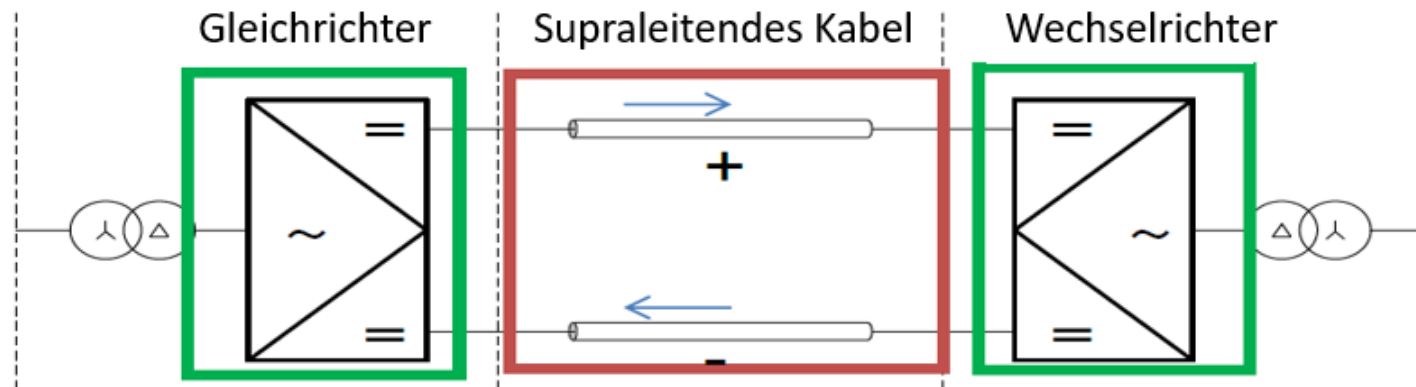
## ■ Geringe EM-Felder

- Elektrisches Feld = 0
- Magnetisches Feld max.  $500 \mu\text{T}$  / Praxiswert  $100 \mu\text{T}$

