

Wirtschaftlichkeit von HTSL Kabeln am Beispiel einer 380 kV Teilerdverkabelung

Zukunft und Innovation der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern

5.-6.03.2020, Berlin

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



Aussagen zu Supraleitenden Kabeln von EVUs

„Supraleitende Kabel sind teurer und funktionieren nicht.“

„Supraleitende Kabel: Was soll denn der Sch....?“

„Geld spielt keine Rolle wenn wir einen Bedarf haben.“

**Heute:
Fakten
Fakten
Fakten**

„Supraleiter sind zu teuer und für Übertragungsnetze keine Lösung.“

Was kosten konventionelle Hochleistungsübertragungen heute?

Wien, 4.5 km, 380 kV AC, 1.8 kA, ca. 20 Mio. € als Kabelgraben (kein Tunnelbauwerk)

→ 4,44 Mio. €/km → **3,76 Mio. €/km GW**

Suedlink, 700 km, 525 kV DC, 2 kA, 4 Systeme a 2 GW, ca. 12 Mrd. €

→ 17,1 Mio. €/km → **2,14 Mio. €/km GW**

NEP 2030 380 kV AC, 1.8 kA für Teilerdverkabelung, 4 Systeme 3 x 1 x 2500 mm², 2XS(FL)2Y in zwei Gräben inkl. Legung, Trassierung, Garnituren, Prüfungen etc.

→ 9-13,5 Mio. €/km → **1,9-2,85 Mio. €/km GW**

Raesfeld, 380 kV AC, 4 GW, 12 km, ca. 100 Mio. €

→ 8,33 Mio. €/km → **2,08 Mio. €/km GW**

München, 110 kV AC, 120 MW

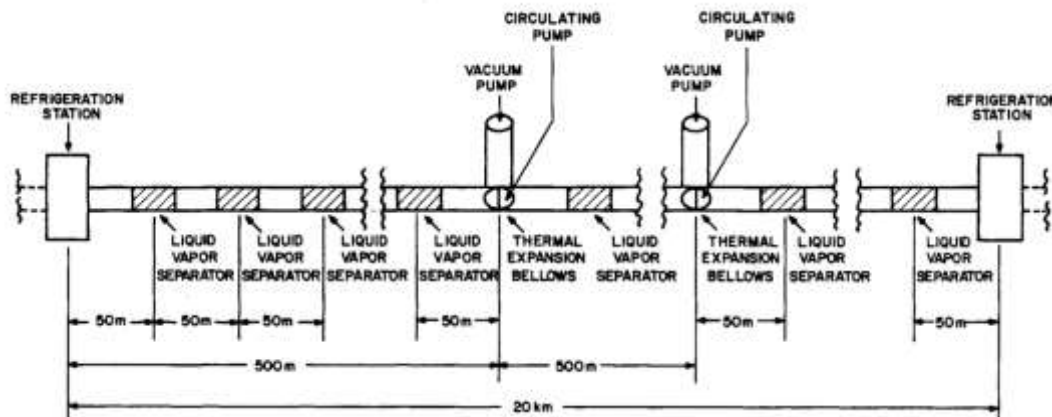
→ 2 Mio. €/km → **16,6 Mio. €/km GW** überwiegend Trasse

Sind HTS Kabel wirtschaftlich?

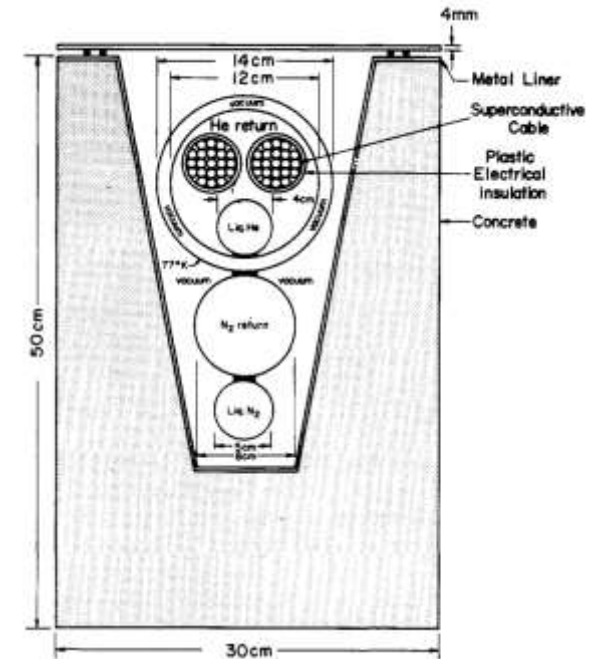
Bisherige Untersuchungen zu supraleitenden Hochleistungs AC Kabeln

■ **1967, Garwin, Matisoo, 1000 km, 100 GW**

20 km Abschnitt



Querschnitt



... every 500 m there is a propeller type booster circulation pump in the liquid helium line...

Kosten 806 Mio. USD davon 550 Mio. USD für den Supraleiter

→ 0,804 Mio. USD/km

→ **8,04 kUSD /km GW**

Quelle: R. L. Garwin, J. Matisoo, Proceedings of the IEEE, Vol. 55, Nr. 4, April 1967

