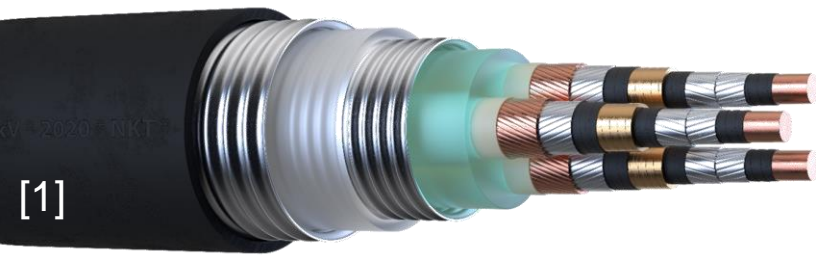


# Optimierung einer Gemischkältekaskade für Zwischenkühlstationen des supraleitenden Kabels SuperLink

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



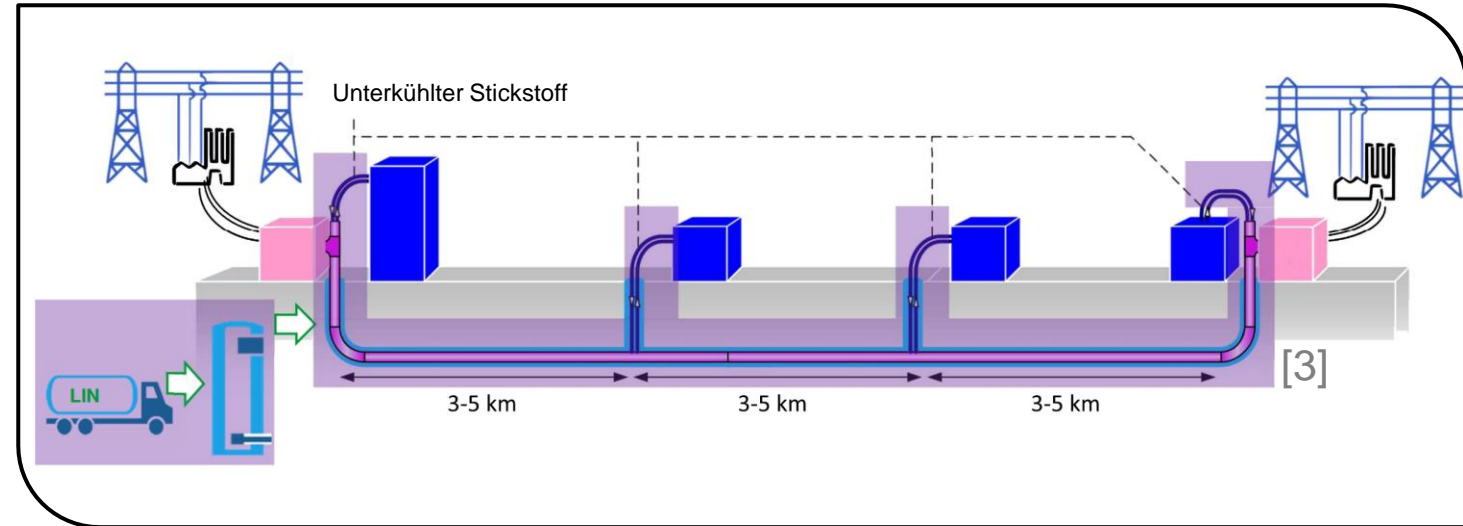
[2] NKT

[1]

[1] [www.nkt.de](http://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  $\Delta T$  und  $\Delta p$  steigt bei kryogenen Temperaturen

# Warum Gemischkälte? – Der Linde-Hampson-Kreislauf

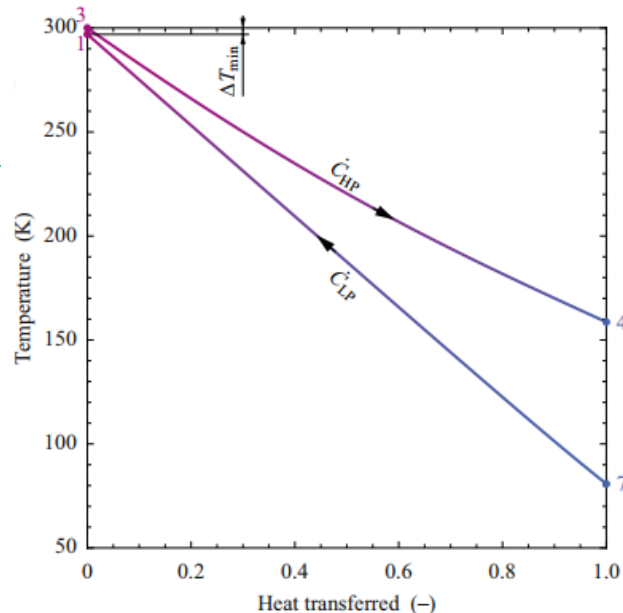
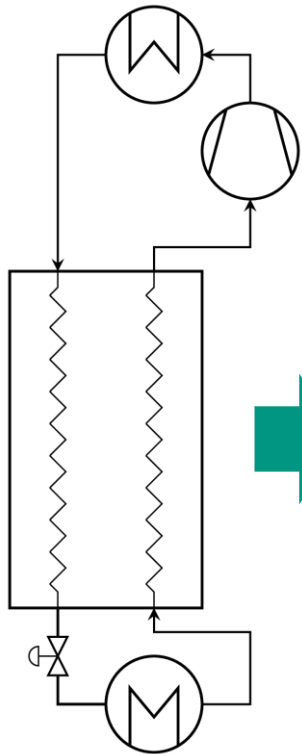
- Einfachster kryogener Kreislauf

- Große Unterschiede in den Kapazitätsströmen reiner Kältemittel  
→  $\Delta T$  erhöht Entropieproduktion

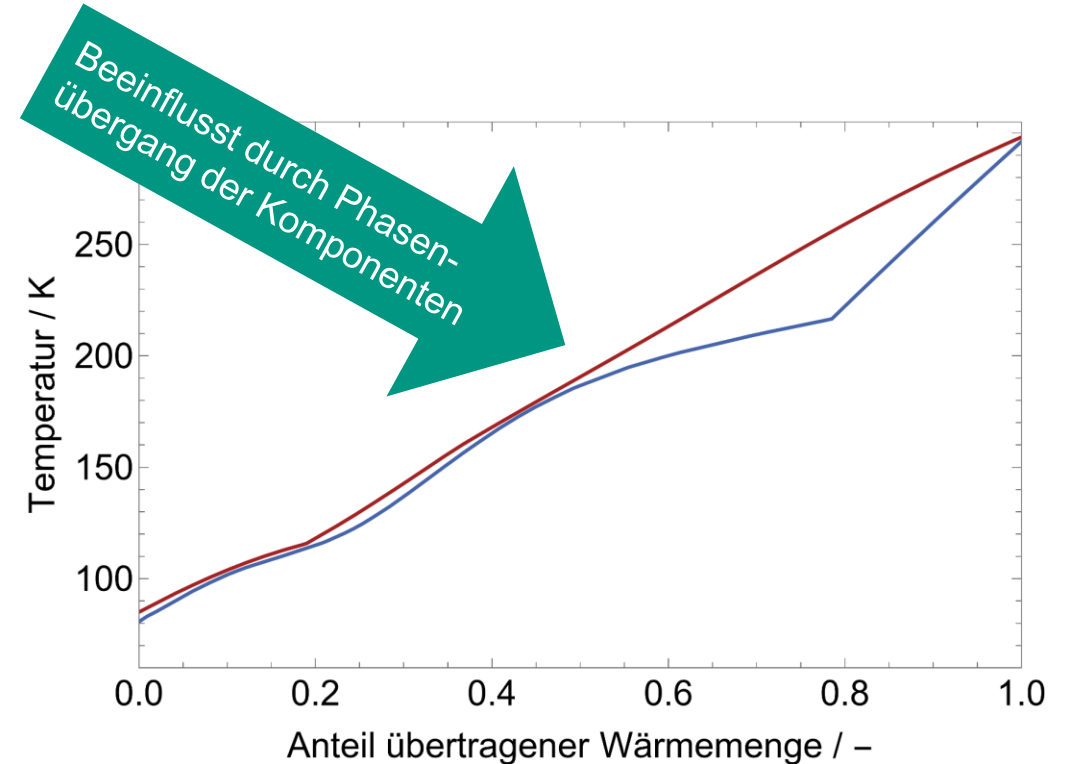
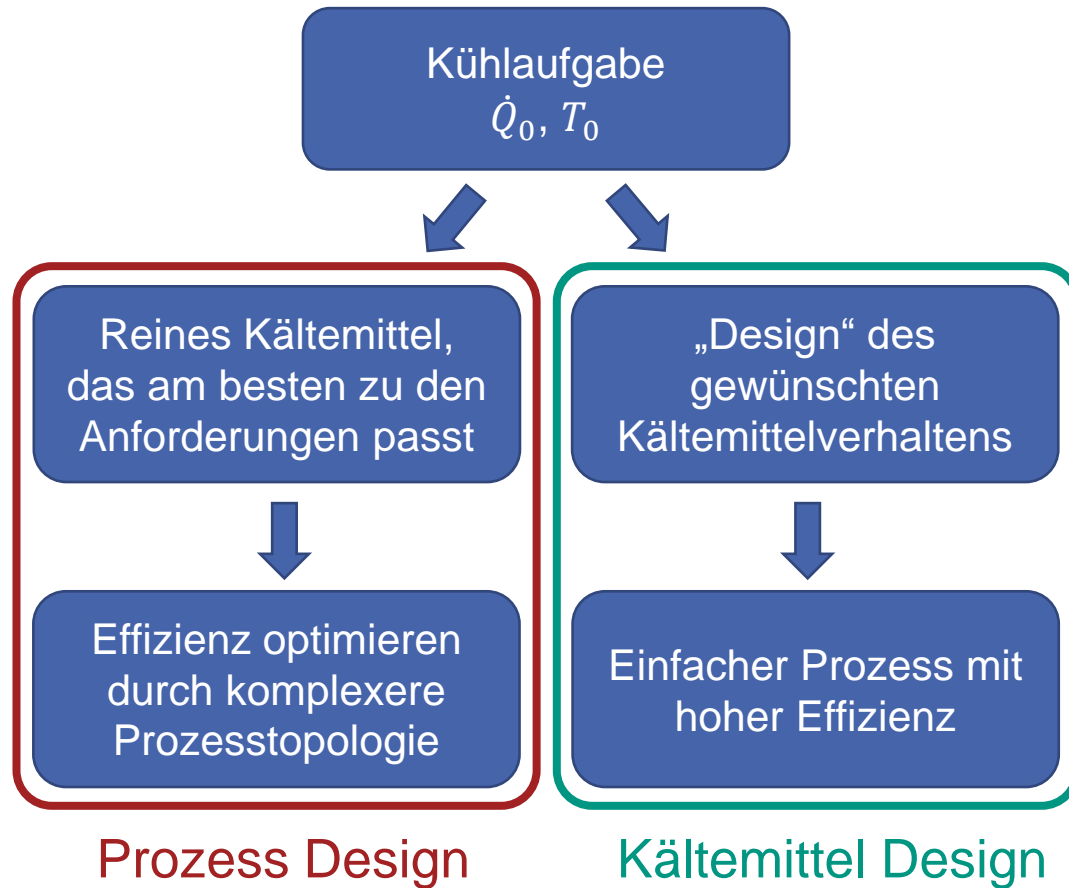
$$\Delta S_{\text{irr}} = \int \frac{T_h - T_c}{T_h T_c} dq$$

- Verbesserung durch passende Kapazitätsströme  
→  $\Delta T$  konstant im CFHX

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

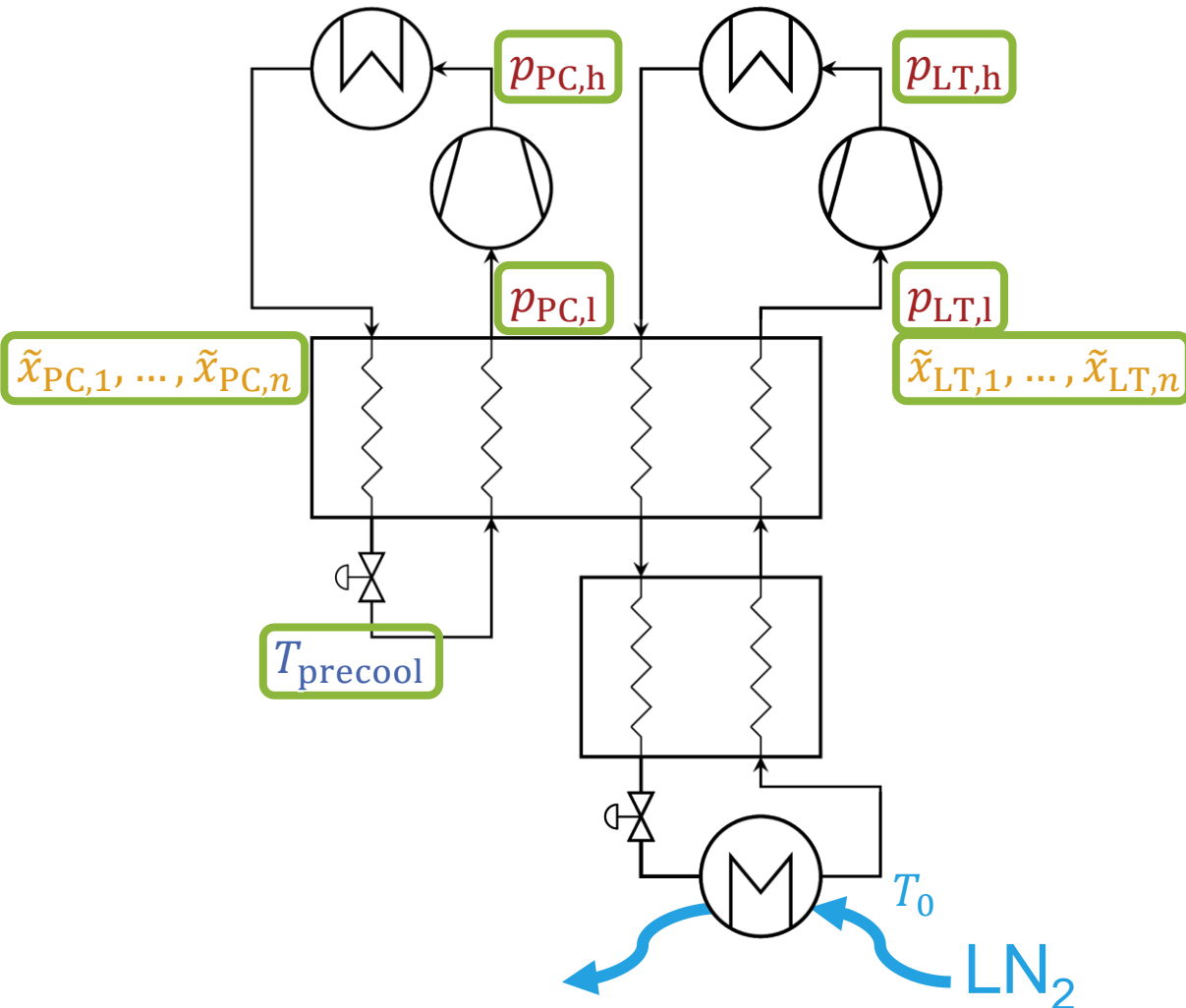


# Warum Gemischkälte? – Kältemittel Design



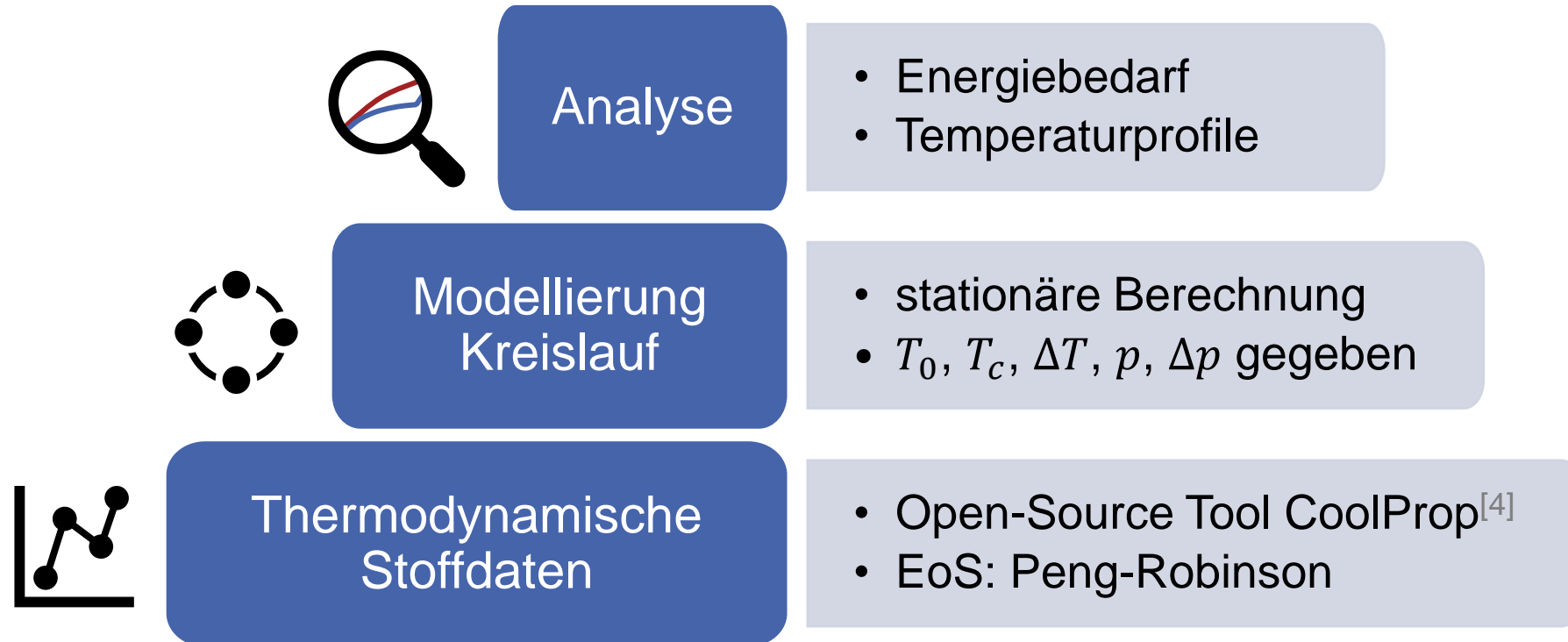
Schlüsselkomponente eines jeden Kühlsystems ist das Kältemittel!

# 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)

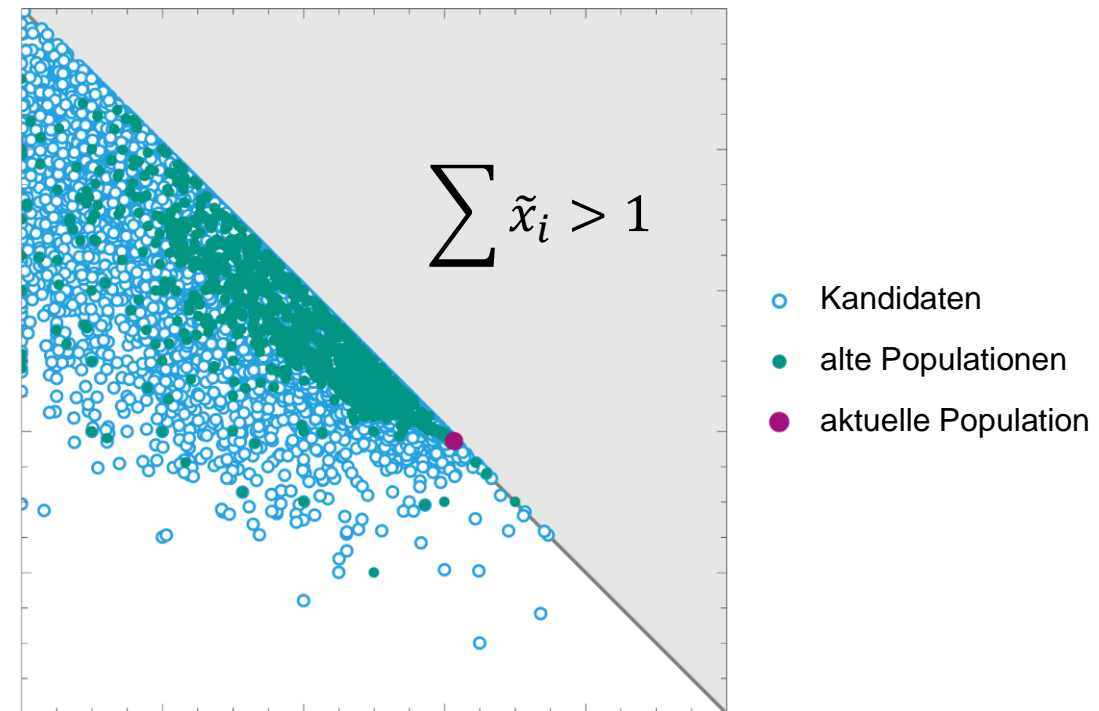
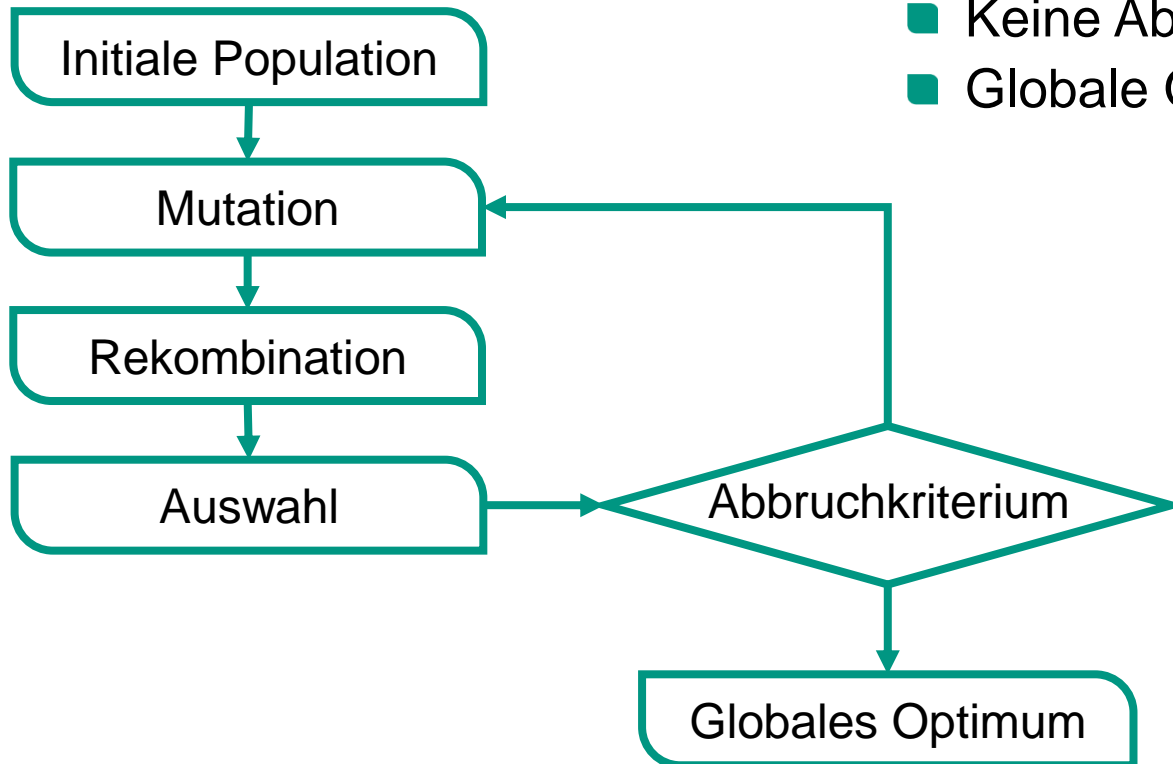
# Prozesssimulation



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

# Optimierung mittels eines genetischen Algorithmus<sup>[5]</sup>

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



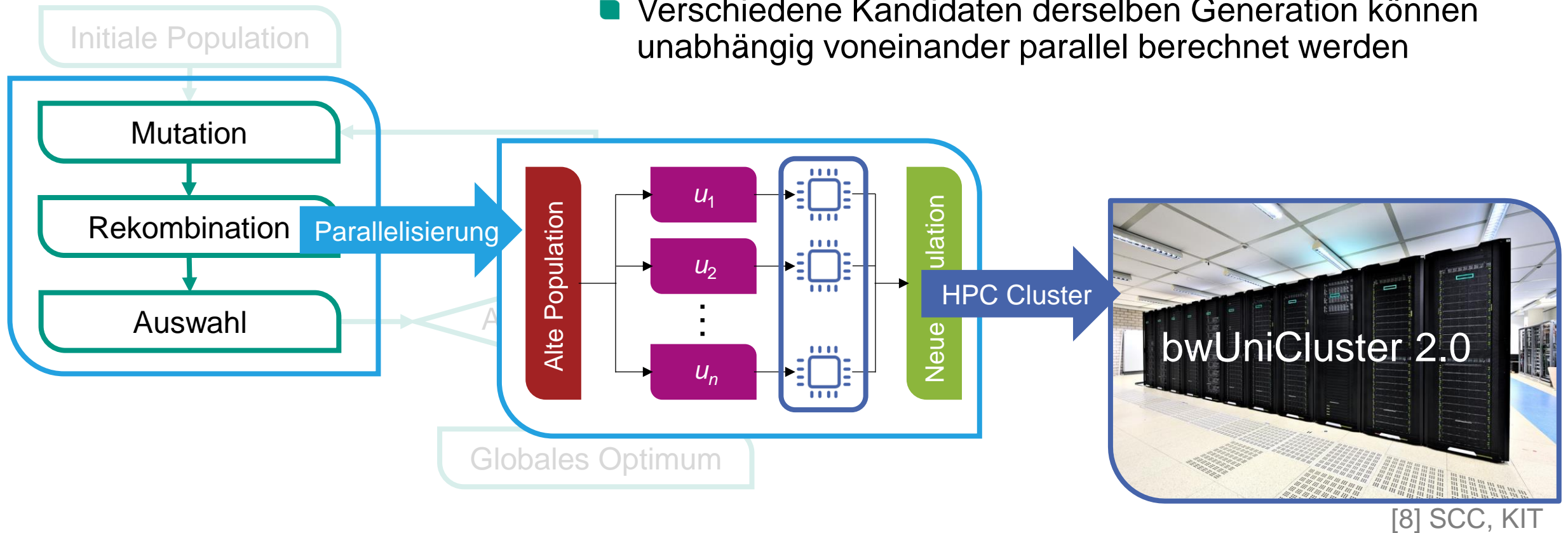
[6] R. Storn und K. Price 1997

[7] K. Price et al. 2005



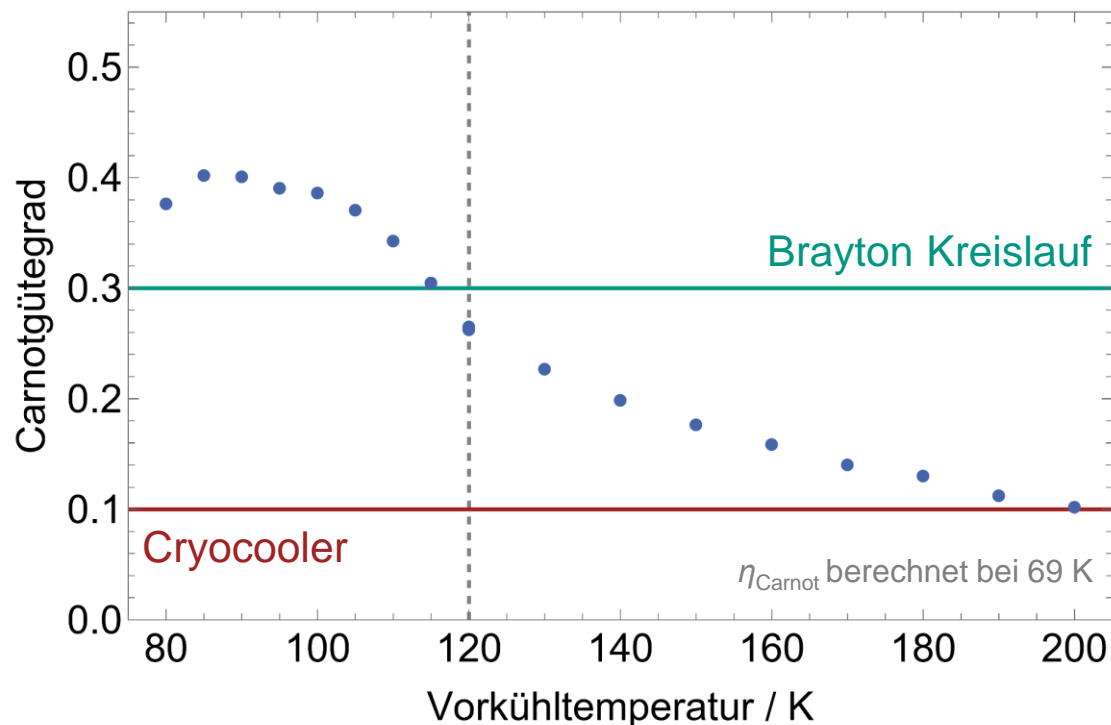
# Optimierung mittels eines genetischen Algorithmus<sup>[5]</sup>

- 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 $T_{\text{precool}}$

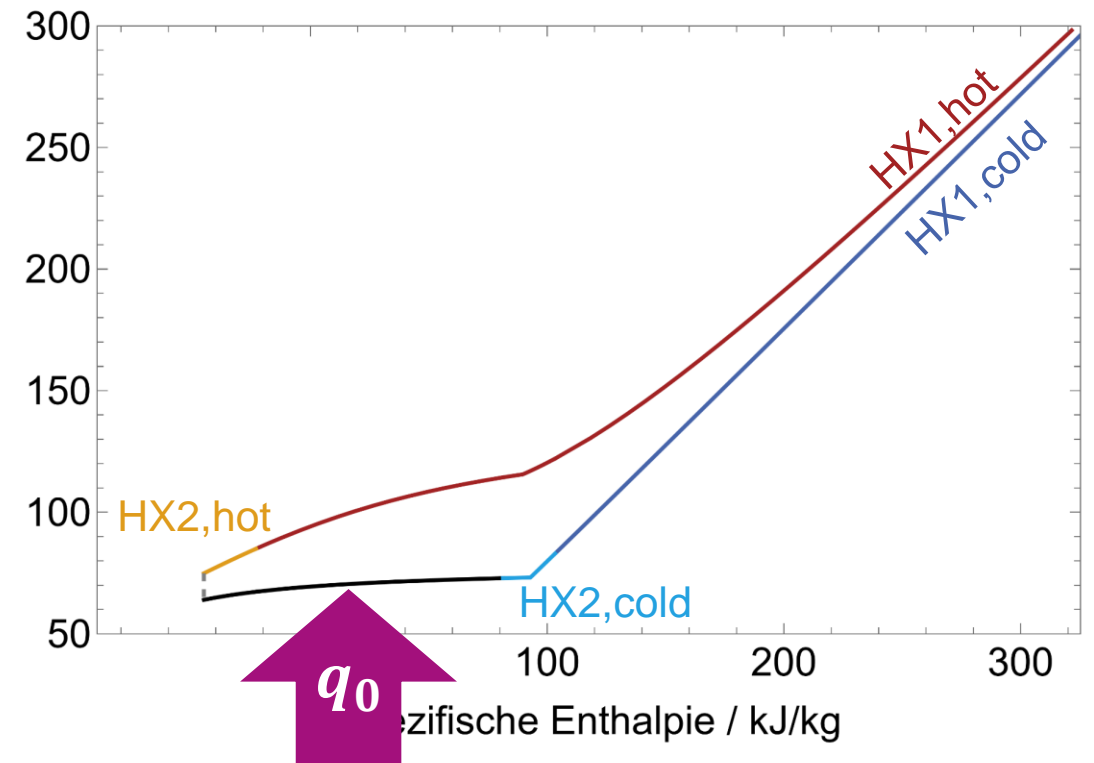
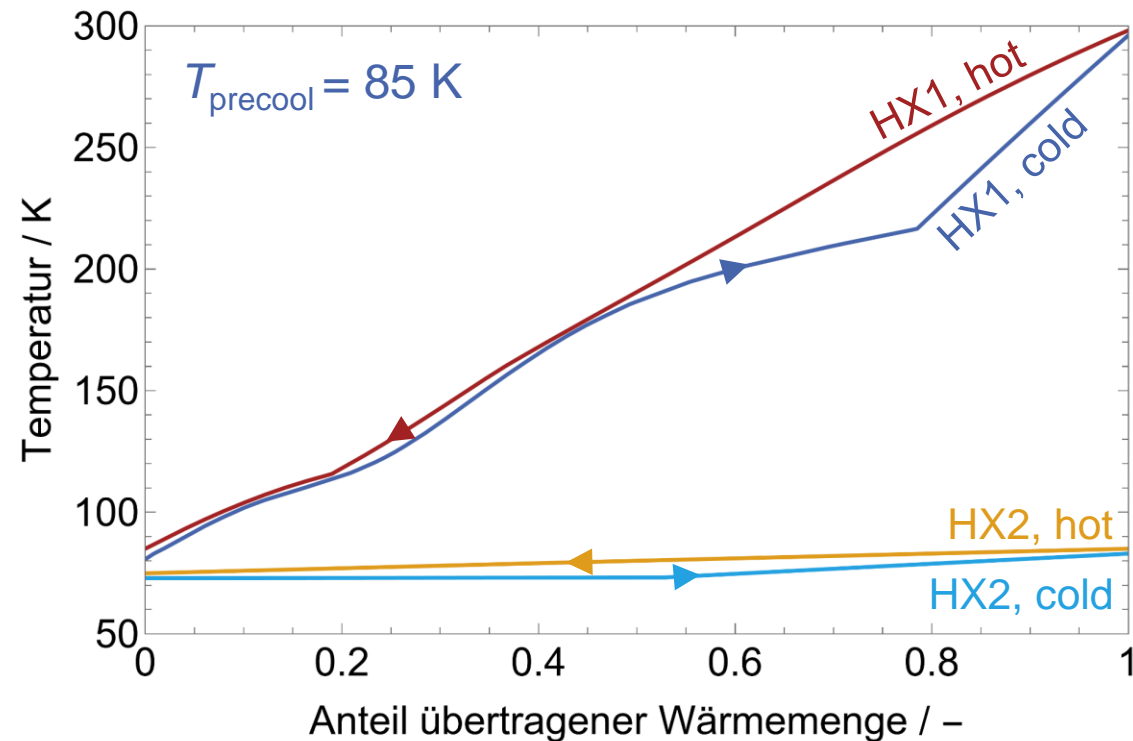


|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| $T_0$                   | 64 K – 74 K |
| $T_a$                   | 293.15 K    |
| $\Delta T_a$            | 5 K         |
| $\Delta T_{\text{min}}$ | 2 K         |
| $\eta_{\text{is}}$      | 0.7         |

|                      |               |
|----------------------|---------------|
| $T_{\text{precool}}$ | 80 ... 200 K  |
| $p_{\text{ND}}$      | 1 ... 20 bar  |
| $p_{\text{HD}}$      | 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<sup>[9]</sup>

- [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](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!