## ■ Lange Übertragungslängen zwischen den Konverterstationen

## ■ Große Distanzen zwischen den Kältestationen

- Onshore: min. 10 km
- Offshore: max. mögliche Länge



## ■ Fault-Ride-Through

## ■ Schwarzstartfähig

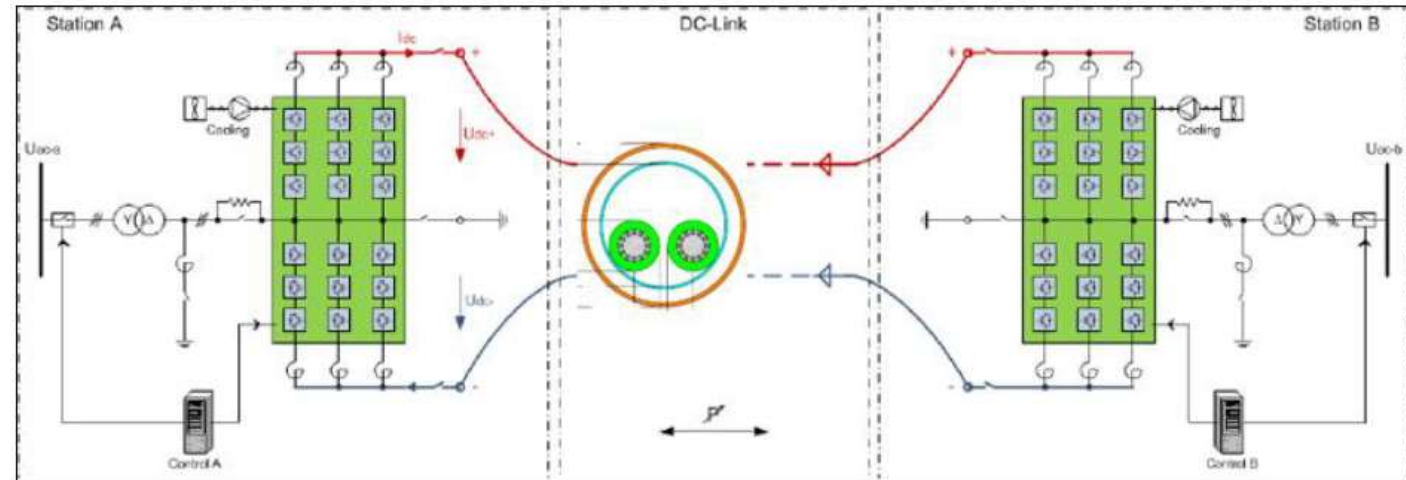
- Kaltreserve
- Dunkelgangreserve

## ■ Verlegung

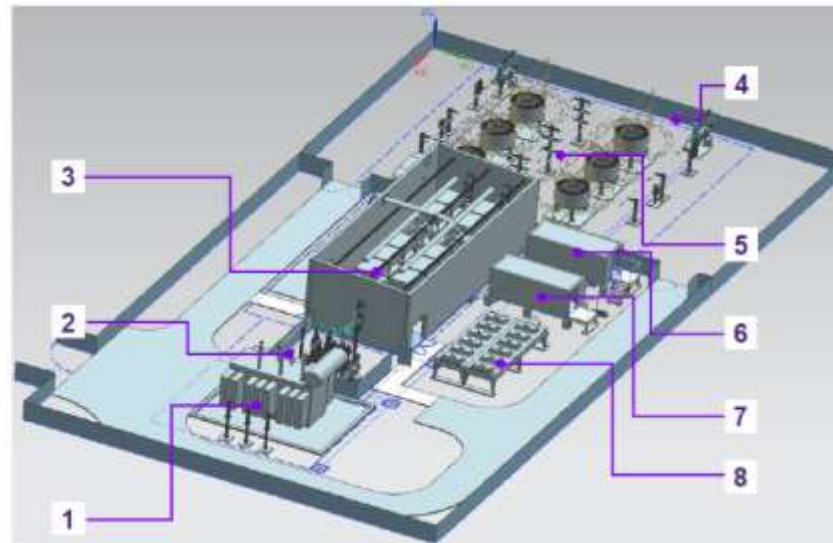
- Offener Graben
- Spülbohrverfahren
- Mikrotunnel

# Konverterstation MVDC

- Symmetrischer Monopol
- ±25 und ±50 kVDC
- bei 150 MW Übertragungsleistung  
→ für 1 GW: 7 Stationen parallel



Type	DNDC-24	DNDC-48
DC voltage at rectifier	+/-24 kVdc	+/-50 kVdc
Rated DC current (max.)	1.5kA <sub>dc</sub>	1.5kA <sub>dc</sub>
Active power transfer (max.)	70MW	149MW
Reactive power / station (max.)	32MVar	66MVar
P- / Q-Control	✓	
Voltage control	✓	
STATCOM operation	✓	
AC fault ride through	✓	