Bisherige Untersuchungen zu supraleitenden Hochleistungs AC Kabeln

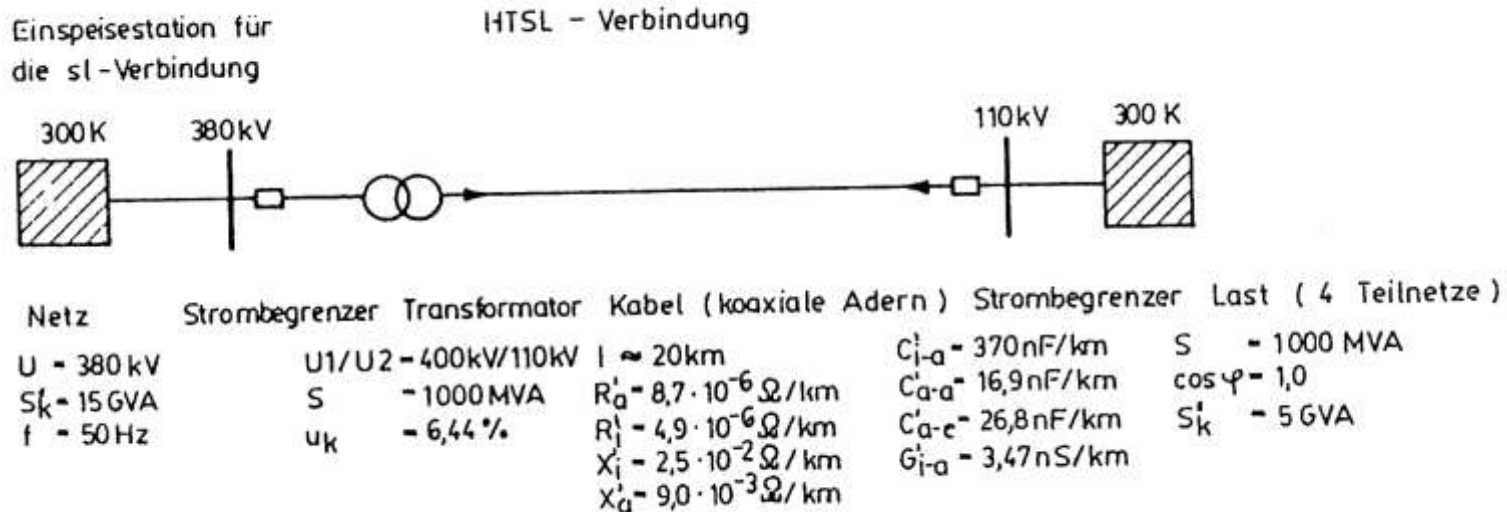
1991, G. Bogner, 1 GW

380 kV Cu Kabel

- 13,4 Mio. DM/km
- 13,4 Mio. DM/km GW

110 kV HTS Kabel

- 12,4 Mio. DM/km
- 12,4 Mio. DM/km GW



Quelle: G. Bogner, Symposium zur angewandten Supraleitung, KfK 1991, S.1-6

Bisherige Untersuchungen zu supraleitenden Hochleistungs AC Kabeln

2001, Politano et. al. : 380 kV AC, 2 Systeme je 1 GW mit 1,5 kA, 100 km von LAVORGO nach Mettlen

380 kV Freileitung

- 3 Mio. SFr/km
- **1.5 Mio. SFr/km GW**

380 kV Cu Kabel

- 10,65-13,3 Mio. SFr/km
- **5,32-6.65 Mio. SFr/km GW**

- Daraus wurden zulässige Kosten für das HTS Kabel von 2,281 Mio. SFr/km abgeleitet für ein 110 kV AC HTS System.

Quelle: D. Politano, et. al, „Technical and Economical Assessment of HTS Cables”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, MARCH 2001

Fazit der Veröffentlichungen:

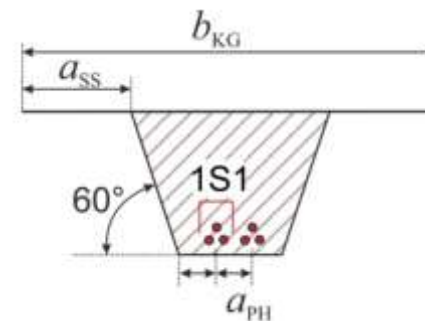
Wenig Untersuchungen, selten Annahmen, Rechenwege und Daten offengelegt.

Inhalte

- Erstmalige Vergleichsstudie einer konventionellen 380 kV Teilerdverkabelung aus dem Netzentwicklungsplan mit einem 380 kV HTS Kabelsystem



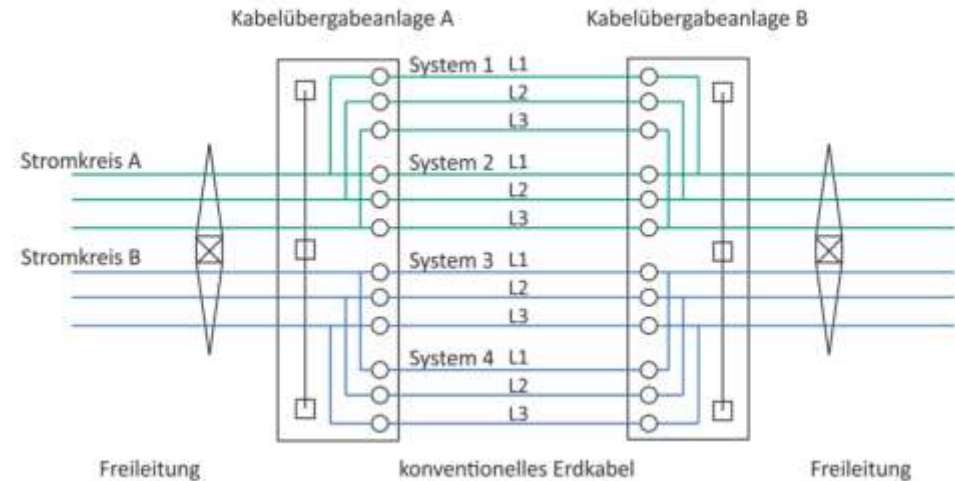
Bild: Dorstener Zeitung



Schema HTS Anlage

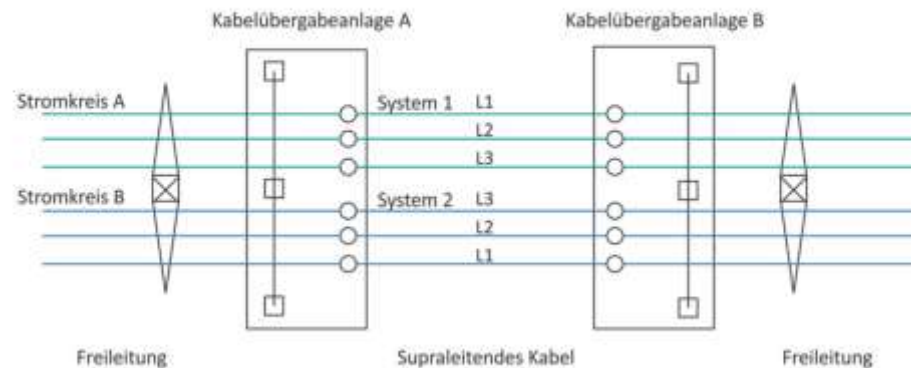
- Konventionelle Kabel
 - Pro Phase zwei parallele Kabel erforderlich
 - Insgesamt 12 Kabel

Teilerdverkabelung durch konventionelle Erdkabel mit 4 Systemen



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

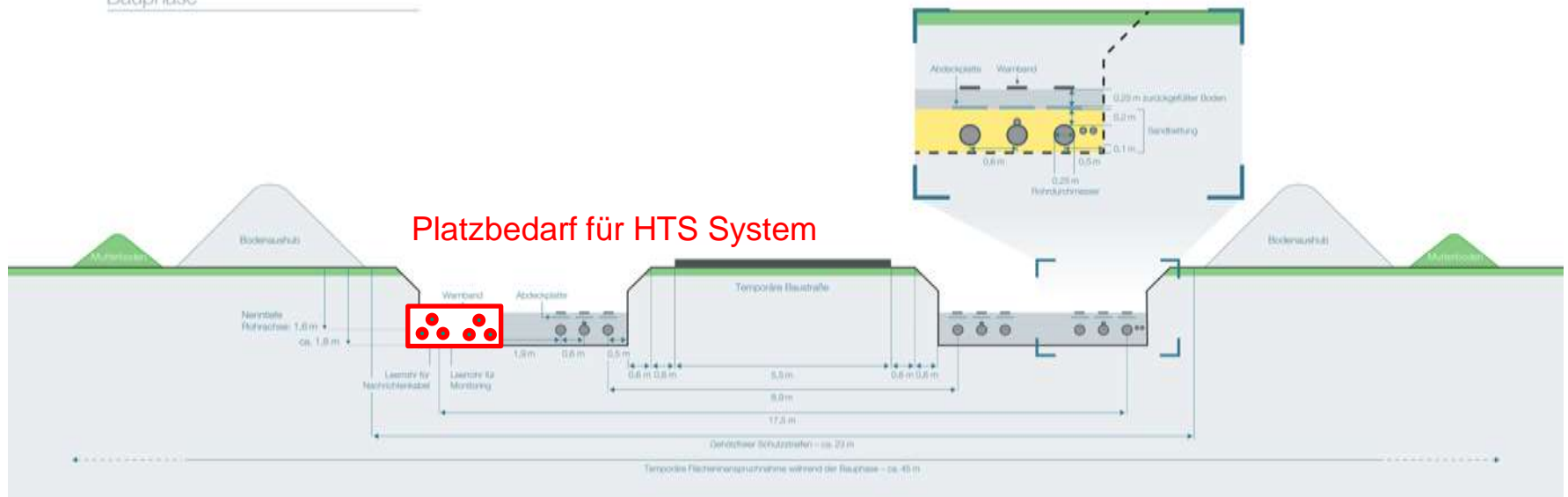
Teilerdverkabelung durch supraleitende Kabel mit 2 Systemen



