Karlsruher Institut für Technologie

Ressourcen schonen und Energie sparen – Supraleiter für Netztechnik und Industrie

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Physik

Rheinland-pfälzischer Supraleiterkongress –
Zukunftstechnologie mit wirtschaftlichem Nutzen, 20. April 2023, Mainz

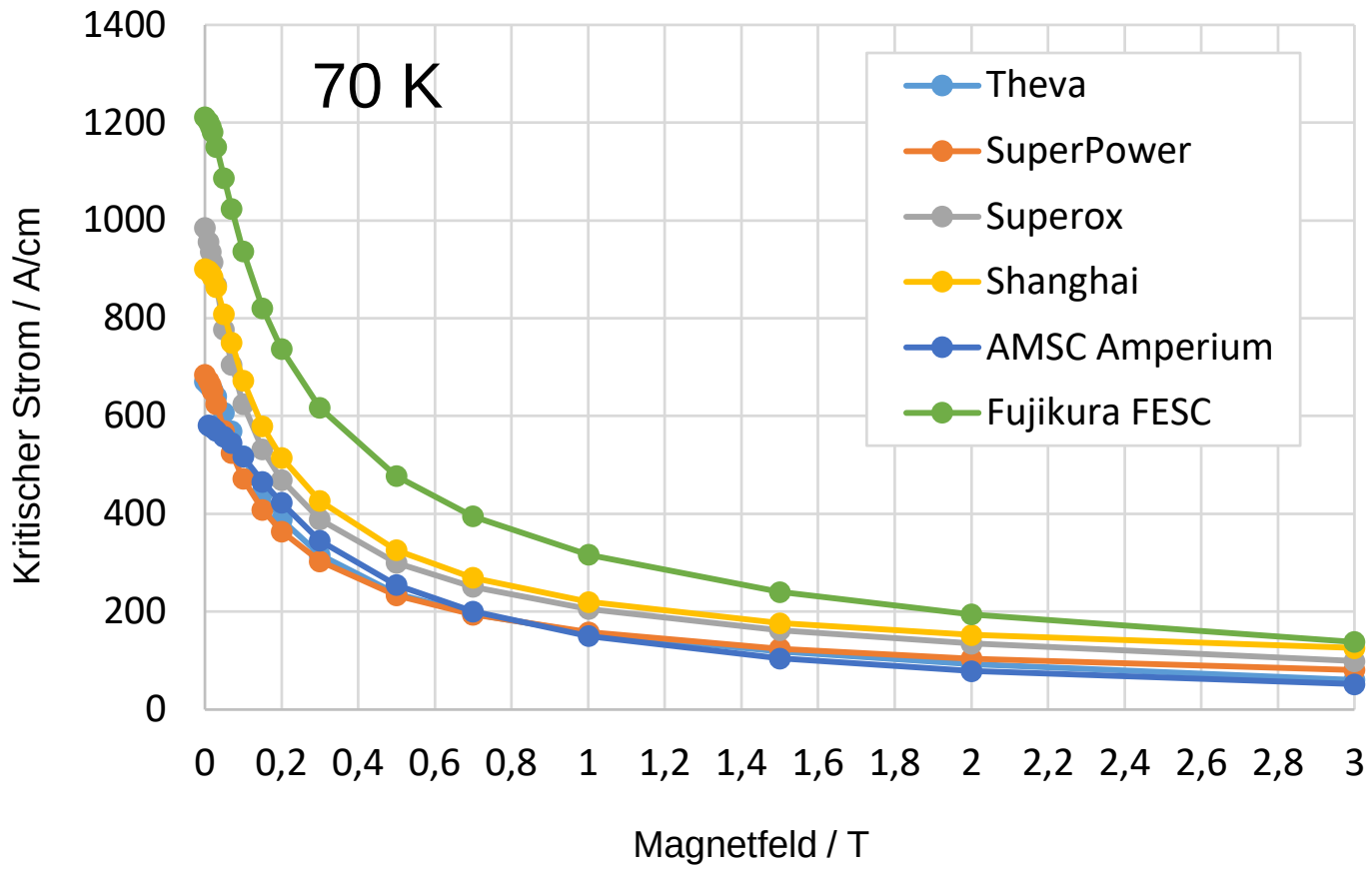
Wie kann Supraleitung Ressourcen schonen und Energie sparen?

Antwort ChatGPT vom 14.4.2023:

Supraleitung kann Ressourcen schonen und Energie sparen, **indem sie den elektrischen Widerstand nahezu auf Null reduziert, was zu einer erheblichen Reduzierung des Energieverbrauchs und der Verluste führt**. **Ein Supraleiter kann elektrischen Strom ohne jeglichen Widerstand transportieren**, was bedeutet, dass keine Energie in Form von Wärme verloren geht, während der Strom fließt.
Dies bedeutet, dass Supraleiter in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden können, um den Energieverbrauch zu senken und damit Ressourcen zu schonen. Beispielsweise können Supraleiter in Stromnetzen eingesetzt werden, **um die Übertragung von Strom über weite Entfernungen effizienter und verlustärmer zu gestalten**. Supraleitende Kabel können auch in Rechenzentren eingesetzt werden, **um den Energieverbrauch von Datenzentren zu reduzieren**, die eine große Menge an Strom benötigen, um die Server zu betreiben und die Abwärme abzuleiten.
Darüber hinaus können **supraleitende Motoren in der Industrie** eingesetzt werden, um den Energieverbrauch von Anlagen zu reduzieren. Auch in der **Medizintechnik** können Supraleiter eingesetzt werden, um den Energieverbrauch von Magnetresonanztomographen (MRTs) zu senken, die eine große Menge an Strom benötigen, um starke Magnetfelder zu erzeugen.
Insgesamt kann Supraleitung dazu beitragen, den Energieverbrauch in vielen Branchen und Anwendungen zu reduzieren und somit dazu beitragen, Ressourcen zu schonen und die Umwelt zu schützen.

Motivation

- Höchste Stromdichten

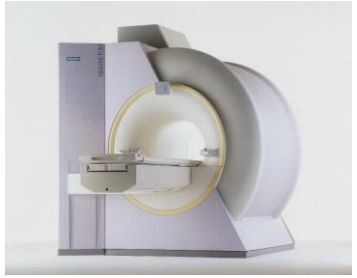


Faktor 500 – 1000 mal höhere Stromdichte als in Cu-Leitern

Bei 20 K nochmal Erhöhung um den Faktor 5

Data collected from: https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.2861821.v15

Übersicht der Anwendungen

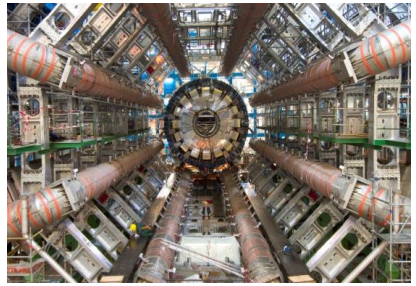


Zyklotron
MRI Anwendungen

← Medizin

Wissenschaft →

Beschleunigermagnete
Detektormagnete
Supraleitende Kavitäten
Hochfeldmagnete

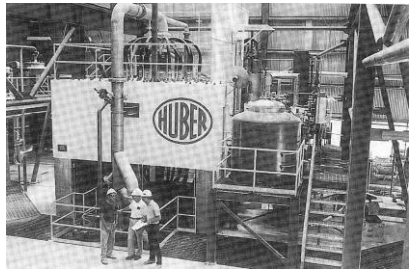


Fusionsmagnete
Netzanwendungen
(Kabel, SSB, Trafos,
Gen., SMES)