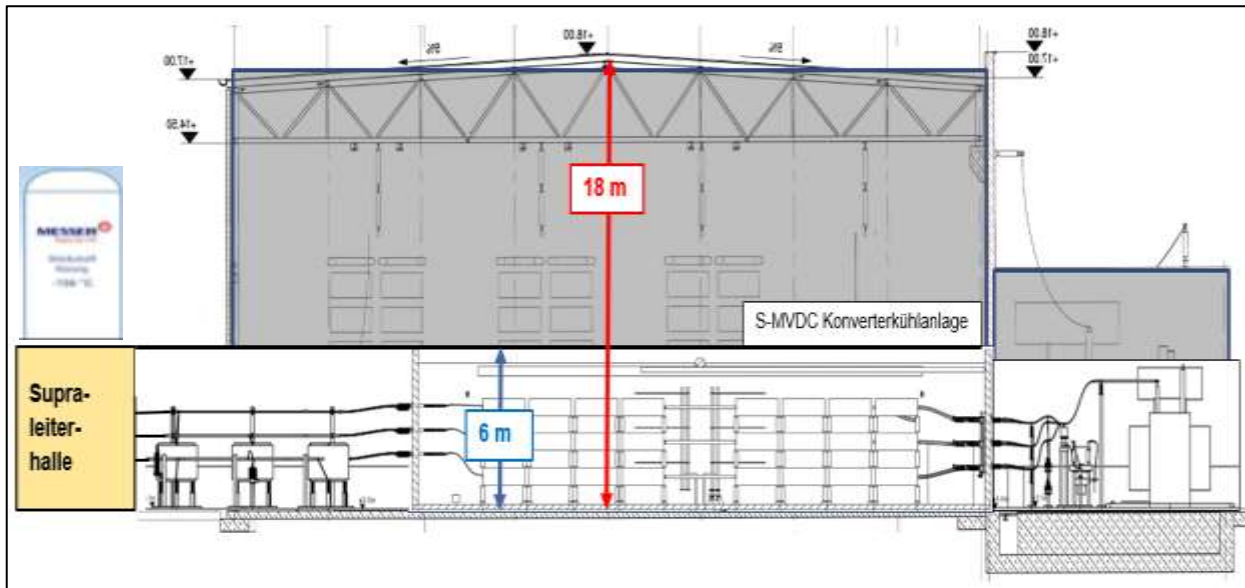


1. Power Transformer
2. AC Yard
3. Converter tower with IGBT
4. DC Yard
5. Phase Reactors
6. Control & Protection Container
7. Cooling Container
8. Outdoor Cooler

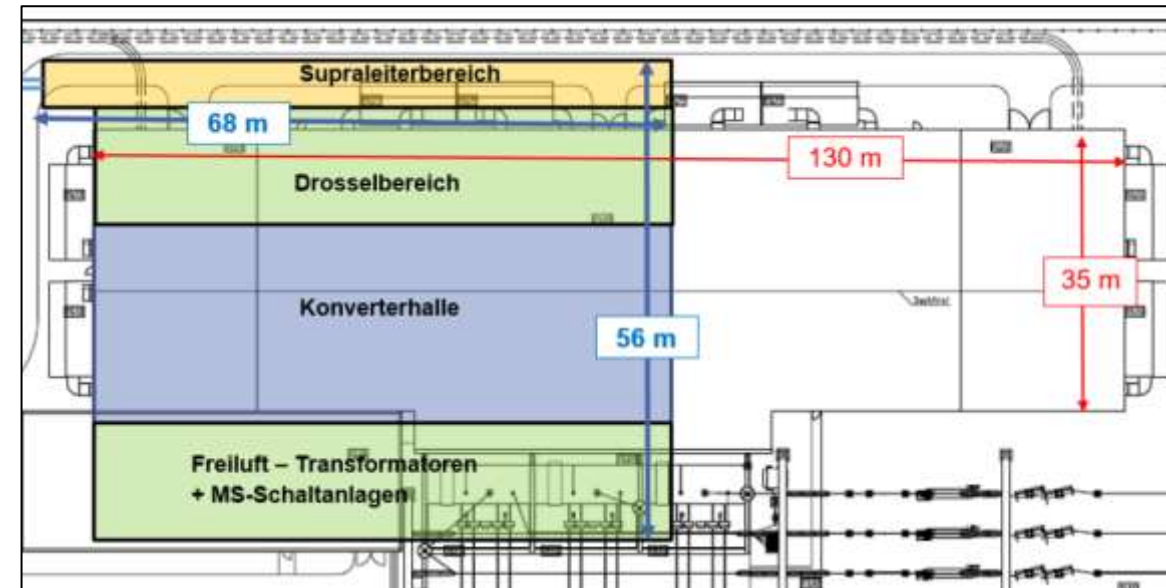
Bildquellen: Siemens Energy

# Konverterstationen MVDC

- DC-Spannungsebenen: 25, 50 und 100 kV
- Stationsleistungen: bis 300 MW, in Stufen bis 4 GW
- Spannungsebene bedingt die Hallenhöhe
- Voraussichtlich kein wesentlicher Unterschied in der Gesamtfläche der Station