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

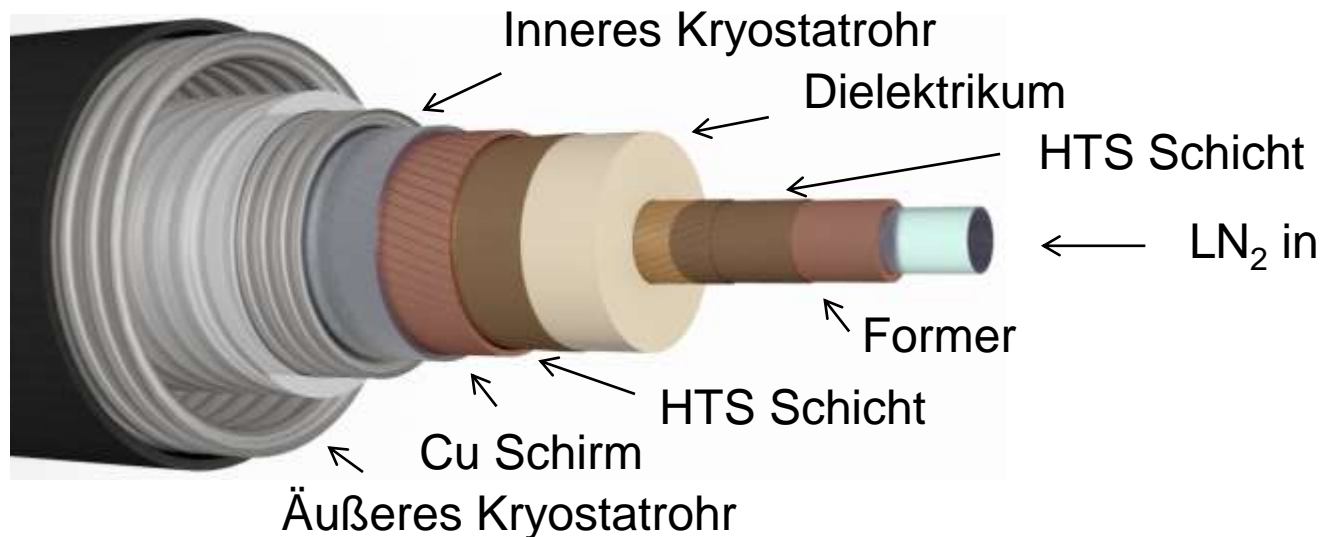


Project (AC 380 kV underground cable)	Commis- sioning (GDP) Year	Route length km	Cable cores No.	Cable sections (plan) km
A120 Wahle - Mecklar	Q3 2021	153,3	12	21,7
A210 Emden/Ost – Conneforde	Q4 2021	63	24	16
A220 Wilhelmshaven – Conneforde	Q4 2020	34,2	12	9,2
A240 Conneforde- Cloppenburg-Merzen	Q4 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
Sum (km) of AC 380 kV cable required	2019 - 2023			1.686

Ausgangsparameter

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

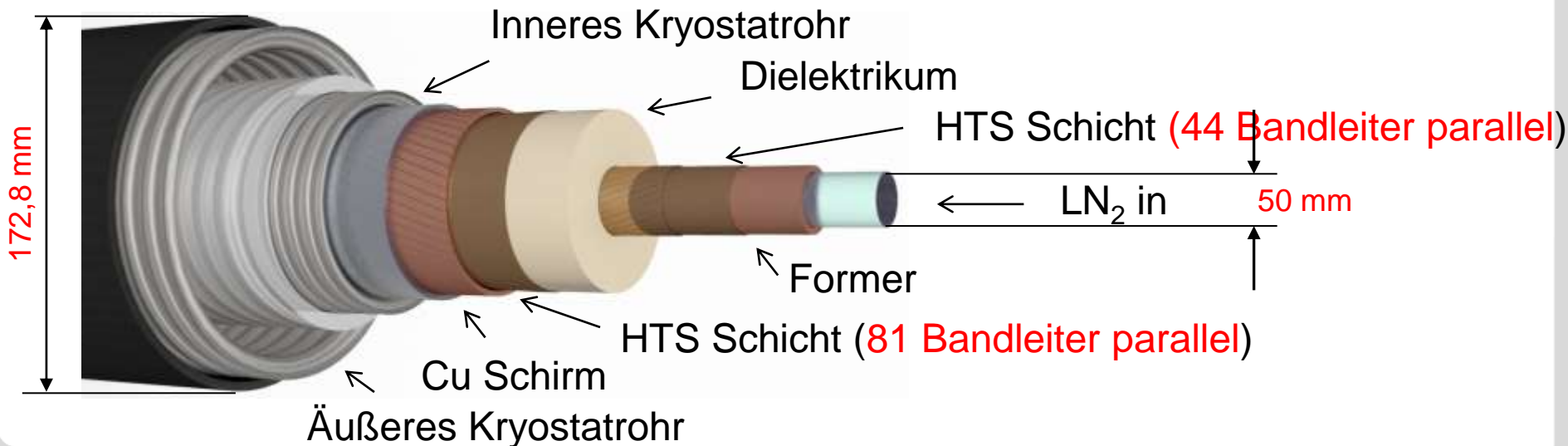
Bemessungsspannung	380 kV
Bemessungsstrom	3600 A
Überströme I_K	63 kA, 300 ms
Lastfaktor	0.7
Länge	3,2 km



