

Supraleitende Strombegrenzer für das 380 kV Netz

380 kV Superconducting Fault Current Limiter Feasibility Study

Autoren der Studie (alphabetisch):

Prof. Dr. Tabea Arndt, KIT

Dr. Wescley de Sousa, KIT

Stefan Fink, KIT

Friedhelm Herzog, Messer

Prof. Dr. Christof Humpert, TH Köln

Stefan Huwer, Huwer Engineering

Marvin Nießen, TH Köln

Prof. Dr. Mathias Noe, KIT, Koordinator

Dr. Sebastian Pfaller, TenneT

Hon. Prof. Dr. Stephan Pöhler, TenneT

Tobias Rodler, TenneT

André Schmid, TH Köln



12. Braunschweiger Energieseminare

Supraleiter | Gleichstrom | Wasserstoff

Komplette Studie in Kürze hier verfügbar:
<https://www.ksp.kit.edu/site/books/series/karlsruher-schriftenreihe-zur-supraleitung-3/>

Inhalt

1. Supraleitende Materialien
2. Resistive supraleitende Strombegrenzer
3. Konzept eines Strombegrenzers für 380 kV
4. Zusammenfassung und Ausblick

Inhalt

1. Supraleitende Materialien
2. Resistive supraleitende Strombegrenzer
3. Konzept eines Strombegrenzers für 380 kV
4. Zusammenfassung und Ausblick

Supraleitende Materialien

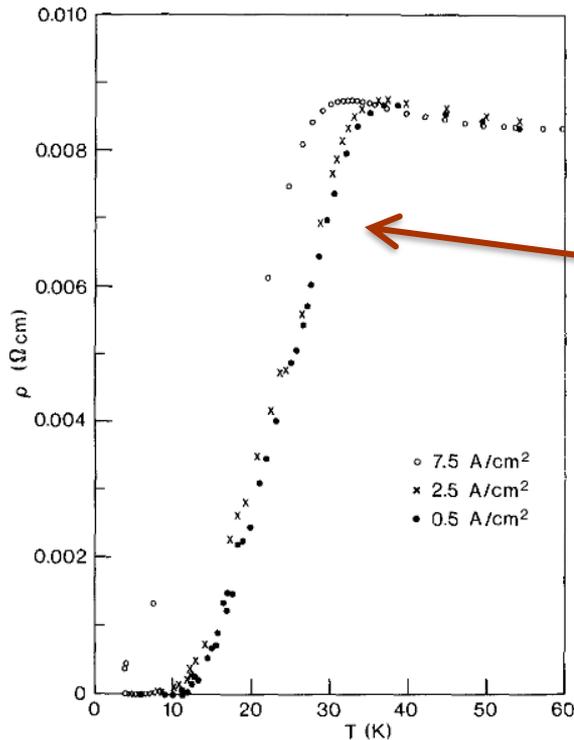
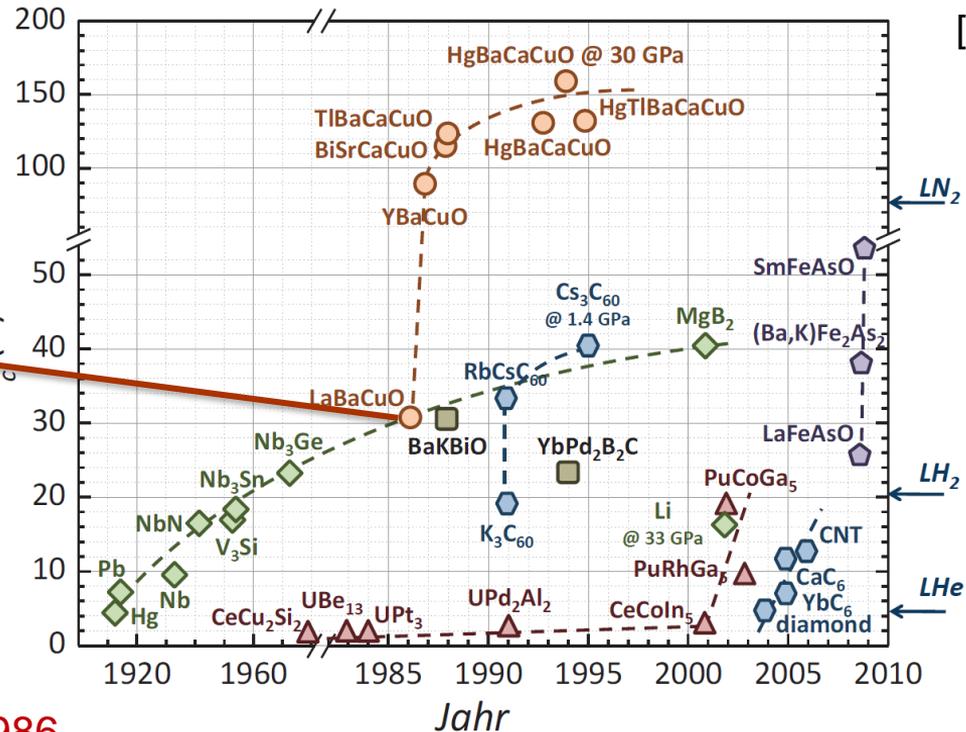


Fig. 3. Low-temperature resistivity of a sample with $x(\text{Ba})=0.75$, recorded for different current densities

[2]

Kritische Temperatur

T_c (K)



[1]

Siedetemperatur bei Normaldruck

April 1986

Entdeckung der Hochtemperatursupraleitung von LaBaCuO durch den deutschen Physiker Johannes Georg Bednorz und den Schweizer Physiker Karl Alex Müller → 1987 Nobelpreis

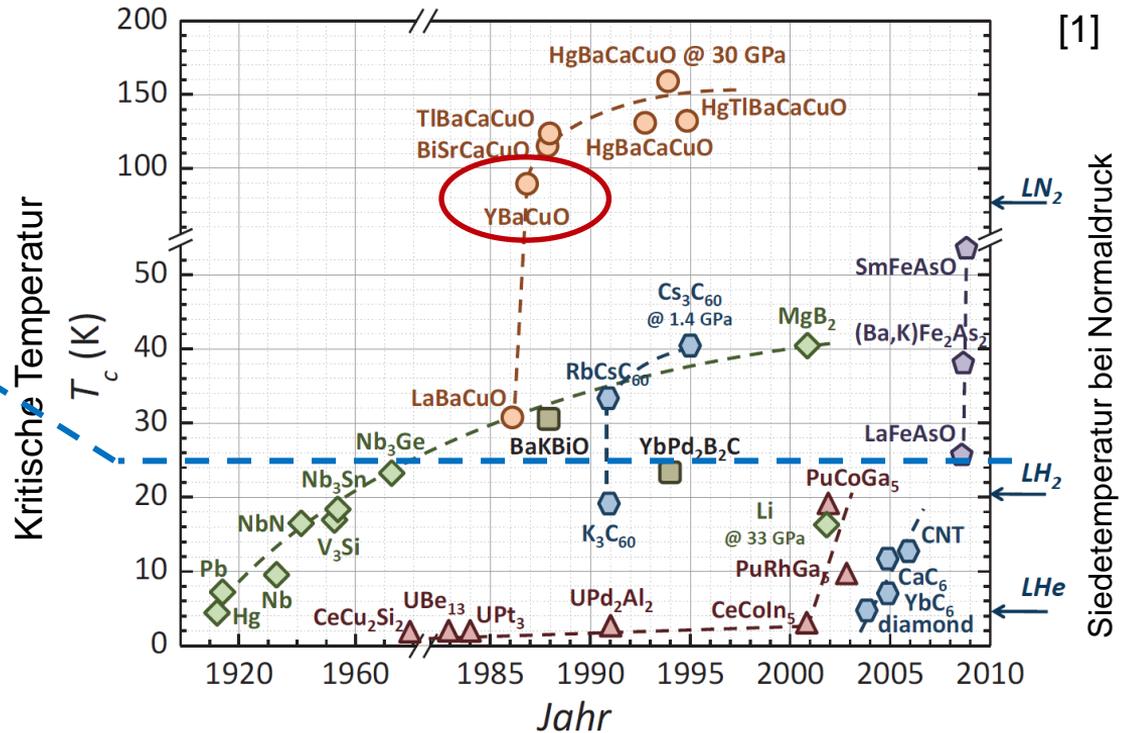
Supraleitende Materialien

HTS

- High Temperature Superconductor
- Hochtemperatursupraleiter
- Sprungtemperatur > 25 K

LTS

- Low Temperature Superconductor
- Tieftemperatursupraleiter
- Sprungtemperatur < 25 K



Für Anwendungen in der Energietechnik zurzeit verwendet (Kühlung mit Flüssigstickstoff, LN_2):

- YBCO-123 ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$), Yttrium-Barium-Kupferoxid, $T_c = 92$ K
- ReBCO, Rare-earth Barium Copper Oxide (Y durch anderes Seltenerdelement ersetzt)

