

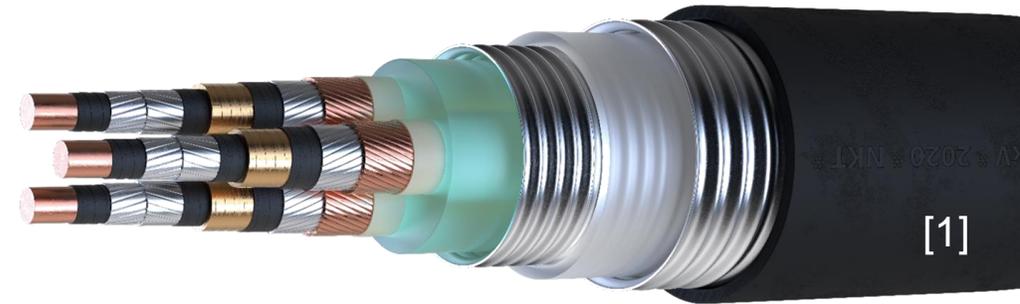
Modellierung und Optimierung kryogener Gemischkältekreisläufe

F. Boehm, S. Grohmann – DKV-Tagung 2023, AA I.16, 24.11.2023

Motivation

- Effiziente Kühlung von Tieftemperaturanwendungen
 - Supraleitende Kabel
 - Teilchenbeschleuniger

- Kühlsystem maßgeblicher Faktor für Energiebedarf kryogener Systeme
 - 1. und 2. HS der Thermodynamik $\rightarrow P = \sum T_U \cdot \dot{S}_{i,irr}$
 - $\Delta p: \dot{S}_{i,irr} \propto -\frac{v}{T} dp$
 - $\Delta T: \dot{S}_{i,irr} \propto \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2}$



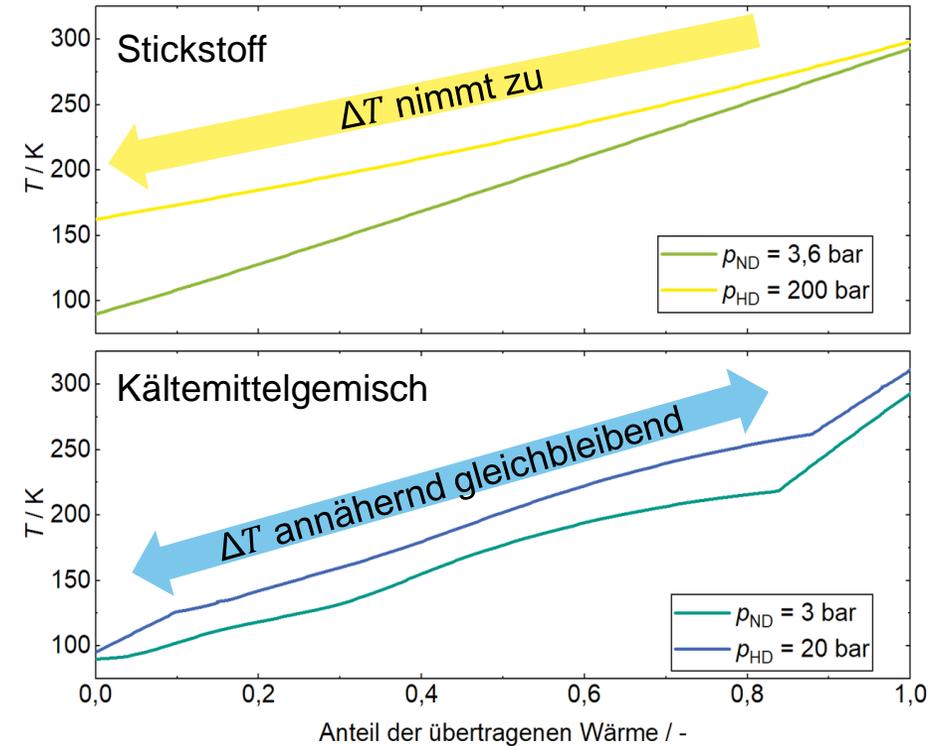
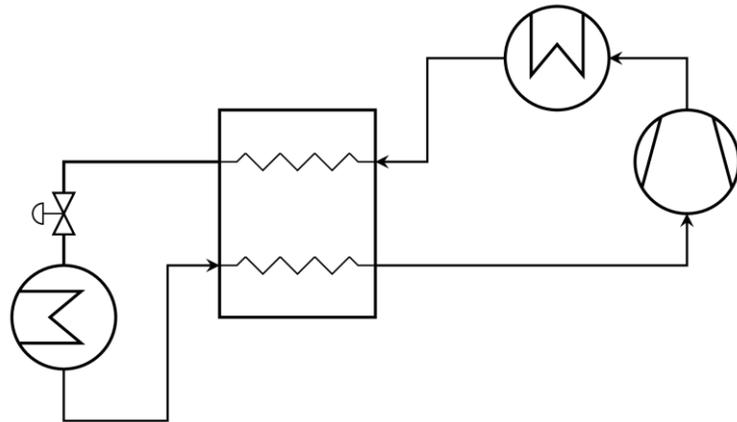
[1]