Ausgangsparameter

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

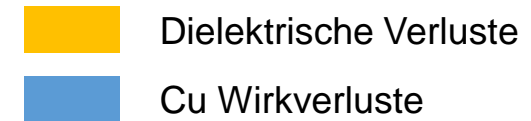
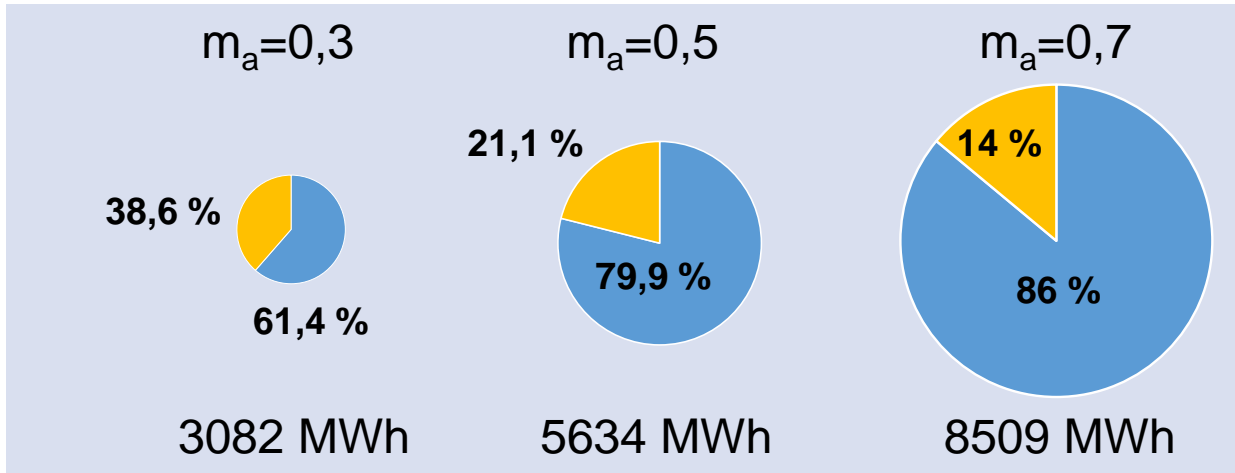
Bemessungsspannung	380 kV
Bemessungsstrom	3600 A
Überströme I_K	63 kA, 300 ms
Lastfaktor	0.7
Länge	3,2 km



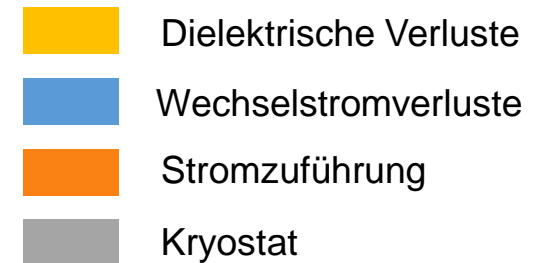
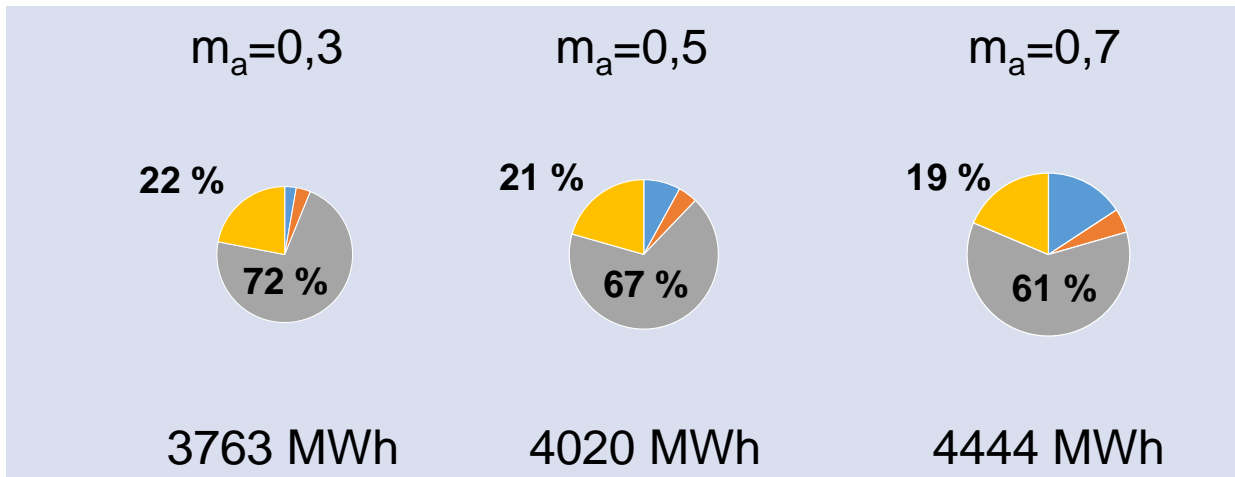
Jahresverlustenergievergleich 380 kV Kabel, 3.2 km



Kupfer 4 Systeme



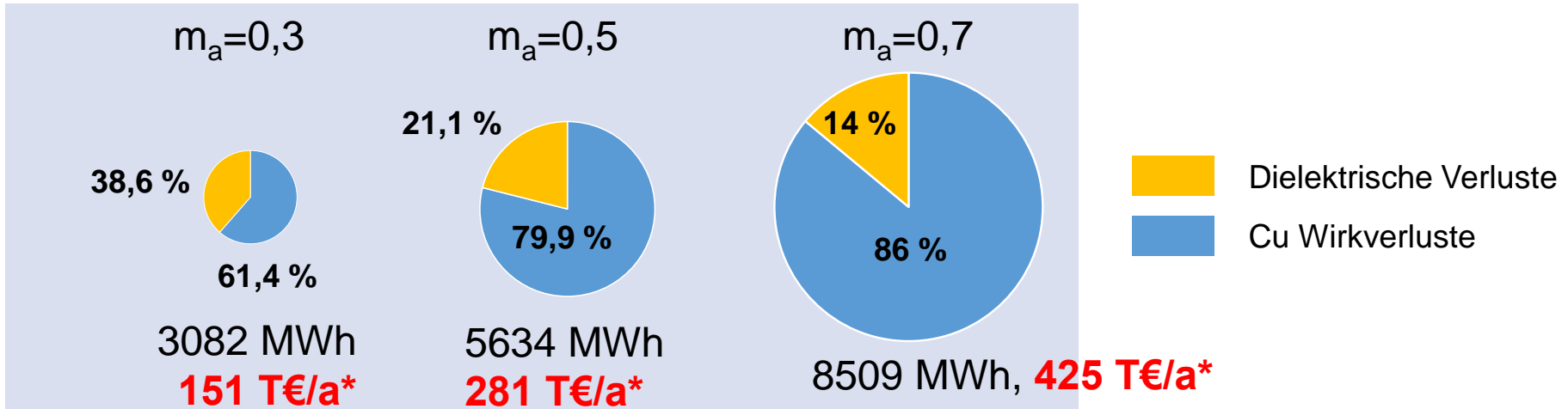
Hochtemperatur-Supraleiter 2 Systeme je 3,6 kA