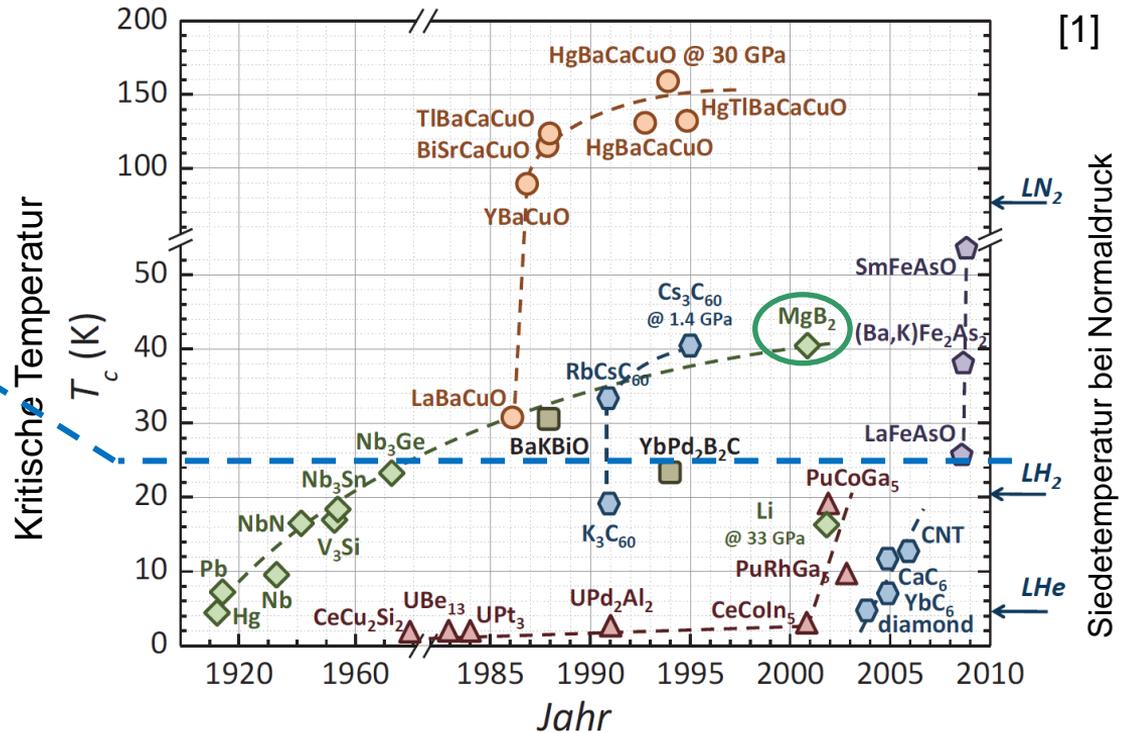
Supraleitende Materialien

HTS

- High Temperature Superconductor
- Hochtemperatursupraleiter
- Sprungtemperatur > 25 K

LTS

- Low Temperature Superconductor
- Tieftemperatursupraleiter
- Sprungtemperatur < 25 K

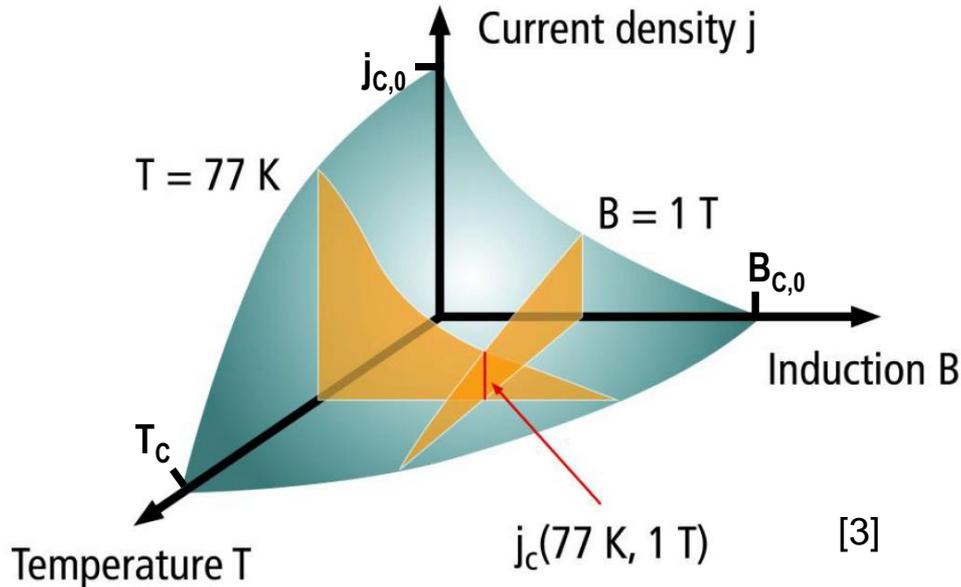


Für Anwendungen in der Energietechnik möglicherweise in Zukunft geeignet:

- MgB₂, Magnesiumdiborid, $T_c = 39$ K – Kühlung mit flüssigem Wasserstoff (LH₂)

Kritische Größen von Supraleitern

- Kritische Temperatur T_C – Materialkonstante
- Kritische Flussdichte B_C – abhängig von Herstellung und Feldrichtung
- Kritische Stromdichte j_C – abhängig von Herstellung
- **Phasendiagramm** eines Hochtemperatursupraleiters (HTS)

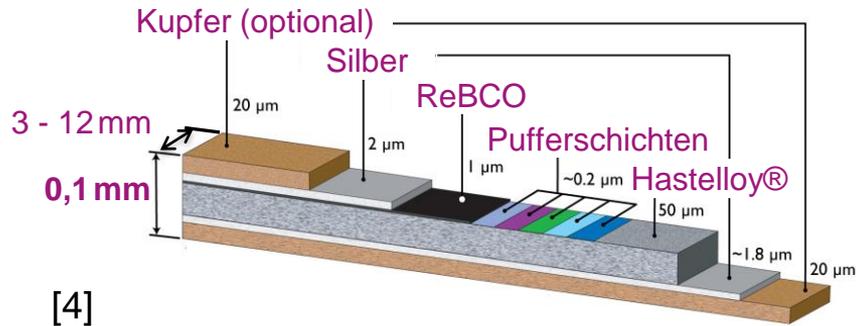


Quench eines Supraleiters

Plötzlicher Übergang vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand

HTS-Bandleiter der 2. Generation (2G)

- ReBCO-Dünnschicht auf Metallsubstrat (Hastelloy®)
- Pufferschichten für epitaktisches (orientiertes) Kristallwachstum der ReBCO-Schicht
- Silber-Beschichtung zur Stabilisierung und Kontaktierung
- Optionale Kupfer-Beschichtung zur weiteren Stabilisierung
- Möglicher Strom pro Bandleiter (12 mm Breite): bis 700 A bei 77 K und $B = 0$ T



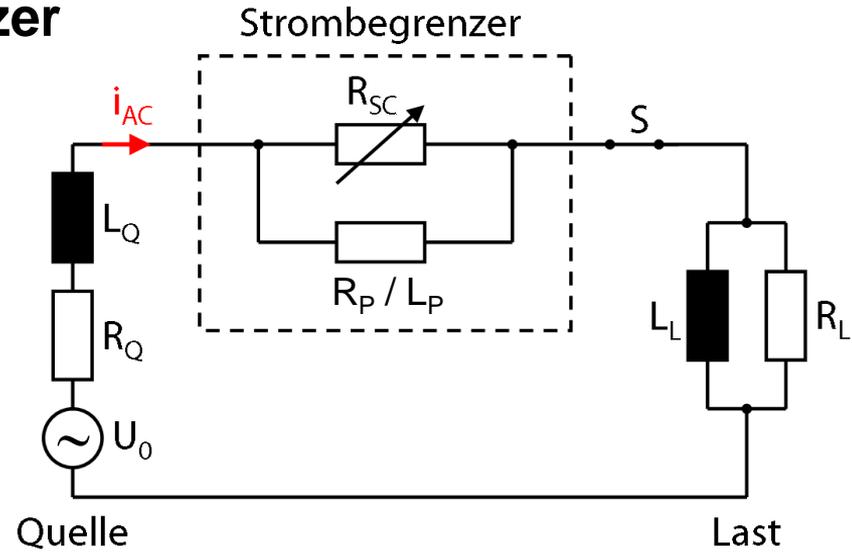
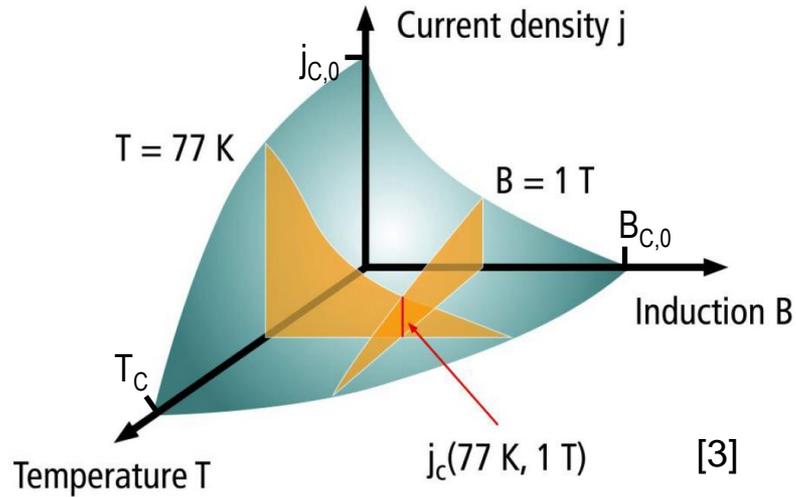
[4] https://nationalmaglab.org/media/5dilsev1/june2018_asc_high_temperature_superconducting_tape.pdf

[5] <https://magneticmag.com/theva-high-temperature-superconductor-wire-making-breakthroughs-in-windpower-turbines-and-electrical-transmission-applications/>

