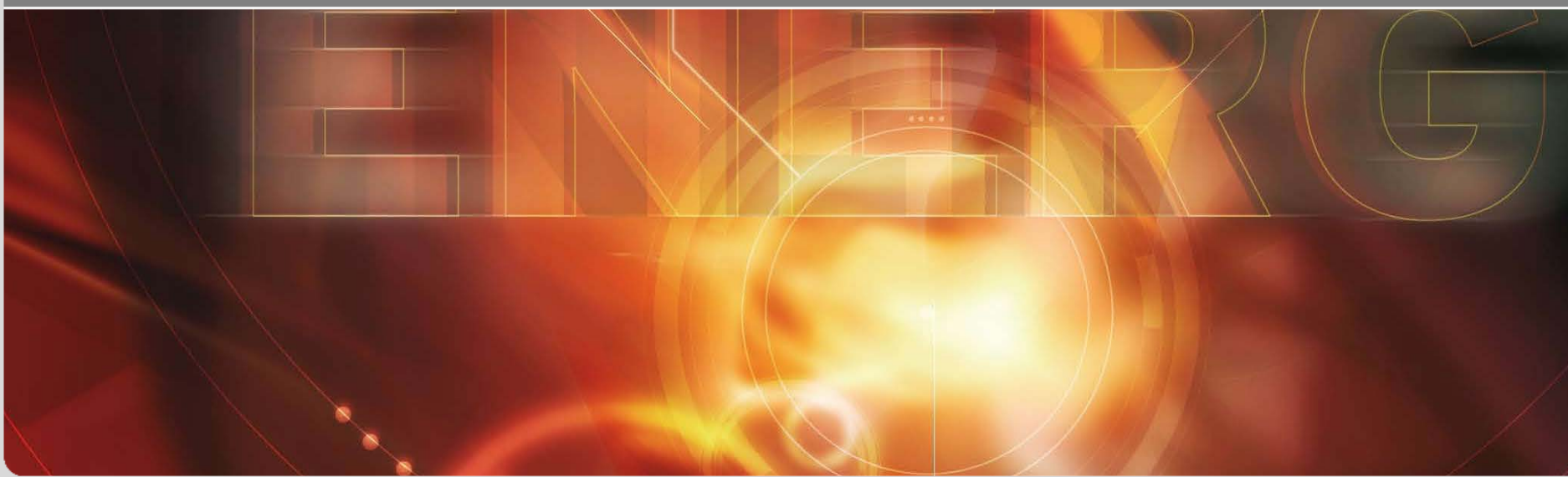


# Bewertung des Einsatzes supraleitender 380 kV Kabel

**Bundesnetzagentur Wissenschaftsdialog: Netzausbau im Fokus der Forschung**  
**10.-11.10.2019, Bonn**

Mathias Noe, Institut für Technische Physik, Karlsruher Institut für Technologie

KIT-CENTRE ENERGY



## Ko-Autoren

- Dustin Kottonau, Eugen Shabagin, Wescley de Sousa, Jörn Geisbüsch, KIT
- Hanno Stagge, S. Fechner, H. Woiton, T. Küsters, TenneT TSO GmbH:

**Gefördert durch das  
Kopernikus-Projekt „Neue Netzstrukturen“:  
Neue EnergieNetzStruktURen für die  
Energiewende (ENSURE)**

<https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/neue-netzstrukturen>

**KOPERNIKUS**  
**>>PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Gliederung

- Motivation
- Konzeptionelles Design des supraleitenden 380 kV Kabels
- Betriebseigenschaften
- Wirtschaftlichkeit
- Stand der Entwicklung supraleitender Kabel
- Zusammenfassung

## ■ Legung

- Geringerer Flächen- und Trassenbedarf (Innenstädte, Teilerdverkabelung)
- Geringerer Aufwand bei der Kabellegung

## ■ Umwelt und Marketing

- Keine elektromagnetischen Streufelder und Bodenerwärmung
- Hohe Energie- und Ressourceneffizienz

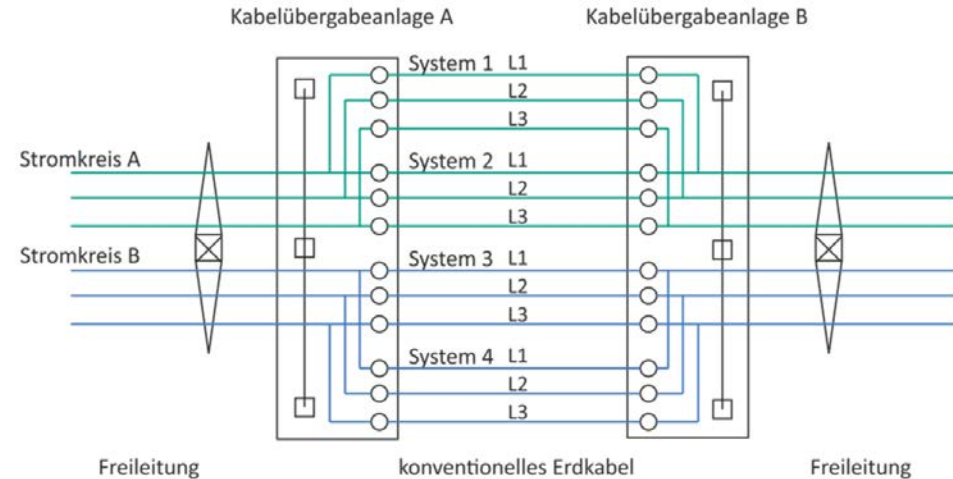
## ■ Betrieb

- Höhere Übertragungsleistung
- bei niedrigerer Spannungsebene (Substitution von Hochspannung)
- bei gleichem Außendurchmesser (Wegerecht bei Retrofit)
- Niedrigere Impedanz
- Niedrigere Spannungsüberhöhung im Leerlauf
- Niedrigerer Spannungsfall
- Betrieb mit natürlicher Leistung möglich