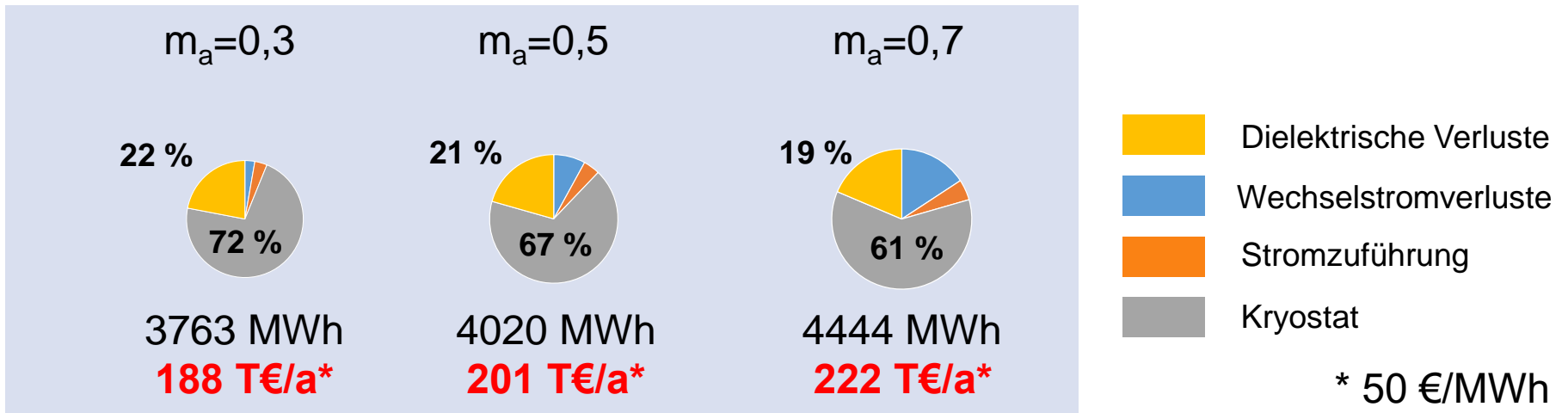
Jahresverlustenergievergleich 380 kV Kabel, 3.2 km