[1] www.nkt.de

Gemischkältetechnik

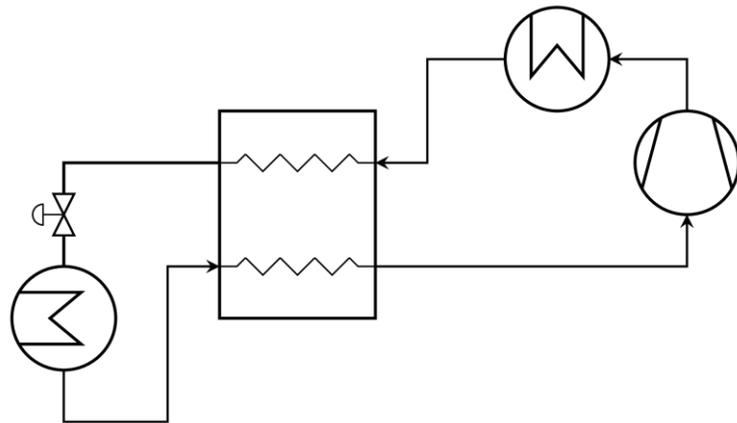
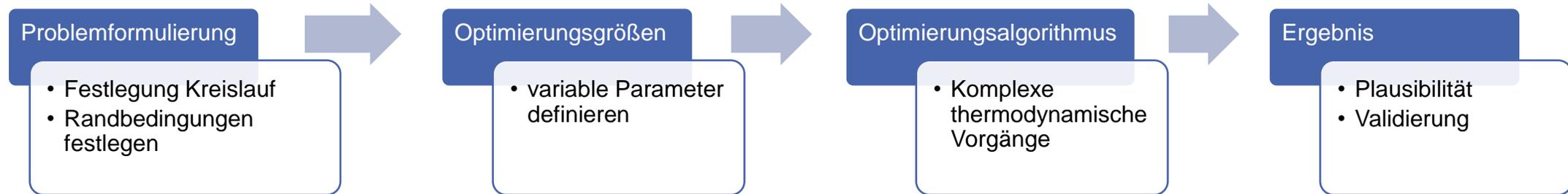
Cryogenic Mixed Refrigerant Cycle (CMRC)

- **Energieeffizienter** und **kostengünstiger** als Reinstoff
- Einfacher Prozessaufbau möglich
- Reduzierter Arbeitsdruck → höhere Prozesseffizienz
- Reduzierte, gleichbleibende Temperaturdifferenzen
 - $\dot{C}_{HD} = \dot{C}_{ND}$
 - 2-Phasenströmung im inneren Wärmeübertrager
- **Anpassungsfähigkeit** an Anforderungen
 - **Gemischtoptimierung**