Höhenvergleich: S-MVDC 50kV mit LN2-Tank vs HGÜ 320 kV



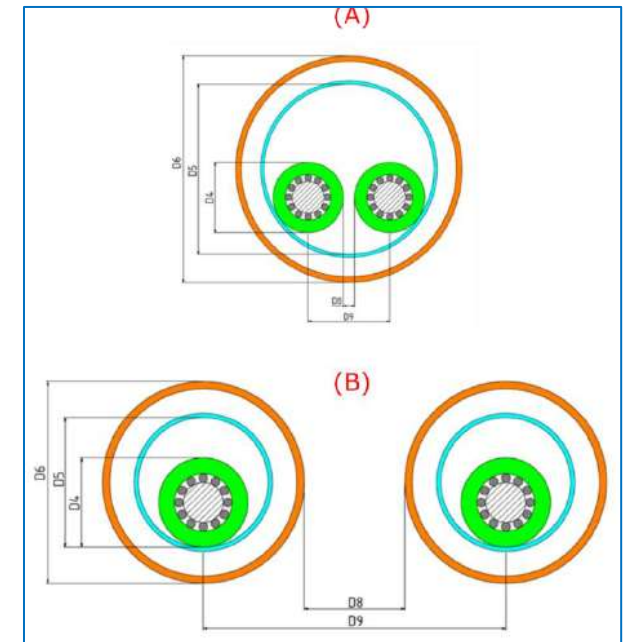
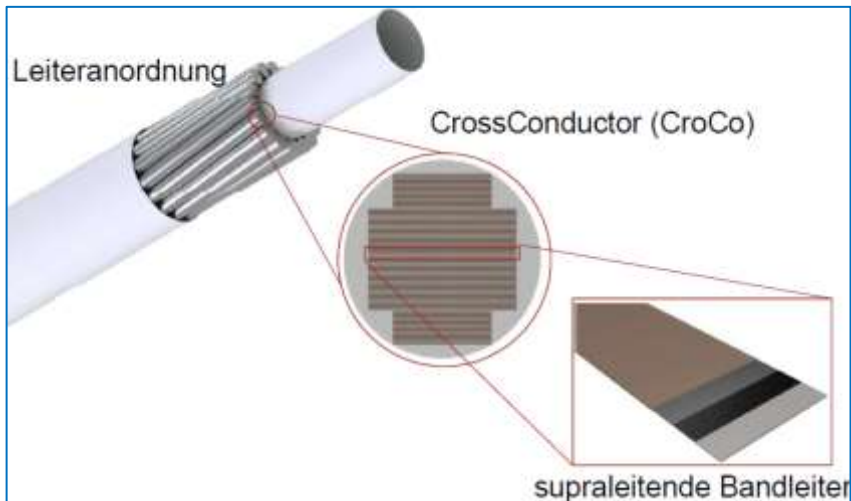
Flächenprojektion S-MVDC-Konverter

# Supraleitendes Kabel - Aufbau

- Viele HTS- und Cu-Bänder → CroCo: 3 Größen mit je 5 Varianten
- Mehrere CroCo (6, 9, 12, 16) → Phasenleiter
- Elektr. Mischisolation aus PPLP & LN2

