

CMRC-gekühlte Stromzuführungen zur Erprobung in COMPASS

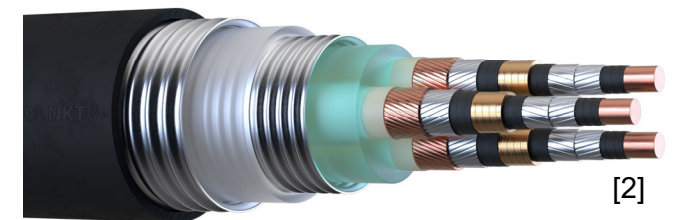
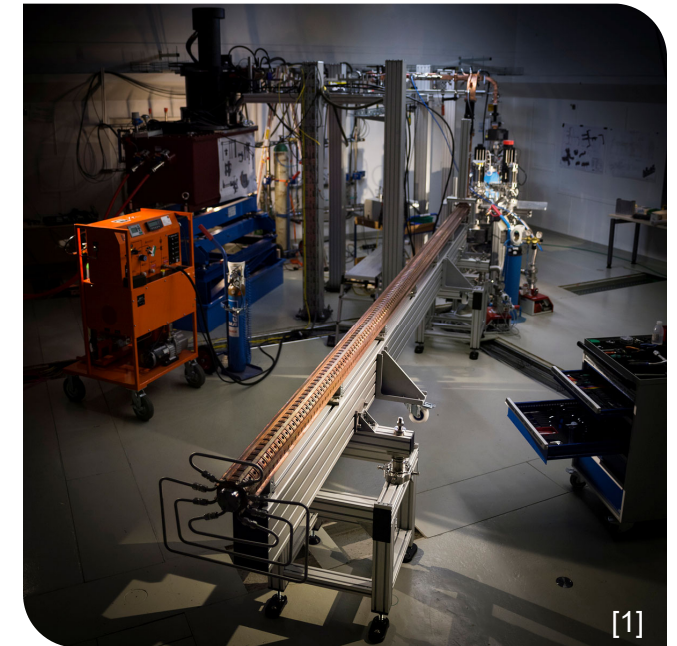
J. Arnsberg, F. Boehm, S. Grohmann – **DKV-Tagung 2023, AA I.07, 13.11.2023**

Motivation

- Bedarf an elektrischer Leistung für kryogene Applikationen
 - supraleitende Magnetsysteme z.B. für Teilchenbeschleuniger
 - supraleitende Kabel für Stromtransport
- Stromtransport von T_u zu T_0 über Stromzuführungen
- Stromzuführungen verursachen maßgeblichen Wärmeeintrag auf das kryogene System
 - ohm'sche Verluste in resistiven Abschnitten
 - Längswärmeleitung ins kryogene System