Inhalt

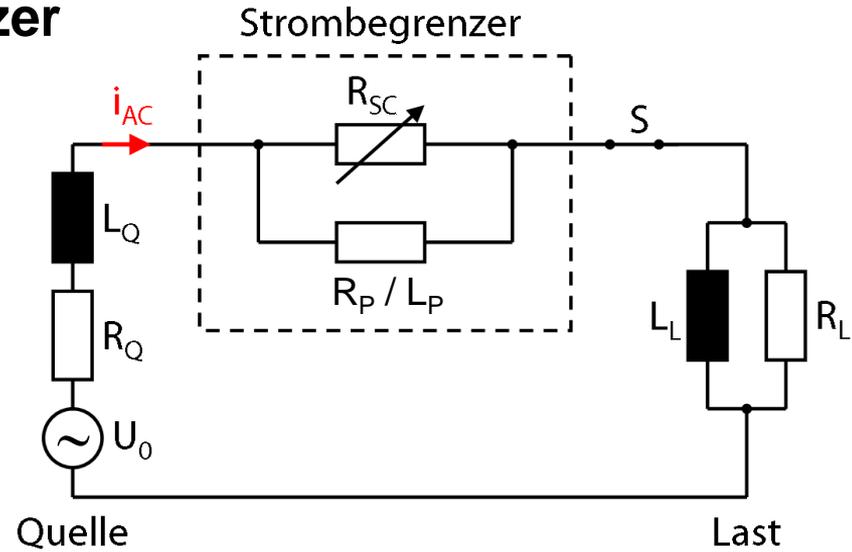
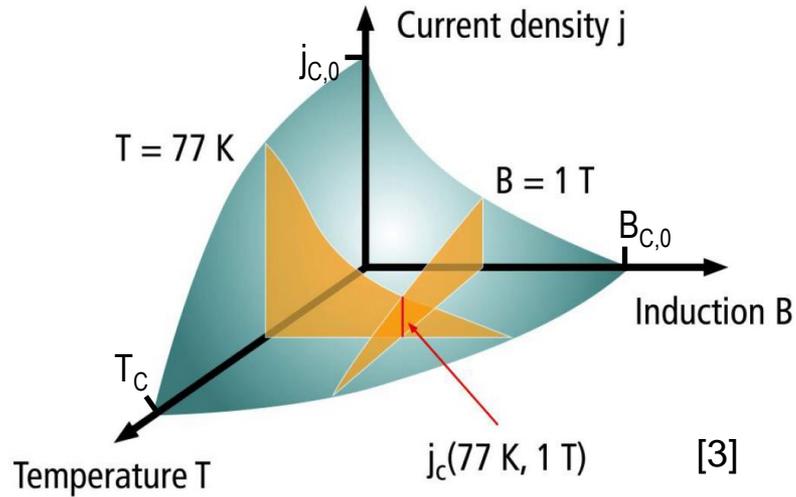
1. Supraleitende Materialien
2. Resistive supraleitende Strombegrenzer
3. Konzept eines Strombegrenzers für 380 kV
4. Zusammenfassung und Ausblick

Resistive supraleitende Strombegrenzer



- Ausnutzung des Quench des Supraleiters bei zu großer Stromdichte im **Kurzschlussfall**
- Supraleitendes Element R_{SC} mit geringer Induktivität
- Paralleler Widerstand R_P oder Induktivität L_P zur Strombegrenzung
- **Nennbetrieb:** Supraleitung \rightarrow **sehr geringe Impedanz**
- **Begrenzerbetrieb:** Normalleitung $\rightarrow R_{SC}$ sehr groß, Strom kommutiert auf R_P bzw. L_P
 \rightarrow **Strombegrenzung durch R_P bzw. L_P , Stromunterbrechung durch S**

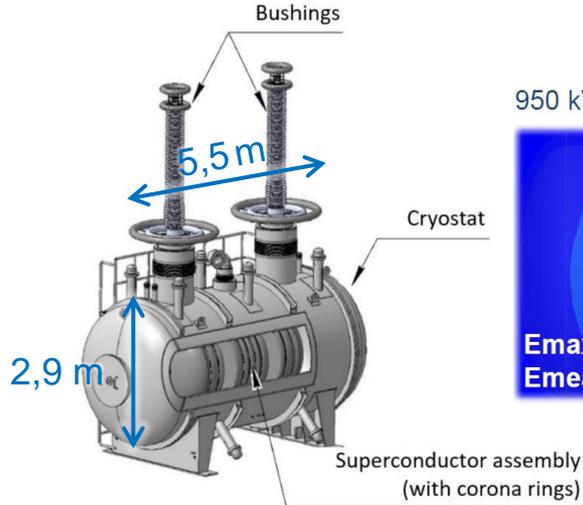
Resistive supraleitende Strombegrenzer



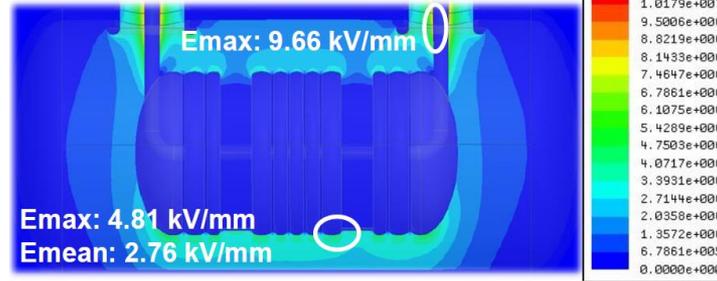
- Strombegrenzung ist Materialeigenschaft: **eigensicher**, kein Triggersignal notwendig
- **Schnelle Begrenzung** schon im ersten Stromanstieg
- **Selbstgenerierend** durch Rückkühlung
- In der Mittelspannung mehrfach realisiert und im Einsatz
- Weitere Anwendungen insbesondere in **Übertragungsnetzen** erwartet

Resistiver supraleitender Strombegrenzer in Moskau

[8]



950 kV lightning impulse E field simulation:



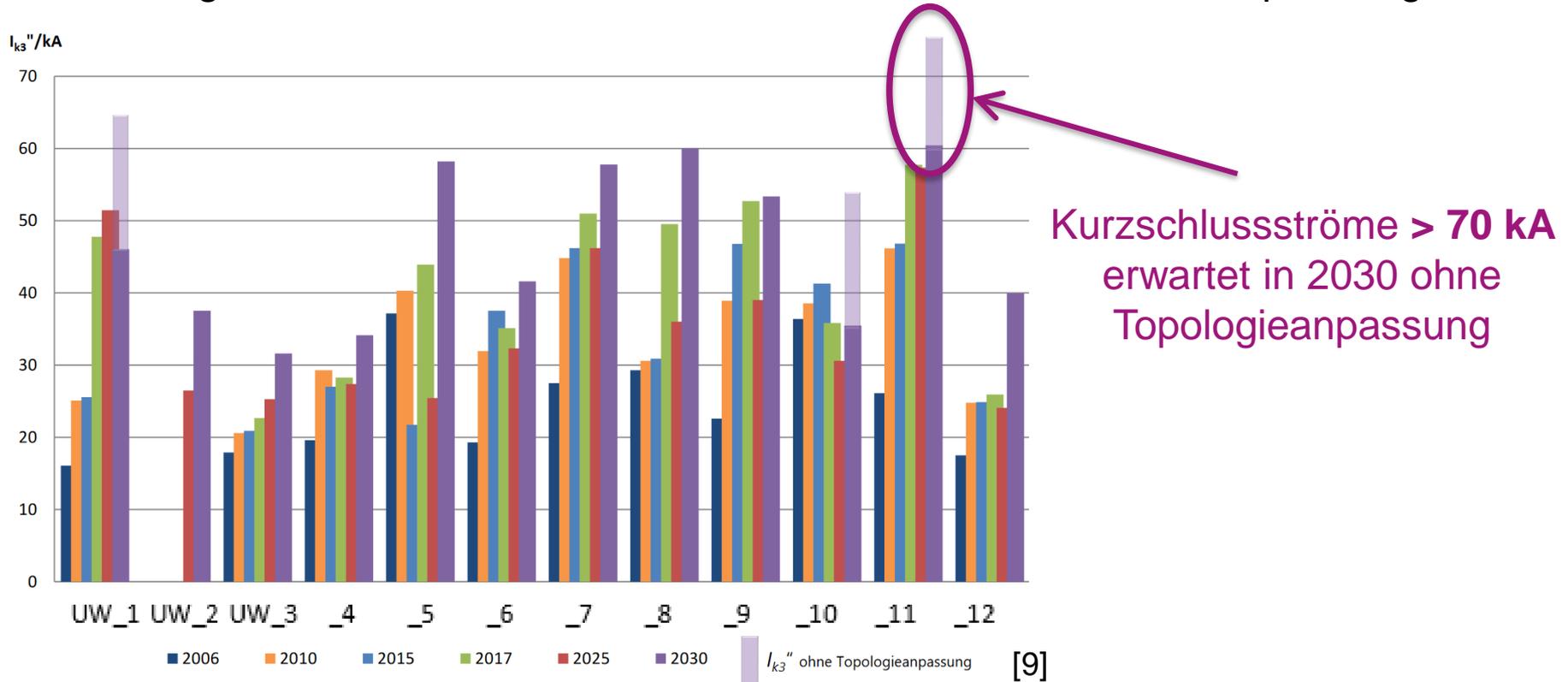
- **220 kV (252 kV), 1200 A**, getestete Kurzschlussstrombegrenzung von **38 kA auf 6,8 kA**
- Prüfspannungen: AC (1 min) – 440 kV, LI – 950 kV, SI – 325 kV
- Insgesamt 8,4 km ReBCO-Bandleiter pro Phase, gekühlt mit LN₂
- **In Betrieb in Moskau seit 2019**