# Schema HTS Anlage

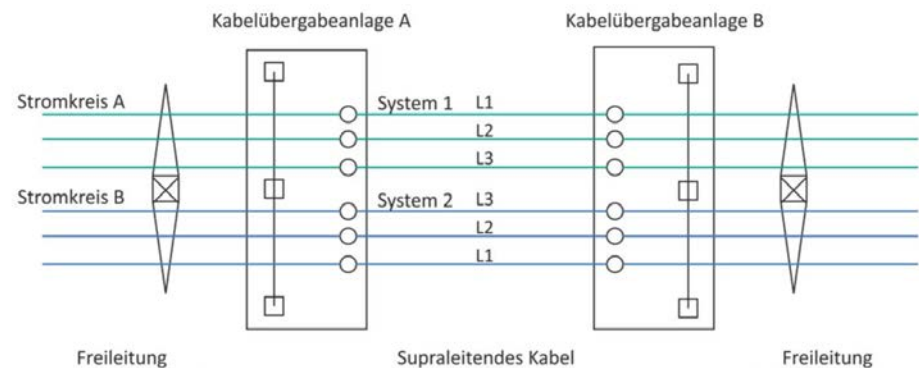
- Konventionelle Kabel
  - Pro Phase zwei parallele Kabel erforderlich
  - Insgesamt 12 Kabel

Teilerdkabelung durch konventionelle Erdkabel mit 4 Systemen



- HTS-Kabel
  - Pro Phase ein Kabel erforderlich
  - Insgesamt 6 Kabel

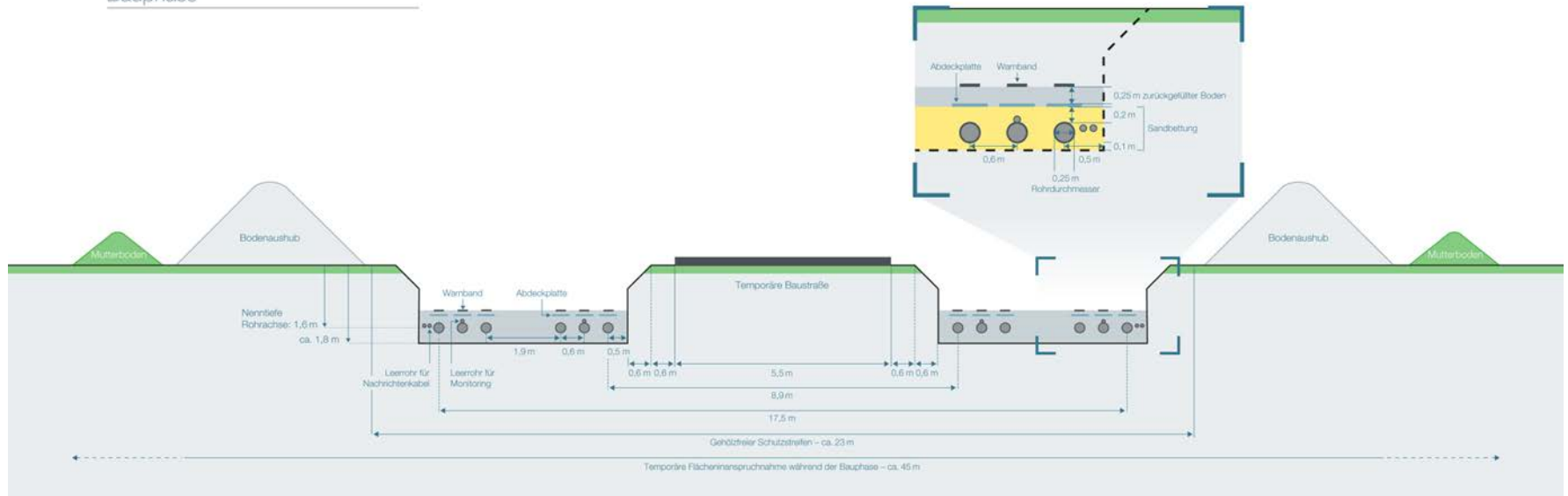
Teilerdkabelung durch supraleitende Kabel mit 2 Systemen



# Vorgaben Graben konventionelle Kabel

- Minimalvorgabe nach thermischer Auslegung
- Je Stromkreis sind zwei Kabel pro Phase erforderlich => 12 Kabel
- Einzelkabelabstand 0,6 m bei Tiefe 1,6 m
- Gesamtbreite Schutzstreifen 23 m
- Sandbettung im direkten Kabelumfeld
- Temporär für die Bauphase doppelte Breite für Lagerung Aushub

Bauphase



# Kabelprojekte in Durchführung und Planung

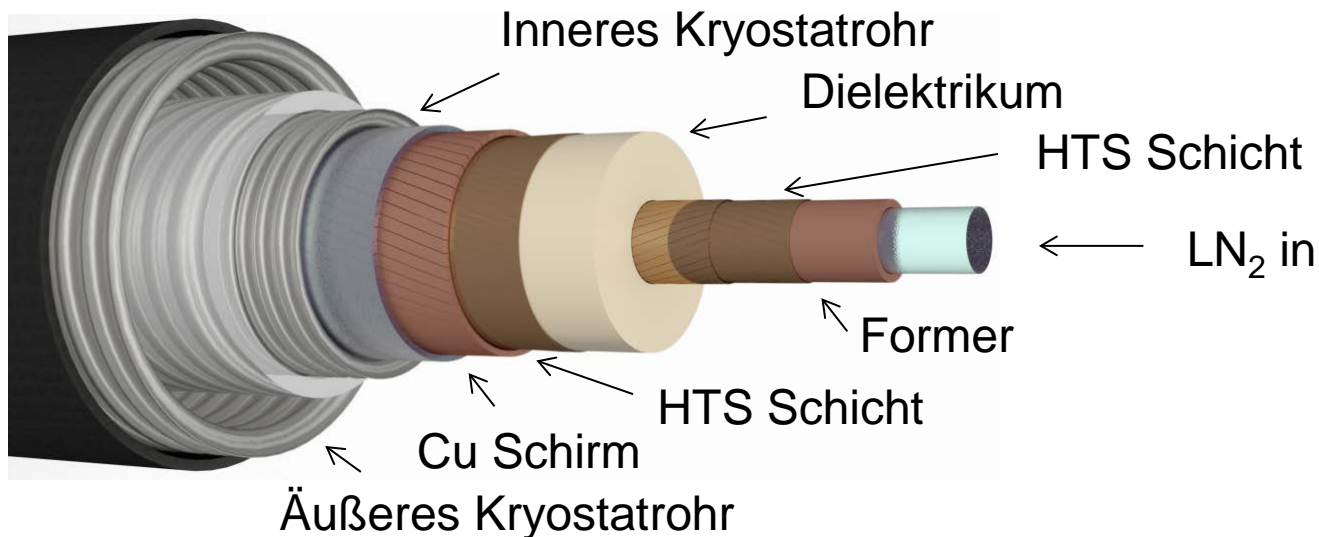


Project (AC 380 kV underground cable)	Commis- sioning (GDP) Year	Route length km	Cable cores No.	Cable sections (plan) km
A120 Wahle - Mecklar	Q3 2021	153,3	12	21,7
A210 Emden/Ost – Conneforde	Q4 2021	63	24	16
A220 Wilhelmshaven – Conneforde	Q4 2020	34,2	12	9,2
A240 Conneforde- Cloppenburg-Merzen	Q4 2023	90	12	27
A250 Stade – Landesbergen Section 2-4	Q4 2023	160	12	23
A250 Bereich Stade Section 1			24	0
A260 Dörpen/West – Niederrhein	Q2 2019	31,3	12	3,1
A280 Ganderkesee - Wehrendorf	Q2 2021	60,7	12	12,5
A310 Ostküstenleitung	Q2 2022	120	12	12
<b>Sum (km) of AC 380 kV cable required</b>	<b>2019 - 2023</b>			<b>1.686</b>