Kupfer 4 Systeme

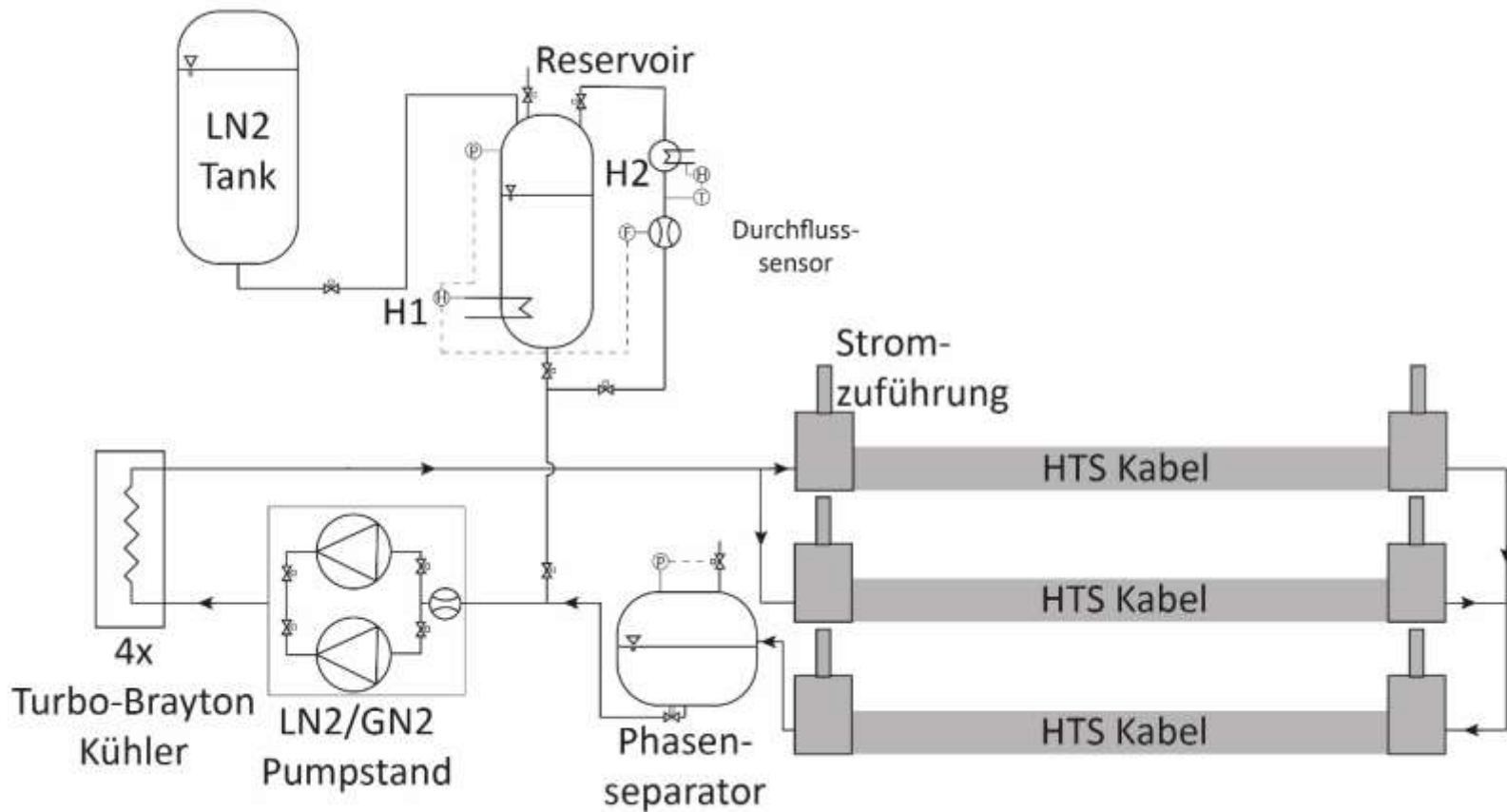


Hochtemperatur-Supraleiter 2 Systeme je 3,6 kA



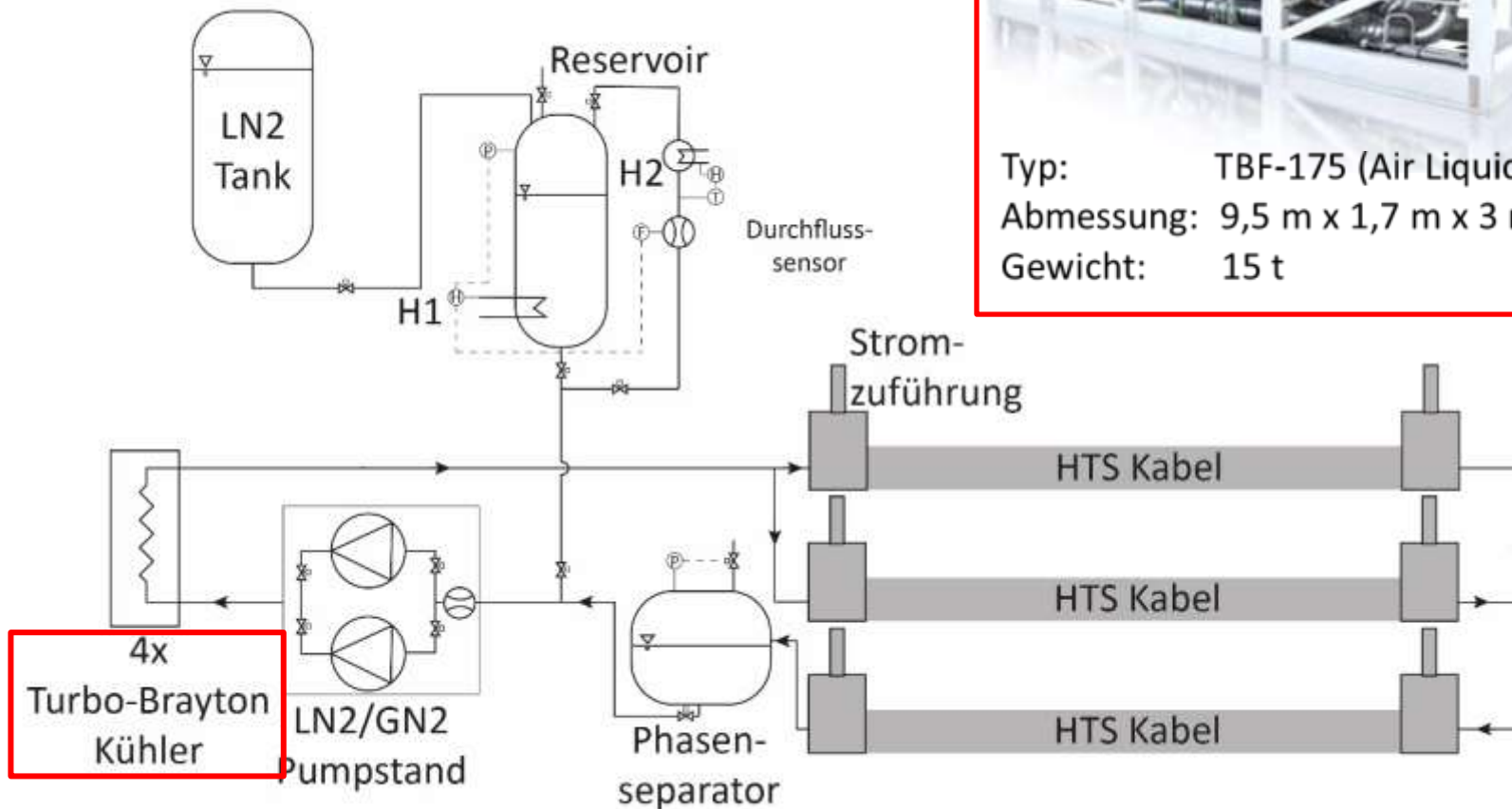
Kühlung

■ Schema des Kältekreislaufes



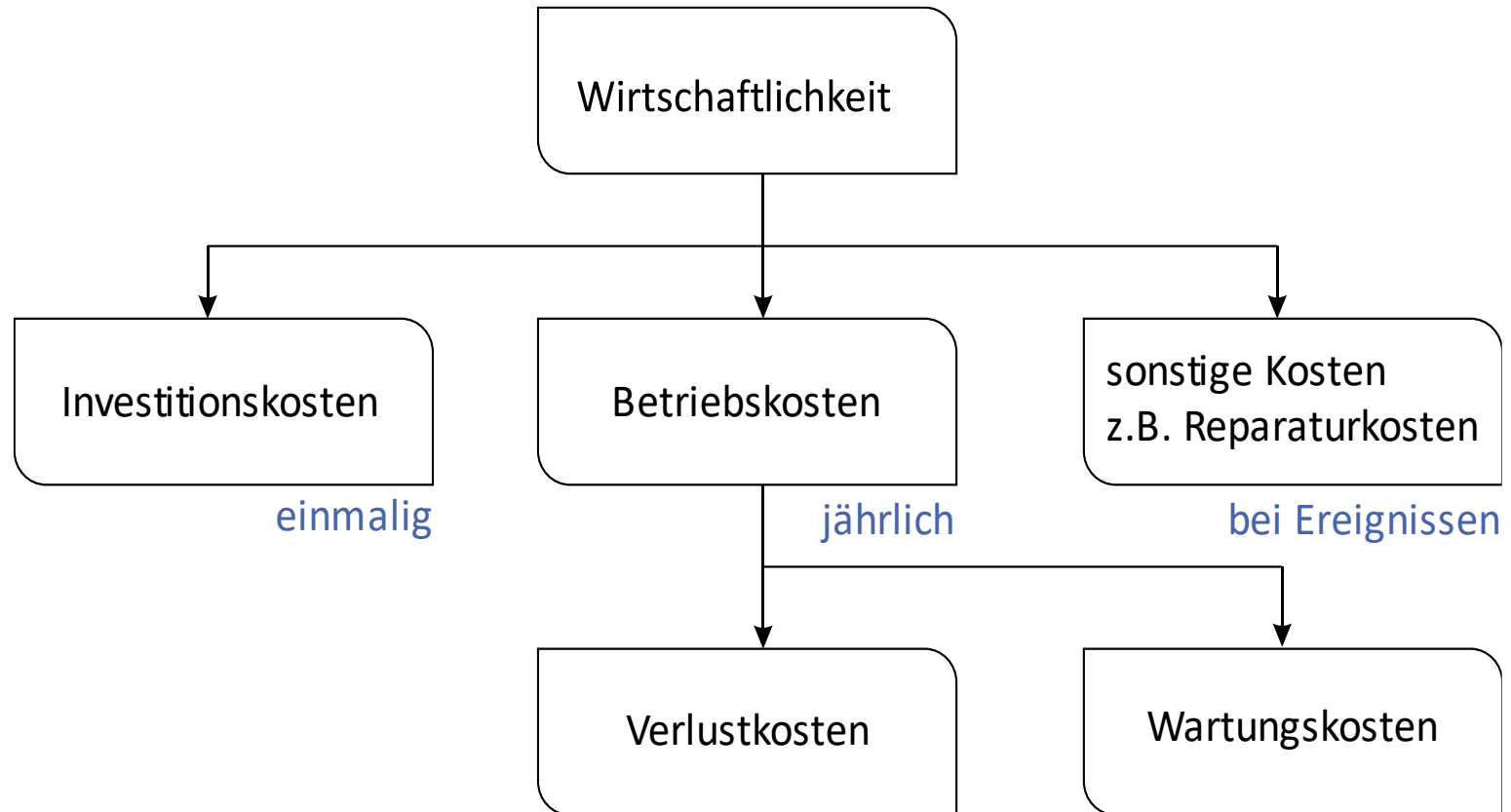
Kühlung

■ Schema des Kältekreislaufes



Wirtschaftlichkeit

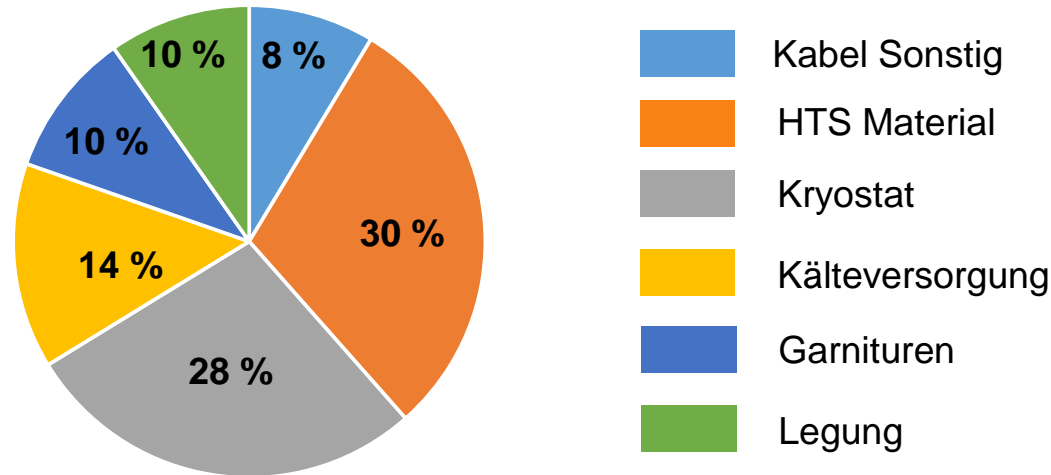
- Barwertmethode mit folgenden Kostenanteilen