Inhalt

1. Supraleitende Materialien
2. Resistive supraleitende Strombegrenzer
- 3. Konzept eines Strombegrenzers für 380 kV**
4. Zusammenfassung und Ausblick

Motivation für Strombegrenzer im 380 kV Netz

Entwicklung der Kurzschlussströme in Teilen des Deutschen Höchstspannungsnetzes

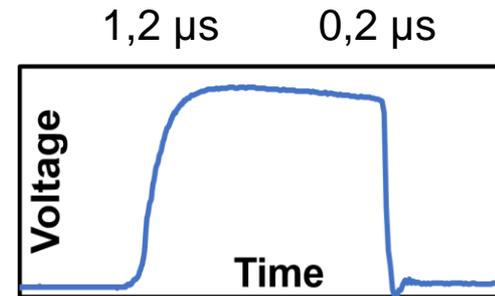


Anforderungen an Strombegrenzer im 380 kV Netz

	[A] AIS Bus Coupler	[B] Bus Section Coupling
Höchste Spannung für Betriebsmittel U_m	420 kV	420 kV
Bemessungsstrom I_n	5 kA	5 kA
Max. Kurzschlussstrom ohne Begrenzer I_k''	63 kA	63 kA
Max. begrenzter Strom mit Begrenzer $I_{k,lim}''$	19 kA	30 kA
Fehlerdauer t_d	0,25 s	0,25 s

Bemessungsspannungen

Kurzzeitwechselspannung (AC)	630 kV (rms)
Blitzstoßspannung (LI)	1425 kV (peak)
Abgeschnittene Blitzstoßspannung (LIC)	1570 kV (peak)
Schaltstoßspannung (SI)	1175 kV (peak)

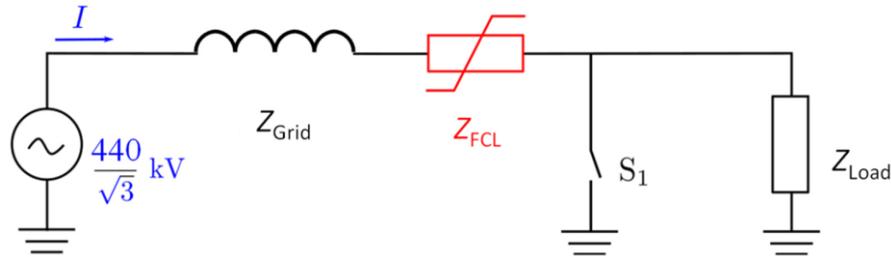


Anzahl paralleler HTS-Bandleiter

Kritischer Strom HTS-Band bei 77 K	700 A
Bemessungsstrom rms / peak (I_{\max})	5000 A / 7071 A
Anzahl paralleler HTS-Bänder	12
Gesamter kritischer Strom I_c	8400 A
Verhältnis I_{\max} zu I_c	0,84



Benötigte Menge an HTS-Bandleitern

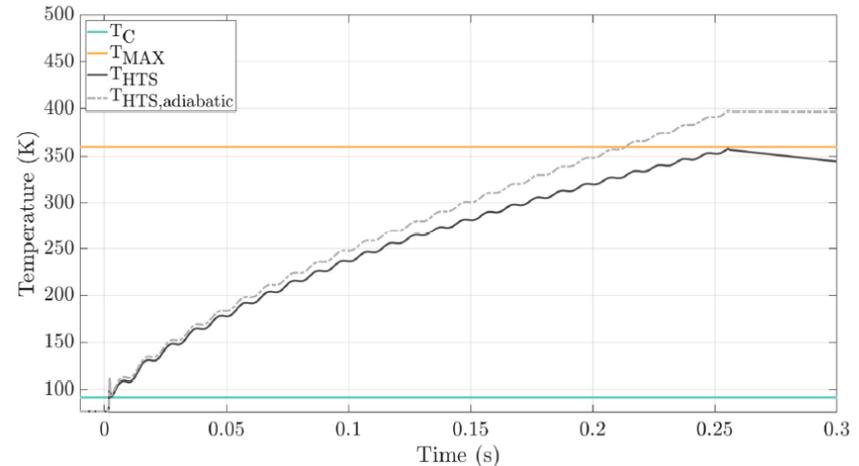
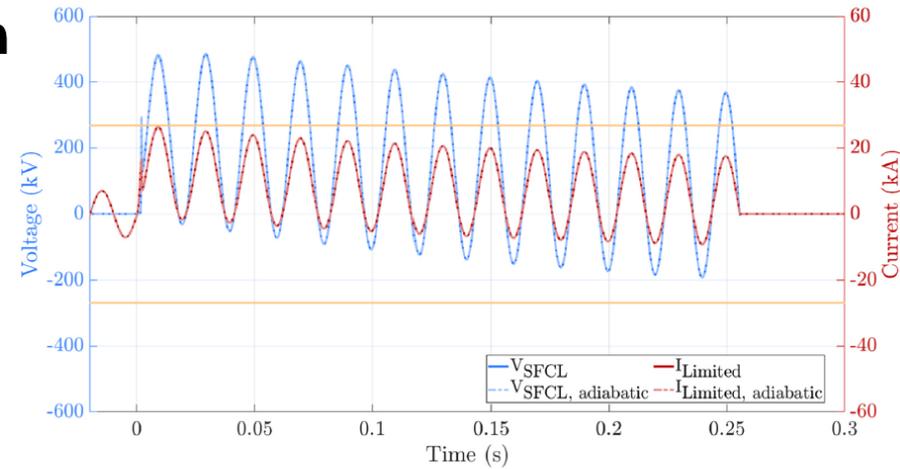


Kurzschlussberechnungen mit Variation

- Eigenschaften der HTS-Bänder
- Länge der HTS-Bänder
- Größe der parallelen Drosselspule

Ziel der Berechnungen

- Maximal begrenzter Strom eingehalten
- **Temperatur der HTS-Bänder < 360 K**



Benötigte Menge an HTS-Bandleitern

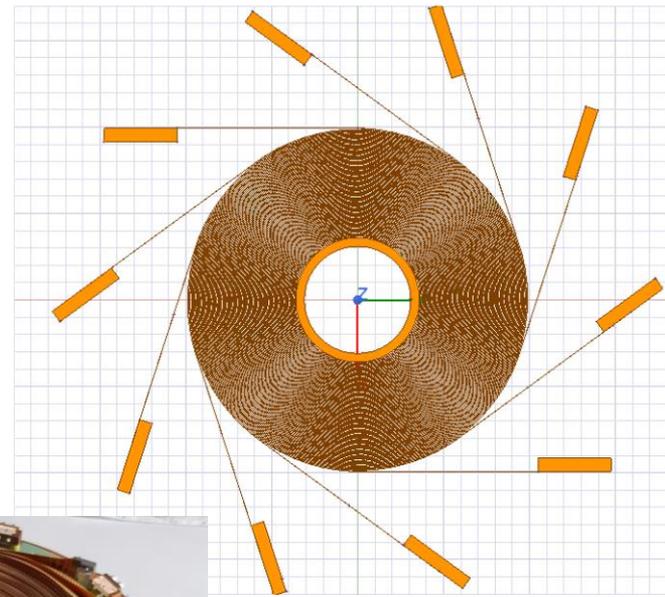
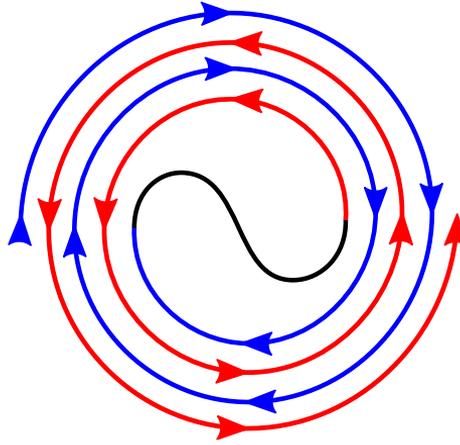
Kritischer Strom HTS-Band bei 77 K	700 A
Bemessungsstrom rms / peak (I_{\max})	5000 A / 7071 A
Anzahl paralleler HTS-Bänder	12
Gesamter kritischer Strom I_c	8400 A
Verhältnis I_{\max} zu I_c	0,84

	[A]	[B]
HTS-Bandleiterlänge pro Phase	12 x 6,5 km = 78 km	12 x 5,8 km = 70 km
Komplette Bandleiterlänge (3 Phasen)	235 km	210 km

Strombegrenzer-Modul

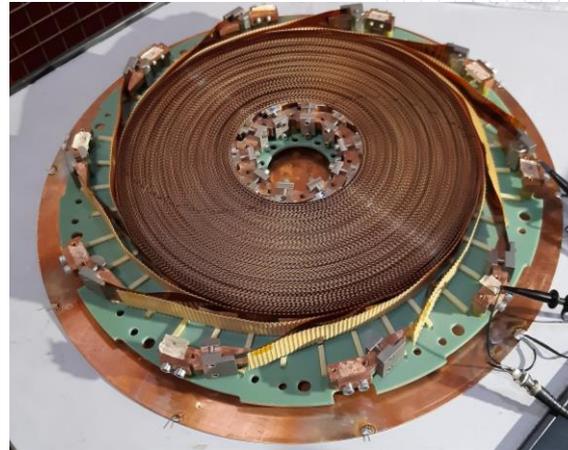
Bifilare Spule

- Kompaktes Design
- Geringe Induktivität
- Geringe AC Verluste
- Mehrere Wicklungen parallel