# Ausgangsparameter

- Zur Auslegung eines supraleitenden Kabels sind lediglich die folgenden Parameter erforderlich

Bemessungsspannung	380 kV
Bemessungsstrom	3600 A
Überströme $I_K$	63 kA, 300 ms
Lastfaktor	0.7
Länge	3,2 km





# Jahresverlustenergievergleich

Variante/ Jahresverlustenergie	Jahresverlust- energie $m_a = 0,3$ MWh	Jahresverlust- energie $m_a = 0,5$ MWh	Jahresverlust- energie $m_a = 0,7$ MWh
<b>Konventionelles Erdkabel</b>			
- Wirkverluste	1894	4455	7320
- Dielektrische Verluste	1189	1189	1189
<b>Jahresverlustenergie – Gesamt</b>	<b>3082</b>	<b>5643</b>	<b>8509</b>
<b>Supraleiterkabel</b>			
- Wechselstromverluste	103	321	701
- Stromzuführung thermisch	100	100	100
- Stromzuführung elektrisch	29	68	112
- Leitungskryostat	2670	2670	2670
- Endverschlusskryostaten	33	33	33
- Dielektrische Verluste	828	828	828
<b>Jahresverlustenergie Gesamt</b>	<b>3763</b>	<b>4020</b>	<b>4444</b>

# 380 kV Kabelauslegung

## ■ Geometrieparameter



Parameter	Wert
Träger (i)	50,0 mm
Träger (a)	54,0 mm
Hohlleiter (a)	57,4 mm
Bandleiterschicht(a)	57,8 mm
Anzahl der Bandleiter	44 Stk.
Elektrische Isolation(a)	106,3 mm
Schirmschicht(a)	106,7 mm
Anzahl der Schirmleiter	81 Stk.
Neutralleiter(a)	110,7 mm
Inneres Kryostatrohr(i)	125,0 mm
Inneres Kryostatrohr(a)	130,2 mm
Äußeres Kryostatrohr(i)	150,0 mm
Äußeres Kryostatrohr(a)	162,0 mm
Mantel(a)	172,8 mm

# 380 kV Kabel Betriebsparameter



Parameter	Wert
Bemessungsstrom pro System	3600 A
Bemessungsspannung	420 kV
Kurzschlussdaten	63 kA für 300 ms
Trassenlänge	3200 m
Kabelkonzept	Einleiter mit 2 Systemen (mit Cu-stabilisierung)
Kühlkonzept:	einseitiges Kühlkonzept
Max. Druckverlust	6,3 bar
Max. Temperatur bei Bemessungsstrom	77,2 K
Max. Temperatur im Kurzschlussfall	100,2 K
Pumpenleistung	1,0 kW
Massenstrom	0,9 kg/s
Kapazitätsbelag	158,8 nF/km
Induktivitätsbelag	0,129 mH/km
Ladeleistung (pro System)	23 MVar
Gesamtverluste bei Bemessungsstrom	644,5 kW bei Umgebungstemp.
HTS Bandleiterbedarf pro Trassenkilometer	388,3 km pro System
HTS Bandleiterbedarf für 3,2 km	1242,6 km pro System