Optimierungsbedarf kryogener Stromzuführungen

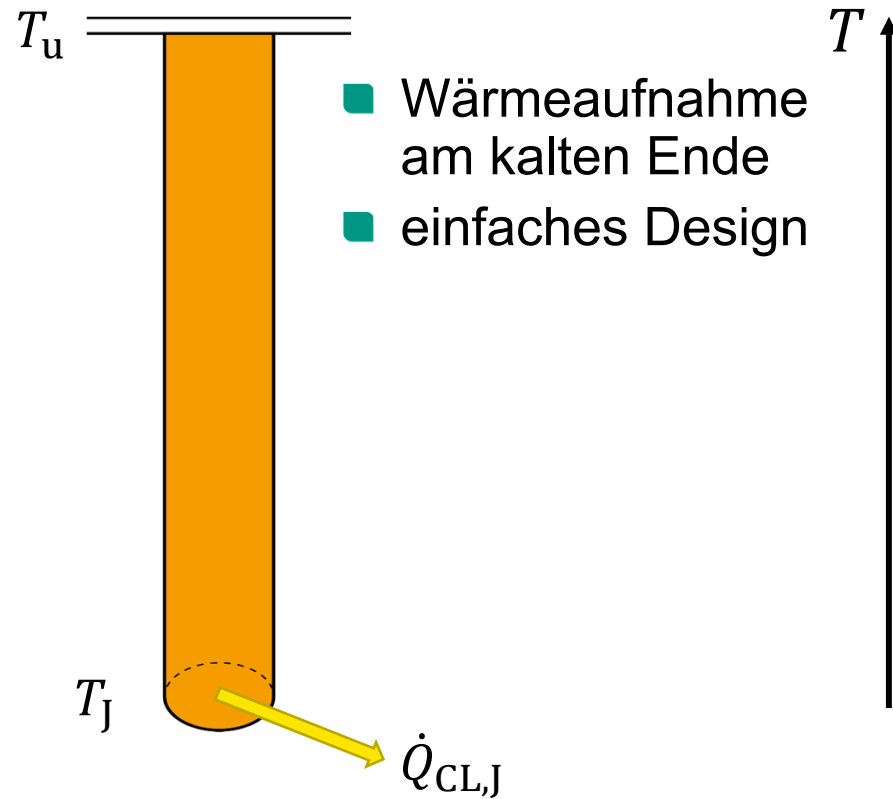


[1] Markus Breig, KIT, 2018

[2] NKT A/S, 2020

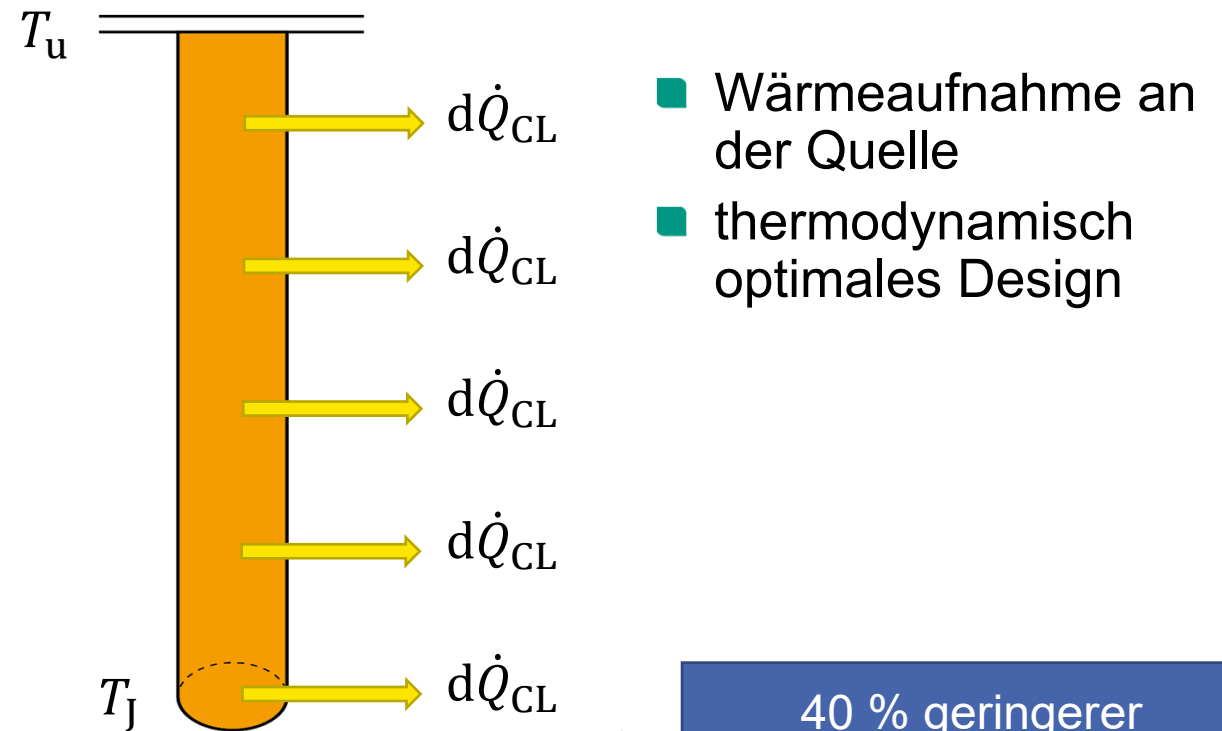
Optimierung von resistiven Stromzuführungen

- leitungsgekühlte Stromzuführung (CC-CL)
- kontinuierlich gekühlte Stromzuführung (∞ -CL)



$$P_{CC-CL} = 123 \text{ W/kA}^{[3]}$$

[3] Shabagin, 2022.



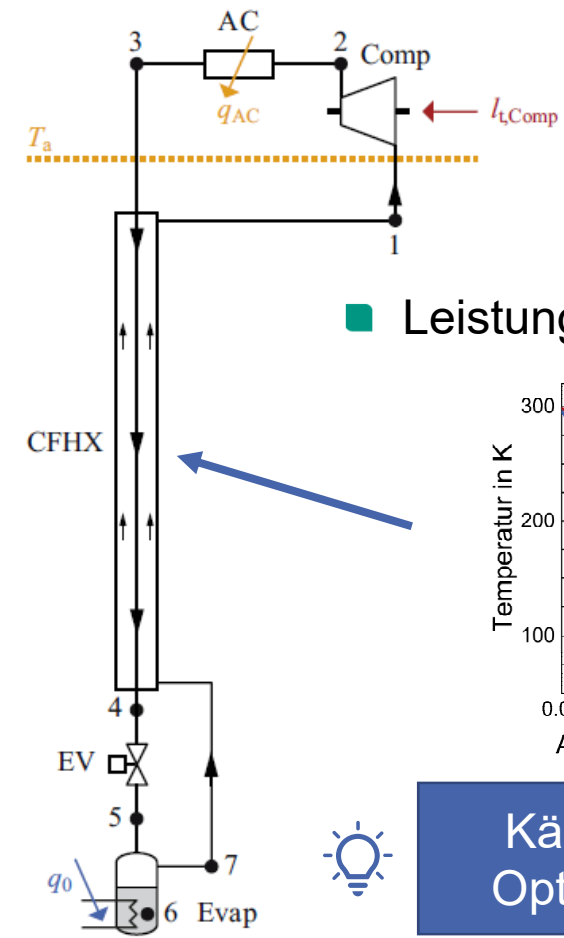
$$P_{\infty-CL} = 73 \text{ W/kA}^{[3]}$$



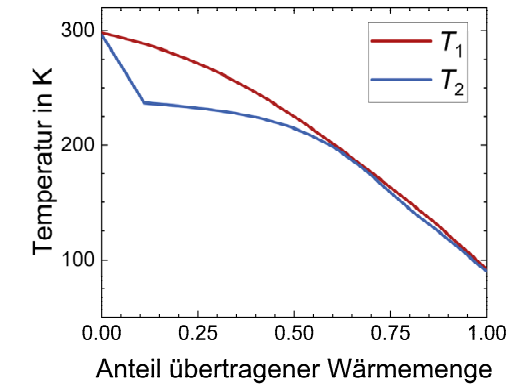
40 % geringerer Leistungsbedarf zur Kühlung von ∞ -CL

Kryogene Gemischkältekreisläufe (CMRC)

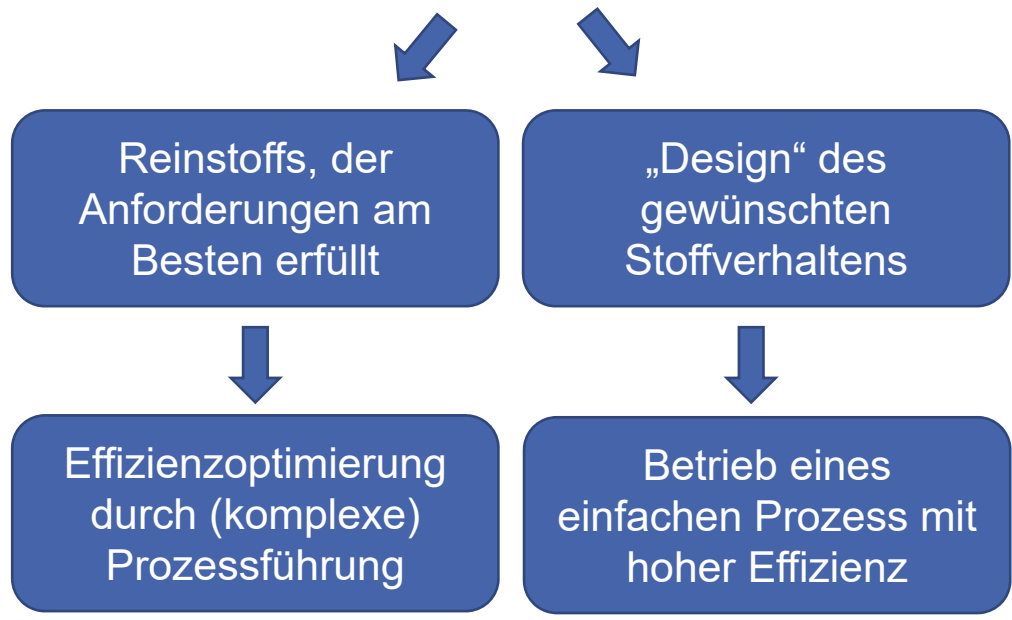
- Schlüsselkomponente in jedem Kühlsystem ist der **Arbeitsstoff**, insbesondere seine
 - Zustands- und Transportgrößen (EoS)
 - Zustandsänderungen während des thermodynamischen Prozesses / Kreislaufs