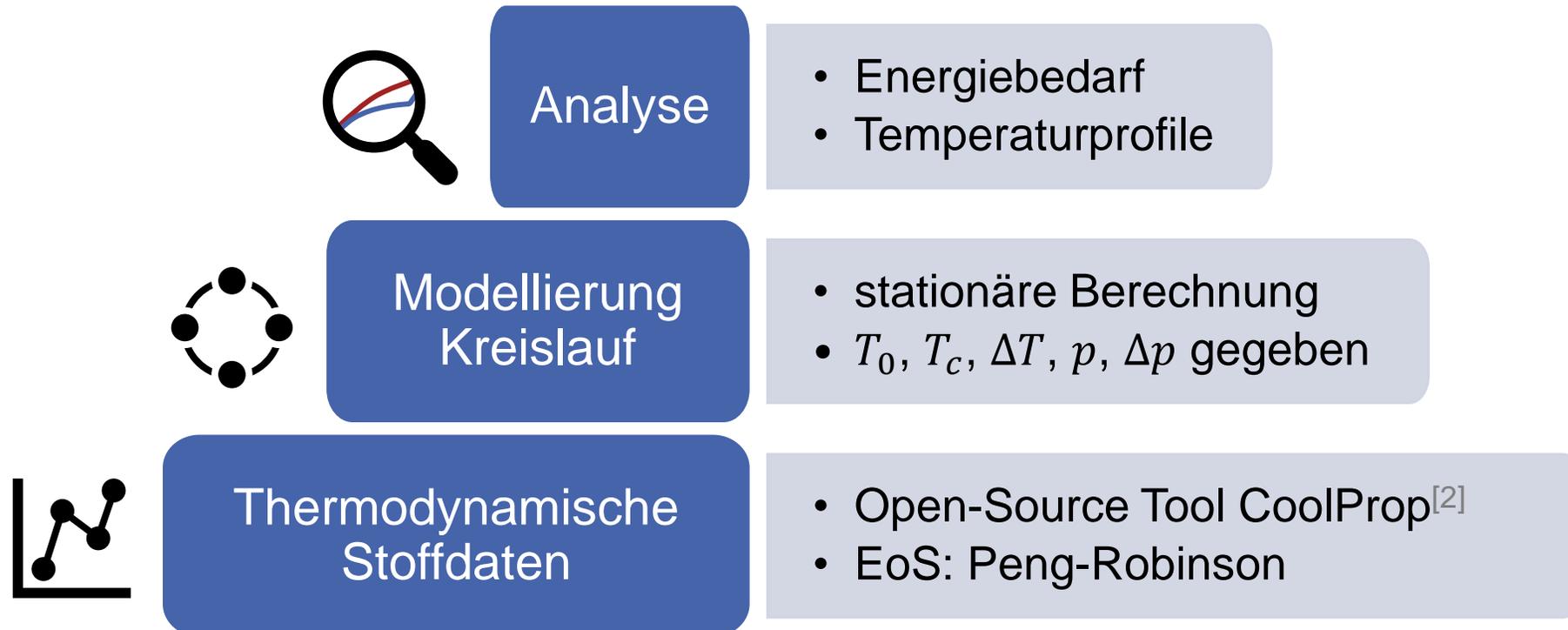


Screening automatisieren durch Tool-Entwicklung

Vorgehen zur anwendungsspezifischen Optimierung



- Modellierung
- Optimierung
- Weitere Anwendungsmöglichkeiten
 - Stromzuführung
 - Kaskade