← Energie

Industrie →

Stromschienen
Magnetische Trenner
Magnetische Heizer
Lager

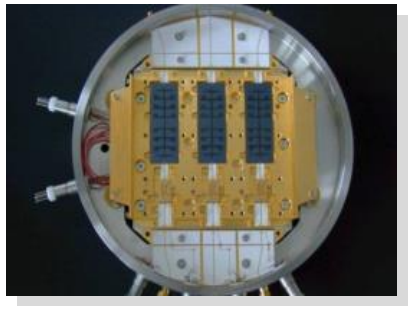


Schweben
LKW, Züge, Schiffe
Flugzeuge

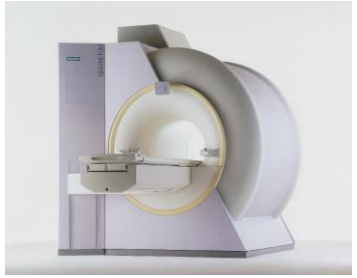
← Mobilität

Elektronik →

SQUIDS
Spannungsstandards
Detektoren
RSFQ Elektronik



Übersicht der Anwendungen

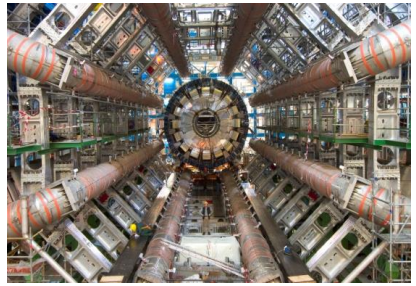


Zyklotron
MRI Anwendungen

← Medizin

Wissenschaft →

Beschleunigermagnete
Detektormagnete
Supraleitende Kavitäten
Hochfeldmagnete

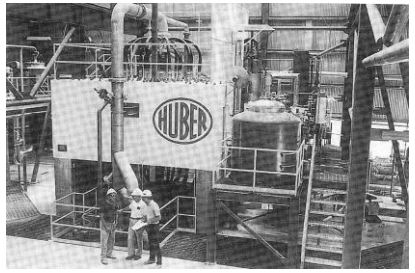


Fusionsmagnete
Netzanwendungen (Kabel, SSB, Trafos, Gen., SMES)

← Energie

Industrie →

Stromschienen
Magnetische Trenner
Magnetische Heizer
Lager

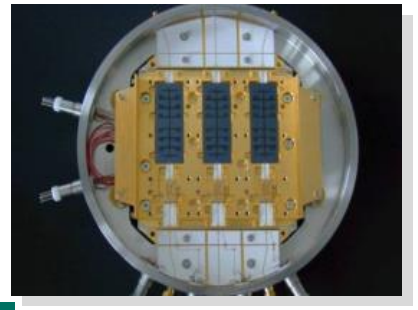


Schweben
LKW, Züge, Schiffe
Flugzeuge

← Mobilität

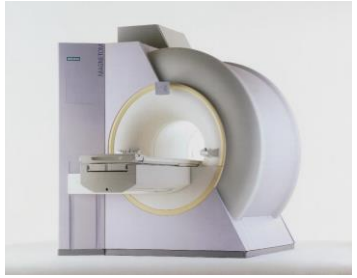
Elektronik →

SQUIDS
Spannungsstandards
Detektoren
RSFQ Elektronik



Anwendung nur sinnvoll möglich mit Supraleitung

Übersicht der Anwendungen

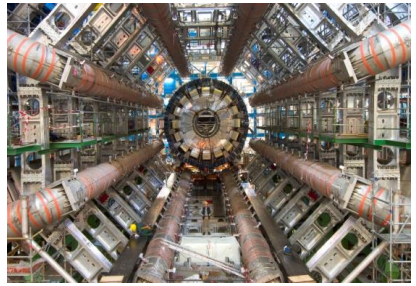


Zyklotron
MRI Anwendungen

← Medizin

Wissenschaft →

Beschleunigermagnete
Detektormagnete
Supraleitende Kavitäten
Hochfeldmagnete

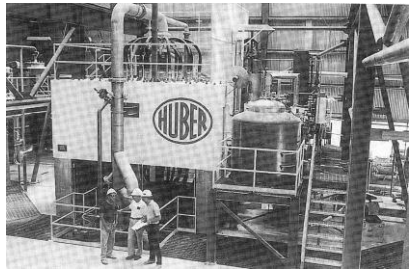


Fusionsmagnete
Netzanwendungen
(Kabel, SSB, Trafos,
Gen., SMES)

← Energie

Industrie →

Stromschienen
Magnetische Trenner
Magnetische Heizer
Lager

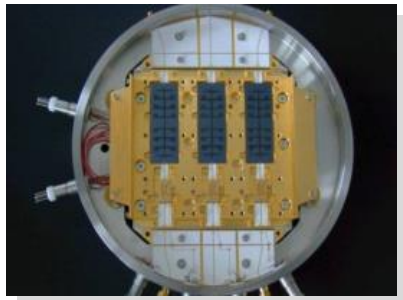


Schweben
LKW, Züge, Schiffe
Flugzeuge

← Mobilität

Elektronik →

SQUIDS
Spannungsstandards
Detektoren
RSFQ Elektronik



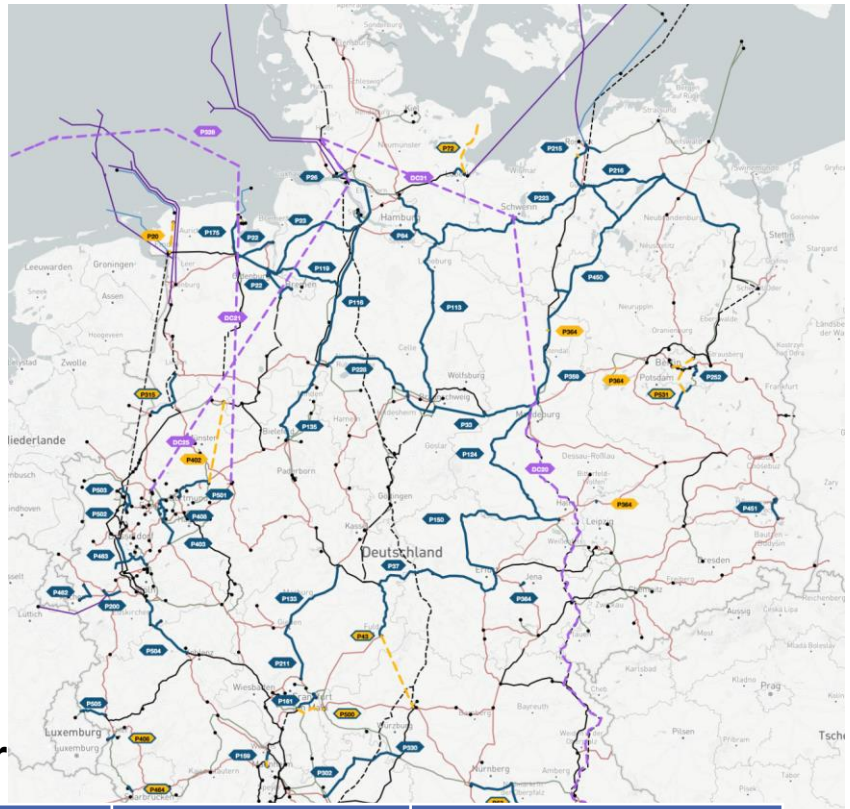
Anwendung heute favorisiert mit Hochtemperatur Supraleitung

