

Supraleitende Generatoren für Windkraftanlagen: Design und Aufbau eines 10 kW Technologie-Demonstrators

Abgeschlossene Doktorarbeit: Dr. Fabian Schreiner;

Unterstützung: A. Drechsler, H. Fillinger, Dr. R. Gehring, U. Mirasch, U. Walschburger

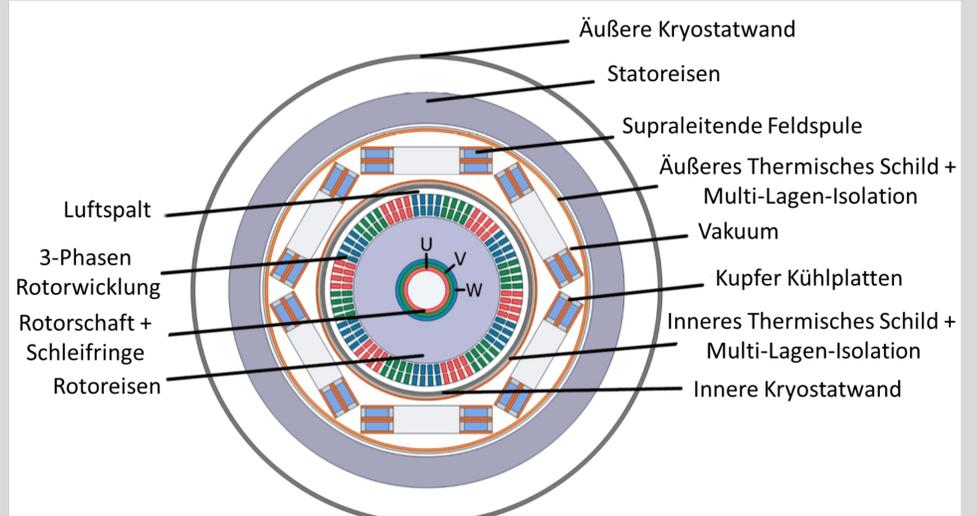
Betreuer: Prof. M. Noe

Warum supraleitende Generatoren?

Der steigende Bedarf an günstigen, erneuerbaren Energiequellen verursacht eine anhaltende Entwicklung hin zu Windkraftanlagen höherer Leistungsklassen. Generatoren dieser Leistungsklassen sind meist besonders schwer und weisen erhöhte Anforderungen bezüglich des Bauraums auf. Durch den Einsatz supraleitender Materialien mit hoher Stromtragfähigkeit kann die Leistungsdichte von elektrischen Maschinen durch Reduktion von Gewicht und Volumen erhöht werden. Gleichzeitig kann der Bedarf an seltenen Erden im Vergleich zu konventionellen, permanenterregten Maschinen reduziert werden.

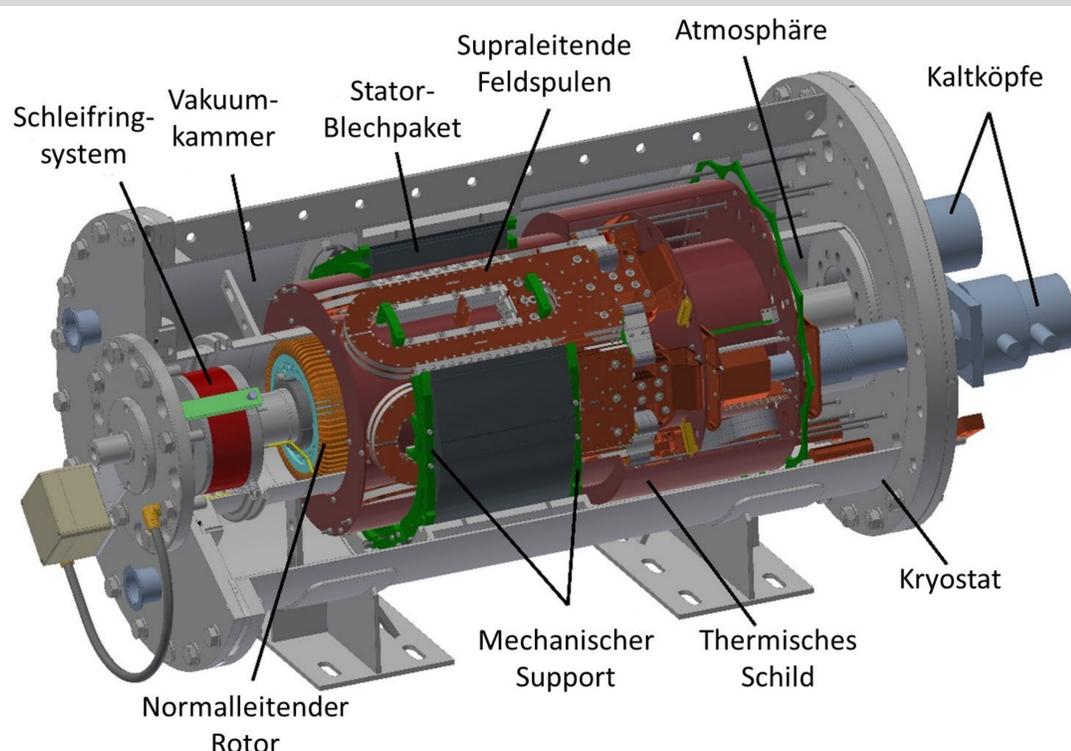
Generatordesign

Die supraleitenden Felderregerspulen befinden sich im Stator der Maschine, während die normalleitende Drehstromwicklung rotierend ausgeführt ist. Weiterhin sind Stator und Rotor als sogenannte Luftspaltwicklungen realisiert. Die supraleitenden Spulen werden mithilfe zweier Kleinkühler (Kryokühler) gekühlt.