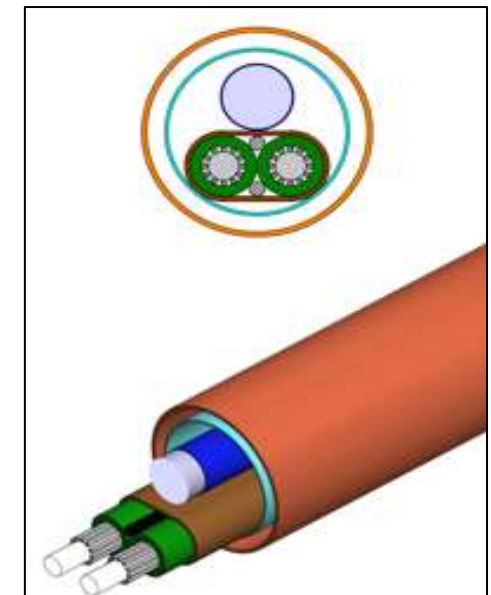
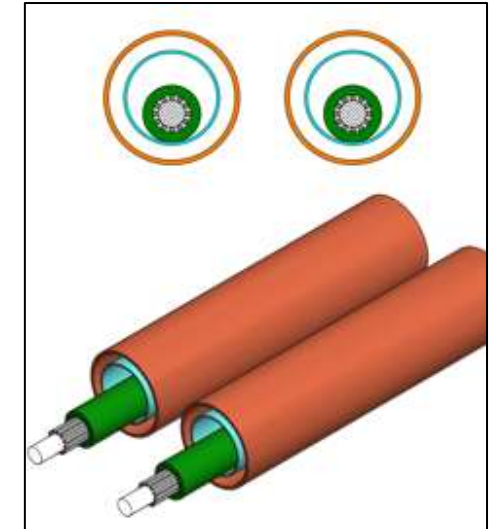
Beide Möglichkeiten in einer Trasse:  
Wellrohr- und Glattrohr-Kryostate

Ein oder beide Phasenleiter in einem Kryostat



# Supraleiterkabel

- Varianten und Komponenten
  - DC-Ströme: 5, 10, 20, 30, 40 kA
  - Besteht aus mehreren Rundleitern & elektr. Isolation
  - Kryostat – doppelwandig mit Vakuum zur thermischen Isolation )
  - Ausführungen
    - Monopolar – Kryostat-Durchmesser 140 – 170 mm
    - Bipolar – Kryostat-Durchmesser 210 – 260 mm
  - Stromzuführung mit supraleitender Sammelschiene – Übergang zwischen Kabel und Konverterstationen
- Betriebstemperatur: 70 -75 K, unterkühlter LN2
  - Offener Kühlkreis mit Vakuum-Unterkühler
  - Geschlossener Kühlkreis mit Kältemaschinen
  - Bipolare Anordnung: Rückführung LN2 im Kryostaten oder außerhalb