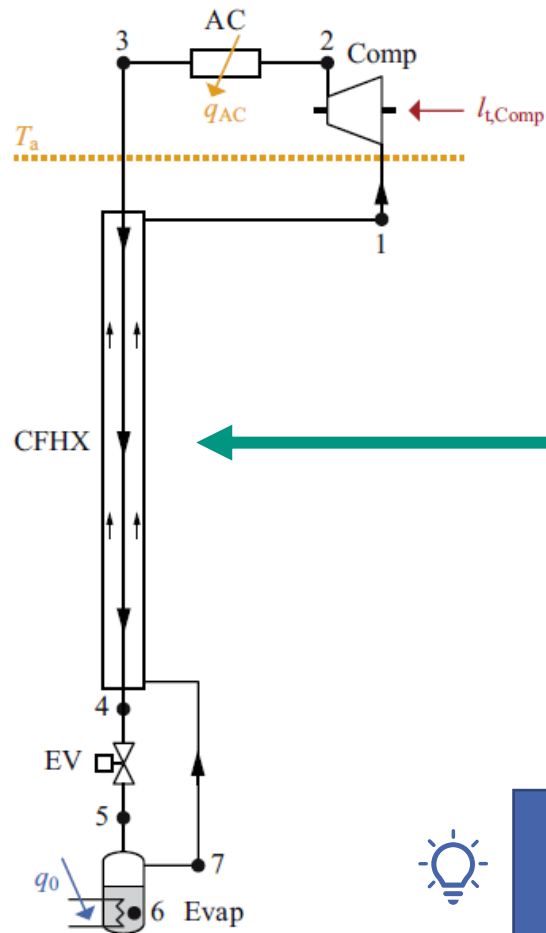
■ Leistungsbedarf: $P \propto \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2}$



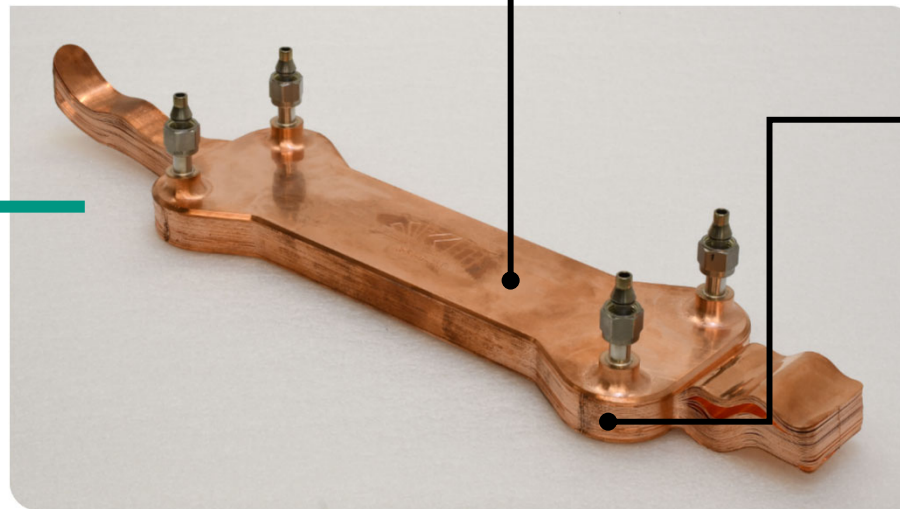
Kältemittelgemisch als Optimierungsparameter



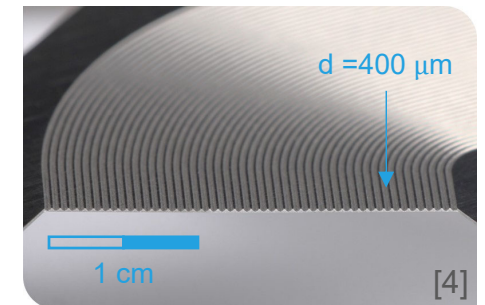
CMRC-gekühlte Stromzuführungen



Wärmeaufnahme an der -quelle und kleine Gradienten für **hohe Effizienz**



skalierbare Konstruktion aus Mikrokanal-Folien



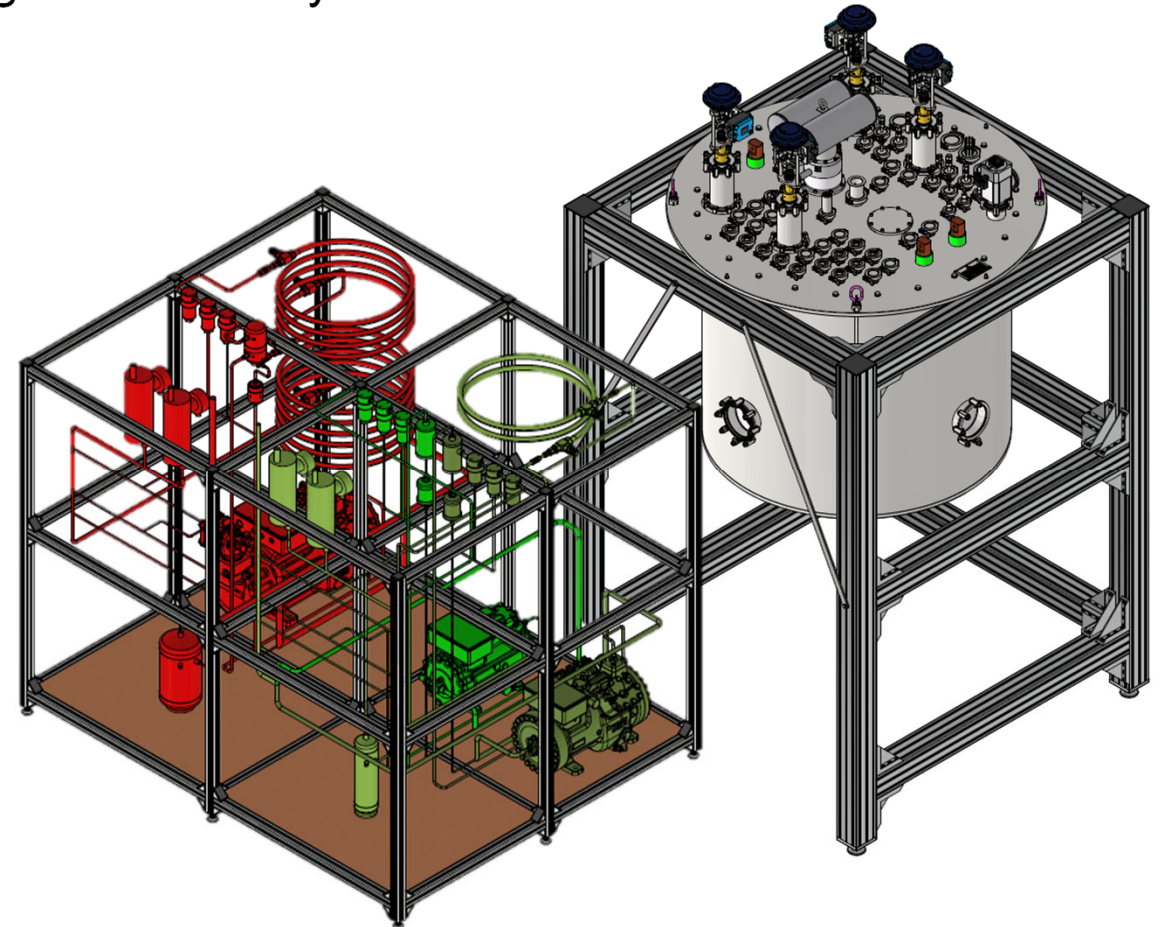
skalierbare Technologie für **kompakte, hoch-effiziente** Stromzuführungen **jeglicher** Leistungsklasse