Designparameter

Parameter	Wert	Einheit
Nennleistung	10	kW
Nenndrehzahl	389	min ⁻¹
Drehmoment	250	N·m
Stator:		
Polpaare	3	
Supraleitende Pancakespulen pro Pol	2	
Mittlere magn. Fussdichte im Luftspalt	0.63	T
Bemessungsstrom	450	A
Rotor:		
Spulenzahl (Kupfer)	72	
Windungen pro Spule	20	
Spulen pro Pol und Phase	4	



Kontakt: mathias.noe@kit.edu, tabea.arndt@kit.edu

ITEP: Tag der
offenen Tür



Supraleitende Generatoren für Windkraftanlagen: Nicht-isolierte supraleitende Felderregerspulen

Abgeschlossene Doktorarbeit: Dr. Fabian Schreiner;

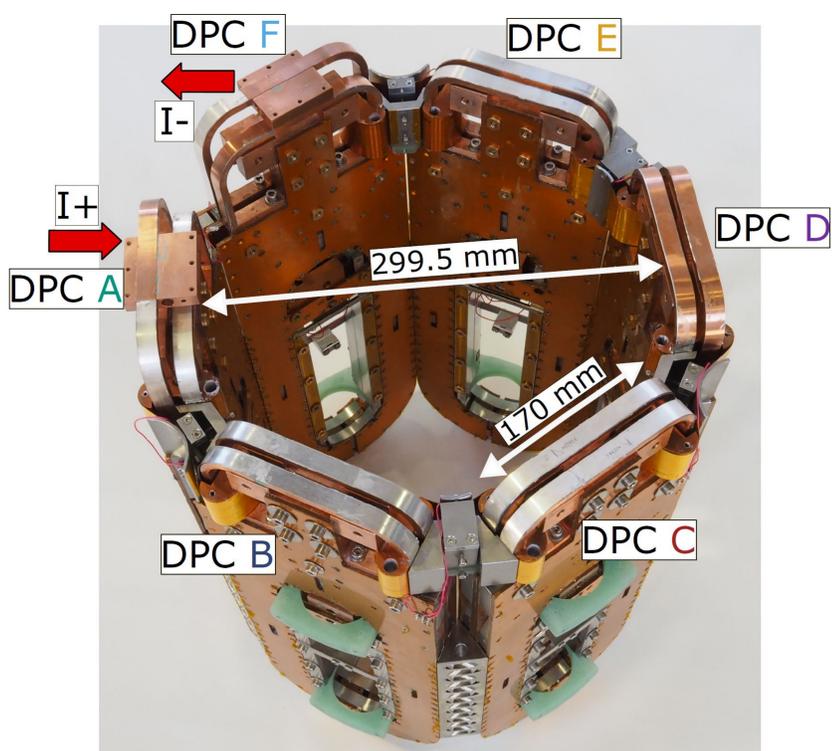
Unterstützung: A. Drechsler, H. Fillinger, Dr. R. Gehring, U. Mirasch, U. Walschburger

Betreuer: Prof. M. Noe

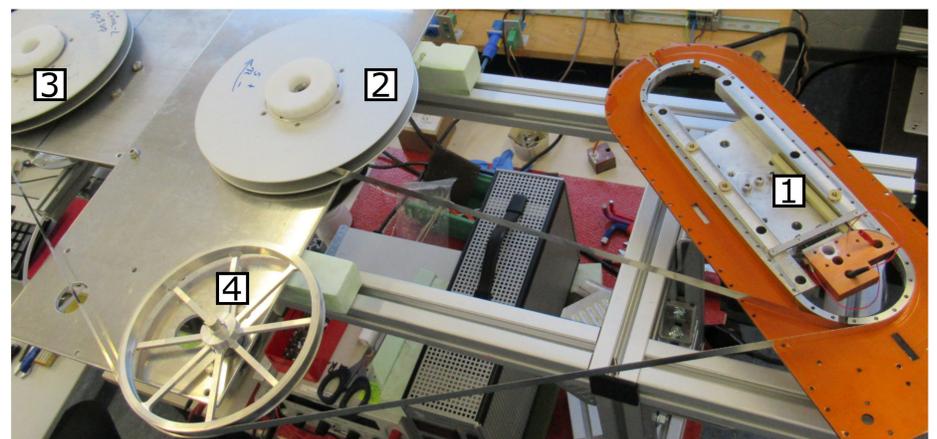
Nicht-isolierte REBCO-Spulen

Für den Aufbau des Demonstrators wurden 14 Pancake-Spulen entwickelt und hergestellt, die in einem späteren Schritt zu sieben Doppel-Pancake-Spulen zusammengefügt wurden. Sechs dieser Doppel-Pancake Spulen wurden im Generator eingebaut, während die siebte Spule für Tests verwendet wurde.