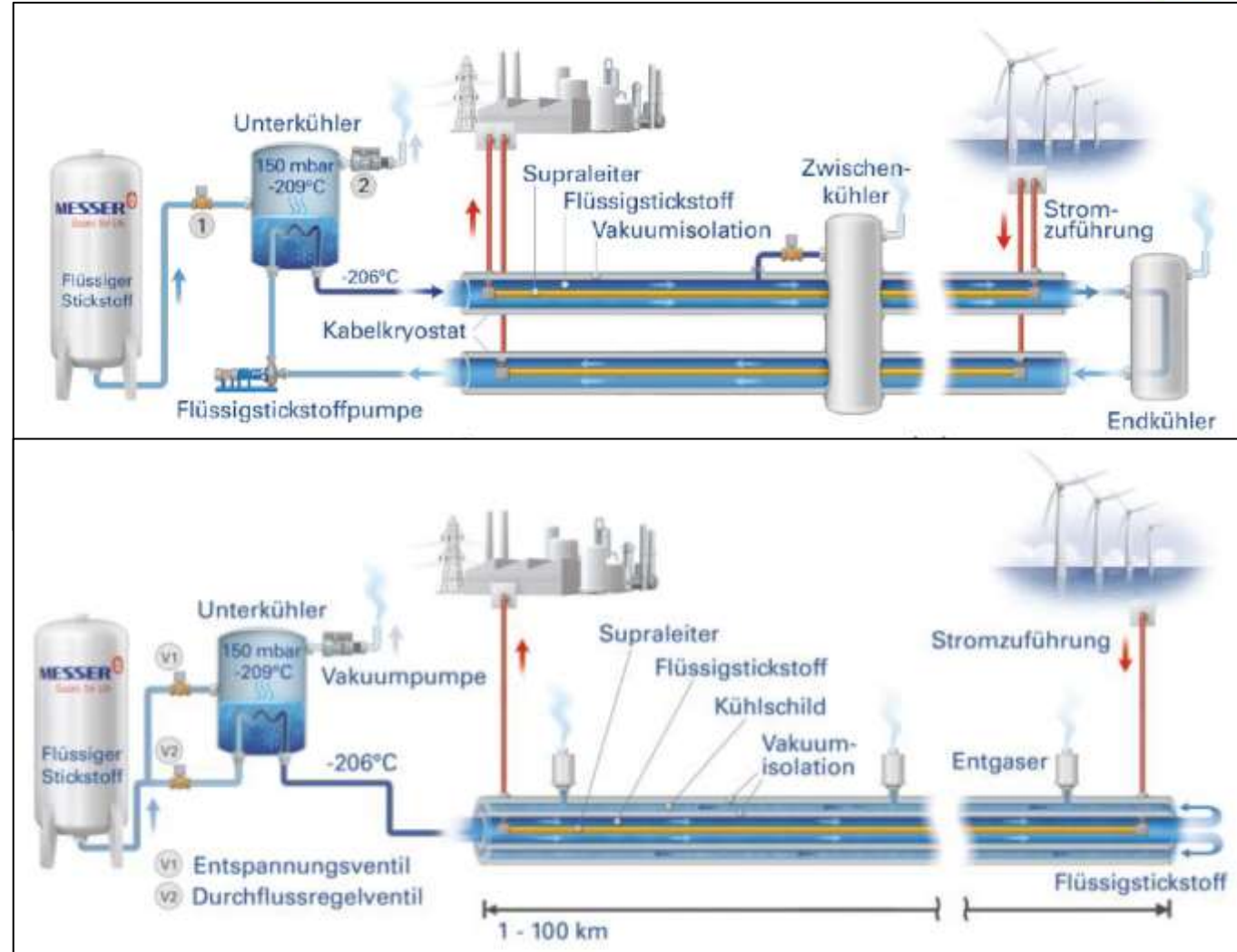


# Untersuchte Eigenschaften des supraleitenden Kabels

- Leitereigenschaften HTS-Bänder
  - Kupferschicht
- CroCo-Eigenschaften (Strom)
  - Anteil Kupferbänder (5 Varianten)
  - Magnetfeldeinfluss im CroCo
- Phasenleiter
  - Kältekontraktion (integriert)
  - Anzahl & Abstände der CroCos
  - Elektr. Isolation (25, 50, 100 kV)
  - Fertigungslänge auf Haspel (> 1 km)
  - Durchmesser f(U): 58 – 84 mm
- Berechnung der Impedanzen
- Thermische Betrachtung
  - Temperaturprofil LN2
    - Radial und über die Länge
    - Stationär und im Störfall
  - Wechselstromverluste durch DC-Ripple
  - Magnetfeldbetrachtung
  - Ausfall der Kühlung (Kältekapazität)
- Konstruktive Eigenschaften
  - Übergang von ein- auf zweiphasig
  - Haspeltransport
  - Fertigungsmöglichkeiten