[4] Gomse et al., 2016

Compact Accelerator Systems Teststand (COMPASS)

- Versuchsumgebung zur Entwicklung neuer, integrierter Kühlsysteme z.B. für kompakte Beschleunigersysteme
- Infrastruktur zur Erprobung CMRC-gekühlter Stromzuführungen
- Anlagenaufbau COMPASS:
 - Kryostatbehälter mit konventionellem Kühlsystem (Cryocooler)
 - zwei Gemischkältekreisläufe unterschiedlicher Leistungsstufen
- Ausführliche Vorstellung von COMPASS:

DKV 2022 – Arnsberg et al., „Aufbau des Compact Accelerator Systems Teststand (COMPASS)“

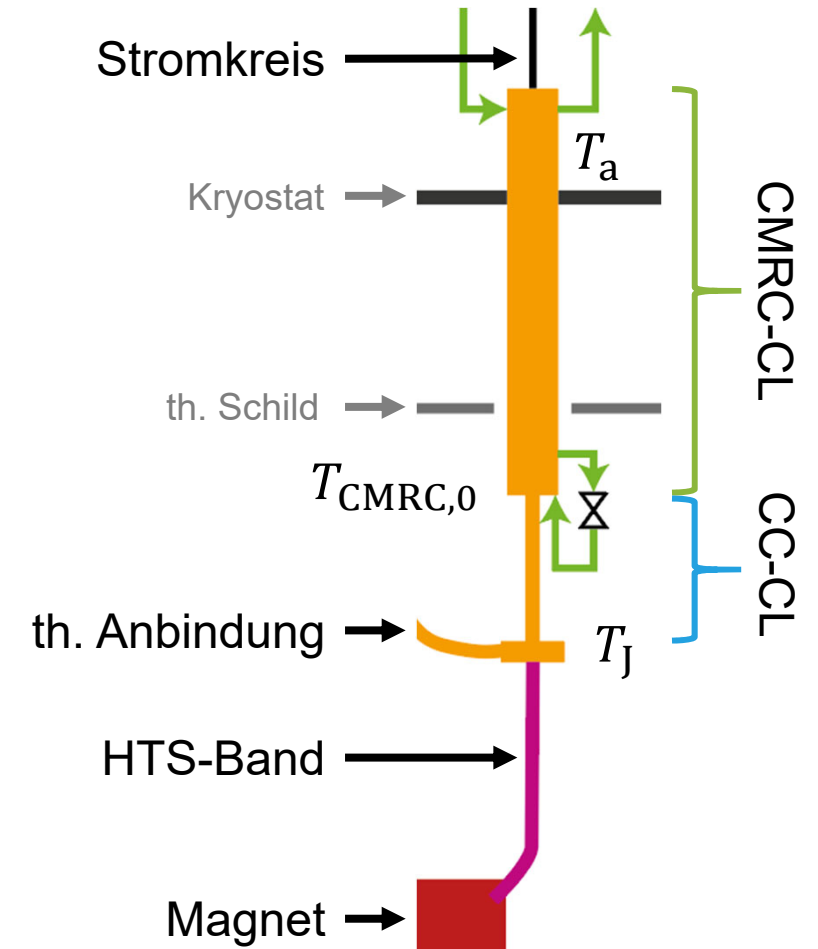


Aufbau „kombinierte Stromzuführung“

- hybride Stromzuführung für $I = 10$ kA
- resistiver Teil zweigeteilt
 - CMRC-Kühlung zwischen T_a und $T_{\text{CMRC},0}$
 - Berechnung mit numerischen Modell
 - Kühlung mit Cryocooler zwischen $T_{\text{CMRC},0}$ und T_J
 - Lösung der 1D-Temperaturfeldgleichung
- Antriebsleistungen
 - Verdichterkennfeld von COMPASS-Verdichter
 - Datenblatt^[5] GM-Cryocooler von Cryomech