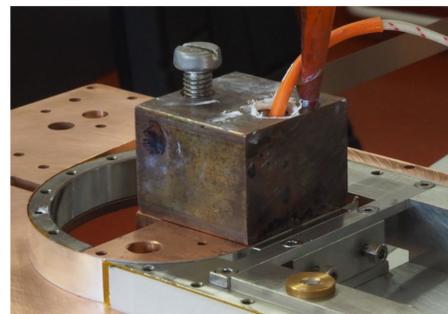
Durch den Verzicht auf eine Isolation der Wicklung wird die elektrische und thermische Stabilität der Spulen verbessert, so dass auch Ströme, die 50 % über dem Nominalstrom lagen, nicht zu einer Beschädigung führten. Nachteil sind erhöhte Verluste bei transienten Lade- und Entladevorgängen, die durch den Einsatz von normalleitenden Zwischenschichten reduziert werden können.



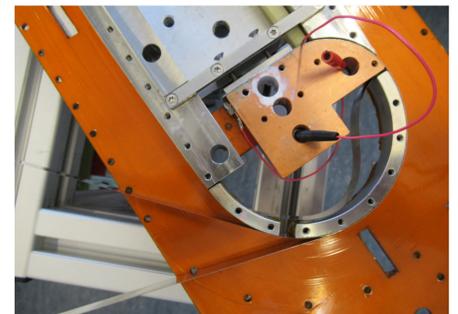
6-poliges Stator-Spulensystem mit Stromzuführungen



a)



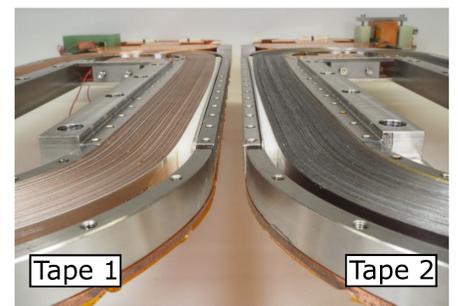
b)



c)



d)



e)

- Spulenwickelvorrichtung mit Spulenkörper [1], der Spule mit dem HTS-Band [2], der Spule mit dem Hastelloy™ C276-Band [3] und einer Umlenkrolle [4] zum Ausrichten des mitgespulten Hastelloy™ C276-Bandes.
- Löten der mittleren Verbindung an der Verbindungsklemme
- Beginn der Spulenwicklung um den inneren Spulenkörper. Das HTS-Band wird mechanisch an der Verbindungsklemme fixiert.
- Gesamtansicht eines gewickelten PCs, bei dem die obere Kupferplatte entfernt wurde. Der PC ist mit Band 1 gewickelt.
- Zwei mit unterschiedlichen HTS-Bändern gewickelte Pancake-Spulen ohne obere Kupferplatte.



Supraleitende Generatoren für Windkraftanlagen: Test des Generator-Demonstrators

Abgeschlossene Doktorarbeit: Dr. Fabian Schreiner;

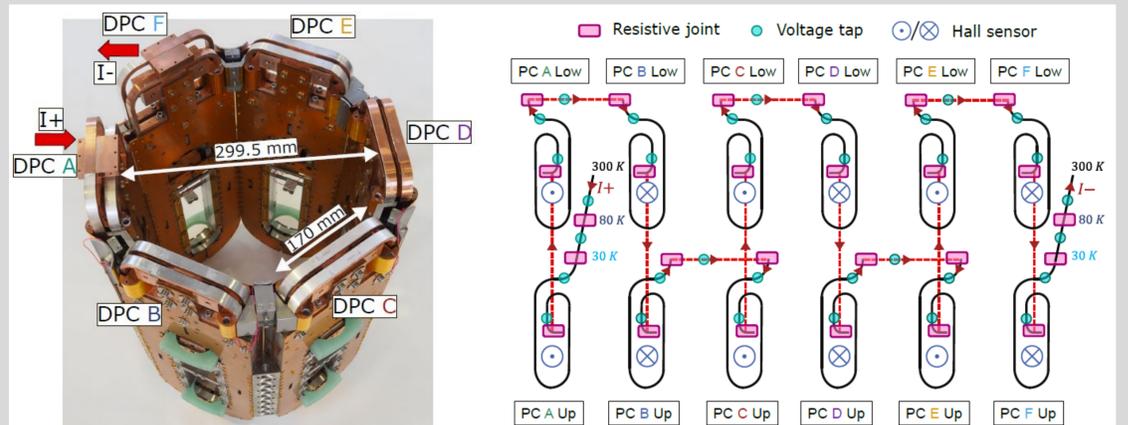
Unterstützung: A. Drechsler, H. Fillinger, Dr. R. Gehring, U. Mirasch, U. Walschburger