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

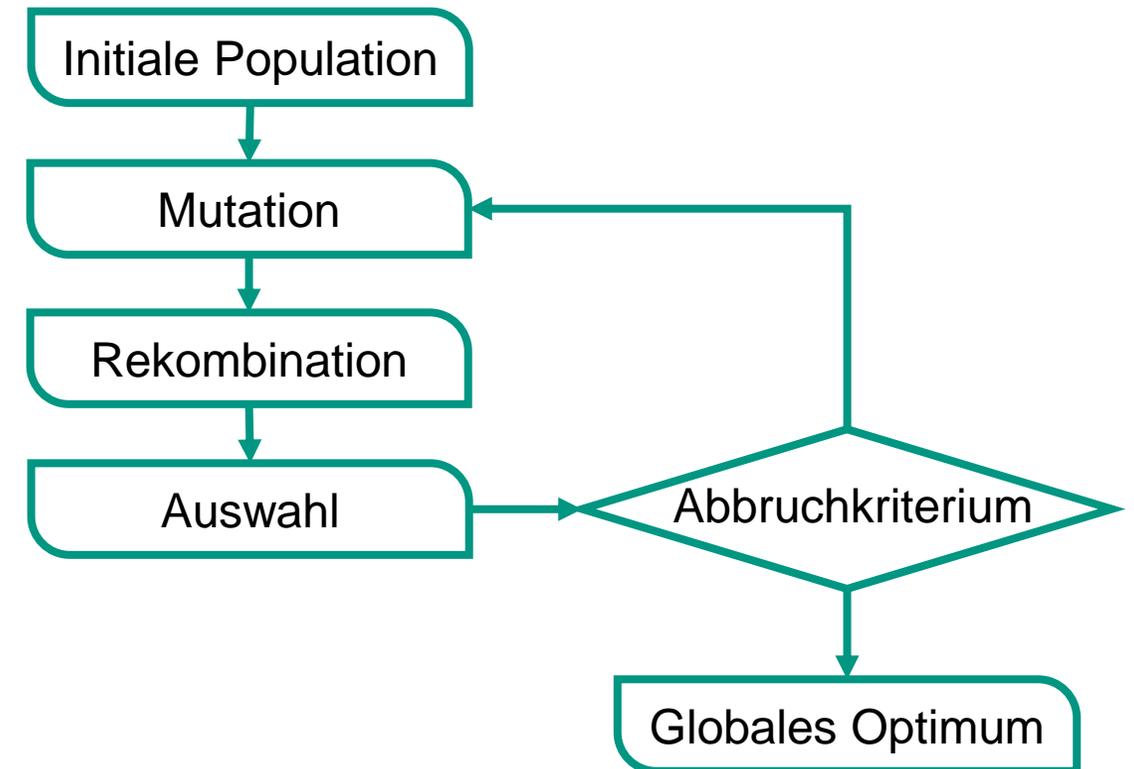
Optimierung

- Keine Ableitungen nötig
- Globale Optimierung
- Berücksichtigung Randbedingungen
- Abbruch definierbar



Differential Evolution^[3,4]

- Genetischer Algorithmus
- Globale Optimierung durch „Exploration & Exploitation“

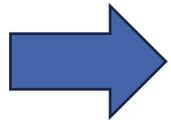


[3] R. Storn und K. Price 1997

[4] K. Price et al. 2005

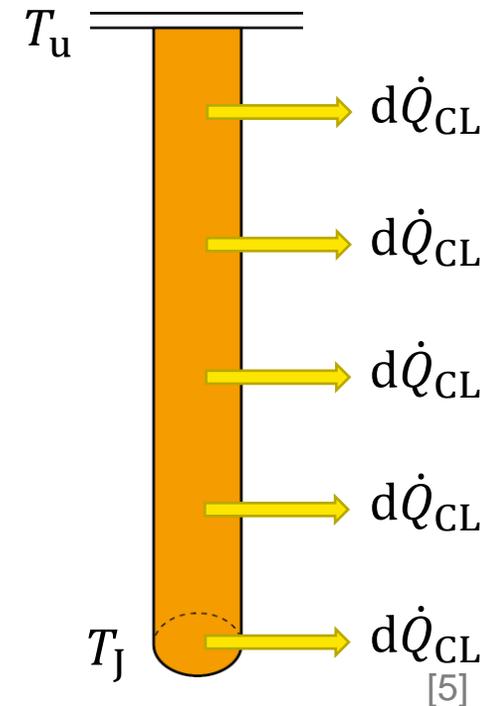
Stromzuführung

- Geringerer Leistungsbedarf zur Kühlung von Stromzuführungen bei kontinuierlicher Kühlung im Vergleich zu leitungsgekühlter Stromzuführung



DKV 2023 AA I.07:
J. Arnsberg et al. – „CMRC-gekühlte Stromzuführungen zur Erprobung in COMPASS“

- Veränderungen am Modell
 - Kein Verdampfer am kalten Ende
 - Verteilte Wärmelast auf den inneren Wärmeübertrager



[5] Arnsberg et al. 2022

Modellierung verteilte Wärmelast

■ Annahmen:

- Aufnahme Wärme in kalten Niederdruckstrom
- Auftragung über anteilige abgegebene Wärmemenge Hochdruckstrom
→ proportional zur Länge $\tilde{q}(z) = \frac{1}{L} \cdot z$
- Wandtemperatur entspricht Mittelwert aus beiden Fluidströmen