Kostenanteile HTS Kabel

Betriebsmittel	niedrige Kosten / T€	hohe Kosten / T€	Annahmen
<i>Supraleitendes Kabel</i>	20.690	34.520	
- Materialkosten HTS	9.320	18.640	25-50 €/kA m
- Isolationsmaterial Tyvek™	815	1.548	20-38 €/kg
- Leitungskryostat mit Schweißkupplung	8.674	9.830	450-510 €/m
- Arbeitskosten für Herstellung	1.881	4.503	10-15 % vom Material
<i>Kälteanlage</i>	4.400	5.750	
- Kryokühler	4.000	5.000	1.0-1.3 Mio. €/Stück
- 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	350-500 T€/km
- Kabelkanal	1.600	2.400	500-750 T€/km
- Kabellegung	320	480	100-150 T€/km
Gesamtsystemkosten	31.230	49.400	

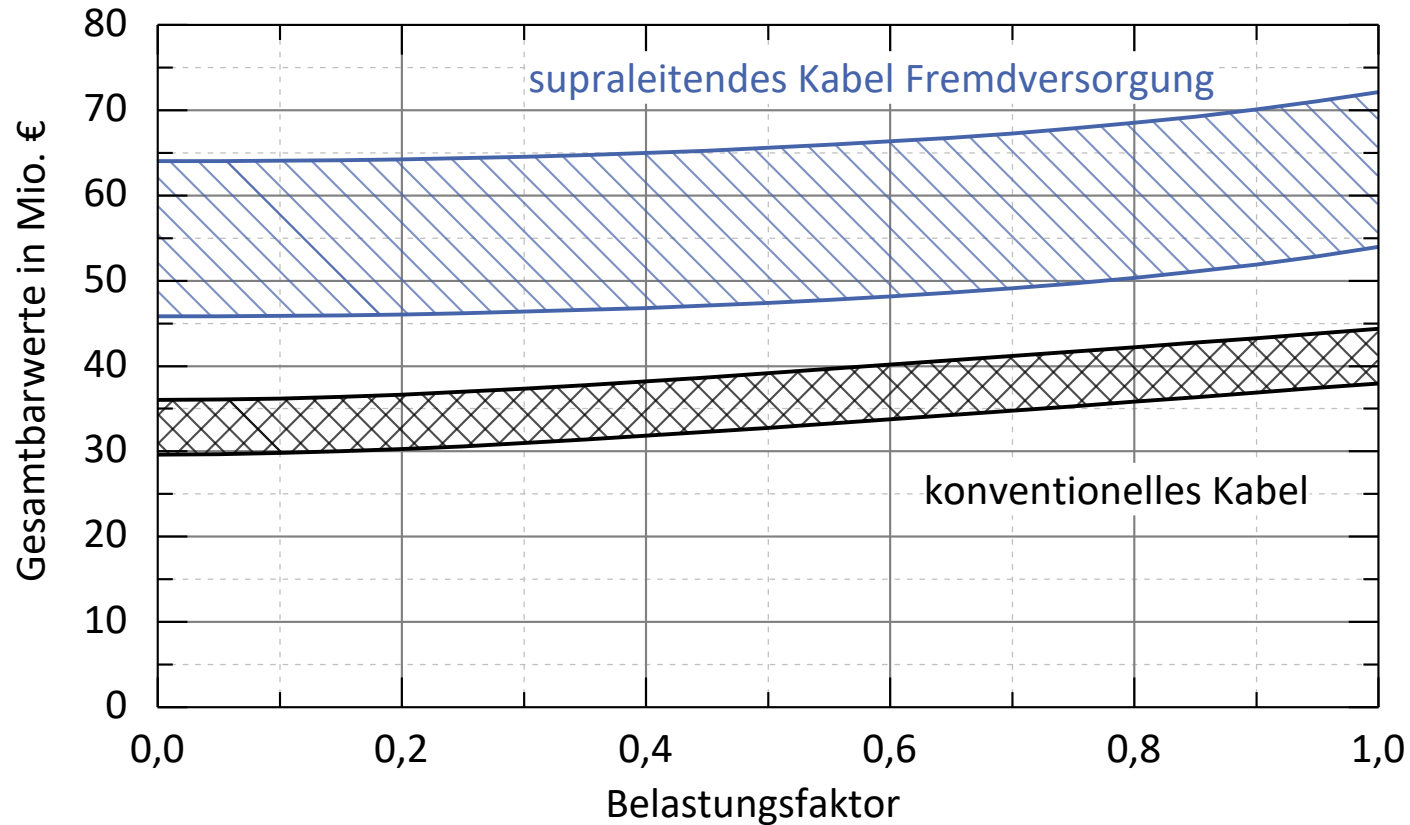
Kostenanteile HTS Kabel (niedrige Kosten)



Gesamtinvestitionskosten 380 kV HTS Kabel 2 Systeme für 3,2 km zwischen
31,2 und 49,4 Mio. €