Betreuer: Prof. M. Noe

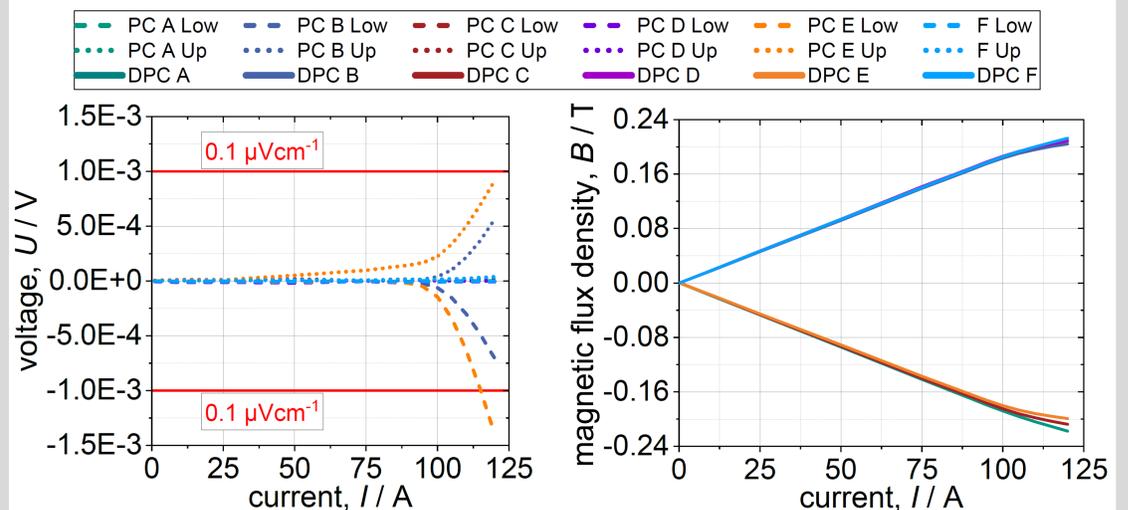
Stator-Test bei 77 K und 20 K

Das gesamte Stator-Spulensystem wurde zunächst in flüssigem Stickstoff getestet, wobei alle Spulen in Serie geschaltet wurden. Je nach verwendetem Leitertyp zeigten die Spulen unterschiedliche kritische Ströme, wobei die niedrigen kritischen Ströme bei Spulen mit demselben Leitertyp beobachtet wurden (PC B und PC E).

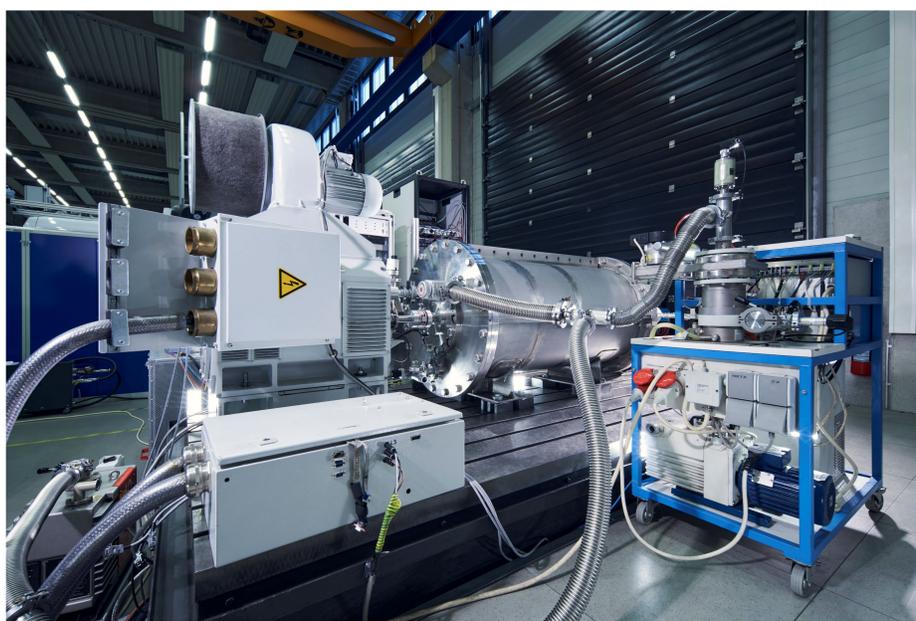
Bei einem späteren Test des im Statorcryostaten eingebauten Spulensystems mit Leitungskühlung wurde bei der Betriebstemperatur von 30 K ein kritischer Strom von 695.4 A gemessen, was dem 1.5-fachen des Nenn-erregersstroms entspricht.



6-poliges Statorsystem (links) und Serienschaltung der Statorspulen (rechts)



Messung des kritischen Stromes und der magn. Flussdichte in LN₂



Test auf dem Motorprüfstand

Der Generatordemonstrator sollte im Rahmen der Doktorarbeit von F. Schreiner auf dem Motorprüfstand am KIT Campus Ost getestet werden, jedoch zeigte einer der beiden Kryokühler einen Defekt, so dass die Betriebstemperatur nicht erreicht wurde.

Nach erfolgreichem Austausch des Kühlers soll der Test in der zweiten Jahreshälfte 2023 durchgeführt werden.