# Kältekonzepte

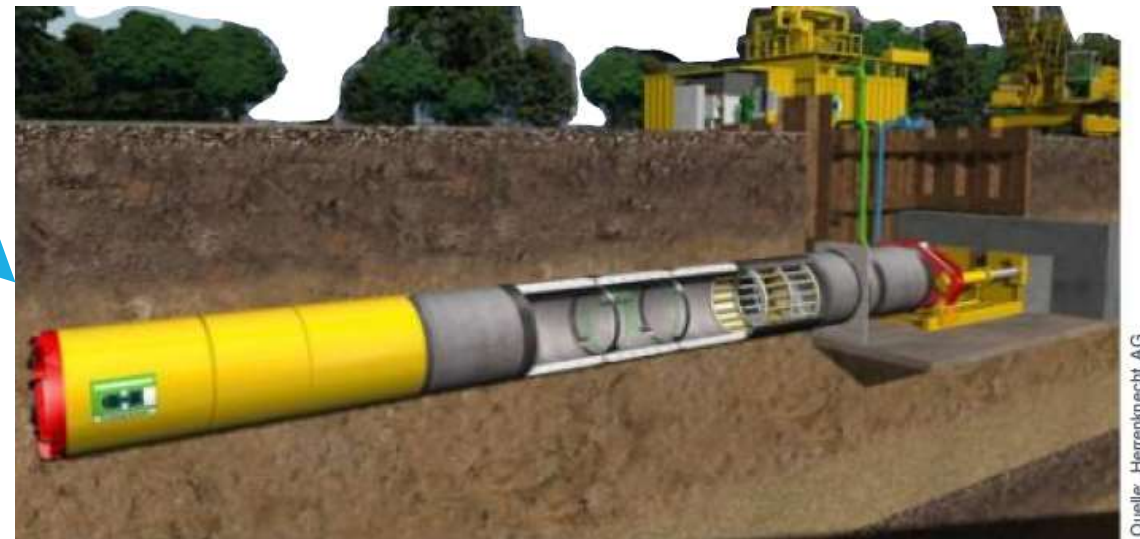
- Berechnung der Kälteleistung
  - Stromzuführung
  - Kryostatverluste
  - Kontaktübergänge
  - Hydraulische Verluste
- Ermittlung Abstand Kältestationen
  - Berechnung günstigster Massenfluss und Druckabfall
    - max. Entfernung von 10 bis 20 km
    - Mit offenem und geschlossenem Kältekreis
  - Entwicklung „Long-Range“- Lösung
    - Entfernungen > 100 km
    - Mit offenem Kältekreis
    - Gemeinsames Patent Messer & VESC



Bildquellen: Messer

# Verlegung

- Offene Verlegung im Graben
  - Schmale Grabensohle
  - Geringer Bodenaushub
  - Ohne Flüssigboden – komplette Wiederverfüllung
  - Reduzierte Baubedarfsfläche
- Spülbohrverfahren und Mikrotunnel zur Kreuzung von Infrastrukturen
- Einpflügen (nur flexibler Kryostat)
- Untersuchung an Referenz-HGÜ mit ca.:
  - 150 Straßen und Wege
  - 10 Eisenbahnlinien
  - 400 Versorgungsleitungen (Gas, Fernwärme, Wasser, Abwasser, Stromleitungen, Telefon- und LWL-Kabel)



Quelle: Herrenknecht AG

Investitionskosten	S-MVDC	HVDC (HGÜ)
Übertragungslänge < 100 km Übertragungsleistung < 1GW	> 120%	100%
Übertragungslänge > 100 km Übertragungsleistung > 1GW	< 100%	100%
Übertragungslänge = 700 km Übertragungsleistung = 2 GW	< 90%	100%
Übertragungslänge = 700 km Übertragungsleistung = 4 GW	< 80%	100%

## Voraussichtliche Investitionskostenabschätzung

- Kostenschnittpunkt zwischen S-MVDC und HVDC liegt zwischen 100 und 150 km
- Mit zunehmender Leistung wird die Differenz zwischen S-MVDC und HVDC größer
  - 2 GW und 4 GW S-MVDC werden im gleichen Kryostaten geführt → gleiche Grabenbreite, gleiche Tiefbaukosten
  - Die max. Kabelleistung einer HVDC beträgt 2 GW bei 525 kV. 4 GW HVDC benötigt 2 Kabel und damit die doppelte Grabenbreite

# S-MVDC vs. HVDC(HGÜ)

Leitungsverluste über 500 km ohne Konverterstationen		
für 2 GW Nennleistung	S-MVDC	HVDC 500 kV
bei 50% der Nennleistung	< 0,1%	9,45 MW
bei 90% der Nennleistung	< 0,1%	33 MW
für 4 GW Nennleistung	S-MVDC	HVDC 500 kV
bei 50% der Nennleistung	< 0,1%	18,9 MW
bei 90% der Nennleistung	< 0,1%	65,4 MW