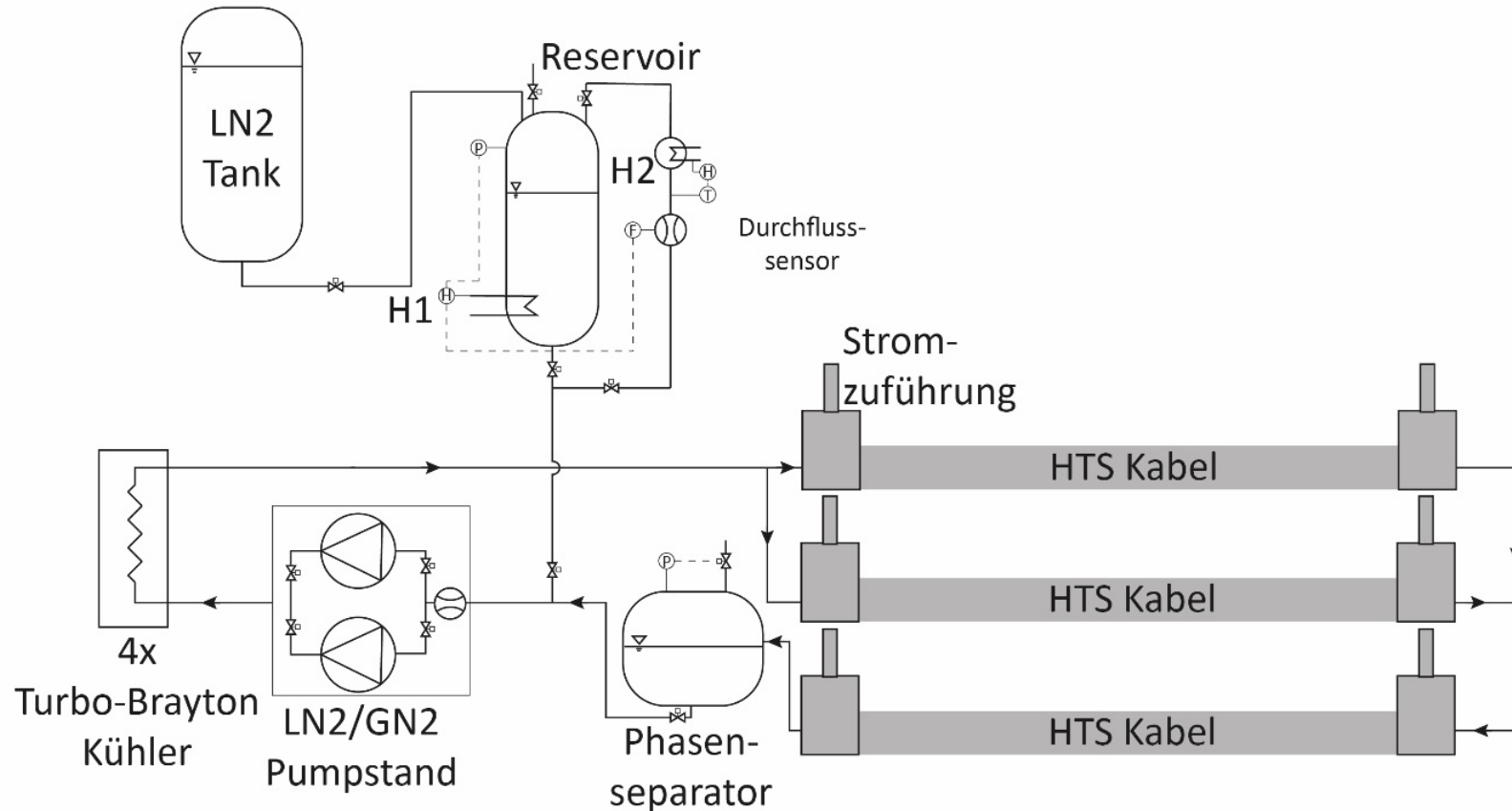
# 380 kV Betriebsparameter

## ■ Leitungsbeläge im Vergleich

		Frei- leitung	Erdkabel	Supraleiter- kabel	Gasisolierte Leitung
Induktivitäts- belag $L'$	(mH/km)	0,80	0,48	0,13	0,2
Kapazitätsbelag $C'$	(nF/km)	13	230	158	55-70
Widerstands- belag $R'$	(m $\Omega$ /km)	36	7,2	>1	

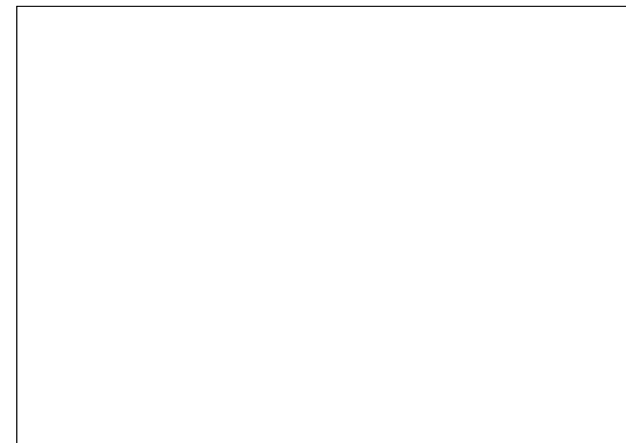
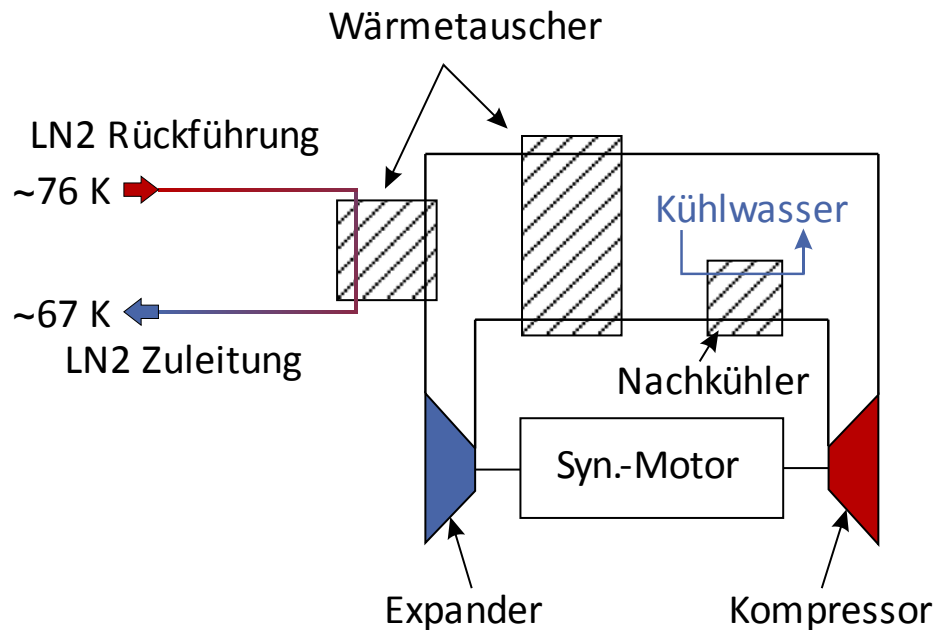
# Kühlung