Supraleitender Generatordemonstrator auf dem Motorprüfstand am KIT Campus Ost

Kontakt: mathias.noe@kit.edu, tabea.arndt@kit.edu

ITEP: Tag der
offenen Tür



Supraleitende Kabel und Stromschienen: Hohe Stromdichten, geringe Verluste

Warum supraleitende Kabel und Stromschienen?

Supraleiter können hohe Gleichströme (DC) verlustfrei transportieren (Widerstand $R=0$). Die bei Wechselströmen (AC) auftretenden Verluste können durch einen geeigneten Kabelaufbau minimiert werden.

Supraleiter müssen zwar gekühlt werden, jedoch lohnt sich der Einsatz insbesondere dann, wenn hohe Stromdichten erforderlich sind (beengte Platzverhältnisse, z.B. bei Retro-Fitting) oder wenn das Gewicht des Stromleiters minimiert werden muss (z.B. bei elektrischen Flugzeugen).

Kabelentwicklung im Rahmen von BMWK-Projekten:

Im Rahmen verschiedener vom BMWK geförderter Projekte entwickelt(e) das ITEP mit zahlreichen Partnern aus Forschung und Industrie supraleitende Kabel und Stromschienen:

AMPACITY

Entwicklung eines 40 MVA-Kabels für Hochenergietrassen mit einer Länge von 1 km, Testbetrieb im Essener Stromnetz. ITEP-Beitrag: Entwicklungsarbeiten zum Design und zur Herstellung eines Hochtemperatursupraleiter-Hochstromkabels.

TELOS

Entwicklung thermisch-elektrisch optimierter Luftfahrt-antriebssysteme“; ITEP-Beitrag: Entwicklung eines 40 MVA Kabel-Demonstrators.

DEMO200

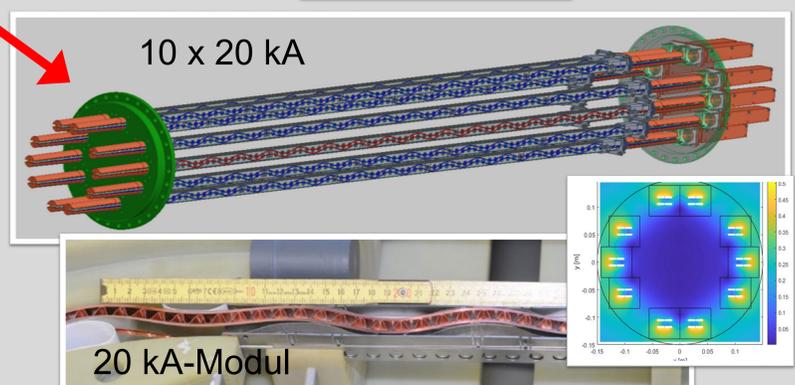
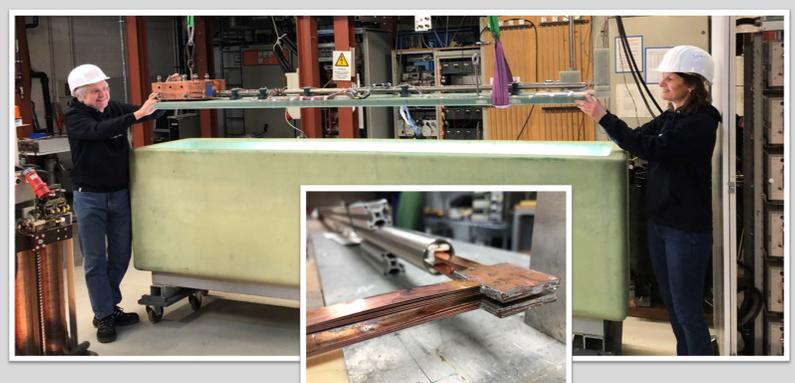
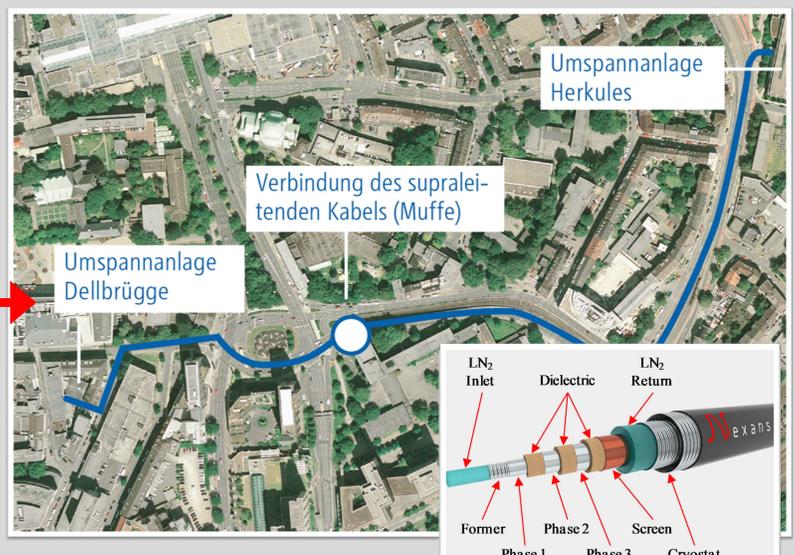
Entwicklung eines 200 kA Stromschienen-Demonstrators für den Einsatz in der Aluminiumschmelze. ITEP-Beitrag: Hauptkomponentenentwicklung mit REBCO-Bandleitern für 70 K Betrieb.