Designkriterien

- Einzelne HTS Stücklänge < 100 m
- Linearer Spannungsabfall < 20 kV
- Strombegrenzer-Element < 7 m
(= alle Module in Reihe)

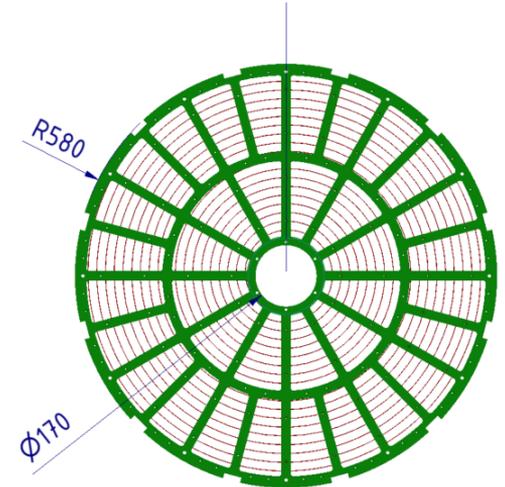


Strombegrenzer-Modul

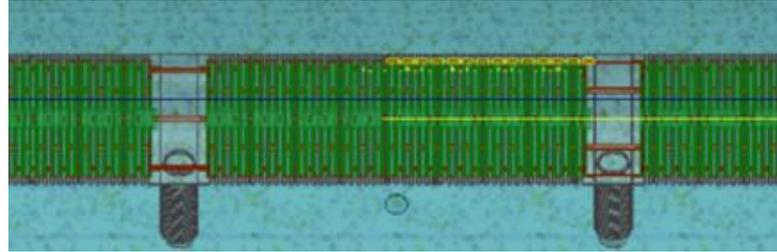
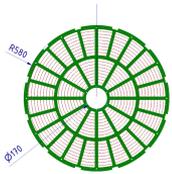
Mögliches Design mit den gegebenen Kriterien

- Twin-Tapes → 2 HTS-Bänder direkt parallel
- Bifilare Spule mit 6 Wicklungen parallel → 12 HTS-Bänder parallel

Strombegrenzer-Modul	[A]	[B]
Innerer Durchmesser	200 mm	
Äußerer Durchmesser	1100 mm	1000 mm
Wicklungsabstand	2 mm	
Einzelne HTS Stücklänge	39 m	32 m
Breite eines Moduls	25 mm	
Abstand zwischen Modulen	50 mm	

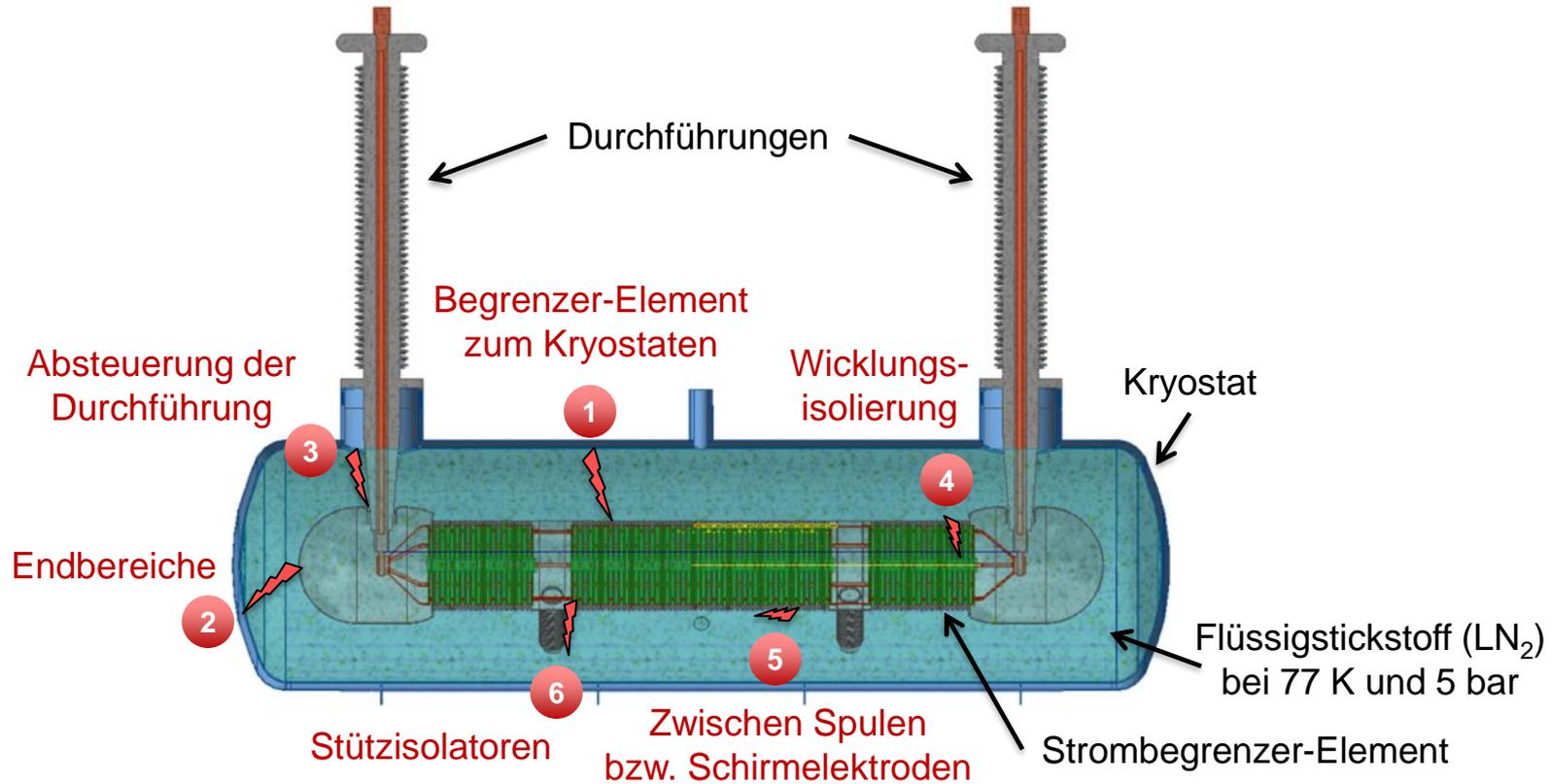


Strombegrenzer-Element = alle Module in Reihe



Strombegrenzer-Element	[A]	[B]
Anzahl der Module	85	93
Äußerer Durchmesser mit Schirmringen	1,3 m	1,3 m
Gesamtlänge	6,4 m	7,0 m
Linearer Spannungsabfall	18,5 kV	16,9 kV

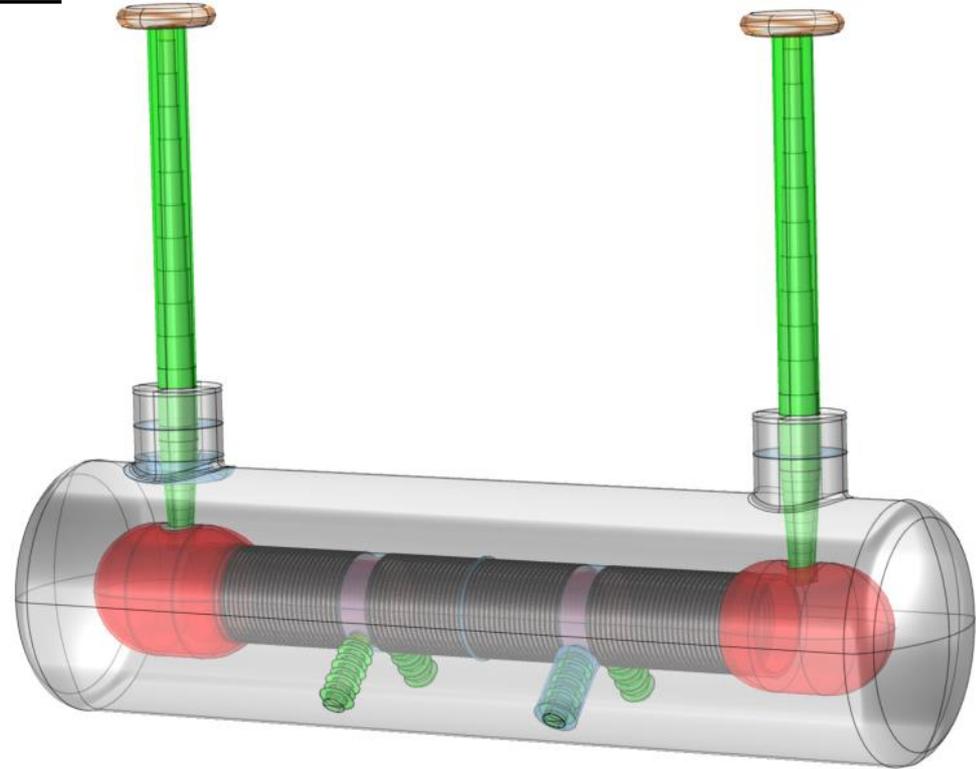
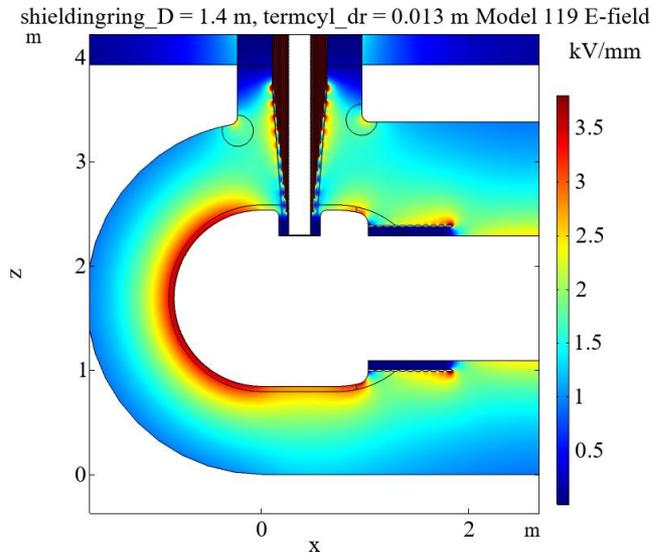
Hochspannungsdesign