## ■ Schema des Kältekreislaufes



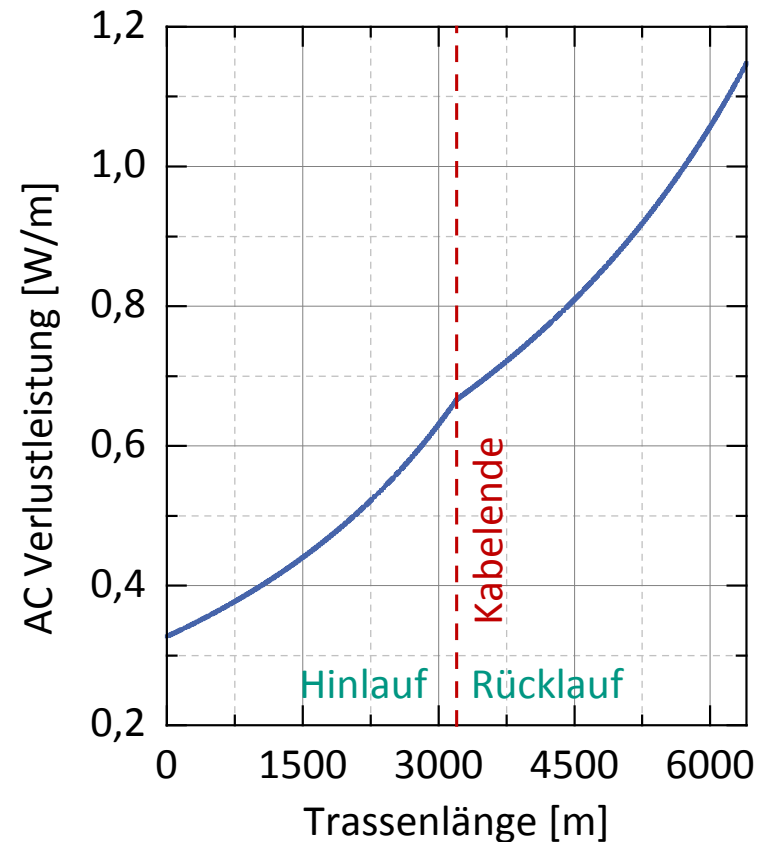
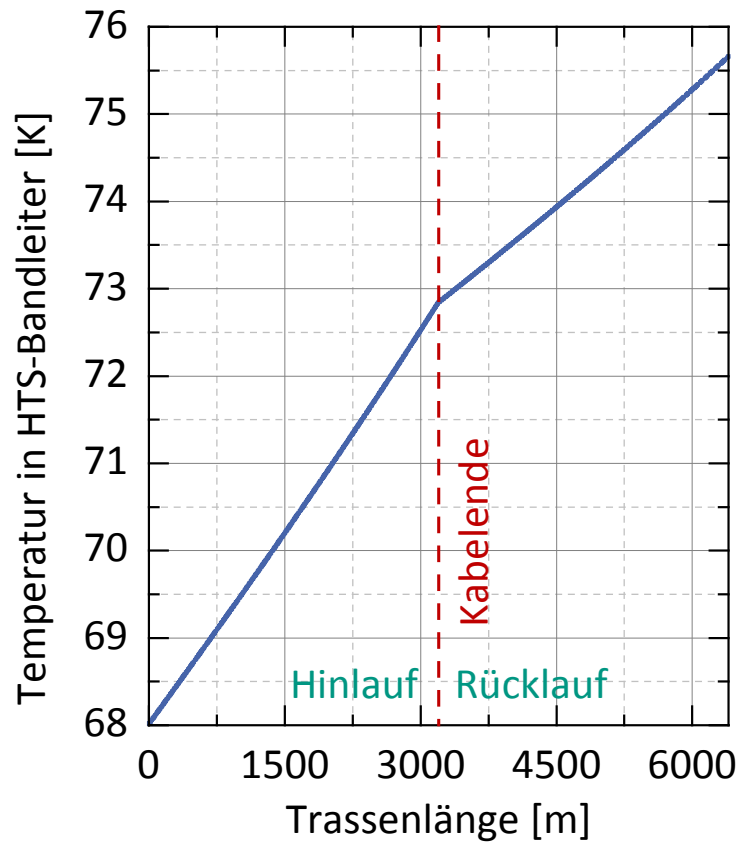
# Kühlung

- Kälteanlage ist als Industrieanlage erhältlich



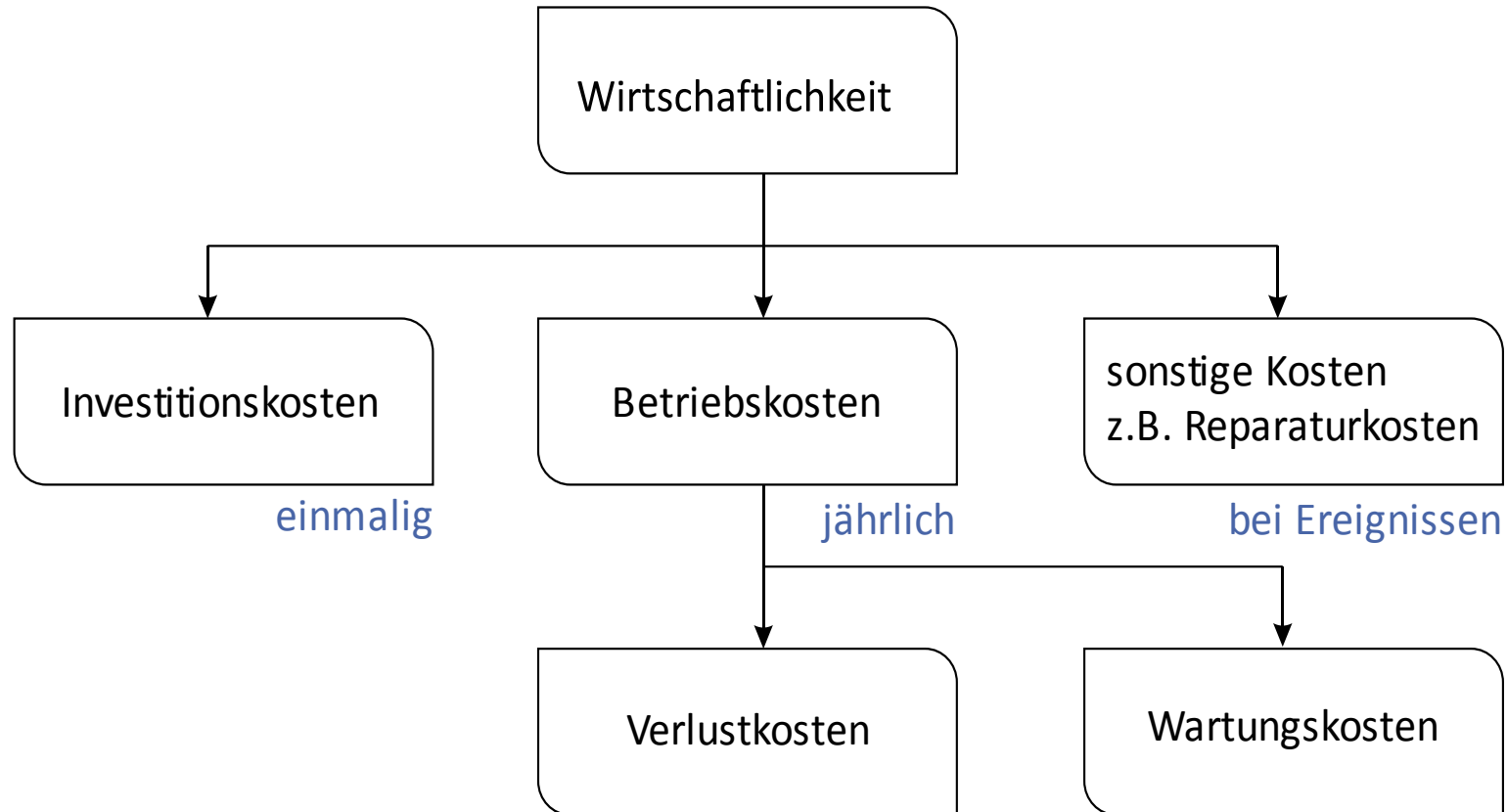
Typ: TBF-175 (Air Liquide)  
Abmessung: 9,5 m x 1,7 m x 3 m  
Gewicht: 15 t