HighAmp

Entwicklung ultrakompakter und hochstromtauglicher Energieverteilungskabel mit Hochtemperatur-Supraleitern; ITEP-Beitrag: Auslegung, Entwicklung und Test von Teilkomponenten für 20 kV Demonstrator.

SuperLink

Innerstädtisches HTS Hochspannungskabel (110 kV) zur Absicherung kritischer Infrastruktur im Zuge der Energiewende; ITEP-Beitrag: Modellentwicklung zur Beschreibung des thermischen und elektromagnetischen Kabelverhaltens.



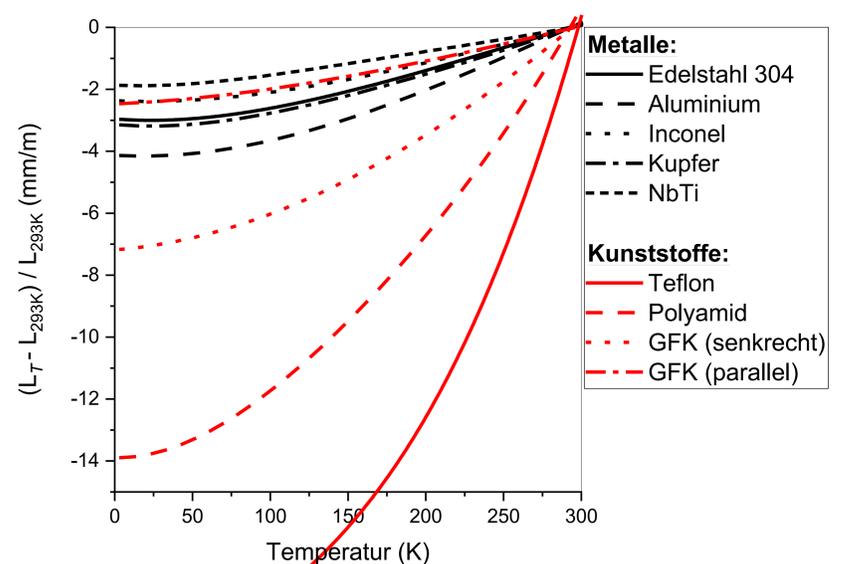
Supraleitende Kabel und Stromschienen: Thermische Längenänderungen bei kryogenen Anwendungen

Thermische Längenänderungen in Kabeln

Kühlt man verschiedene Materialien von Raumtemperatur (etwa $20^{\circ}\text{C} = 293\text{ K}$) auf kryogene Temperaturen, z.B. mit flüssigem Stickstoff (LN_2 , $T = -196^{\circ}\text{C} = 77\text{ K}$), so ändern sich die Längen sehr unterschiedlich.

Komponenten aus Edelstahl, Kupfer oder auch aus REBCO-Hochtemperatursupraleitern, zum Beispiel, schrumpfen um ca. 3 mm/m in allen Richtungen.

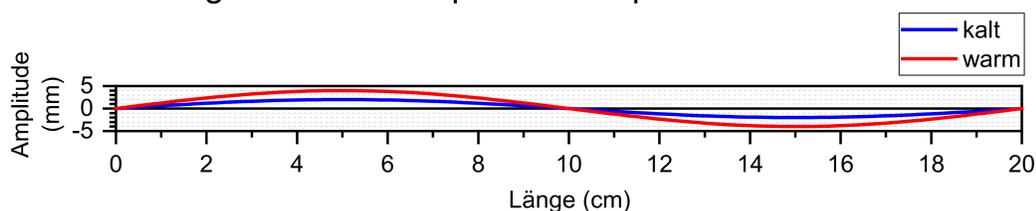
Problem: Während das kalte Supraleiterkabel im Kryostaten schrumpft, ändert sich die Länge des Kryostaten nicht. Ohne Ausdehnungskompensation kann das Kabel beim thermischen Zyklieren zerstört werden.



Ausdehnungskompensation in supraleitenden Kabeln (Kompensation auf Kabelstrecke):

Wellenform, variable Amplitude:

Beim Schrumpfen / Ausdehnen kann die Längenänderung über eine Änderung der Wellenamplitude kompensiert werden:



Spiralwicklung, variabler Radius

Beim Schrumpfen / Ausdehnen kann die Längenänderung über eine Änderung des Radius kompensiert werden:

Omega-Spirale, beweglich auf festem Radius

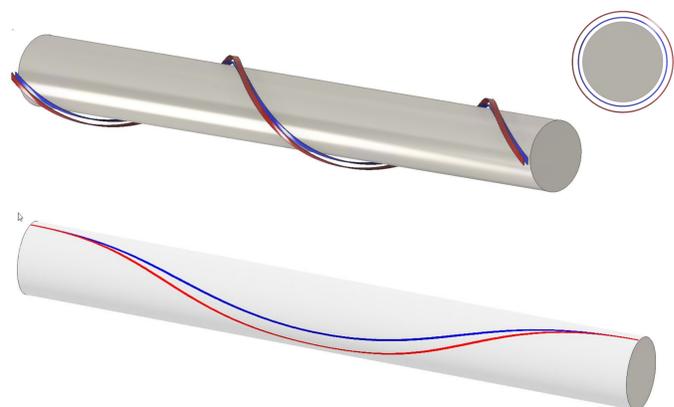
Beim Schrumpfen / Ausdehnen kann die Längenänderung über eine Bewegung auf Zylinderoberfläche kompensiert werden:



TELOS-Kabel: CAD-Konstruktion der Trägerstruktur mit Wellenführung (links). Trägerstruktur bestückt mit 2 Bandstapeln (rechts).



DEMO 200: 20 kA-Modul mit Wellenführung



Thermische Längenänderungen bei kryogenen Anwendungen: Experiment

LN₂

Experiment „Thermische Längenänderungen“

GfK-Platte mit Gewichten (6 x 33 kg = 198 kg) hängt an einem Rohr, das an einer beweglichen Achse befestigt ist.

Ausgangszustand:

Im warmen Zustand berührt die GfK-Platte den Boden (blaue Grundplatte des Gestells)

Experiment:

Über einen Trichter wird flüssiger Stickstoff (LN₂) in das Rohr gefüllt, das Rohr wird kalt.

Ergebnis:

Durch thermische Kontraktion schrumpft das Rohr und die GfK-Platte mit den Gewichten wird angehoben und kann frei schwingen.

Hintergrund:

Relative Längenänderung Stahl von Raumtemperatur bis 77 K (-196°C):

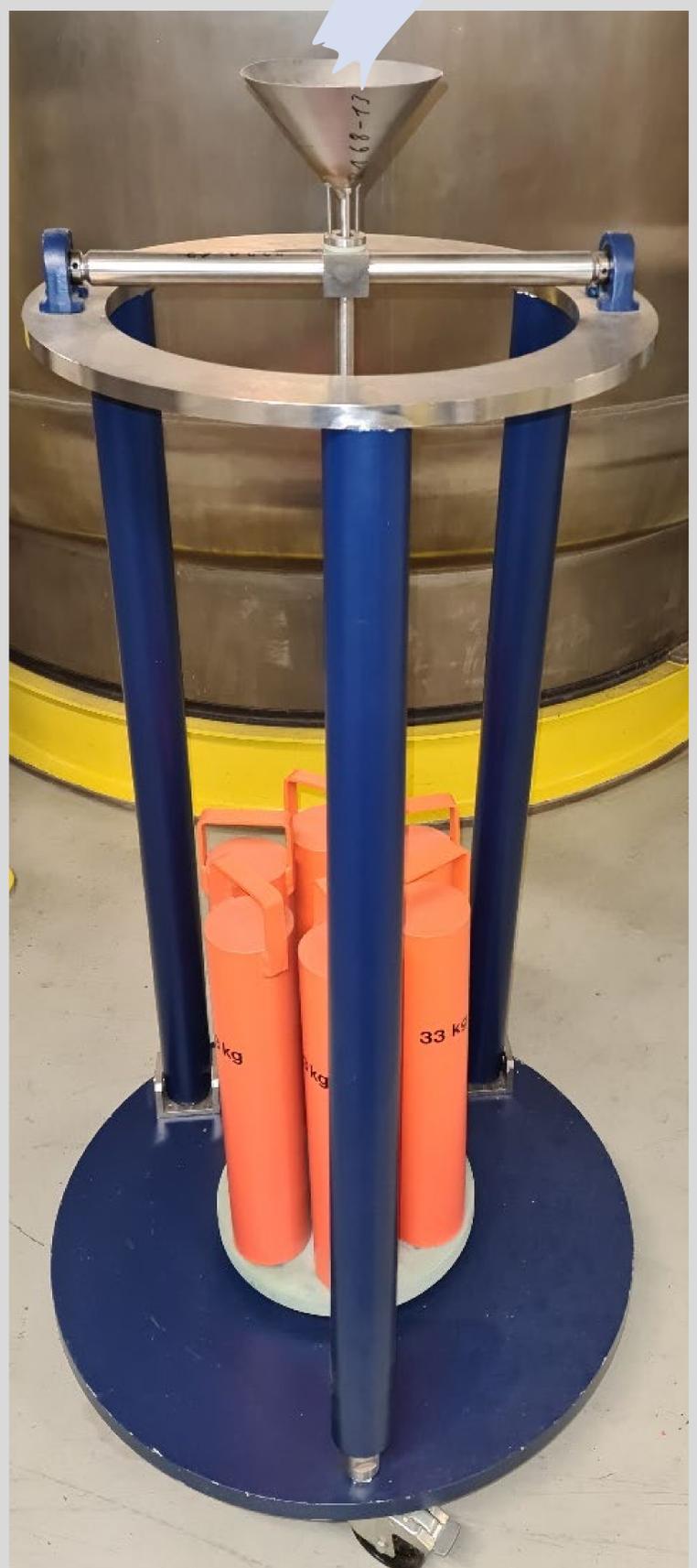
$$\frac{\Delta L}{L} = 0.3\% \sim 3 \frac{mm}{m}$$

→ Das 1.5 m lange Rohr wird etwa 4.5 mm kürzer.