■ Joule'sche Wärme: $\dot{Q}_{el} = \frac{I^2}{A} \cdot \int_0^L \rho_{el}(T_w(z)) dz \rightarrow \dot{Q}_{el} = \frac{I^2}{A} \cdot L \cdot \int_0^1 \rho_{el}(T_{w,\tilde{q}}(\tilde{q})) d\tilde{q}$

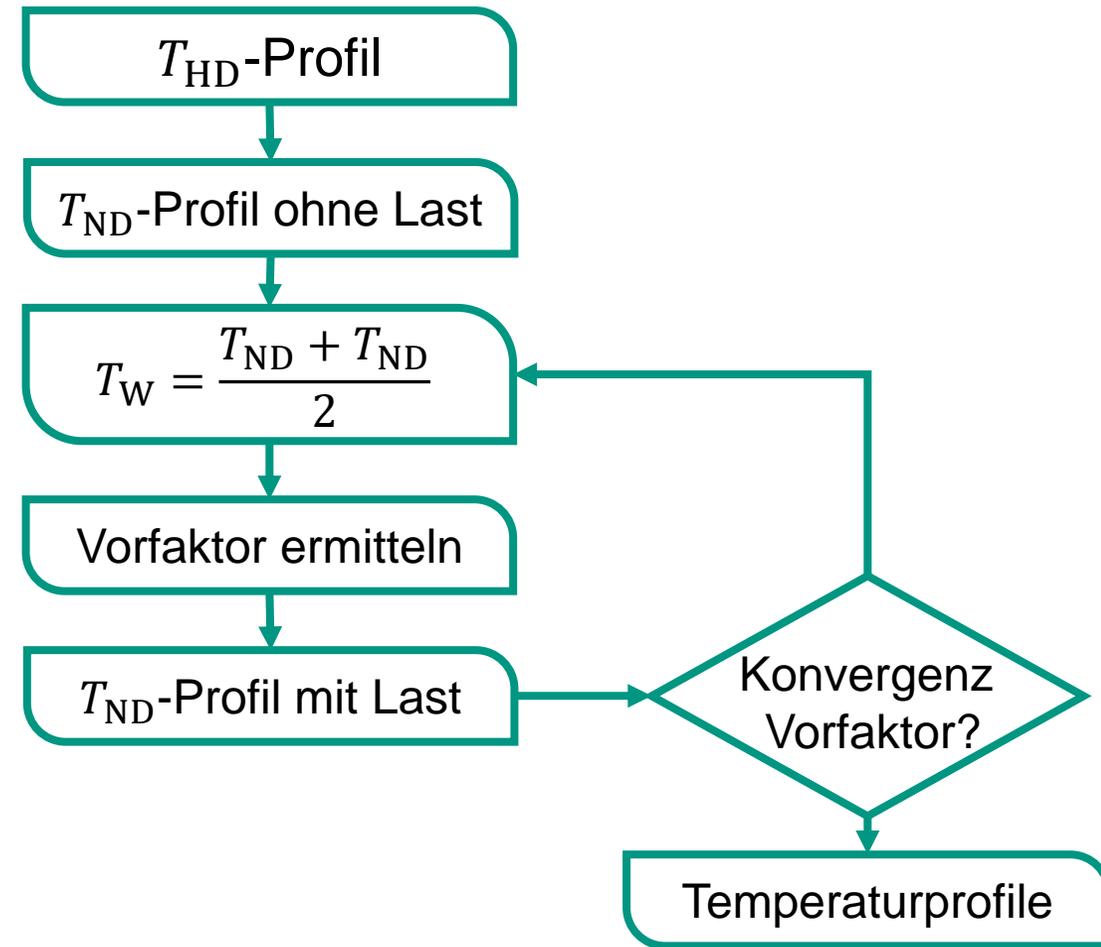
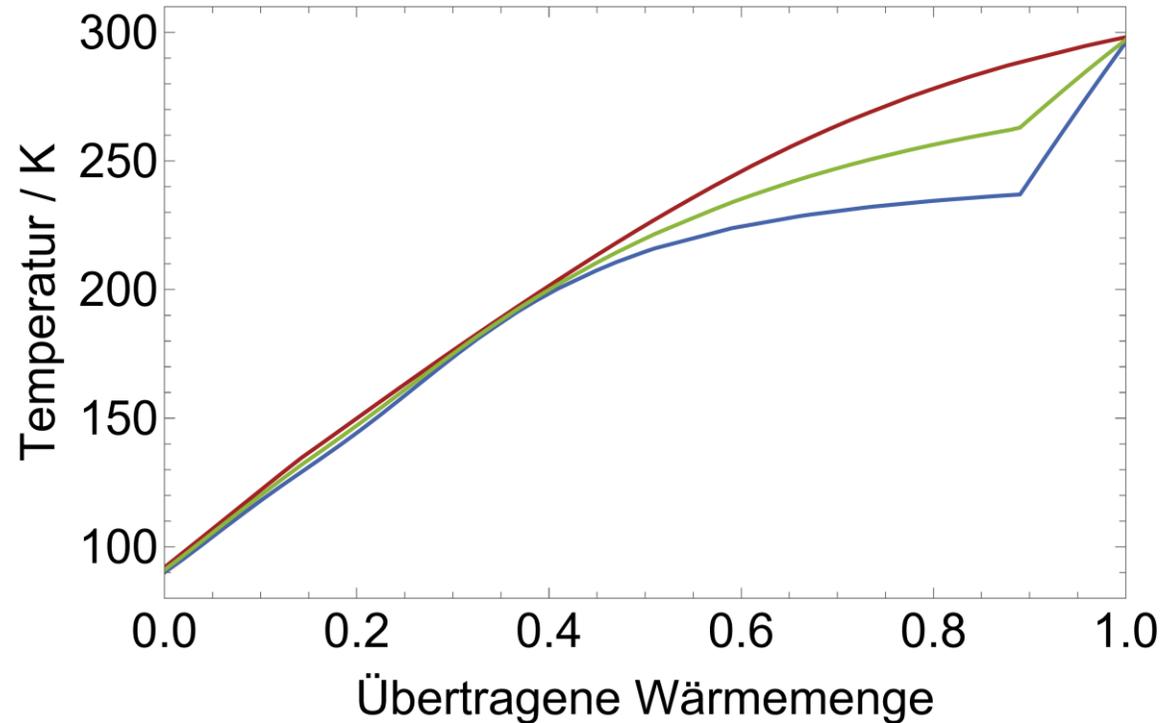
- spezifische Wärme (von ND-Strom aufgenommen)