Betriebskosten über 500 km ohne Konverterstationen		
für 2 GW Nennleistung	S-MVDC	HVDC 500 kV
bei 50% der Nennleistung	126%	4,1 mio € / a
bei 90% der Nennleistung	36%	14,3 mio € / a
für 4 GW Nennleistung	S-MVDC	HVDC 500 kV
bei 50% der Nennleistung	63%	8,3 mio € / a
bei 90% der Nennleistung	18%	28,7 mio € / a

- Leitungsverluste = Spannungsabfall \* Betriebsstrom
- S-MVDC: praktisch kein Widerstand, gleichbleibender Spannungsabfall unabhängig von der Streckenlänge
- HVDC: widerstandbehaftet, Spannungsabfall proportional zur Streckenlänge (bei 1000 km doppelter Leitungsverlust der o.g. Werte)

- Betriebskosten ohne Wartung & Nichtverfügbarkeit
- S-MVDC: Leitungsverluste + Kältearbeit
- HVDC: nur Leitungsverluste
- Break-even 2GW 4 GW
  - mit 50% nach 650 km nach 300 km
  - mit 90% nach 200 km nach 90 km

## Vorteile von S-MVDC

- Reduktion des umbauten Volumens der Konverterstationen → **Mögliche höhere Akzeptanz**
- Komplette feldfreie Trasse durch supraleitende Schirmung → **Mögliche höhere Akzeptanz**
- Kein Wärmeeintrag (ins Erdreich) → **Mögliche höhere Akzeptanz**
- Niedrigere Spannungen denkbar → **Mögliche höhere Verfügbarkeit und kürzere Genehmigungsfristen**
- Zur Verfüllung ist kein Flüssigboden notwendig → **Beschleunigung der Erdarbeiten beim Trassenbau**
- Skalierbarkeit des Stroms und damit der Leistung bei gleicher Kabelgröße → **Gleiche Breite für 4 GW und 2 GW-Trasse möglich**
- Geringere Verluste → **Hohe Effizienz**
- Wirtschaftlichkeit bei hohen Leistungen / lange Strecken → **Kostenreduktion möglich**

## Nachteile von S-MVDC

- Fehlende Prototypen und Betriebserfahrung (TRL 3 von 9) und fehlende Standardisierung → **Weitere Entwicklungsschritte und –kosten notwendig**
- Zwischenkühlstation mit Kühltanks (Höhe 6 bis 18m) → **eventuell zusätzliche Genehmigungen für Nebenanlagen**
- Vergleichsweise hohe Investitionskosten bei geringen Leistungen / kurzen Strecken
- Im offenen Kältekreis geringe Wartung, dafür hoher LN<sub>2</sub>-Verbrauch
- Im geschlossenen Kältekreis wartungs- und erneuerungsintensive Kältemaschinen
- Lange Inbetriebnahmezeiten nach längerem Ausfall der Kühlung und Systemerwärmung

# Ausblick

- Supraleitende Kabel zeigen verschiedene Vorteile gegenüber der konventionellen HVDC-Kabeltechnik
- Weitere technologische Entwicklung von Prototypen als auch Qualifizierungsprüfungen erforderlich
- Voraussichtlich erst in 5-10 Jahren Einsatz im Planungsprozess
- Konsolidierte Roadmap unter Beteiligung der Stakeholder erforderlich zur Beschleunigung der Entwicklung

# Vielen Dank!

**Dr. Wolfgang Reiser**

Vision Electric Super Conductors GmbH

Morlauterer Str. 21  
67657 Kaiserslautern

T: +49 631 / 627 983-0  
F: +49 631 / 627 983-19  
M: +49 173 / 6633 232  
reiser@vesc-superbar.de

[www.vesc-superbar.de](http://www.vesc-superbar.de)

[www.ivsupra.de](http://www.ivsupra.de)

[www.demo200.de](http://www.demo200.de)