Netzausbauplanung aus NEP2037/2045 (2023) vom 24. März 2023

Installierte Leistung	Bestand (2020/2021)	2035 (NEP 2021)	2037 (NEP 2023)	2045 (NEP 2023)
PV	59 GW	**110-120 GW**	**345 GW**	400-445 GW
Offshore Wind	8 GW	**28-34 GW**	**51-59 GW**	70 GW
Onshore Wind	56 GW	**82-91 GW**	**158-162 GW**	160-180 GW

Quelle: Übertragungsnetzbetreiber

Zubau Szen. B 2037	Trassenlänge	Invest.
Offshore	**9.300 km**	103,5 Mrd. €
Onshore	**12.430 km**	94,5 Mrd. €
Summe	**21.730 km**	198,0 Mrd. €

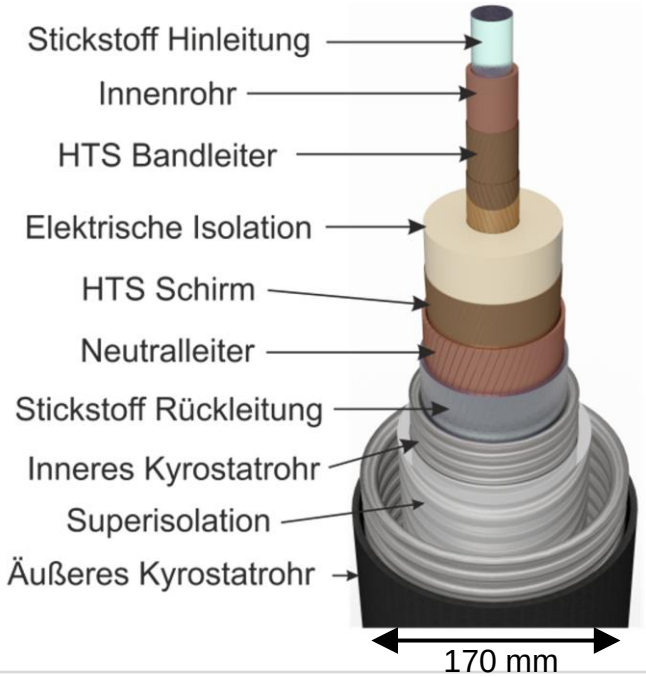


Status Netzausbau aus Monitoringbericht 2022 der Bundesnetzagentur

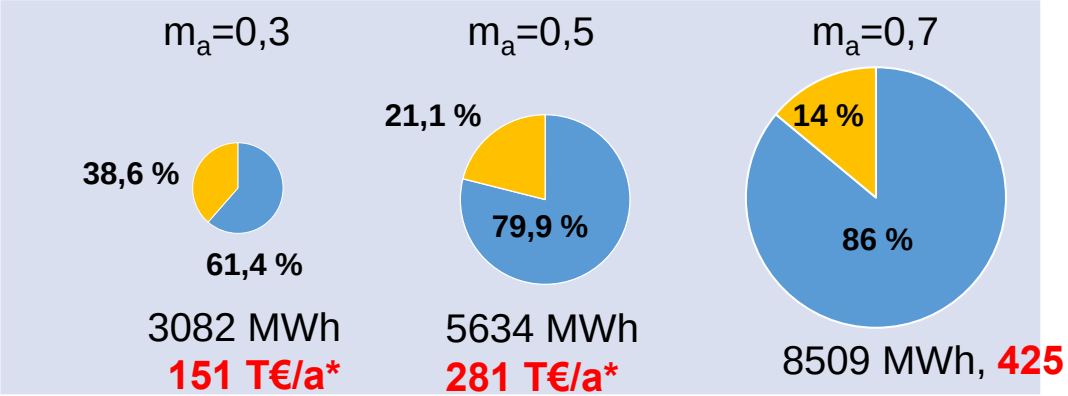
	Gesamt	Im Raumordnungs-verfahren	Vor bzw. im Planfest-stellungsverfahren	Genehmigt	Davon fertiggestellt
Enlag 2009	1.821 km	8 km	205 km	360 km	1248 km
BBPlG 2013	10.413 km	394 km	5.815 km	656 km	886 km

Supraleitende 380 kV Teilerdkabel, 3.2 km

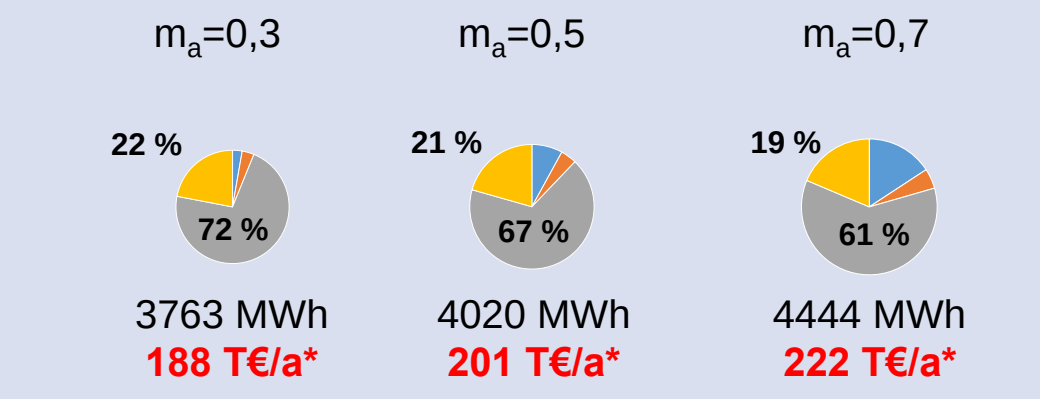
Bezeichnung	Werte
Bemessungsspannung	420 kV
Nennspannung	380 kV
Bemessungsstrom	3,6 kA
Dauerkurzschlussstrom	63 kA
Fehlerklärungszeiten	300 ms