## ■ Temperaturverlauf im Kabel und temperaturabhängige Verluste



# Wirtschaftlichkeit

- Barwertmethode mit folgenden Kostenanteilen

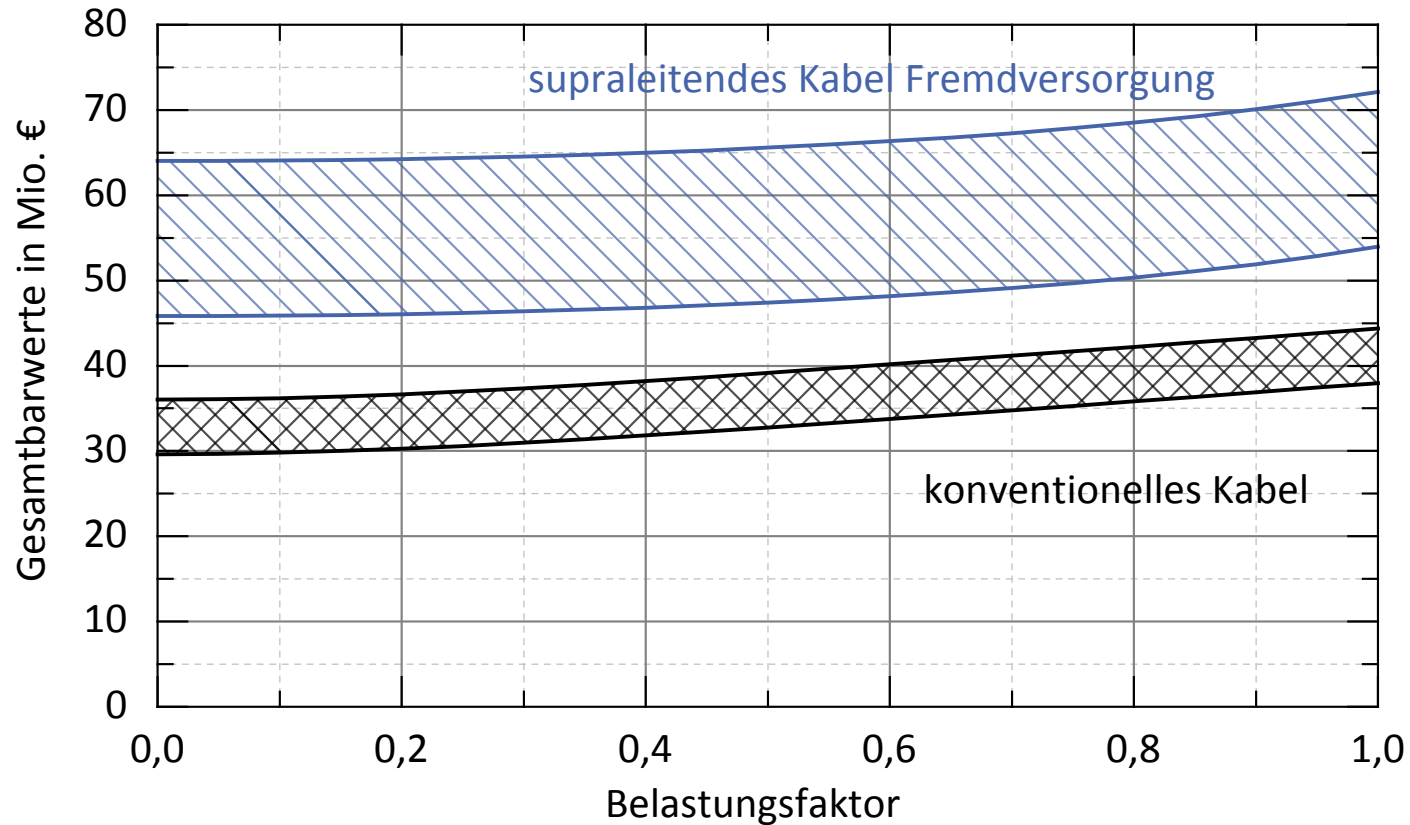




# Kostenanteile HTS Kabel

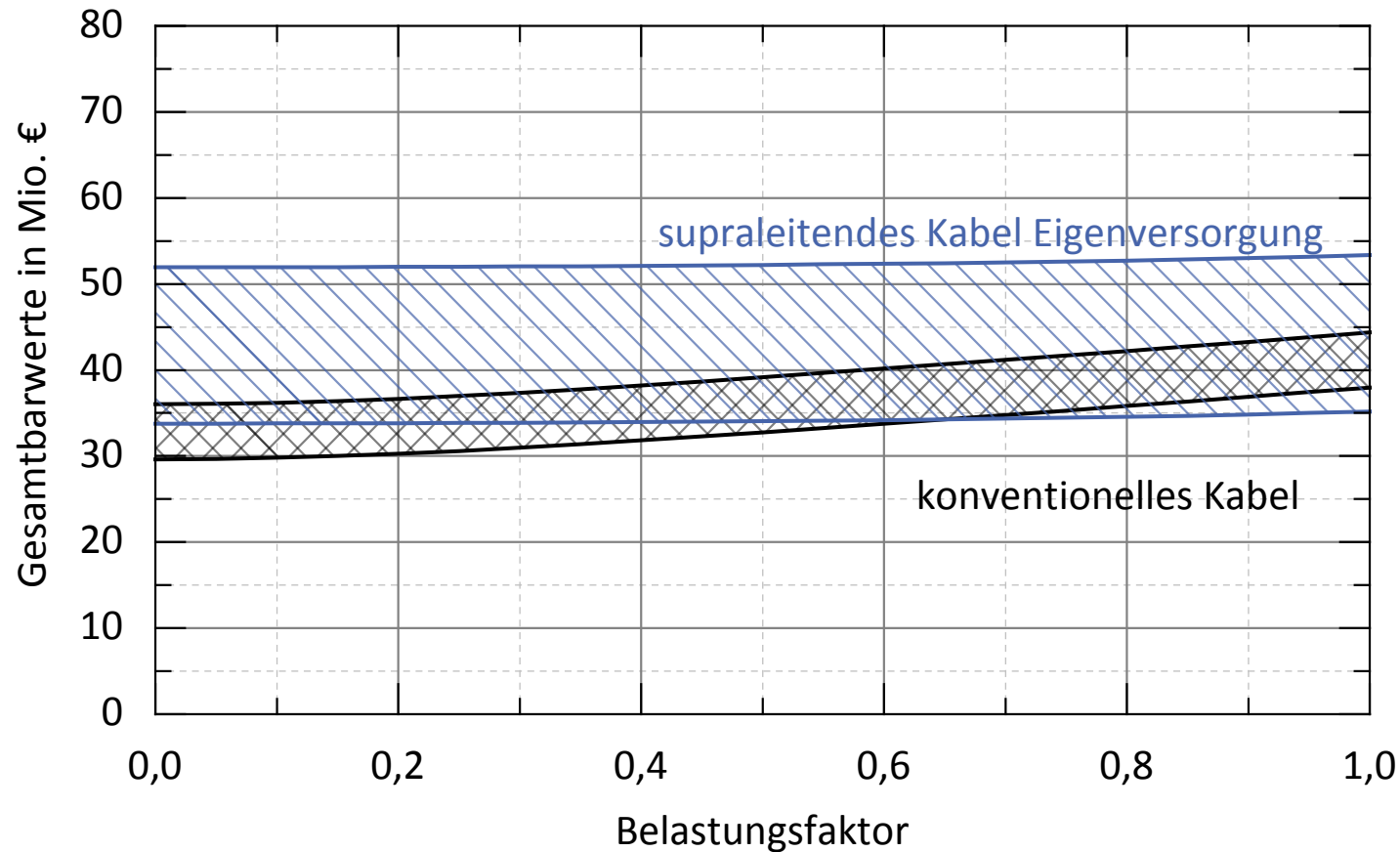
Betriebsmittel	niedrige Kosten / T€	hohe Kosten / T€
<i>Supraleitendes Kabel</i>	20.690	34.520
- Materialkosten HTS	9.320	18.640
- Isolationsmaterial Tyvek™	815	1.548
- Leitungskryostat mit Schweißkupplung	8.674	9.830
- Arbeitskosten für Herstellung	1.881	4.503
<i>Kälteanlage</i>	4.400	5.750
- Kryokühler	4.000	5.000
- Kälteanlagezubehör	400	750
<i>Garnituren</i>	3.100	4.650
- Endverschluss	1.200	1.800
- Muffen	1.900	2.850
<i>Tiefbau</i>	3.040	4.480
- Kabelgraben	1.120	1.600
- Kabelkanal	1.600	2.400
- Kabellegung	320	480
<b>Gesamtsystemkosten</b>	<b>31.230</b>	<b>49.400</b>

## ■ Gesamtbarwert bei Fremdstromversorgung



# Wirtschaftlichkeit

## ■ Gesamtbarwert bei Eigenstromversorgung



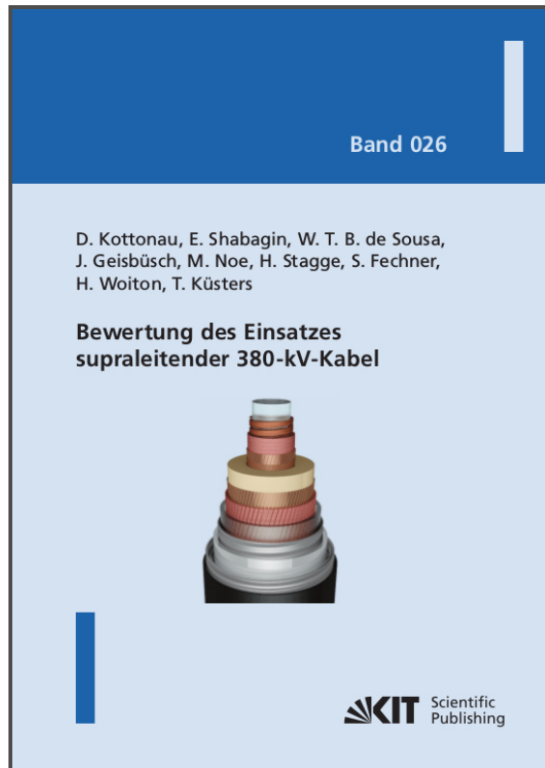
# Zusammenfassung

- Ein 3,2 km langes supraleitendes 380-kV-Kabel mit einer Auslegungsstromstärke von 3,6 kA wurde unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten mit konventionellen Erdkabeln verglichen.