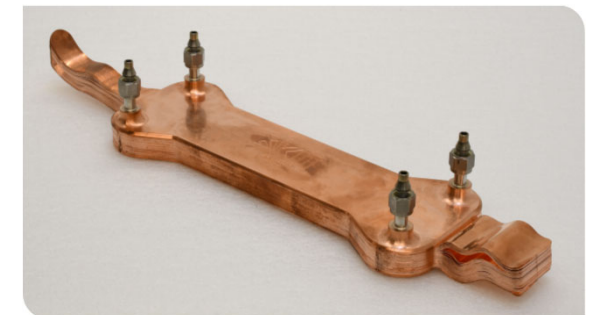
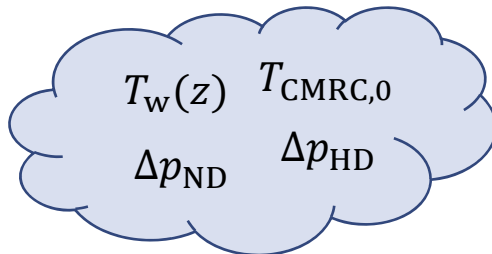
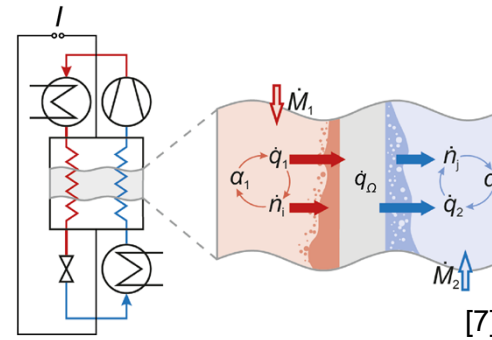
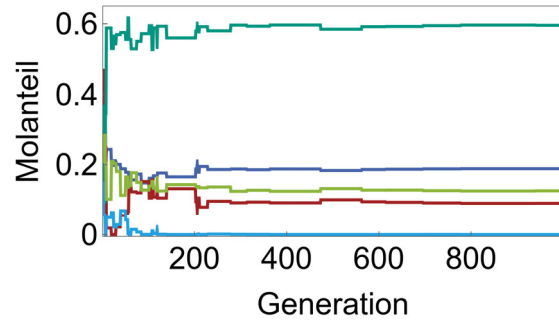


Ziel: Minimierung der Antriebsleistungen von CMRC-Kreislauf und Cryocooler



[5] Bluefors Oy, 2023

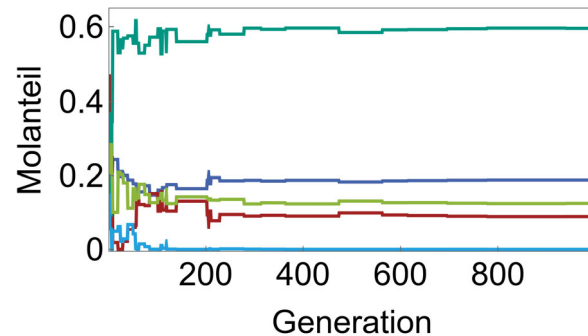
Vorgehen zur Optimierung einer CMRC-CL



[7] Gomse et al., 2018

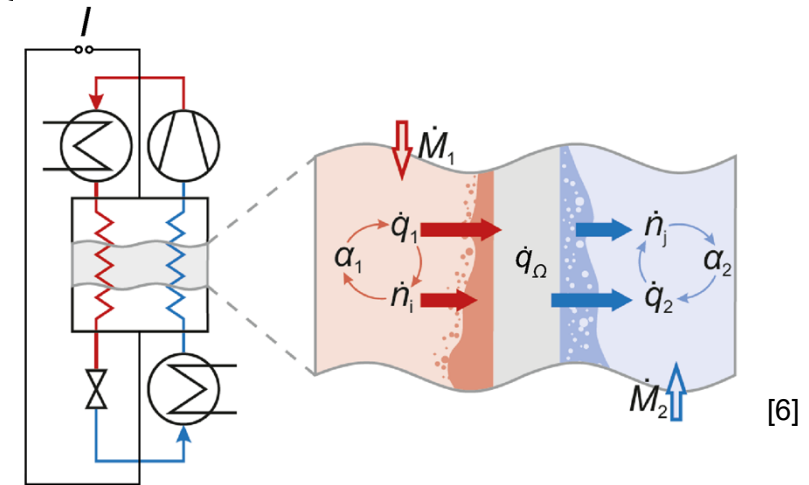
Numerische Auslegungstools

- thermodynamisches Modell zur **Optimierung** der Betriebsparameter von CMRC
 - stationäre Kreislaufsimulation
 - Variation der Zusammensetzung des Kältemittelgemischs und der Betriebsdrücke
 - populationsbasierte Optimierung mit Differential Evolution



AA I.16, Fr., 13:30 Uhr, Salon Herrenhausen:
 F. Boehm – „Modellierung und Optimierung kryogener
 Gemischkältekreisläufe“

- **numerisches Modell** zur Berechnung von Wärmeübertragern^[7] und Stromzuführungen^[3]
 - iterative Lösung der Erhaltungsgleichungen
 - Wärme- und Stofftransport in Zweiphasenströmungen über empirische Korrelationen
 - Thermoelektrische Integration der ohm'schen Verluste^[3]



[3] Shabagin, 2022.

[6] Gomse et al., 2018

[7] Gomse, 2019

Numerische Auslegungstools

- Lösung der 1D-Temperaturfeldgleichung:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + I^2 \cdot \frac{\rho(T)}{A} = 0$$

- Randbedingungen:

$$T_{(x=0)} = T(L_{CMRC})$$

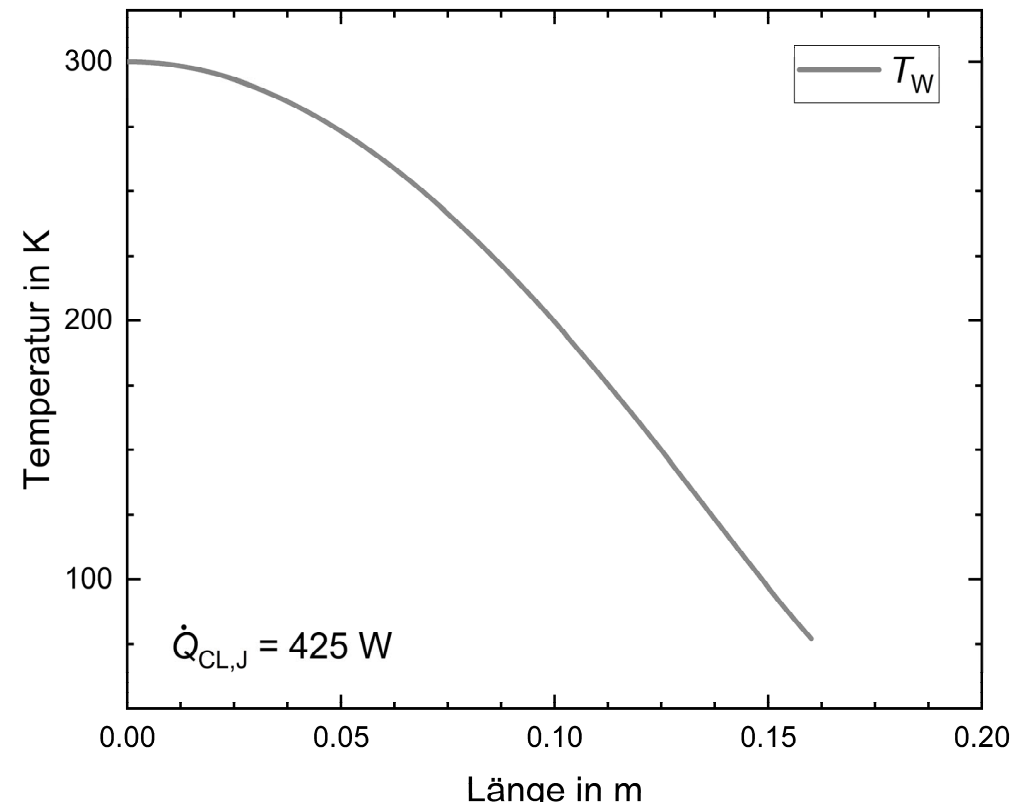
$$T'_{x=0} \propto T'(L_{CMRC})$$

- Variation der Länge L_{CC} bis $T(L_{CC}) = T_J$



erfolgreiche Validierung durch Vergleich mit
Ergebnissen von Shabagin^[3]

- Vergleichsfall optimierte leitungsgekühlte
10 kA-Stromzuführung:



[3] Shabagin, 2022.

Auslegungsparameter

■ Randbedingungen für 10 kA-Stromzuführung

Temperaturen	
T_a	300 K
$T_{CMRC,0}$	90 K
T_J	77.4 K

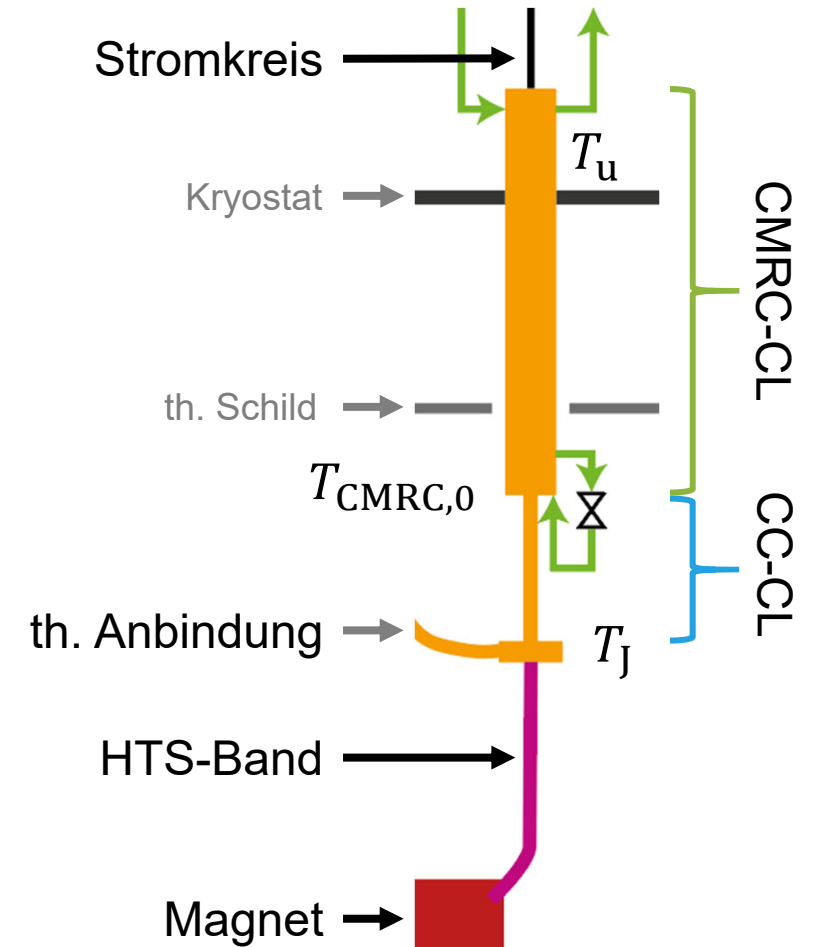
Drücke CMRC	
p_{HD}	25 bar
p_{ND}	2,25 bar

Massenstrom	
\dot{M}	6 ... 10 g/s

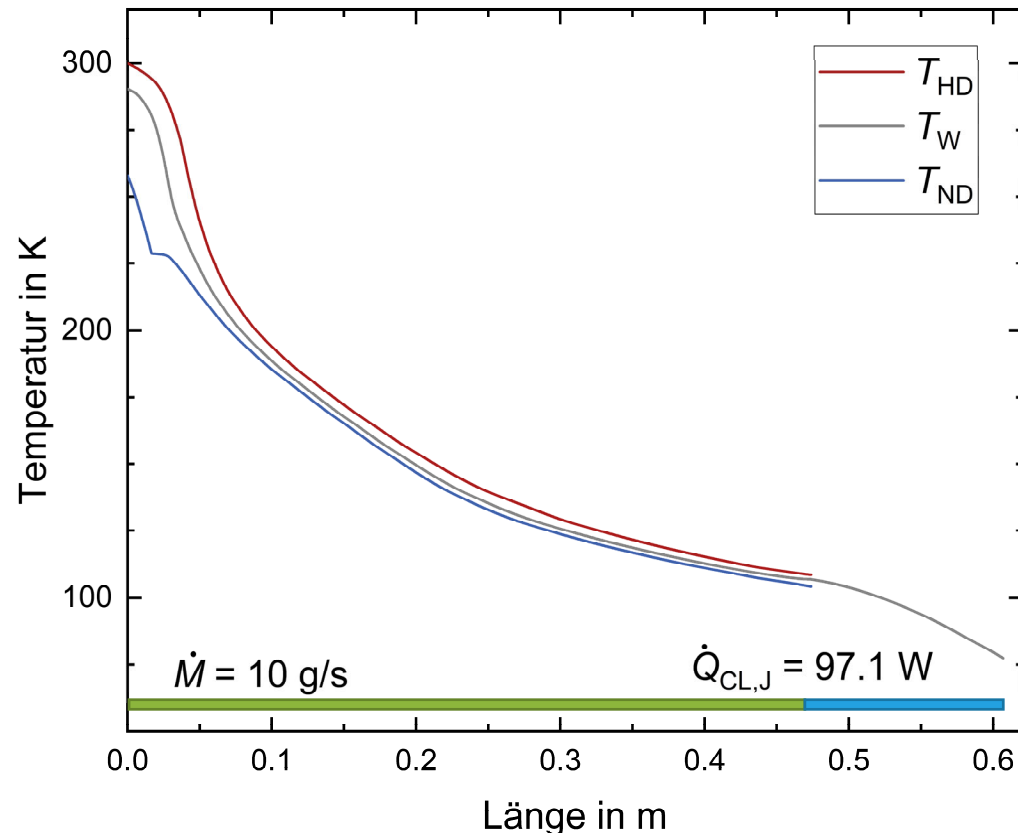
Gemischkomponenten
N_2 , Kohlenwasserstoffe $C_{1...3}$

Ergebnis der Gemischoptimierung

Cryocooler	
$\dot{Q}_{0,max}$	120 W @ 80 K



Verlauf der Temperaturprofile

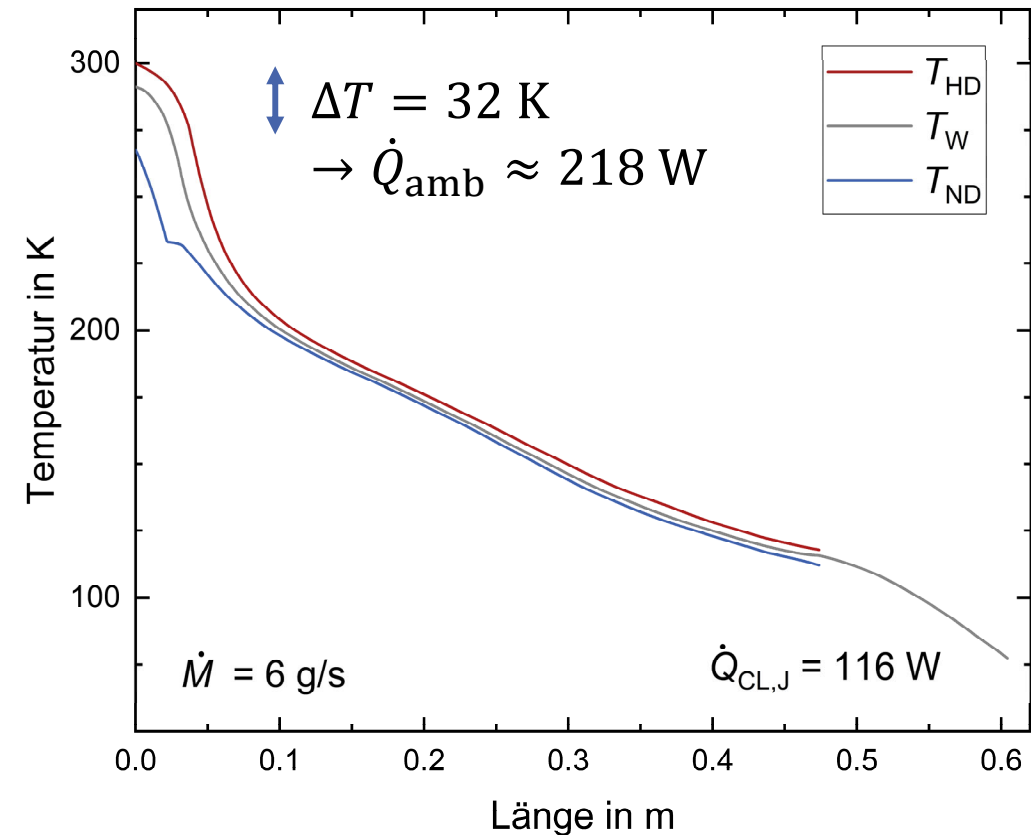
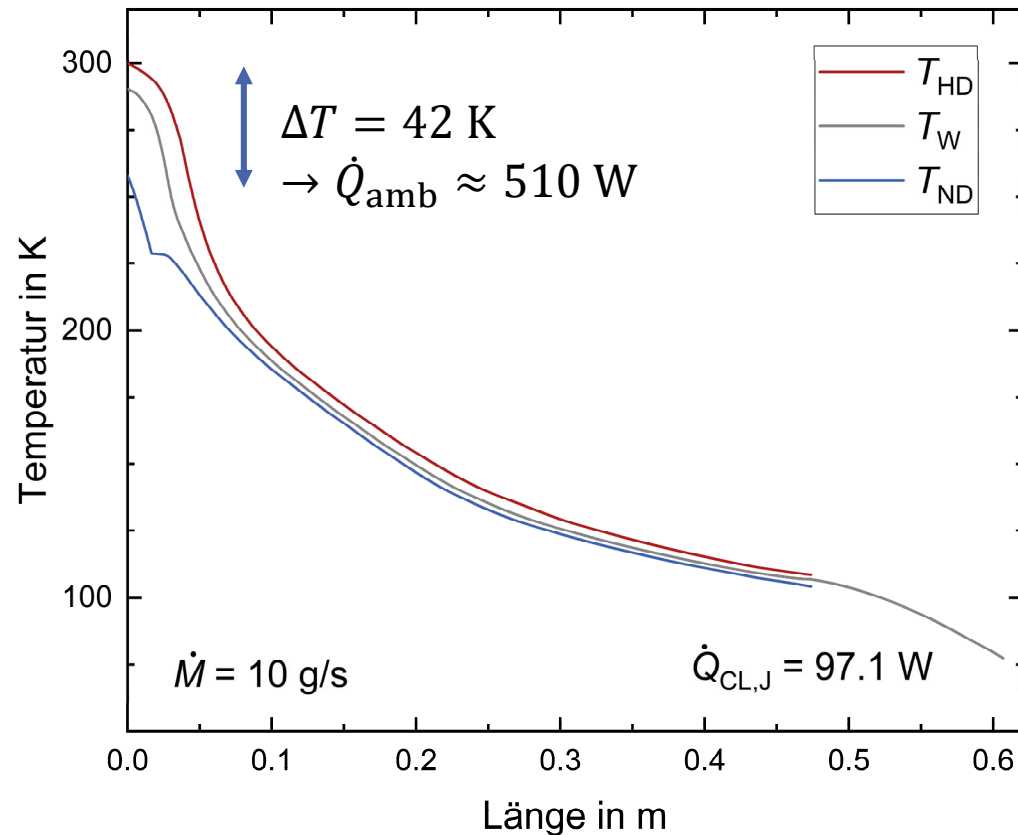


- unterhalb von ca. 200 K : $\Delta T < 10 \text{ K}$
- Zieltemperatur von $T_J = 77.4 \text{ K}$ wird am kalten Ende erreicht
- glatter Übergang der Wandtemperatur von **CMRC-gekühlten** auf **CC-gekühlten** Abschnitt

	CC-CL	CMRC-CC-CL
T_J	77.4 K	77.4 K
$\dot{Q}_{CL,J}$	425 W	97 W
\dot{Q}_{el}	425 W	307 W
P_{ges}	11.5 kW	6.6 kW

– 43 %!

Einfluss des Massenstroms

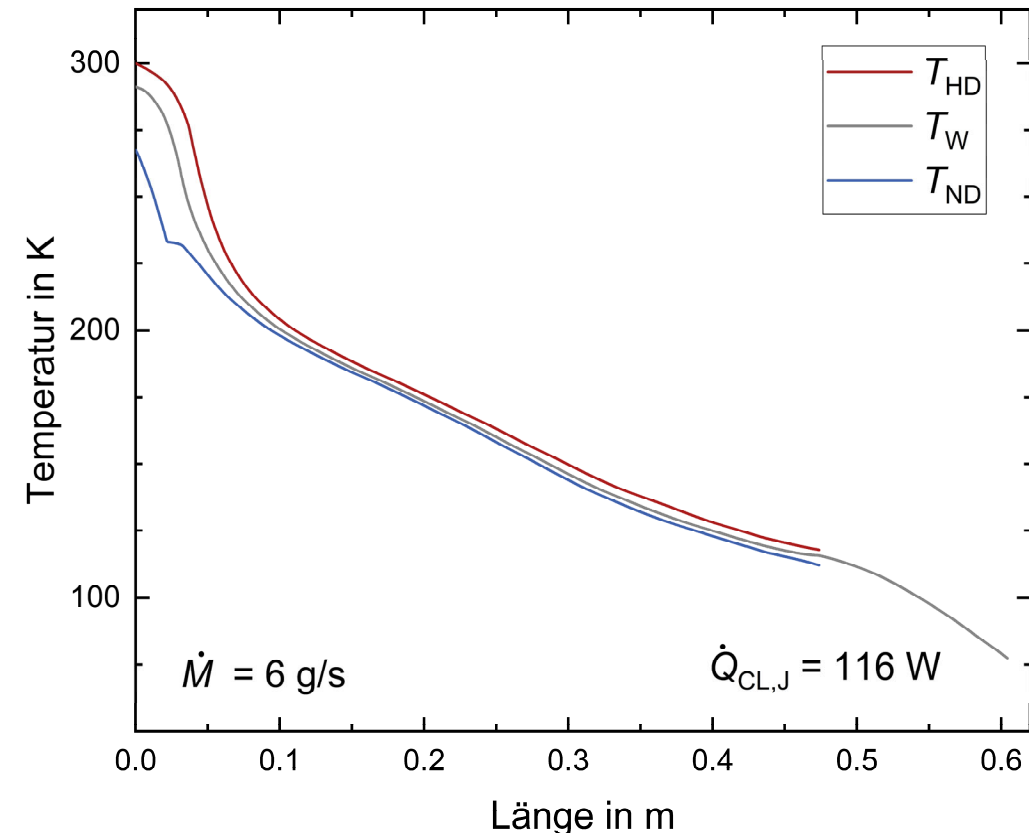


Einfluss des Massenstroms

	CC-CL	$\dot{M} = 10 \text{ g/s}$	$\dot{M} = 6 \text{ g/s}$
P_{CMRC}	–	3256 W	1857 W
$T_{\text{CMRC},0}$	–	104.1 K	112.3 K
$\dot{Q}_{\text{CL},J}$	425 W	97 W	116 W
P_{ges}	11.5 kW	6.6 kW	5.2 kW

↑ ↑ **– 55 %!**

- Reduktion des Massenstroms resultiert in
 - Verringerung der Verdichterleistung
 - Erhöhung der Temperatur $T_{\text{CMRC},0}$
 - bessere Ausnutzung des Cryocoolers



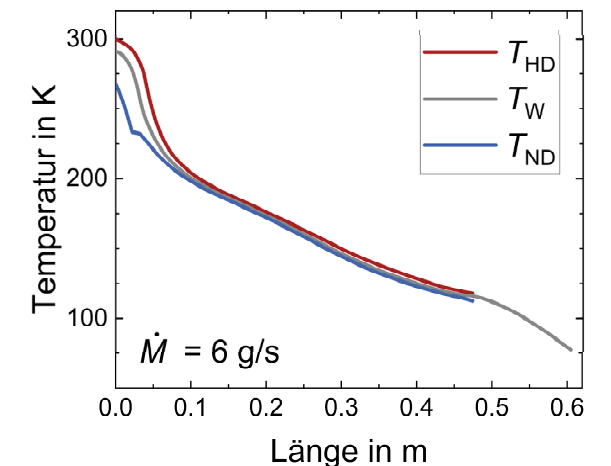
optimaler Betrieb der Stromzuführung bei vollständiger Auslastung der Cryocooler-Kapazität

Zusammenfassung

- Thermodynamische Optimierung von Stromzuführungen erfordert Kühlung entlang der gesamten Länge
 - CMRC-gekühlte, mikrostrukturierte Stromzuführungen als effiziente, skalierbare Technologie

- Optimierung von CMRC-gekühlten Stromzuführungen kann nur unter Betrachtung von **Anwendungsfall**, **Betriebsbereich** und entsprechender **Mischungsoptimierung** erfolgen

- 55 % geringerer Leistungsbedarf kombinierter Stromzuführungen gegenüber leitungsgekühlten Stromzuführungen
 - vollständige, einstufige Kühlung mit CMRC angestrebt



zukünftige Erprobung der Stromzuführungen in COMPASS

Quellenangaben

- [1] Markus Breig, KIT, https://www.kit.edu/kit/english/pi_2018_149_ultra-compact-accelerators-for-science-and-medical-research.php, abgerufen am 30.10.2023.
- [2] NKT A/S, <https://www.nkt.de/presse-events/nkt-entwickelt-den-prototyp-fuer-das-weltweit-laengste-supraleitende-stromkabel>, abgerufen am 15.11.2023.
- [3] E. Shabagin, „Development of a CMRC cooled 10 kA current lead for HTS applications“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [4] D. Gomse, T. Kochenburger, J. Brandner, S. Grohmann, „Entwicklung eines Wärmeübertragers für kryogene Gemischkältekreisläufe“, de, 2016. DKV Tagung Kassel, AA.I.19, 18.11.2016.
- [5] Bluefors Oy, <https://bluefors.com/products/gifford-mcmahon-cryocoolers/al125-gifford-mcmahon-cryocooler/>, abgerufen am 15.11.2023.
- [6] D. Gomse, S. Grohmann, „Heat transfer and pressure drop in the main heat exchanger of a cryogenic mixed refrigerant cycle“, en, 2018. ICEC27-ICMC 2018, Oxford, England, September 3-7 2018.
- [7] D. Gomse, „Development of heat exchanger technology for cryogenic mixed-refrigerant cycles“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2019.