Kupfer 4 Systeme



Hochtemperatur-Supraleiter 2 Systeme je 3,6 kA



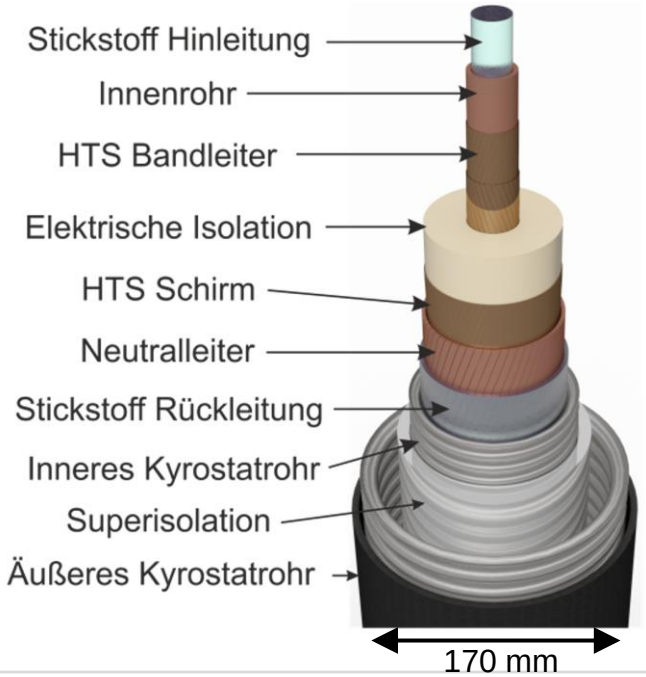
* 50 €/MWh

ZIEHL Workshop – 5.-6.3.2020, Berlin, M. Noe

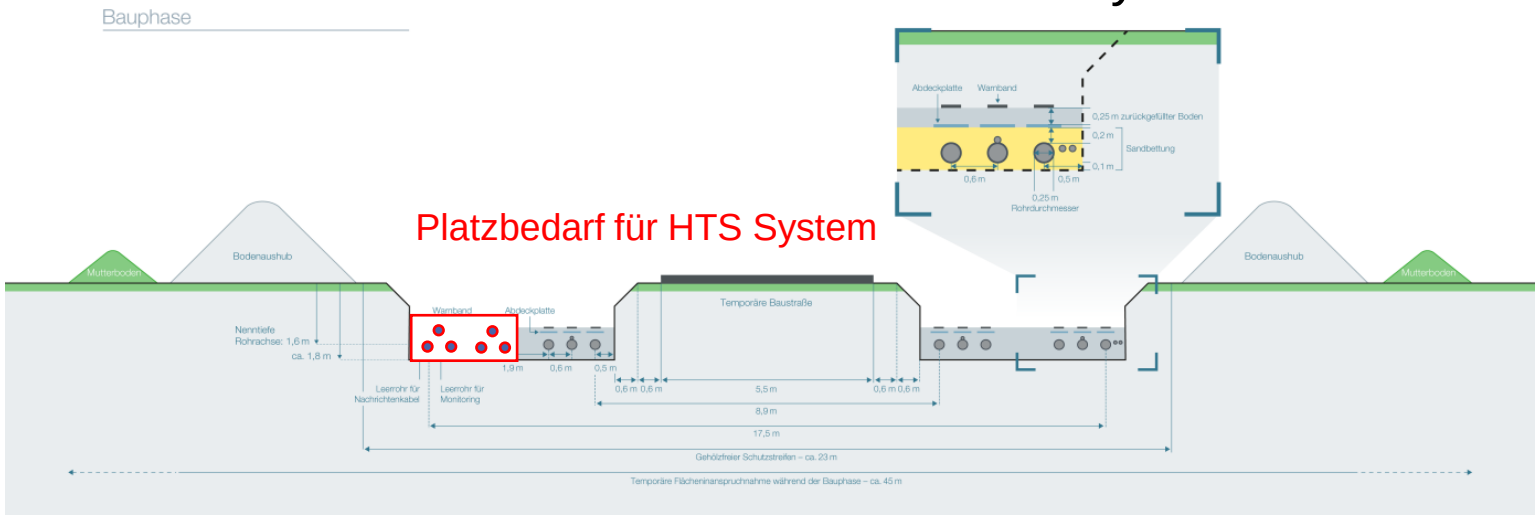
Quelle: Kottonau et.al. Bewertung des Einsatzes supraleitender 380 kV Kabel, KIT Scientific Publishing 2019

Supraleitende 380 kV Teilerdkabel, 3.2 km

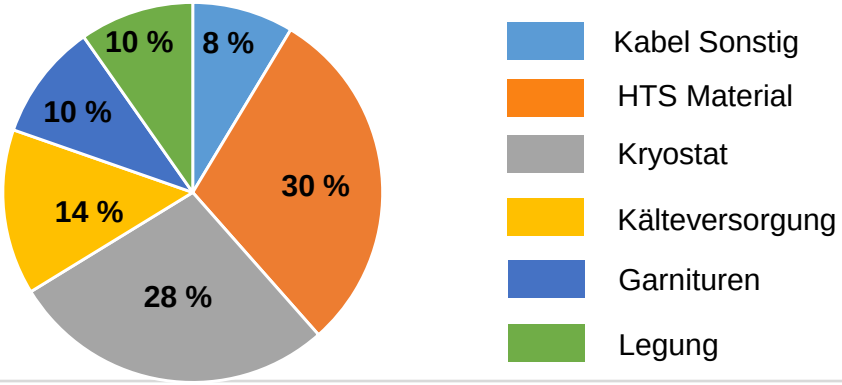
Bezeichnung	Werte
Bemessungsspannung	420 kV
Nennspannung	380 kV
Bemessungsstrom	3,6 kA
Dauerkurzschlussstrom	63 kA
Fehlerklärungszeiten	300 ms



Trassenbreite konventionelles Kabelsystem 45 m



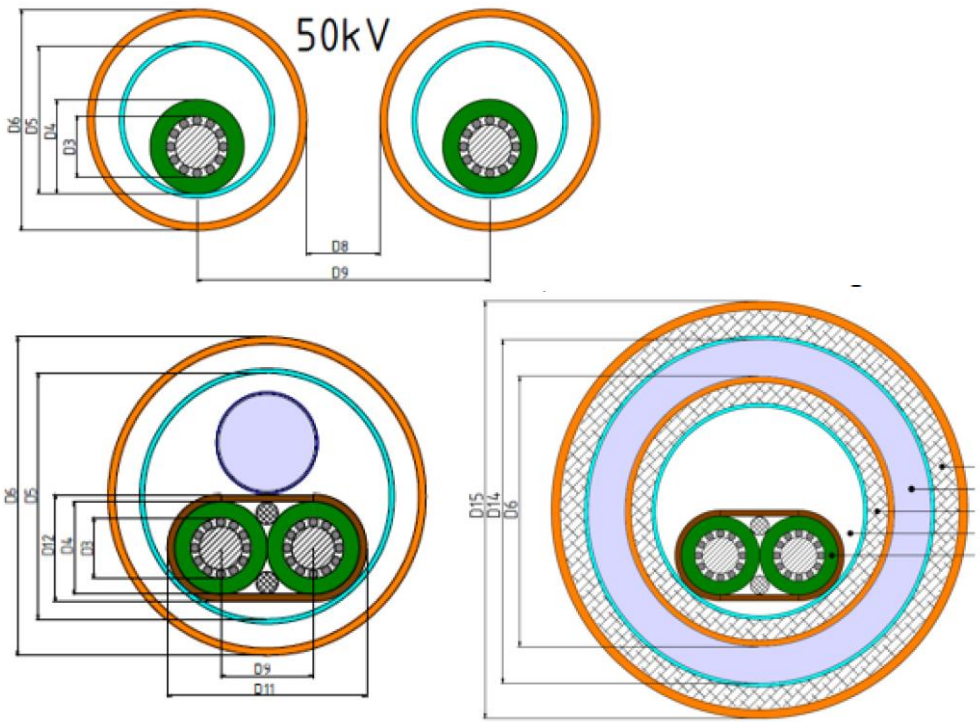
Aufteilung der Investitionskosten (Stand 2019)



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

Supraleitende 1 GW MVDC Kabel

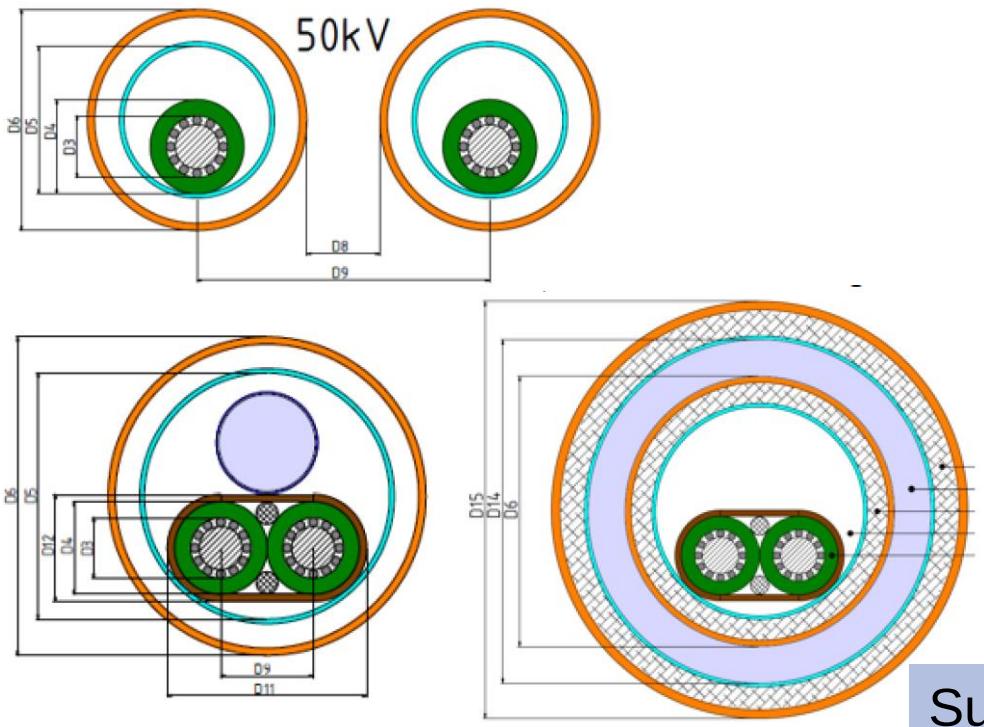
Nennspannung AC, 50 Hz		Hochspannung zwischen 110 und 400 kV									
Nennleistung	MW	500		1.000			2.000			4.000	
Nennspannung DC	± kVDC	25	50	25	50	100	25	50	100	50	100

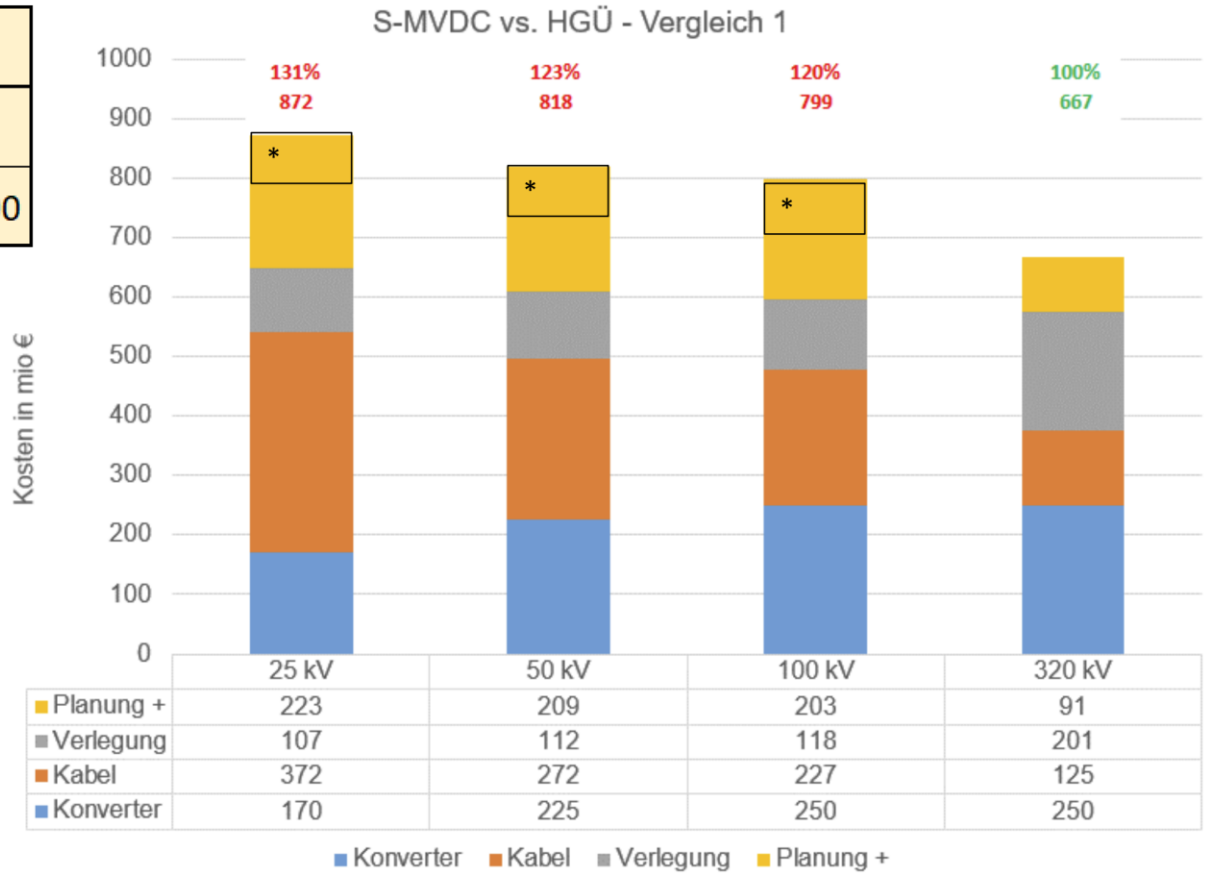


Flächen- und Raumvergleich	Referenzprojekt	S-MVDC
DC-Spannung	± 320 kV	± 50 kV
Transformatoren	Freiluft	Freiluft
MS-Schaltanlage	entfällt	Freiluft
Konverterhalle	100%	68%
Konverterkühlanlage	Freiluft	Halle S1 - Dachaufbau
Flächen in m²		
Halle	4.770	3.220
Freiluft	1.000	1.000
Gesamtflächenbedarf	**5.770**	**4.220**
	100%	**73%**
Hallenhöhen		
Konverterhalle	17 m Traufe / 18 m First	6 m / 7,5 m Kühler
Hallenvolumen in m³	83.000	21.000
	100%	**25%**