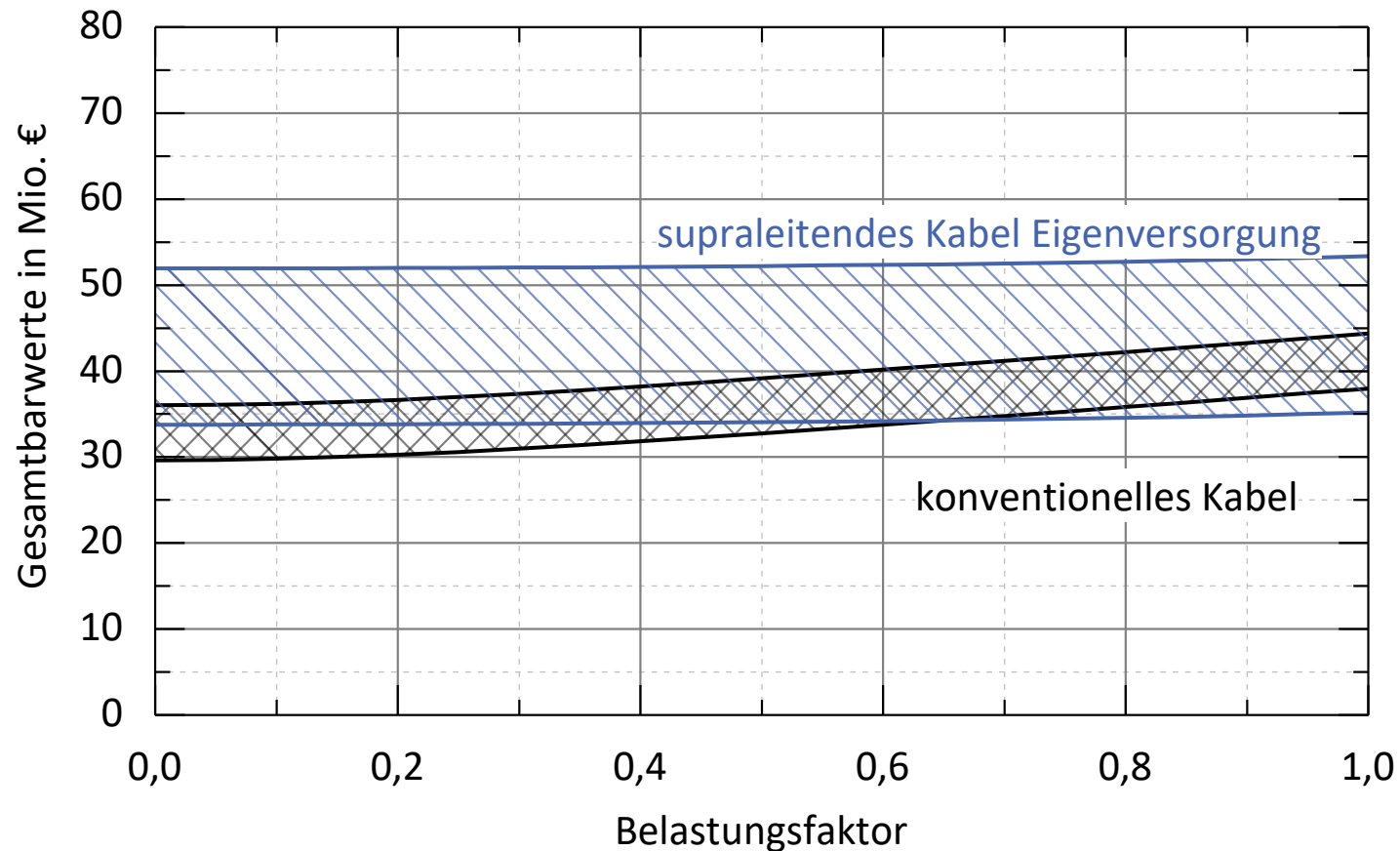
Das entspricht zwischen 2,059 und 3,2 Mio. €/km GW

■ Gesamtbarwert bei Fremdstromversorgung



Wirtschaftlichkeit

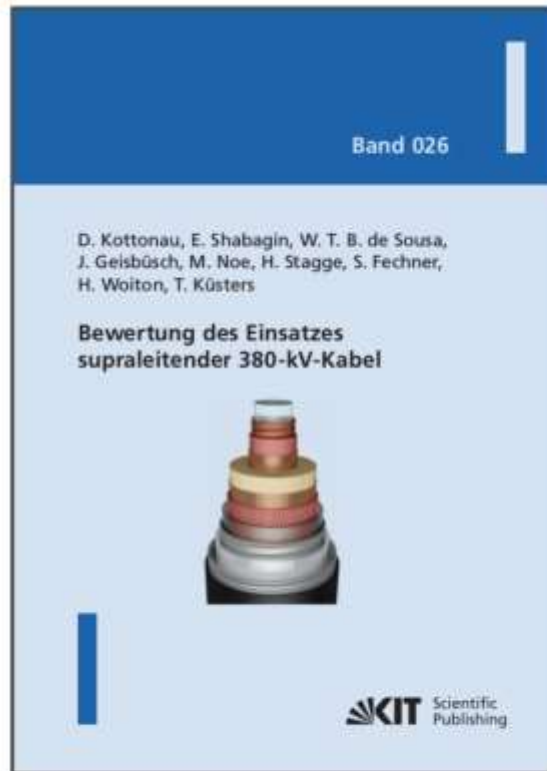
■ Gesamtbarwert bei Eigenstromversorgung



Eine pdf-Kopie der Studie ist kostenfrei 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

Herausforderung für Systemintegration von Kabeln im Übertragungsnetz

Herausforderung (nach Prof. Pöhler, TenneT, Vortrag Wisdialog, Bundesnetzagentur, Oktober 2019)

Längsimpedanz kleiner als bei konventionellen Freileitungen und Kabeln (ggf. Lastflusssteuerung)

Leerlaufverluste wegen Kühlbedarf

Eingeschränkte Schwarzstartfähigkeit (Kühlmittelverfügbarkeit, autarke Energieversorgung)

Begrenzte Fähigkeit zum Tragen von Kurzschlussströmen

Anpassung der Schutztechnik

Erfordernis von Kühlstationen in regelmäßigen Abständen (Bereitstellung von Eigenbedarfsversorgung)

Im Fehlerfall lange Reparaturdauern (vglw. Geringe Verfügbarkeit)

Eignung für Automatische Wiedereinschaltbarkeit (AWE-Fähigkeit)

Einsatz derzeit nur in Pilotprojekten wg. Erfordernis zur Einhaltung § 49 Abs. 1 EnWG, „Anerkannte Regeln der Technik“ für Planfeststellung

Herausforderung für Systemintegration von Kabeln im Übertragungsnetz

Herausforderung (nach Prof. Pöhler, TenneT, Vortrag Wisdialog, Bundesnetzagentur, Oktober 2019)	Erfüllung oder Lösung
Längsimpedanz kleiner als bei konventionellen Freileitungen und Kabeln (ggf. Lastflusssteuerung)	Im Verbund wird dadurch das HTS Kabel mehr Strom tragen. 😊
Leerlaufverluste wegen Kühlbedarf	Insgesamt sind 380 kV HTS Kabel effizienter 😊
Eingeschränkte Schwarzstartfähigkeit (Kühlmittelverfügbarkeit, autarke Energieversorgung)	Zusätzlicher Generator nötig, damit Schwarzstartfähigkeit gesichert ist. 😞
Begrenzte Fähigkeit zum Tragen von Kurzschlussströmen	Auslegung als kurzschlussstolerantes Kabel 😊
Anpassung der Schutztechnik	Möglich 😊
Erfordernis von Kühlstationen in regelmäßigen Abständen (Bereitstellung von Eigenbedarfsversorgung)	Bei AC alle 5-10 km 😞. Teilerdverkabelungen sind meist kürzer 😊
Im Fehlerfall lange Reparaturdauern (vglw. Geringe Verfügbarkeit)	1 bis 2 Wochen mehr durch Abkühlung und Aufwärmung 😞
Eignung für Automatische Wiedereinschaltungsfähigkeit (AWE-Fähigkeit)	Machbar wie in Essen gezeigt 😊
Einsatz derzeit nur in Pilotprojekten wg. Erfordernis zur Einhaltung § 49 Abs. 1 EnWG, „Anerkannte Regeln der Technik“ für Planfeststellung	Deshalb jetzt ein Pilotprojekt 😊

Zusammenfassung

- 380 kV Hochtemperatur-Supraleiter Kabel können wirtschaftlich sein und besitzen gegenüber konventionellen Kabeln weitere Vorteile:
 - Trassenbreite kleiner 10 m gegenüber mehreren 10 m
 - Keine Bodenerwärmung
 - Keine elektromagnetische Strahlung
- Die Zeit ist reif für ein Entwicklungsprojekt für Hochtemperatur-Supraleiter 380 kV Kabel.

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit