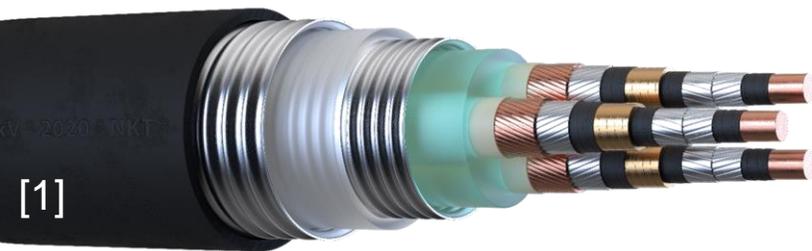


Optimierung einer Gemischkältekaskade für Zwischenkühlstationen des supraleitenden Kabels SuperLink

F. Boehm, S. Grohmann – DKV-Tagung 2024, AA 1.22, 22.11.2024

SuperLink – 15 km supraleitendes Hochspannungskabel in München

- Fortschreitende Elektrifizierung im Rahmen der Energiewende
- Ausbau des aktuellen Stromnetzes unerlässlich (Alter, Übertragungsleistung)



- Geringerer Flächenbedarf
- Keine elektromagnetischen Streufelder
- Keine Bodenerwärmung
- Höhere Übertragungsleistung



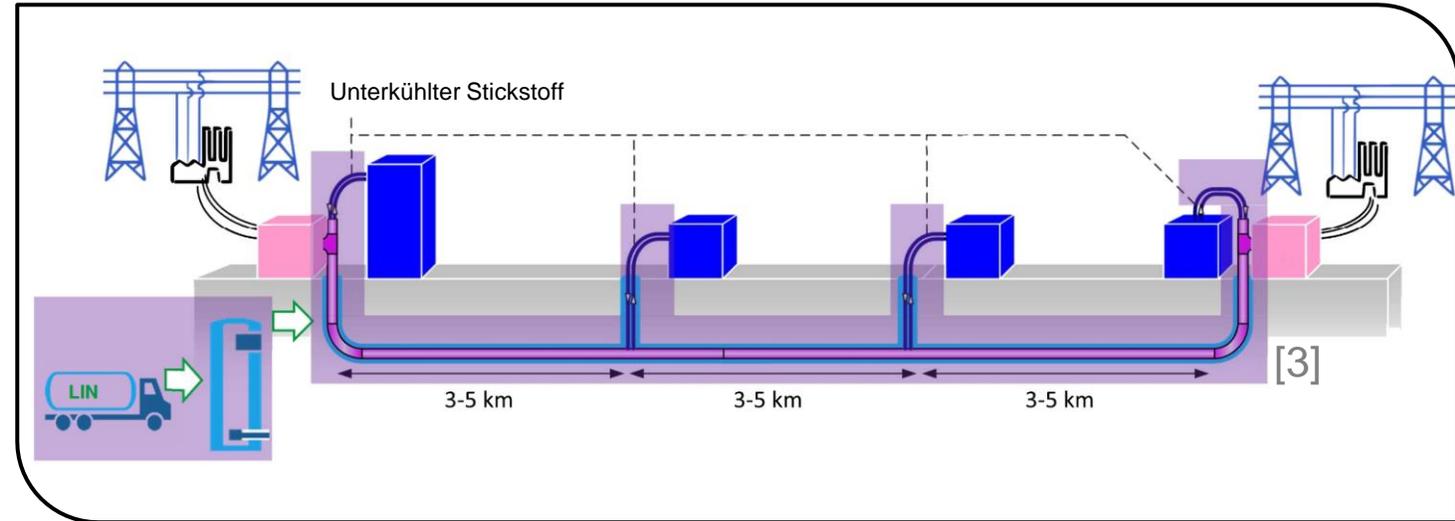
[2] NKT

[1]

[1] www.nkt.de

SuperLink – Zwischenkühlstationen

- Kühltemperatur unter 77 K
- 15-30 kW pro Kühlstation
- Lange Wartungsintervalle
→ Zuverlässigkeit
- Geringer Platzbedarf
- Niedriger Energiebedarf



[3] Alekseev et al. 2020

- Kühlsysteme → Hauptenergiebedarf
 - 1. und 2. HS der Thermodynamik → $P = \sum T_U \cdot \dot{S}_{i,irr}$
 - $\Delta p: \dot{S}_{i,irr} \propto -\frac{v}{T} dp$
 - $\Delta T: \dot{S}_{i,irr} \propto \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2}$

Einfluss von ΔT und Δp steigt bei kryogenen Temperaturen

Warum Gemischkälte? – Der Linde-Hampson-Kreislauf

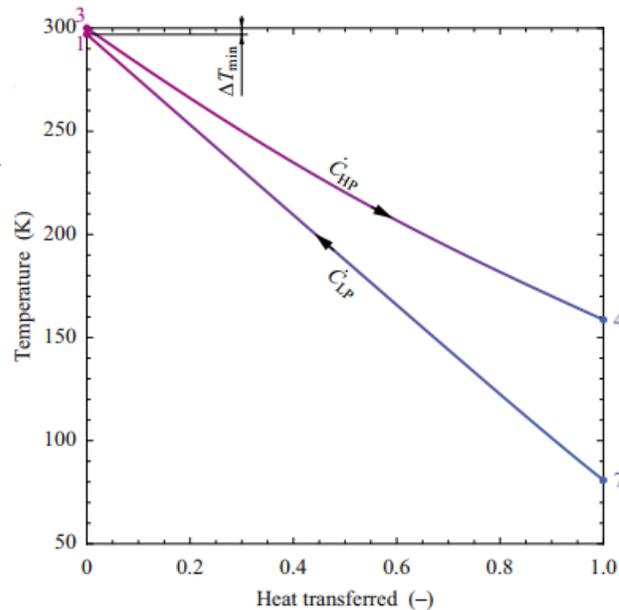
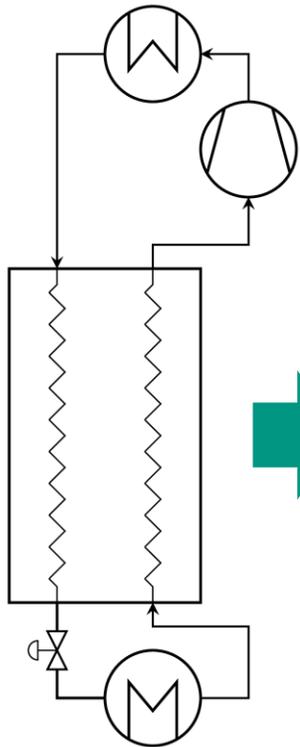
- Einfachster kryogener Kreislauf

- Große Unterschiede in den Kapazitätsströmen reiner Kältemittel
→ ΔT erhöht Entropieproduktion

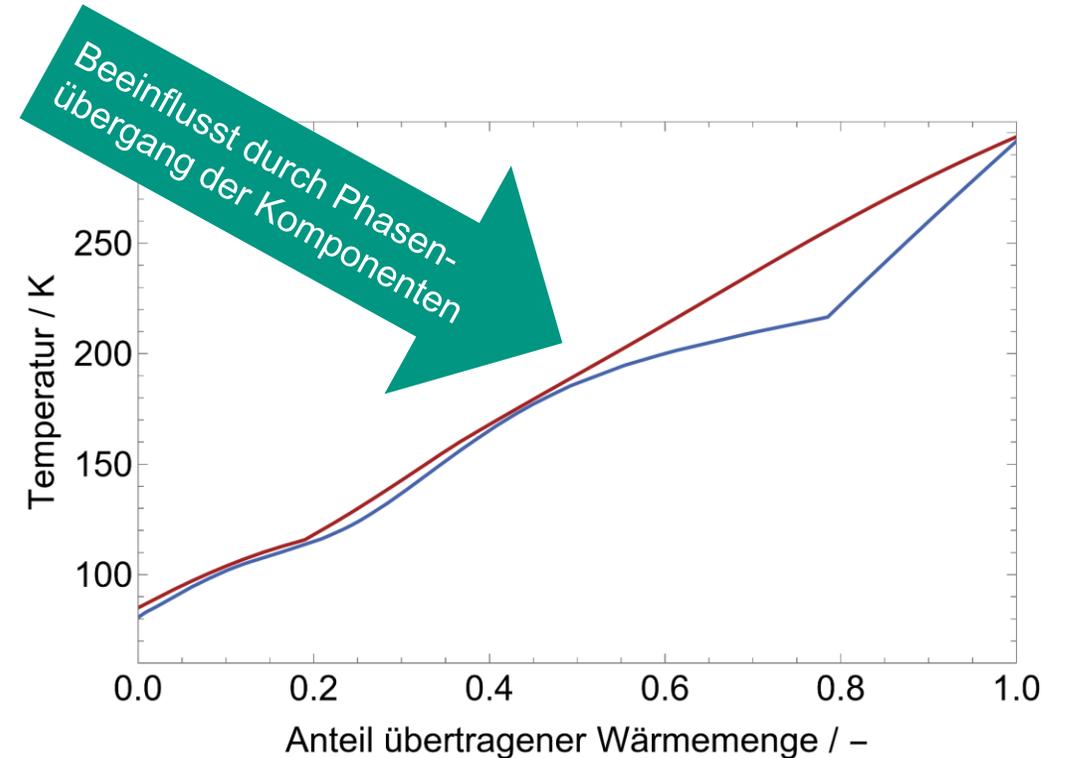
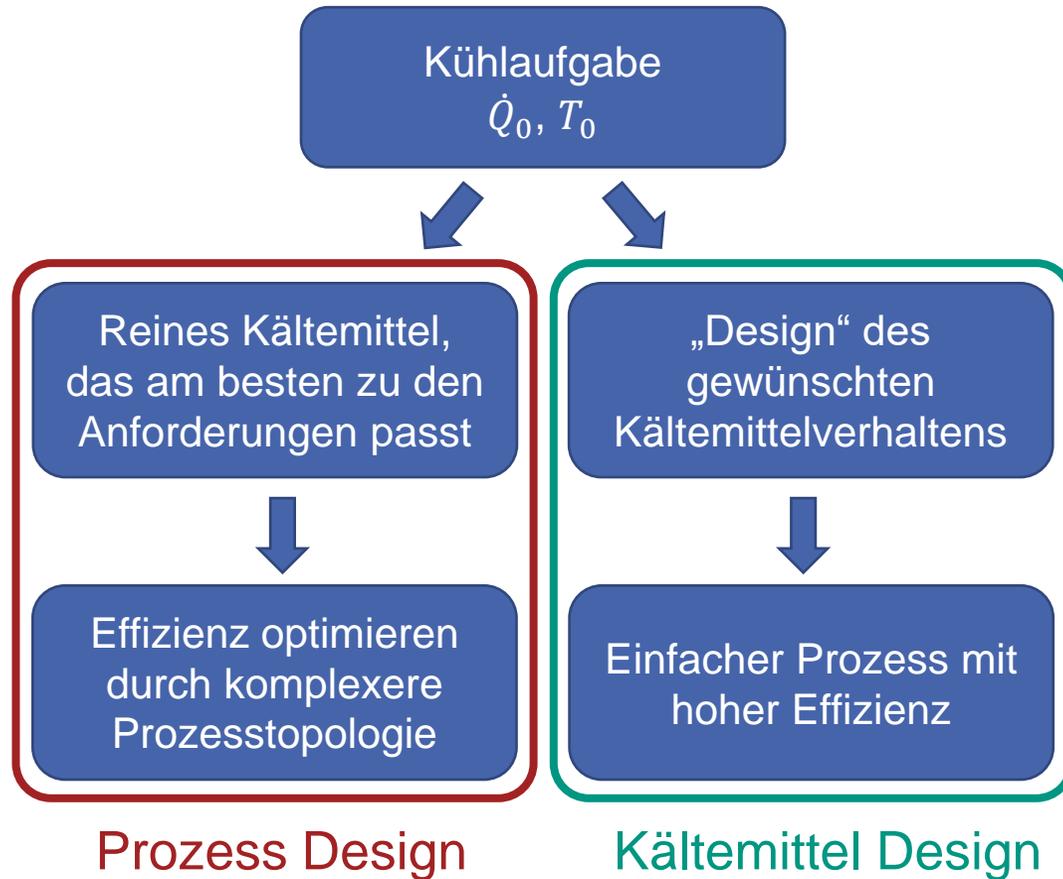
$$\Delta S_{\text{irr}} = \int \frac{T_h - T_c}{T_h T_c} dq$$

- Verbesserung durch passende Kapazitätsströme
→ ΔT konstant im CFHX

- ... durch Anpassen der Massenströme im CFHX
 - z.B. Claude Prozess
- ... durch Verwenden weitsiedender Gemische
 - Cryogenic Mixed-Refrigerant Cycle (CMRC)

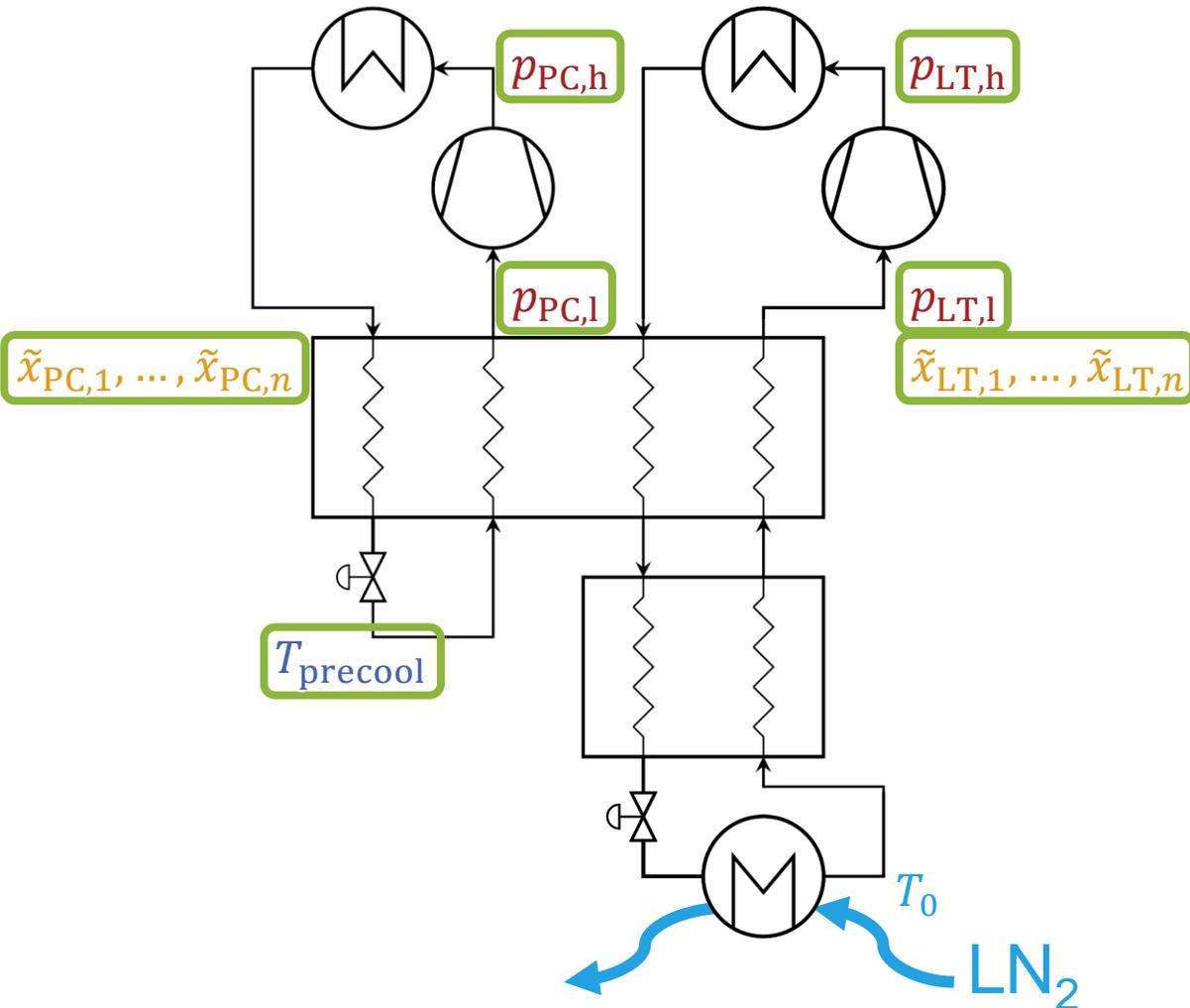


Warum Gemischkälte? – Kältemittel Design



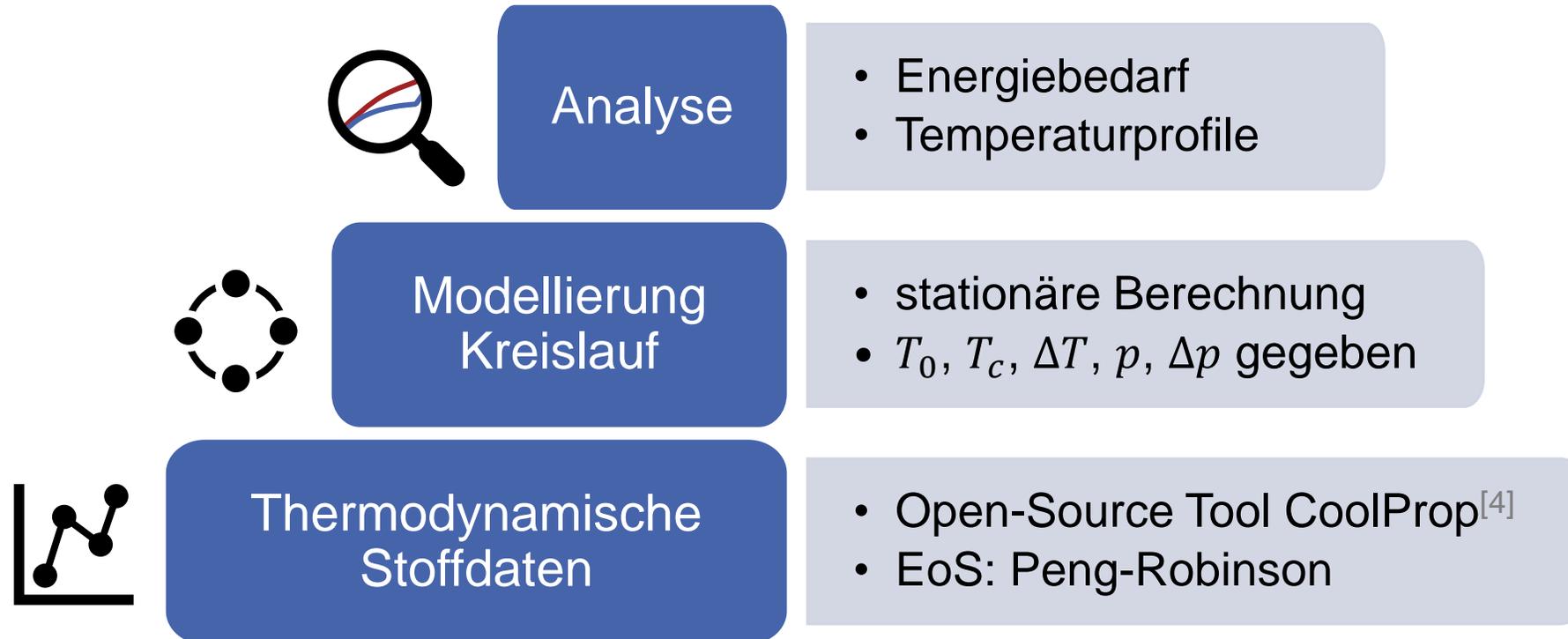
Schlüsselkomponente eines jeden Kühlsystems ist das Kältemittel!

Gemischkältekaskade



- Einfacher Gemischkältekreislauf bei sehr niedrigen Temperaturen ineffizient (70 K)
 - Hochsiederanteil muss drastisch reduziert werden, um Ausfrieren zu verhindern
- Gemischkältekaskade
- Abkühlen auf $T_{precool}$ in Vorkühlstufe (PC)
 - Kühlung bei T_0 Tieftemperaturstufe (LT)

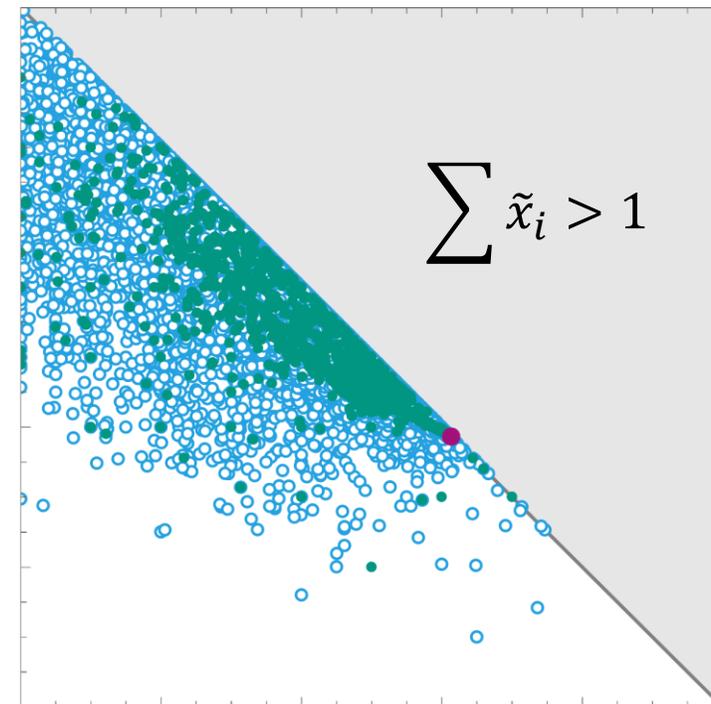
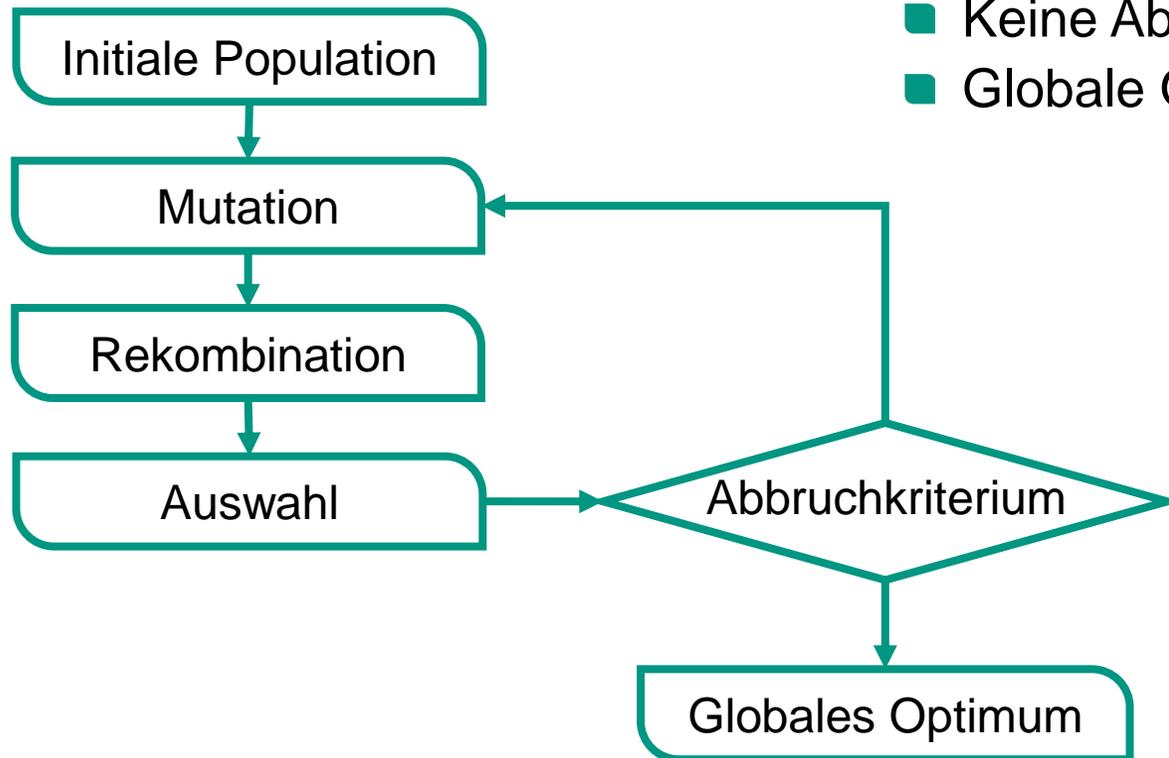
Prozesssimulation



[4] I.H. Bell et al. 2014

Optimierung mittels eines genetischen Algorithmus^[5]

- Differential Evolution (DE) ^[6,7]
 - Keine Ableitungen nötig
 - Globale Optimierung → „Exploration & Exploitation“

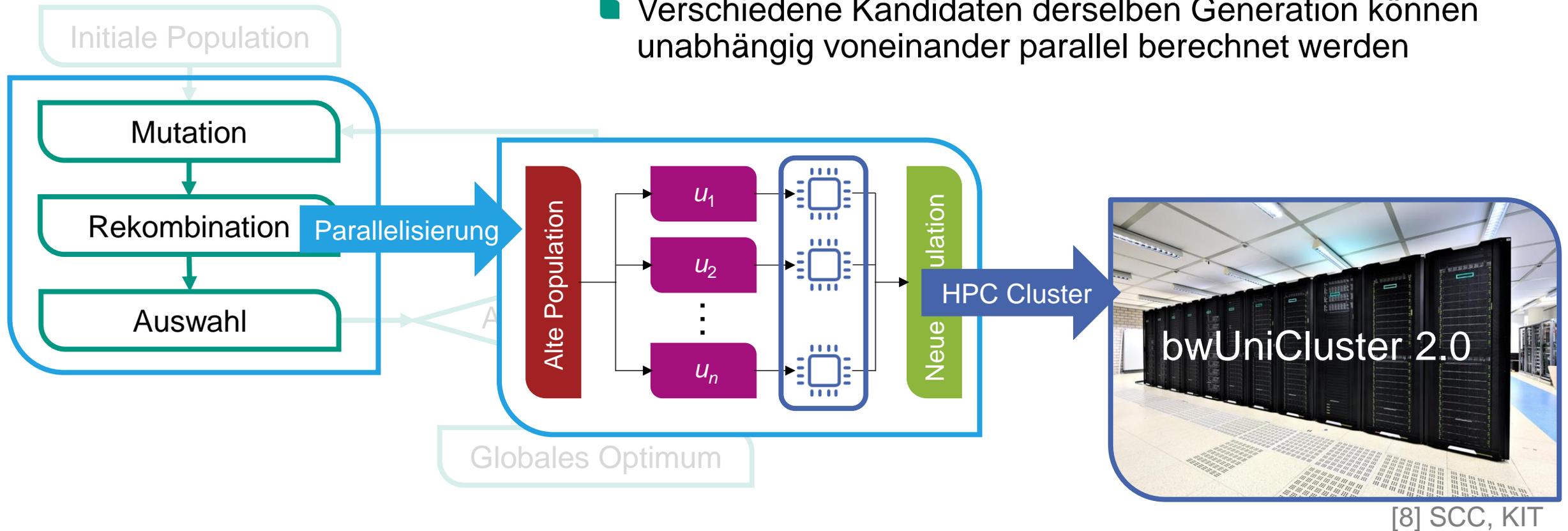


[6] R. Storn und K. Price 1997

[7] K. Price et al. 2005

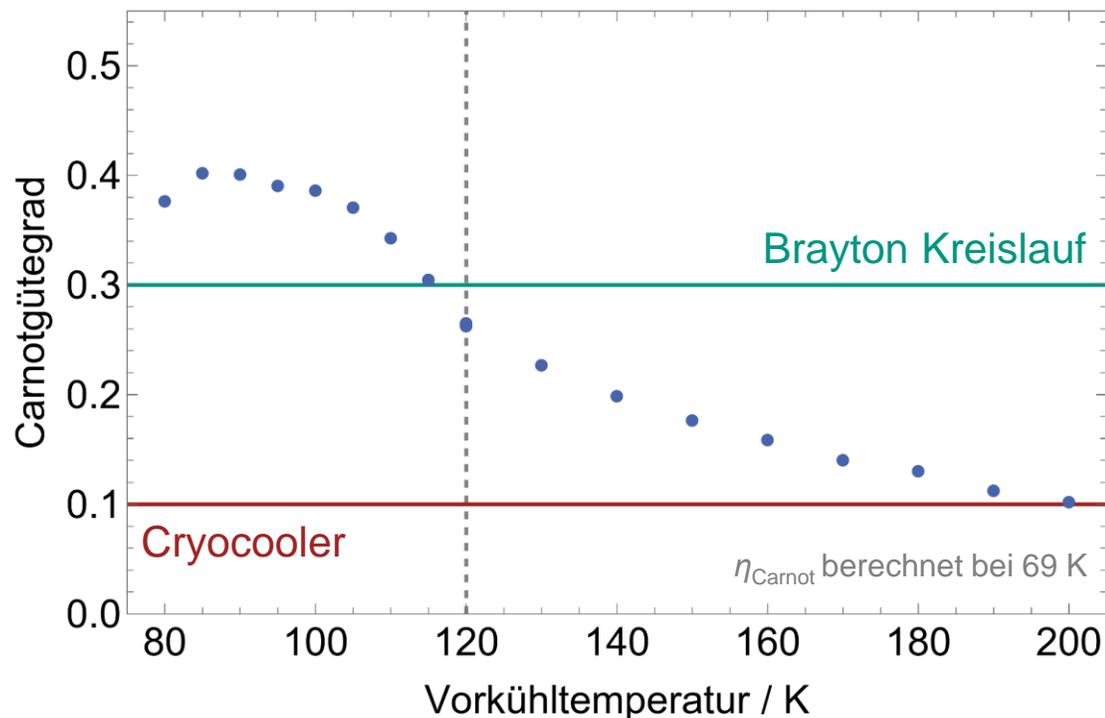
Optimierung mittels eines genetischen Algorithmus^[5]

- DE eignet sich sehr gut zur parallelen Berechnung
 - Verschiedene Kandidaten derselben Generation können unabhängig voneinander parallel berechnet werden



[8] SCC, KIT

Gesamt-Carnoteffizienz bei unterschiedlichen T_{precool}

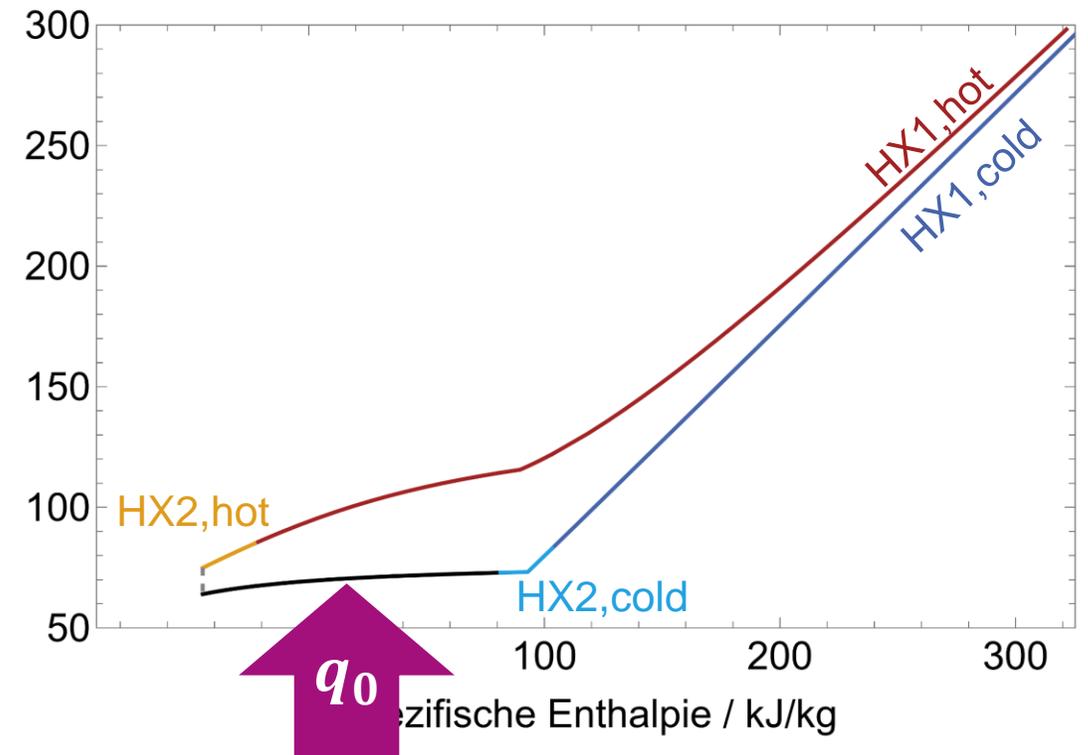
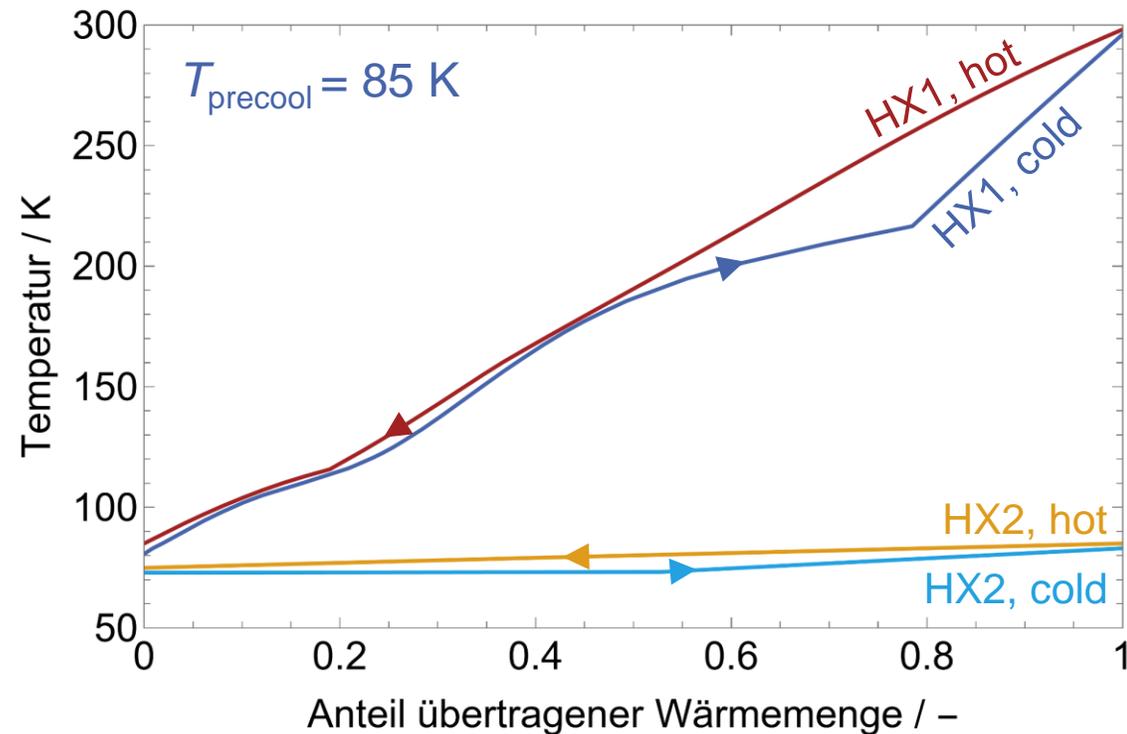


T_0	64 K – 74 K
T_a	293.15 K
ΔT_a	5 K
ΔT_{min}	2 K
η_{is}	0.7

T_{precool}	80 ... 200 K
p_{ND}	1 ... 20 bar
p_{HD}	10 ... 60 bar
\tilde{x}_i	0 ... 1

- Teilkondensierter Kältemittelstrom (LRS) in HX2 bei $T \leq 120$ K
 - erhöht die Effizienz der Tieftemperaturstufe signifikant

HX Temperaturprofile und T-h Diagramm der LT Stufe



Zusammenfassung und Ausblick

Simulationsergebnisse

- Erfolgreiche Implementierung eines genetischen Algorithmus zur Optimierung von Gemischkaskaden
- Vorkühltemperaturen unter 120 K erhöhen die Effizienz
- Kapazitätsströme innerhalb der Wärmeübertrager passen zueinander

Technologie Ausblick

- Im Vergleich mit Turbo-Brayton-Kreisläufen haben **Gemischkaskaden**
 - eine höhere Carnoteffizienz ($> 40\%$)
 - eine höhere Leistungsdichte (2-Phasenströmung)
 - keine kalten Expander
 - ein skalierbares Konzept
- **Nächste Schritte**
 - Prototypenentwicklung?
 - Erprobung in COMPASS^[9]

- [1] <https://www.nkt.de/presse-events/nkt-entwickelt-den-prototyp-fuer-das-weltweit-laengste-supraleitende-stromkabel>, last checked: 17 July 2024,
- [2] NKT, private communication
- [3] A. Alekseev, S. Grohmann and L. Decker, „Anforderungen an das Kühlsystem für lange HTSL-Leistungskabel“, german, 2020. DKV Tagung 2020 online, A I.11, 19-20 November 2020
- [4] I.H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin and V. Lemort, “Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp”, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53, S. 2498–2508, ISSN 0888-5885. 2014.
- [5] F. Boehm and S. Grohmann, "Modelling and optimization of cryogenic mixed-refrigerant cycles for the cooling of superconducting power cables." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1301. No. 1. IOP Publishing, 2024. doi: 10.1088/1757-899X/1301/1/012132
- [6] R. Storn and K. Price, „Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces“, *Journal of Global Optimization*, 11, S. 341-359, 1997. doi: 10.1023/A:1008202821328
- [7] K. Price, R. Storn and J. Lampinen, „Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization“, Springer Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-20950-8. 2005.
- [8] https://www.scc.kit.edu/dienste/bwUniCluster_2.0.php, last checked: 17 July 2024
- [9] J. Arnsberg, M. Stamm, and S. Grohmann. “Design of a High-Current Cryogenic Test Stand for Compact Accelerator Systems”. In: 26th IIR International Congress of Refrigeration - Refrigeration Science and Technology Proceedings. 26th IIR International Congress of Refrigeration. Vol. 1. Paris, France, Aug. 21, 2023, pp. 231–239. DOI: 10.18462/iir.icr.2023.0290.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!