Supraleitende 1 GW MVDC Kabel

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





Supraleitende Kabel sind Energienetzausbaubeschleuniger

Stand der Entwicklung supraleitender Kabel

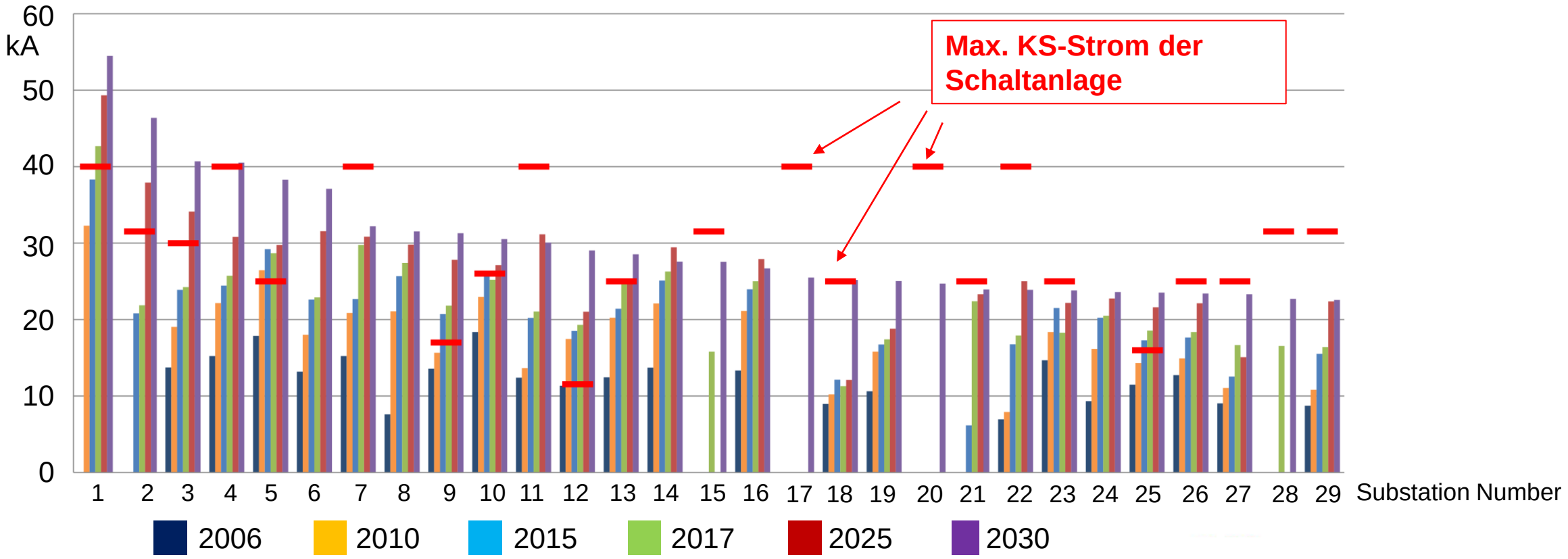
	Längen pro Kabelstrecke bis zu	TRL 1	TRL2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
Wechselstromanwendungen										
Innerstädtische Mittelspannung (6-30 kV)	Wenige km							X		
Innerstädtische Hochspannung (110-220 kV)	Wenige km						X			
Höchstspannungsübertragung (380 kV)	Wenige 100 km		X							
Höchstspannungsteilerdverkabelung (380 kV)	Wenige km		X							
Generatorausleitung (6-30 kV)			X							
Gleichstromanwendungen										
Elektrolyseindustrie (einige 10 kA)	Wenige 10 m					X				
Aluminiumindustrie (> 100 kA)	Wenige 100 m					X				
Datencenter	Wenige 10 m				X					
Anbindung erneuerbarer Energien	Wenige km					X				
Bahnstromversorgung	Wenige km						X			
Mittelspannungs-Gleichstromübertragung	~ 100 km		X							
Hochspannungs-Gleichstromübertragung	~ 100-1000 km		X							
Elektrische Flugzeugversorgungssysteme	~ 10-100 m			X						
„Degaussing“ von Schiffen									X	

Niedriger TRL — Mittlerer TRL — Hoher TRL

Quelle: M. Noe, M. Bauer „Supraleitende Hochstromkabel und Leitungen“, Physik in unserer Zeit 6/2021, DOI: 10.1002/piuz.202101615