Auswirkung für Kryoanwendungen:

Probleme durch unterschiedliche Kontraktion verschiedener Materialien oder durch unterschiedlich schnelles Abkühlen:

- Risse, Brüche, Biegungen
- Lockerung von Verschraubungen
- Klemmen von beweglichen Verbindungen
- ...



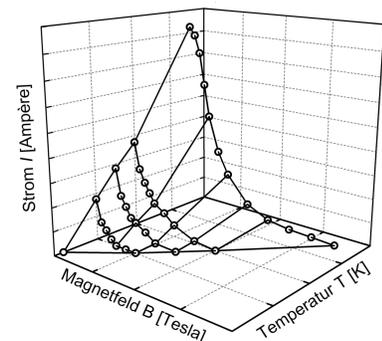
Apparatur zur Messung kritischer Ströme von Supraleitern in flüssigem Stickstoff

Grenzen der Supraleitung:

Die Supraleitung eines jeden supraleitenden Materials wird begrenzt durch:

- Kritische Temperatur T_C
- Kritische Stromdichte J_C
- Kritisches Magnetfeld B_C

Diese Parameter hängen stark von einander ab und sind Materialeigenschaften.

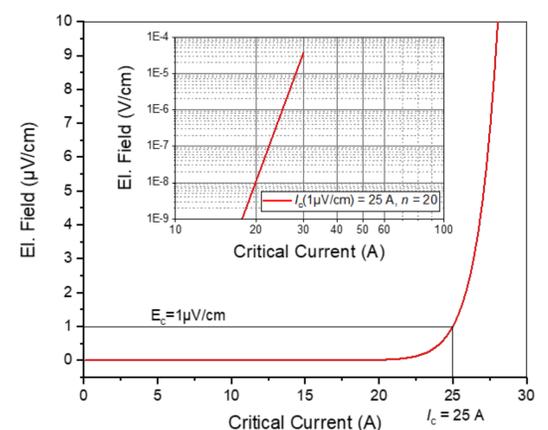
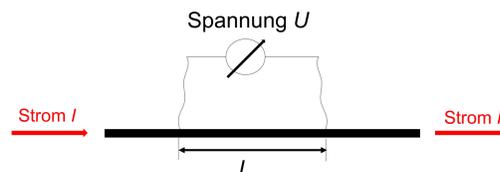


Messung des kritischen Stromes:

Die Charakterisierung von Supraleitern hinsichtlich ihrer Stromtragfähigkeit unter Einfluss von Temperatur, Magnetfeld oder mechanischen Belastungen, ist sowohl bei der Herstellung von Supraleitern als auch bei der Qualitätssicherung für Anwendungen wichtig.

I_c -Bestimmung: Messung von Strom I und Spannung U während einer Stromrampe. $U=0$ im supraleitenden Zustand, bei Annähern an den kritischen Strom steigt die Spannung und mit ihr das elektrische Feld $E = U/L$ an. Der kritische Strom I_c lässt sich für ein bestimmtes E -Kriterium E_c berechnen, wobei der n -Wert eine Maß für die Homogenität des Materials ist:

$$E(I) = E_c \cdot \left(\frac{I}{I_c}\right)^n$$



I_c -Messungen bei Entwicklung eines supraleitenden Kabelbaums für Satelliten (ESA-Auftrag):

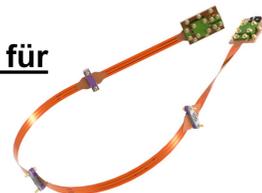
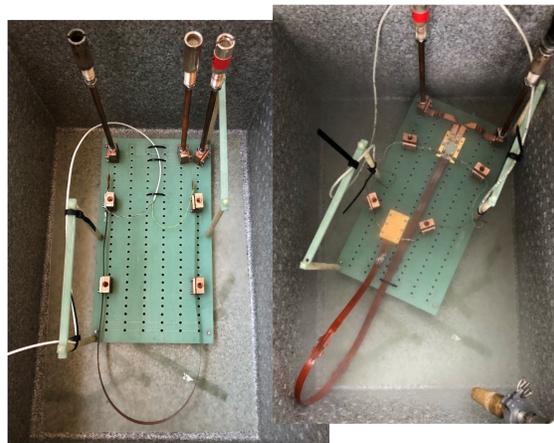
Zielanwendung: Stromzuführungen für Magnete auf Satelliten



I_c -Messung an REBCO-Einzelbändern:
6-fach Proben-träger

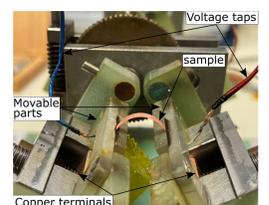


I_c -Messung an laminierten REBCO-Bändern (links) und am montierten Kabelbaum (rechts)



I_c -Messungen unter Biegung

Nur Biegung, verschiedene Biegeradien:



Biegung + Torsion