Hochspannungsdesign

Elektrische Feldberechnungen mit Comsol

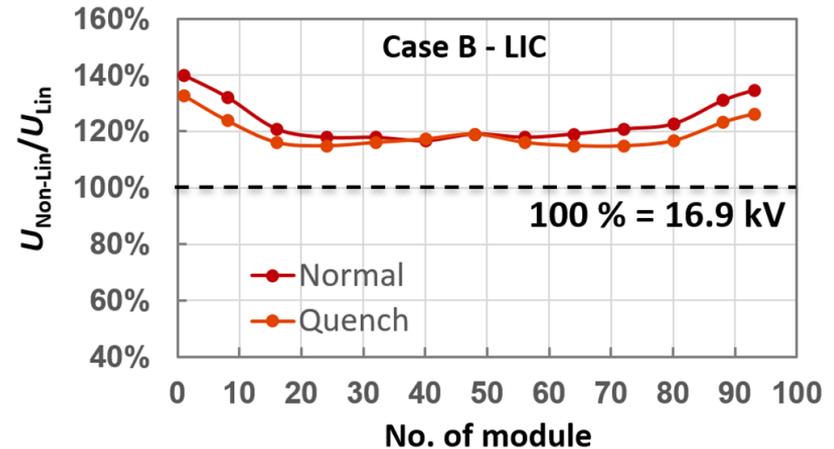
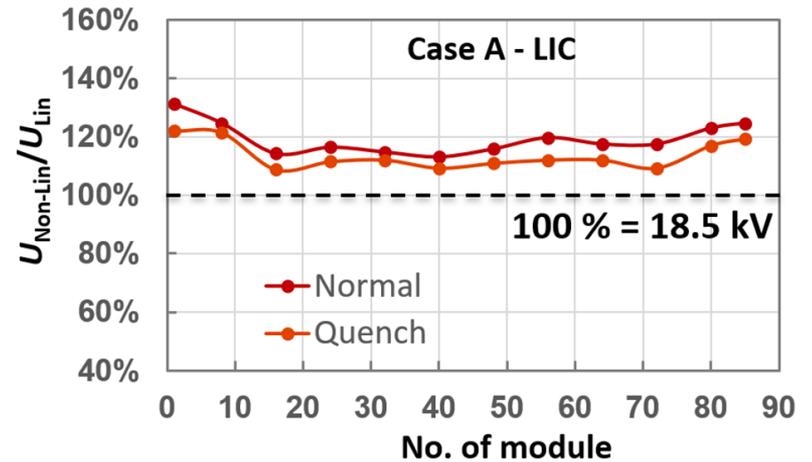
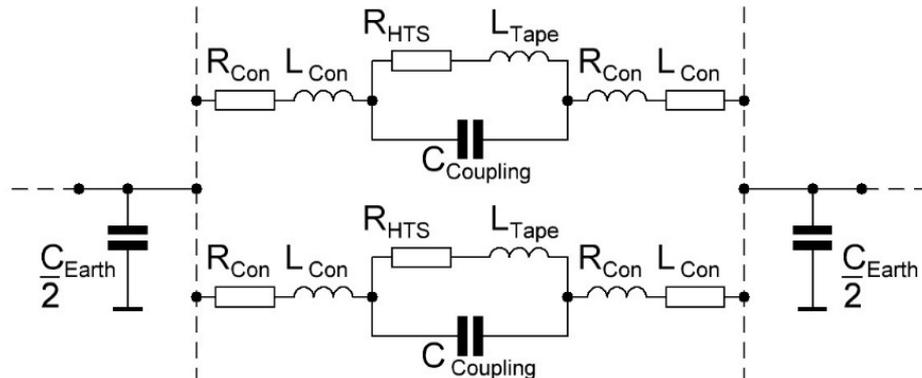
- Max. Spannung: 1570 kV (LIC)
- Max. Feldstärke in LN₂: **3,8 kV/mm**



Hochspannungsdesign

Netzwerkberechnungen der nicht linearen Spannungsverteilung bei LIC-Belastung

- Einzelne Wicklungen mit konzentrierten Bauelementen nachgebildet
- **Max. Spannungsbelastung: 140 %**