Anstieg der Kurzschlussströme als Folge des Netzausbaus

Entwicklung der Kurzschlussströme in einem 110 kV Verteilnetz

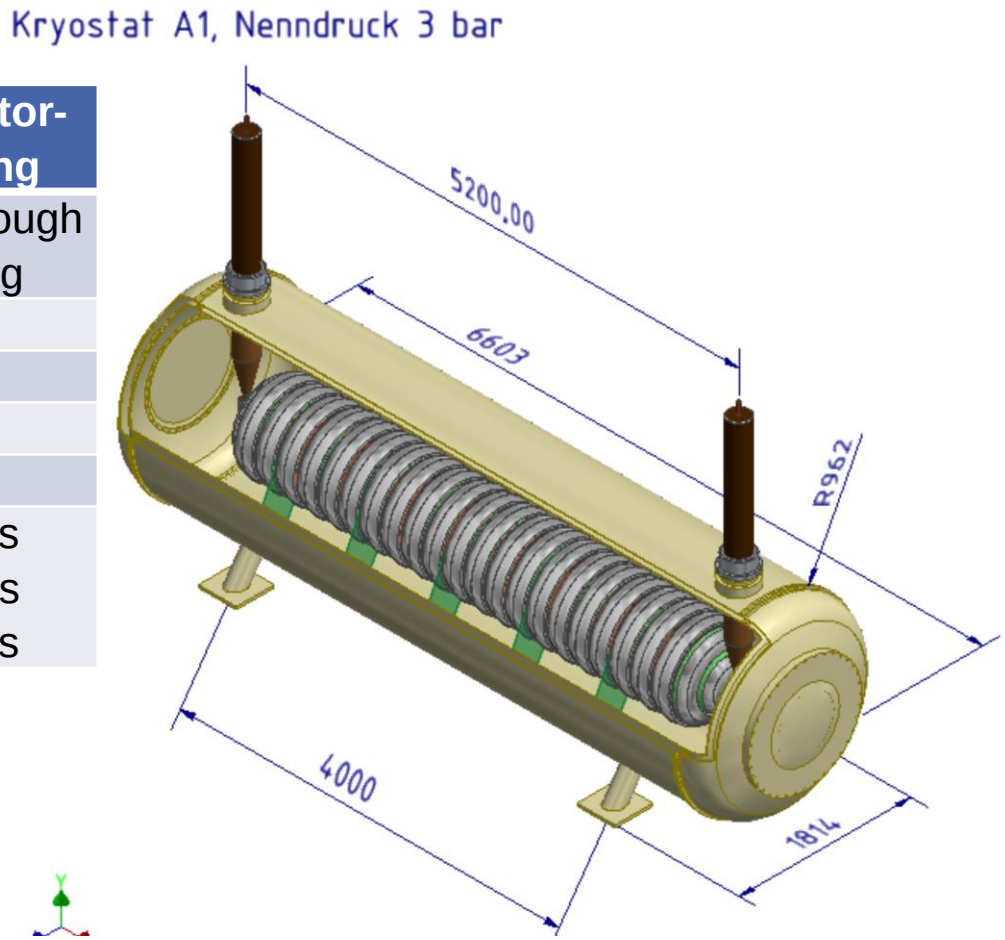


Quelle: R. Steinhorst, Ziehl 2022, Berlin

Supraleitende Strombegrenzer zur Begrenzung von Kurzschlussströmen

- 110 kV Spannungsebene

	Sammelschienenkupplung		Transformator-einspeisung
Einsatzort	Kupplung öffnen	Fault ride through (FRT) fähig	Fault ride through (FRT) fähig
Nennspannung	110 kV	110 kV	110 kV
Bemessungsstrom	3,15 kA	3,15 kA	2,1 kA
Max. I_k“ (ohne SSB	50 kA	50 kA	13 kA
Max. I_k“ (mit SSB)	6,5 kA	6,5 kA	4,5 kA
Fehlerdauer	t_{F1} = 0.25 s	t_{F1} = 0,10 s t_{P1} = 0,30 s t_{F2} = 0,20 s	t_{F1} = 0,55 s t_{P1} = 0,30 s t_{F2} = 0,20 s

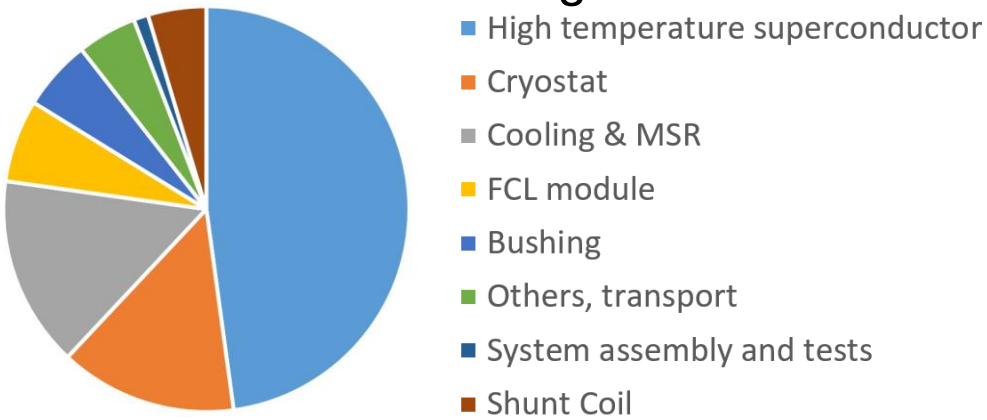


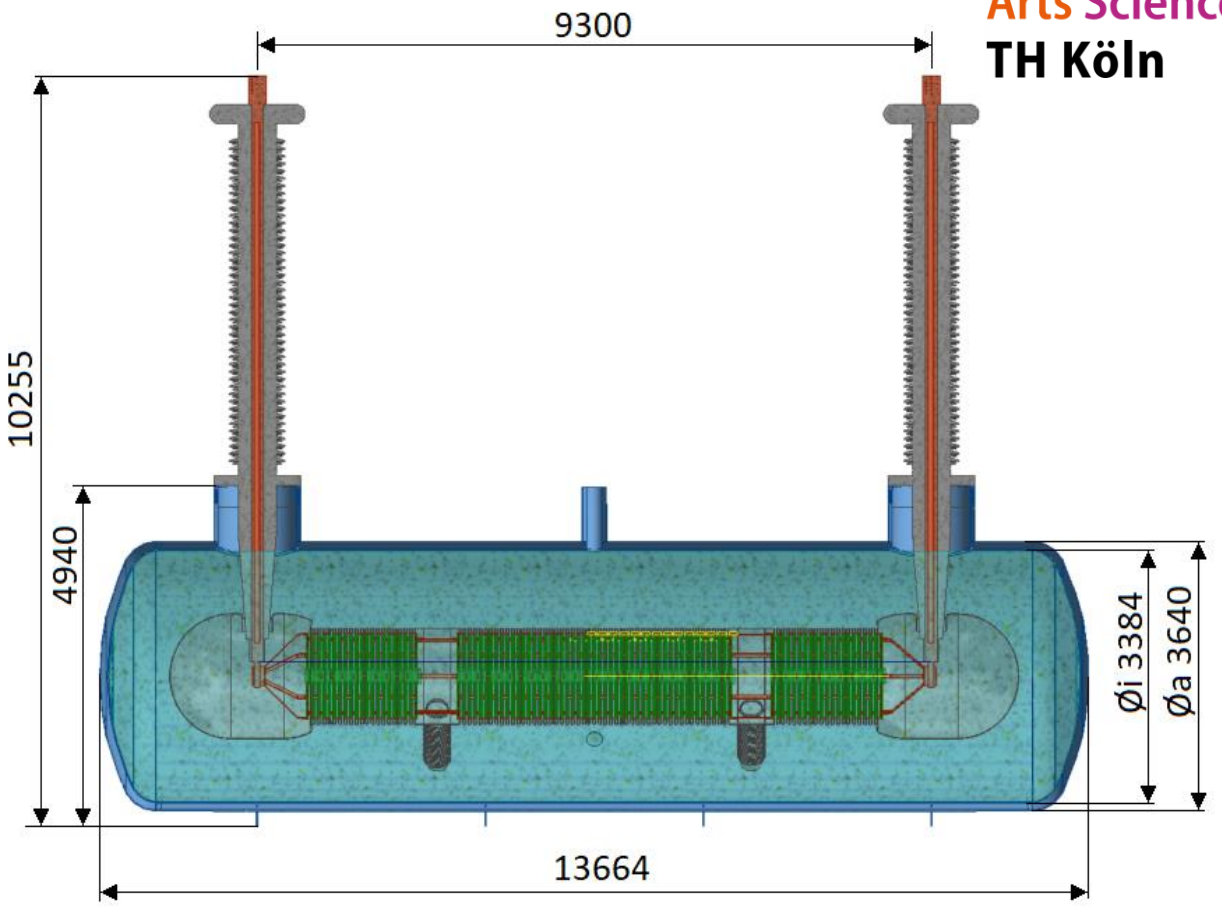
Supraleitende Strombegrenzer zur Begrenzung von Kurzschlussströmen

- 380 kV Spannungsebene

	SS Kupplung	SS Teilkupplung
Nennspannung	380 kV	380 kV
Höchste Spannung	440 kV	440 kV
Nennstrom	5,0 kA	5,0 kA
Max. I''_k ohne Begrenzer (eff.)	63 kA	63 kA
Max. $I''_{k,lim}$ mit Begrenzer (eff.)	19 kA	30 kA
Fehlerdauer	0,25 s	0,25 s

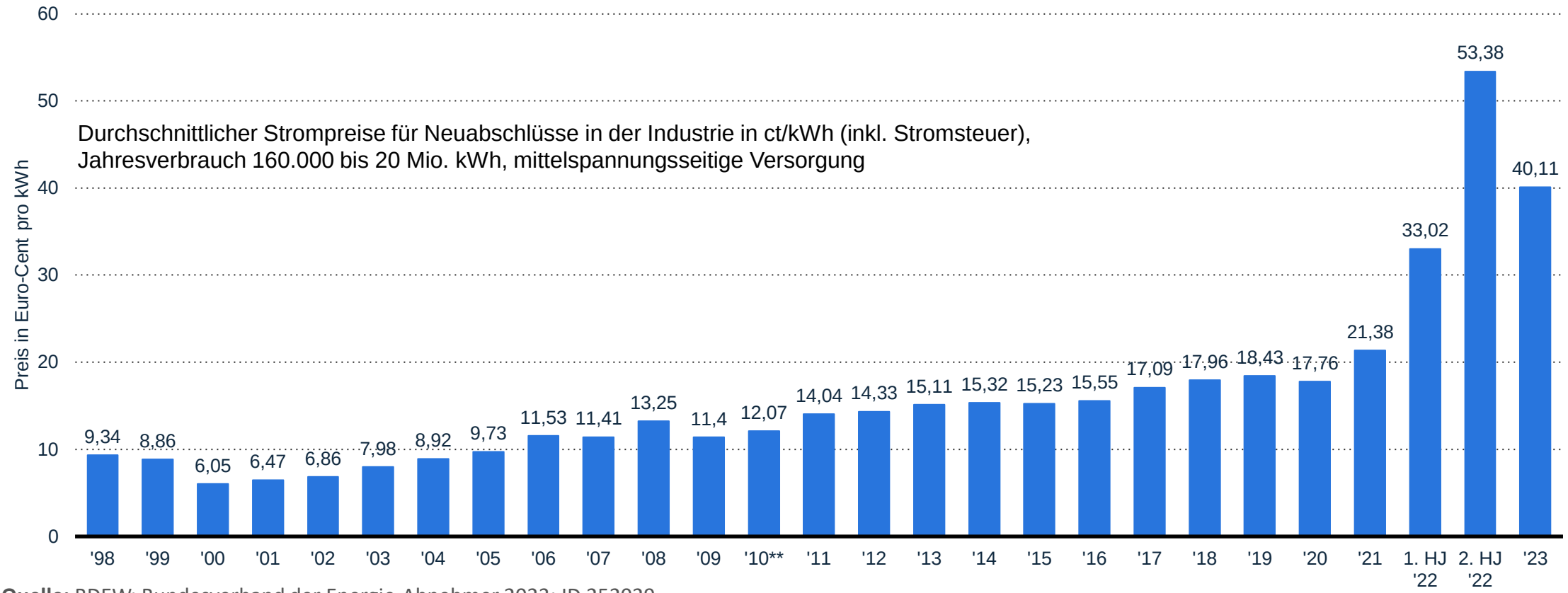
Kostenaufteilung





Bedeutung der Energieeffizienz in der Industrie

Mittlerer Industriestrompreis in Deutschland



Quelle: BDEW; Bundesverband der Energie-Abnehmer 2023; ID 252029

Davon in 2022 Umlagen, Steuern und Abgaben: 6,42 Euro Cent pro kWh

Einsparpotentiale

- Stromschiene

200 kA, 600 m

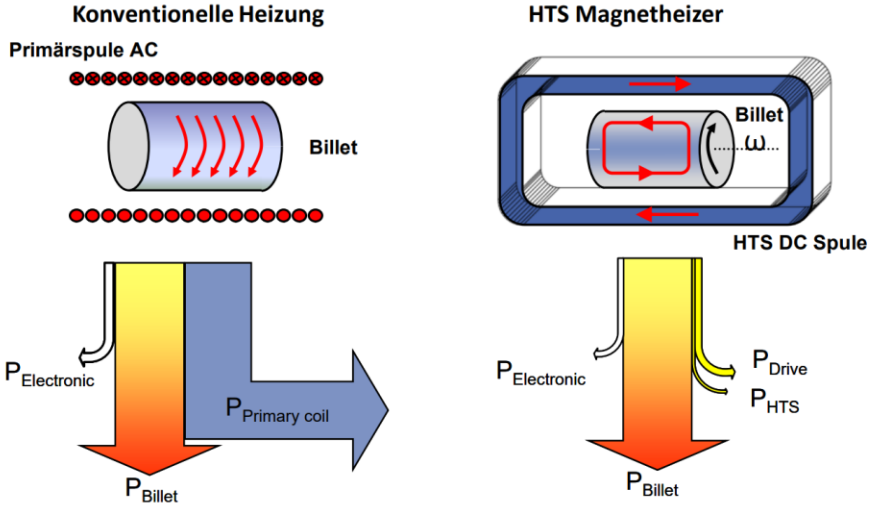
Spannungsfall mit Al ca. 12 V

Spannungsfall mit HTS < 0.5 V

Verluste	Al	HTS
kW	2.400	100
MWh/a	21.024	876
M€/a (2007)*	2,390	0,101
M€/a (2021)*	4,494	0,187

* Mittlerer Industriestrompreis D

- Magnetheizer



Pro Tonne aufheizen von Al ergibt sich eine Energieeinsparung von 120 kWh.

Einsparung	2007	2021
Pro Jahr	50,6 k€*	93,9 k€*

*Annahme 1 Billet (L=1 m, D=30 cm) 12 pro h
Eine Schicht mit 8 h, 200 Arbeitstage,
durchschnittlicher Industriestrompreis D

Schlussfolgerung

- Supraleitende Kabel und Strombegrenzer sind für die Übertragungsebene technisch machbar.
- Sowohl supraleitende Kabel durch die geringe Trassenbreite und supraleitende Strombegrenzer durch Ihr Alleinstellungsmerkmal sind sehr attraktiv und können zur Beschleunigung des Netzausbaus beitragen.
- Entwicklungsprojekte für 380 kV Kabel und Strombegrenzer könnten in den nächsten 5 Jahren zu ersten Prototypen führen.
- Die Wirtschaftlichkeit von HTS Anwendungen in der Industrie hat sich durch die höheren Strompreise deutlich verbessert.

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Danksagung

- Stefan Huwer, Wolfgang Reiser, Carsten Räch, Claus Hanebeck, Vision Electric SuperConductors
- Friedhelm Herzog, Messer
- Joachim Bock, Werner Prusseit, Cornelia Hintze, Theva
- Stephan Pöhler, Hannu Stagge, Sebastian Pfaller, Tobias Rodler, TenneT
- René Steinhorst, Thüringer Energienetze
- Kevin Lunge, Bartosz Rusek, Amprion
- Christoph Humpert, André Schmid, TH Köln
- Sowie allen Kolleginnen und Kollegen sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Technische Physik