- Die elektrotechnischen Leitungsparameter einer supraleitenden Kabelanlage sind denen einer Freileitung ähnlicher als die einer herkömmlichen Kabelanlage, was Vorteile für Netztechnik und Betriebsführung bietet.
- Der Vergleich der Verluste einer supraleitenden 380 kV Kabelanlage mit denen einer herkömmlichen Kabelanlage zeigt eine hohe Abhängigkeit von der Auslastung.
- Wegen der aktiven Kühlung des supraleitenden Kabels ist der Aufwand für die Instandhaltung höher.
- Eine supraleitende 380 kV Kabelanlage kann bereits heute wirtschaftlich sein.

# Eine pdf-Kopie der Studie ist erhältlich unter



■ <https://www.ksp.kit.edu/9783731509271>



1

EXEMPLAR(E) IN DEN WARENKORB



DUSTIN KOTTONAU, EUGEN SHABAGIN, WESCLEY TIAGO BATISTA DE SOUSA, JÖRN GEISBÜSCH, MATHIAS NOE, HANNO STAGGE, SIMON FECHNER, HANNES WOITON, THOMAS KÜSTERS

Bewertung des Einsatzes supraleitender 380-kV-Kabel  
(Karlsruher Schriftenreihe zur Supraleitung ; 26)

Autor Kottonau, Dustin ; Shabagin, Eugen ;  
Batista de Sousa, Wescley Tiago ;  
Geisbüsch, Jörn ; Noe, Mathias ; Stagge,  
Hanno ; Fechner, Simon ; Woiton,  
Hannes ; Küsters, Thomas

Verlag KIT Scientific Publishing, Karlsruhe

ISBN 9783731509271

Umfang III, 121 S.