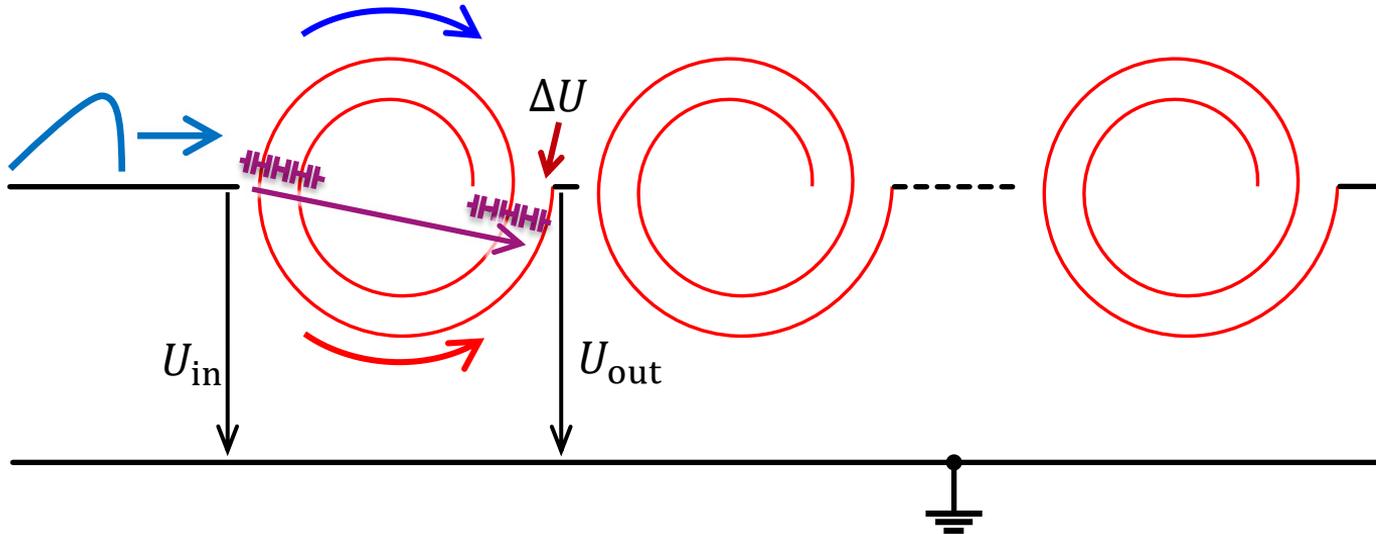


Hochspannungsdesign

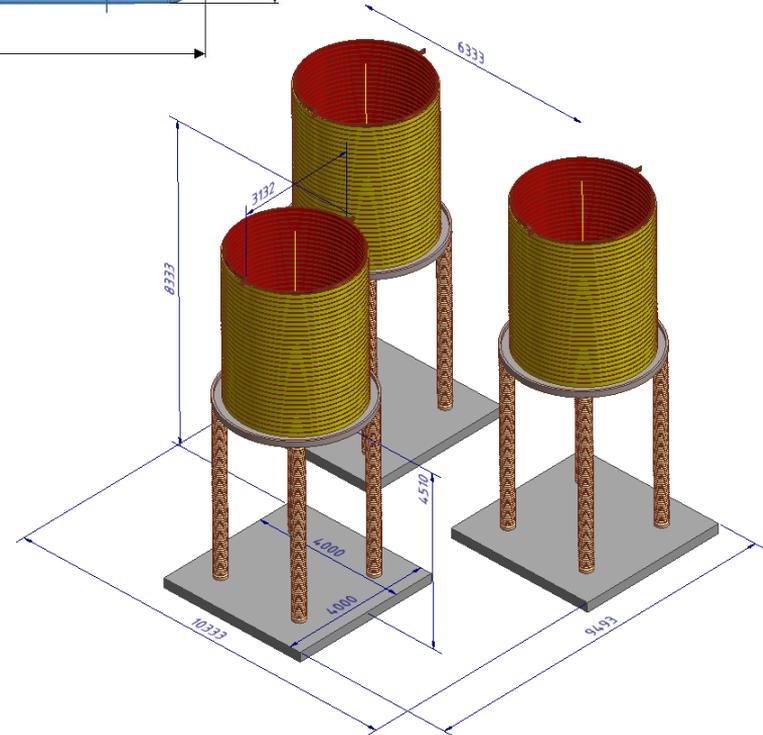
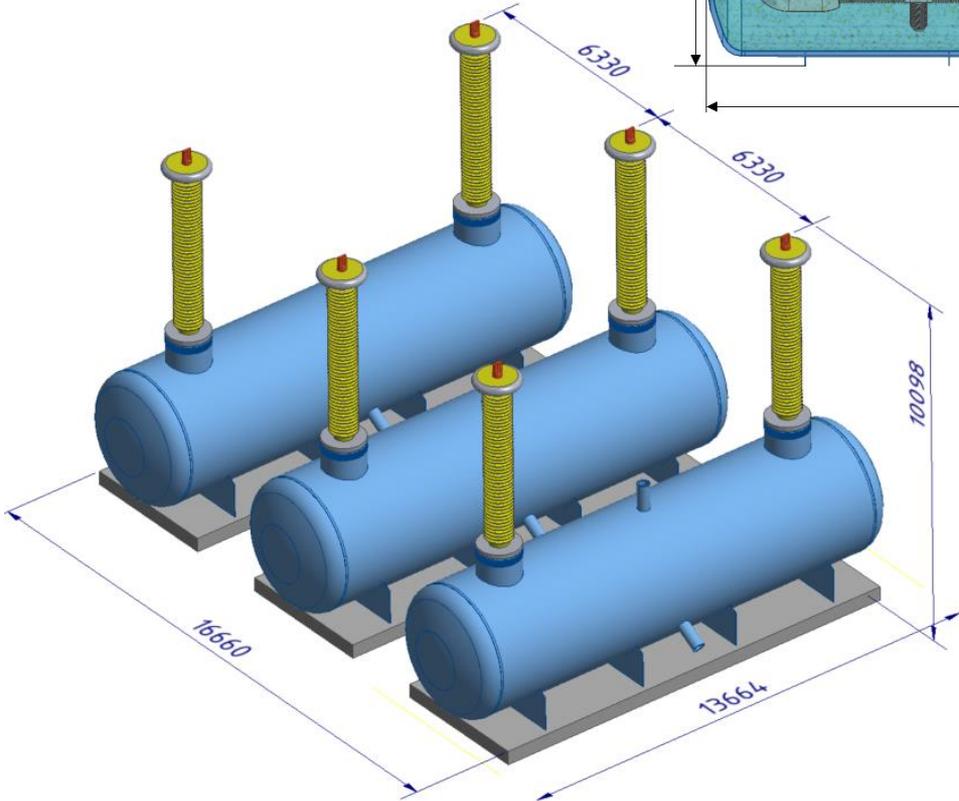
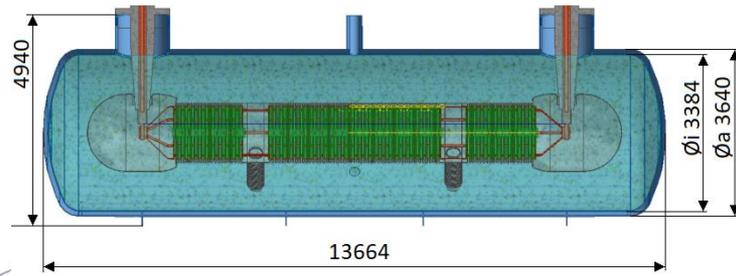
Messung und 3D-Simulation von Wanderwellenvorgängen

- Spannungsdifferenz $\Delta U = U_{\text{out}} - U_{\text{in}}$ belastet die Wicklungsisolation
- Ausbreitung entlang der Bandleiter
- Radiale Ausbreitung aufgrund kapazitiver Kopplung

Beide aktiv und führen zu
Spannungsbelastungen!



Gesamtsystem

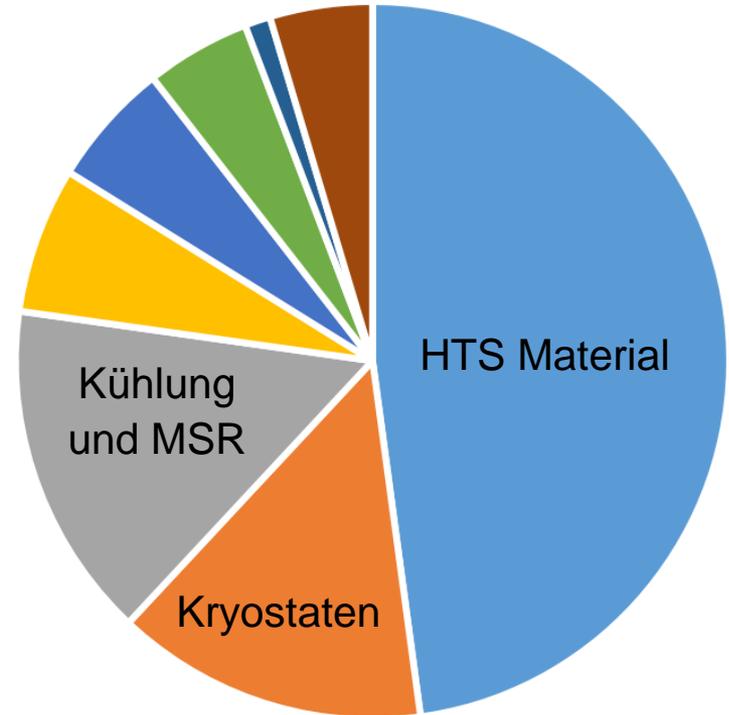


Investitionskosten (CAPEX) [A]

	Minimum	Medium	Maximum
Gesamtkosten	19.011.400 €	25.805.600 €	37.538.000 €
HTS Material (30 – 90 €/m)	7.408.800 €	12.348.000 €	22.226.400 €
Begrenzer-Module	1.637.400 €	1.701.900 €	1.766.400 €
Kryostaten	3.043.000 €	3.647.500 €	4.252.000 €
Durchführungen	1.213.000 €	1.453.000 €	1.693.000 €
Kühlung und MSR	3.385.000 €	3.930.000 €	4.325.000 €
Zusammenbau und Tests	250.000 €	300.000 €	350.000 €
Transport und weiteres	1.175.200 €	1.225.200 €	1.275.200 €
Drosselspulen	900.000 €	1.200.000 €	1.650.000 €

Investitionskosten (CAPEX) [A]

	Medium
Gesamtkosten	25.805.600 €
HTS Material (30 – 90 €/m)	12.348.000 €
Begrenzer-Module	1.701.900 €
Kryostaten	3.647.500 €
Durchführungen	1.453.000 €
Kühlung und MSR	3.930.000 €
Zusammenbau und Tests	300.000 €
Transport und weiteres	1.225.200 €
Drosselspulen	1.200.000 €



Inhalt

1. Supraleitende Materialien
2. Resistive supraleitende Strombegrenzer
3. Konzept eines Strombegrenzers für 380 kV
4. Zusammenfassung

Zusammenfassung – Design eines 380 kV, 5 kA Strombegrenzers

Eigenschaft	[A] 63 kA → 19 kA	[B] 63 kA → 30 kA
HTS-Bandleiterbedarf (12 mm, 700 A)	235 km	210 km
Moduldurchmesser	1,1 m	1,0 m
Anzahl Module in Reihe	85	93
Kryostat-Abmessungen	3,6 m Durchmesser - 13,6 m lang	
Masse eines Strombegrenzers	142 t, 94 t LN ₂	
Drosselspule parallel	72,9 mH	39,5 mH
Investitionskosten	19,0 – 37,5 Mio. €	18,2 – 35,1 Mio. €

Wir sehen keine technischen Hindernisse oder großen Hürden für die weitere Entwicklung eines 380 kV, 5 kA resistiven supraleitenden Strombegrenzers.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

380 kV Superconducting Fault Current Limiter Feasibility Study

Autoren der Studie (alphabetisch):

Prof. Dr. Tabea Arndt, KIT

Dr. Wesley de Sousa, KIT

Stefan Fink, KIT

Friedhelm Herzog, Messer

Prof. Dr. Christof Humpert, TH Köln

Stefan Huwer, Huwer Engineering

Marvin Nießen, TH Köln

Prof. Dr. Mathias Noe, KIT, Koordinator

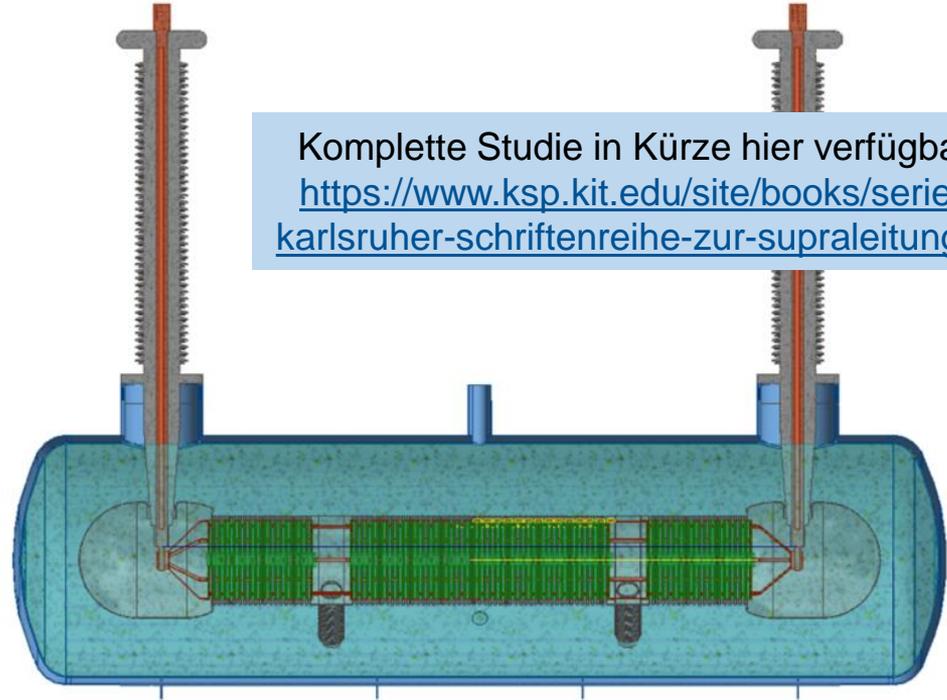
Dr. Sebastian Pfaller, TenneT

Hon. Prof. Dr. Stephan Pöhler, TenneT

Tobias Rodler, TenneT

André Schmid, TH Köln

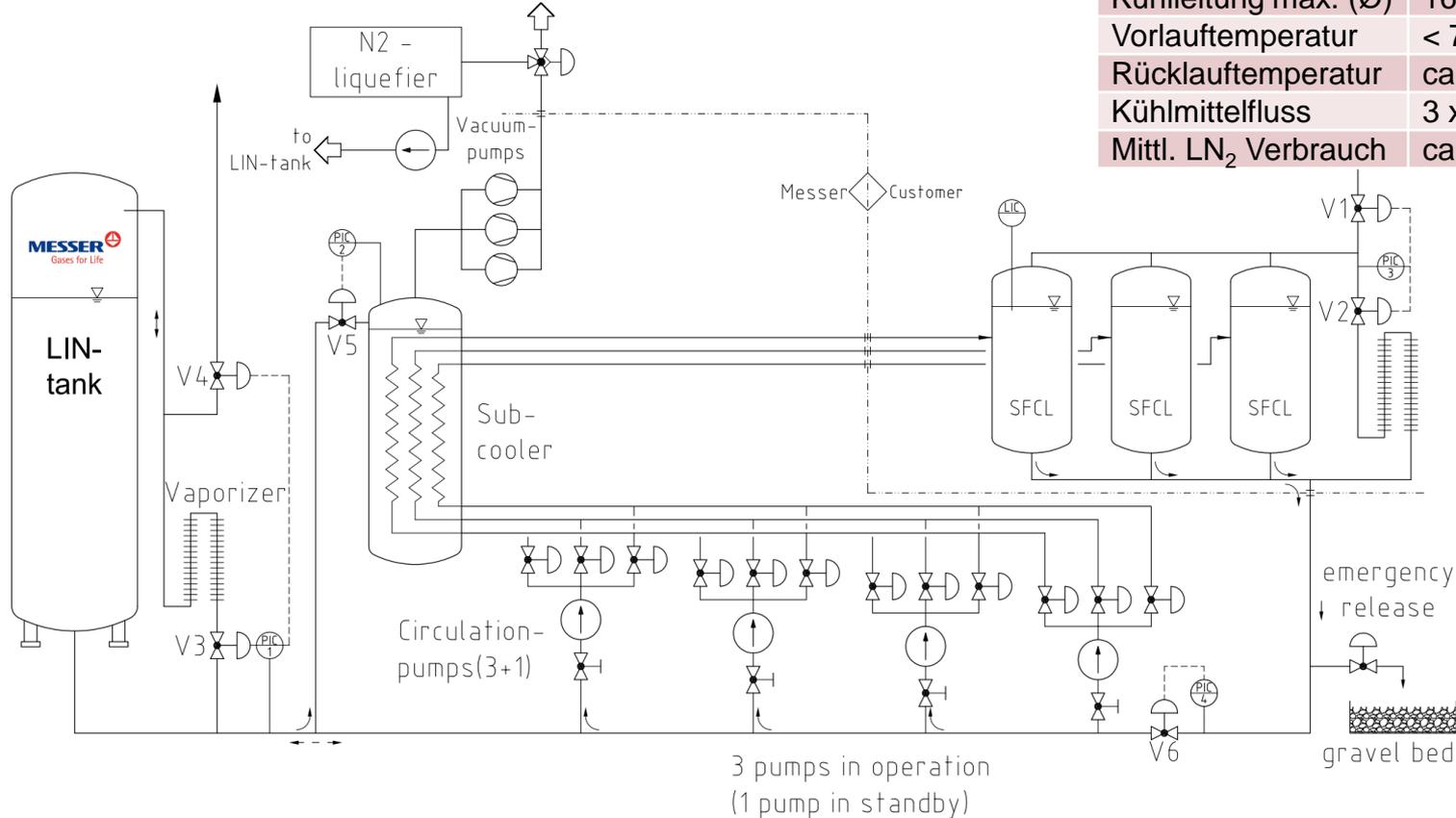
Komplette Studie in Kürze hier verfügbar:
<https://www.ksp.kit.edu/site/books/series/karlsruher-schriftenreihe-zur-supraleitung-3/>



Verluste bei 77 K

Load	AC loss [A]	AC loss [B]	Current lead	Cryostat	Total [A]	Total [B]
I_r	3 · 5.17 kW	3 · 4.59 kW	1274 W	~ 900 W	17.69 kW	15.97 kW
$0.9 \cdot I_r$	3 · 3.03 kW	3 · 2.69 kW	1162 W	~ 900 W	11.16 kW	10.15 kW
$0.8 \cdot I_r$	3 · 1.75 kW	3 · 1.55 kW	1071 W	~ 900 W	7.24 kW	6.65 kW
$0.7 \cdot I_r$	3 · 0.96 kW	3 · 0.86 kW	997 W	~ 900 W	4.81 kW	4.49 kW
$0.6 \cdot I_r$	3 · 0.49 kW	3 · 0.44 kW	937 W	~ 900 W	3.34 kW	3.17 kW
$0.5 \cdot I_r$	3 · 0.24 kW	3 · 0.21 kW	889 W	~ 900 W	2.51 kW	2.44 kW
$0.4 \cdot I_r$	3 · 0.09 kW	3 · 0.08 kW	852 W	~ 900 W	2.05 kW	2.02 kW
$0.3 \cdot I_r$	3 · 0.05 kW	3 · 0.05 kW	823 W	~ 900 W	1.90 kW	1.88 kW
0	0 W	0 W	800 W	~ 900 W	1.72 kW	1.72 kW

Offenes Kühlsystem (F. Herzog, Messer)



Kühlmittel	Flüssigstickstoff (LN ₂)
Druck	5 bar bis zu 8 bar
Kühlleitung max. (Ø)	16 (4,5) kW @ 71 K
Vorlauftemperatur	< 71 K
Rücklauftemperatur	ca. 77 K
Kühlmittelfluss	3 x 0,5 kg/s
Mittl. LN ₂ Verbrauch	ca. 120 kg/h (@ 4,5 kW)

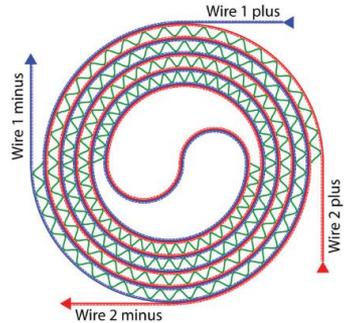
Resistiver supraleitender Strombegrenzer – SuperLimiter

[6, 7]



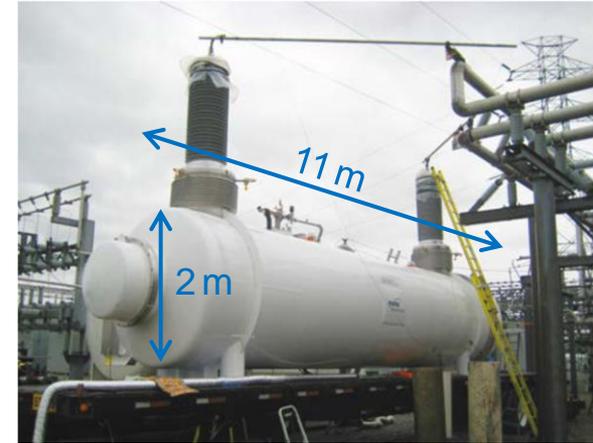
SIEMENS

Hexans



1 Stack = 3 bifilare
Spulen parallel

21 Stacks in Reihe



- **115 kV** (138 kV), **900 A**, max. Kurzschlussstrombegrenzung von **63 kA auf 40 kA**
- Bifilar gewickelte Spulen (Pancake) zur Reduzierung der Induktivität
- Insgesamt 3,4 km ReBCO-Bandleiter pro Phase
- Windungsisolierung: gewickelte PTFE-Isolierung, gewellter Spacer, LN₂ bei 74 K / 5 bar
- **Erfolgreiche Tests einer Phase 2012**

[6] Superconducting Fault Current Limiters: Technology Watch 2012. EPRI, Palo Alto, CA: 2012. 1024190

[7] H.-P. Kraemer, W. Schmidt, H. Cai, B. Gamble, D. Madura, T. MacDonald et al., Superconducting Fault Current Limiter for Transmission Voltage, Physics Procedia 36, S. 921–926, 2012, DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.230