Veröffentlicht  
am: 22.08.2019

Erscheinungs-  
jahr 2019

Verfügbarkeit 04

*Demnächst auch in Englisch*

# Stand der Entwicklung supraleitender 380 kV Kabel

## ■ Feldtesterfahrung mit supraleitenden Kabeln

Hersteller/Nutzer	Ort, Land, Jahr	Daten	HTS
LS Cable	Korea, 2021	20 kV, 2.5 kA, 2500 m	YBCO
SECRI	Shanghai, China , 2020	35 kV, 2 kA, 1200 m	YBCO
Southern Grid	Shenzen, China, 2020	12 kV, 2 kA, 500 m	YBCO
LS Cable	Korea, 2020	154 kV, 400 MVA, 1.6 km	YBCO
LS Cable	Seoul, Korea, 2018	22.9 kV, 1000 m	YBCO
Nexans	Essen, Deutschland, 2014	10 kV, 2.4 kA, 1000 m	BSCCO
Sumitomo	Yokohama, Japan, 2013	66 kV, 1.8 kA, 240 m	BSCCO
LS Cable	Icheon, Korea, 2011	22.9 kV, 3.0 kA, 100 m	BSCCO
LS Cable	Icheon, Korea, 2009	22.9 kV, 1.3 kA, 500 m	BSCCO
Nexans	Long Island, US, 2008	138 kV, 2.4 kA, 600 m	BSCCO/YBCO
LS Cable	Gochang, Korea, 2007	22.9 kV, 1.26 kA, 100 m	BSCCO
Sumitomo	Albany, US, 2006	34.5 kV, 800 A, 350 m	BSCCO
Ultera	Columbus, US, 2006	13.2 kV, 3 kA, 200 m	BSCCO
Sumitomo	Gochang, Korea, 2006	22.9 kV, 1.25 kA, 100 m	BSCCO
Furukawa	Yokosuka, Japan, 2004	77 kV, 1 kA, 500 m	BSCCO

# Stand der Entwicklung supraleitender 380 kV Kabel

## ■ Feldtesterfahrung mit supraleitenden Kabeln

Hersteller/Nutzer	Ort, Land, Jahr	Daten	HTS
LS Cable	Korea, 2021	20 kV, 2.5 kA, 2500 m	YBCO
SECRI	Shanghai, China , 2020	35 kV, 2 kA, 1200 m	YBCO
Southern Grid	Shenzen, China, 2020	12 kV, 2 kA, 500 m	YBCO
LS Cable	Korea, 2020	154 kV, 400 MVA, 1.6 km	YBCO
LS Cable	<b>Mehr als 5 Jahre Betriebserfahrung ohne Ausfall</b>		YBCO
Nexans	Essen, Deutschland, 2014	10 kV, 2.4 kA, 1000 m	BSCCO
Sumitomo	Yokohama, Japan, 2013	66 kV, 1.8 kA, 240 m	BSCCO
LS Cable	Icheon, Korea, 2011	22.9 kV, 3.0 kA, 100 m	BSCCO
LS Cable	Icheon, Korea, 2009	22.9 kV, 1.3 kA, 500 m	BSCCO
Nexans	Long Island, US, 2008	138 kV, 2.4 kA, 600 m	BSCCO/YBCO
LS Cable	Gochang, Korea, 2007	22.9 kV, 1.26 kA, 100 m	BSCCO
Sumitomo	Albany, US, 2006	34.5 kV, 800 A, 350 m	BSCCO
Ultera	Columbus, US, 2006	13.2 kV, 3 kA, 200 m	BSCCO
Sumitomo	Gochang, Korea, 2006	22.9 kV, 1.25 kA, 100 m	BSCCO
Furukawa	Yokosuka, Japan, 2004	77 kV, 1 kA, 500 m	BSCCO

# Supraleitende Hochspannungskabel in Deutschland



- SWM SuperLink Kabel in München
- Antrag zur Entwicklung eines 110 kV, 500 MVA Kabels eingereicht



**Stadtwerke München** Netzbetreiber 400 V – 400 kV  
Städtische Infrastruktur



**NKT Cables Group** HTS - Kabelhersteller  
Hoch- und Höchstspannungskabel



**Linde Group** Technische Gase  
Kryotechnik & Kryoplanlagenbau



**THEVA** HTS – Bandleiterhersteller



**FH SWF, Soest** Hochspannungstechnik  
Kabelprüftechnik, Simulation



**Karlsruhe Institut of Technology** Expertise für HTS - Netztechnik

- Dies wird als die erste wirtschaftliche Anwendung angesehen, da ein 10 km langes Tunnelbauwerk für ein 380 kV Kabel vermieden werden könnte.



# Supraleitende Hochspannungskabel in Deutschland

- 380 kV Kabelsystem in Hürth, Länge 1,7 km
- Kurzstudie durchgeführt und Verluste und Eigenschaften berechnet

## SC-CD-2 380 kV

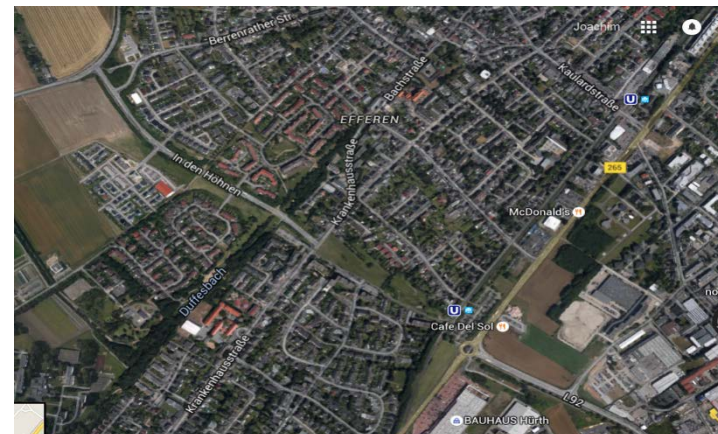
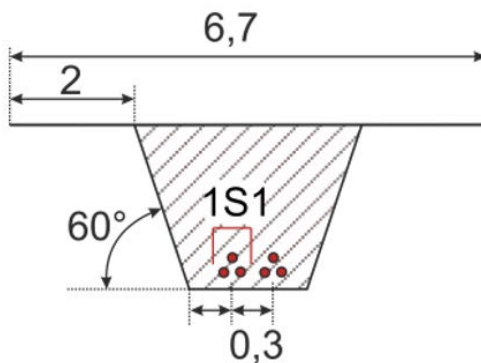
Normalbetrieb

$$I_{S1} = 5040 \text{ A}$$

(n-1) Störung im Netz

$$I_{S1} = 7200 \text{ A}$$

nicht maßstabsgetreu, Angaben in m



# Supraleitende Hochspannungskabel in Deutschland



## Nächste Schritte

- Entwicklung und Typtest eines supraleitenden 380 kV Kabels inklusive Garnituren in 2 Jahren
- Auslegung, Bau und Inbetriebnahme einer ersten 380 kV Kabelstrecke in weiteren 3 Jahren