$$q_{el} = h_{HD,aus} - h_{HD,ein} + h_{ND,aus} - h_{ND,ein}$$

- iterative Lösung T_{ND} , T_w und C

$$C = \frac{I^2 \cdot L}{A \cdot \dot{m}} \cdot \int_0^1 \rho_{el}(T_{w,\tilde{q}}(\tilde{q})) d\tilde{q}$$

Iteration Temperaturprofile



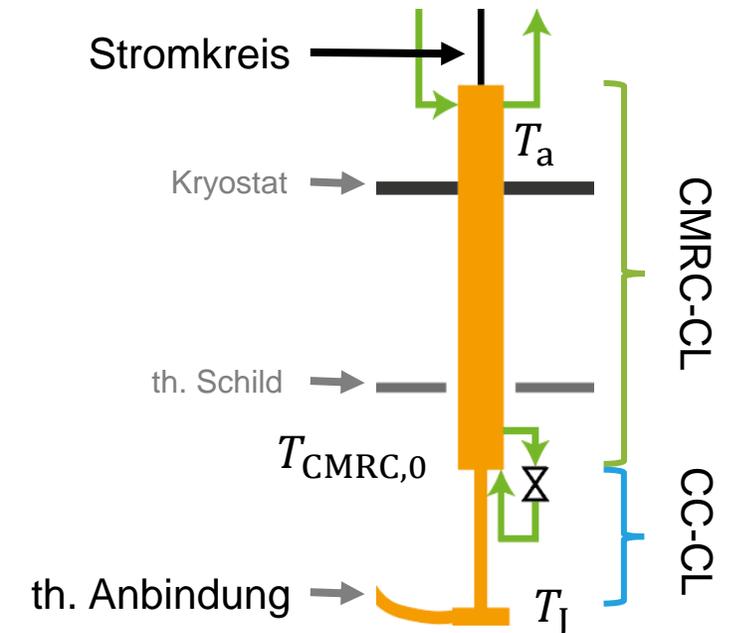
Gemischoptimierung für hybride Stromzuführung

DKV 2023 AA I.07: J. Arnsberg et al. :
 Optimierung von CMRC-gekühlten Stromzuführungen kann nur unter Betrachtung von **Anwendungsfall, Betriebsbereich** und entsprechender **Mischungsoptimierung** erfolgen

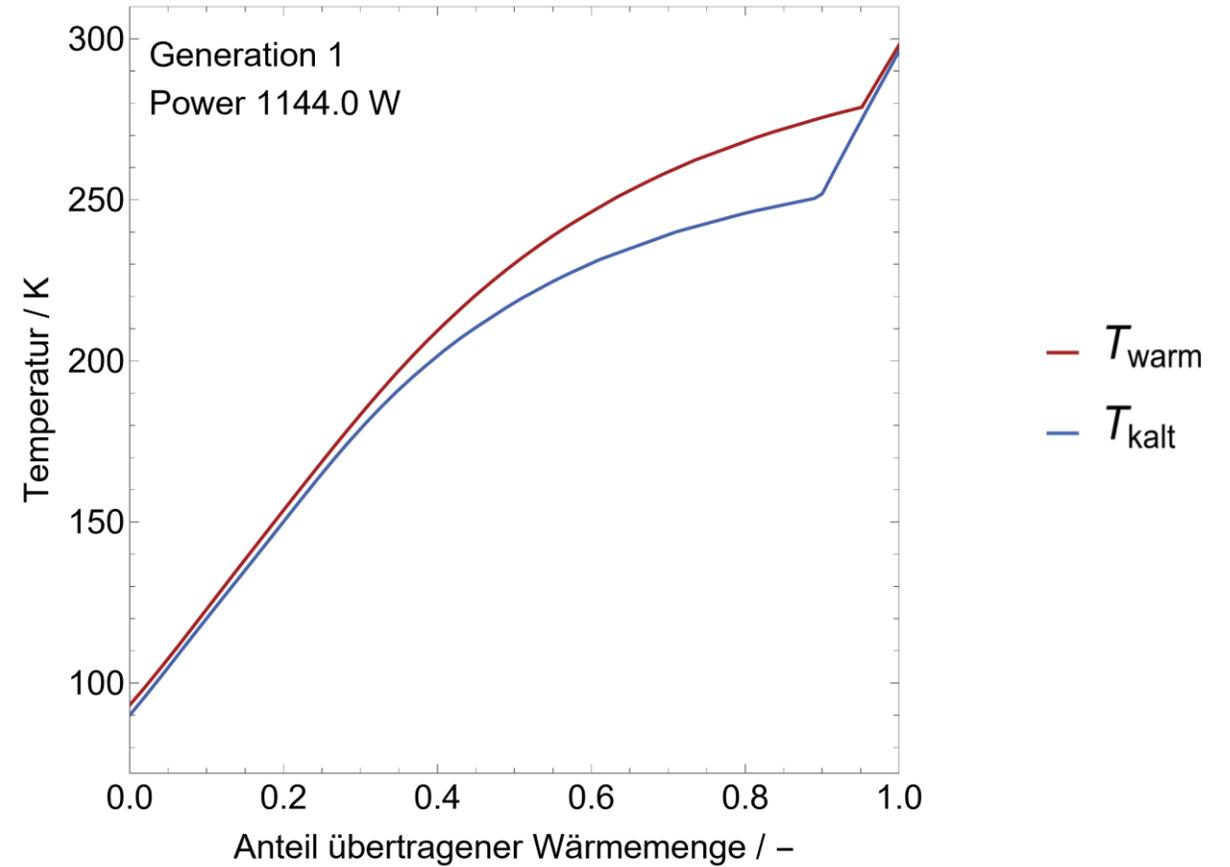
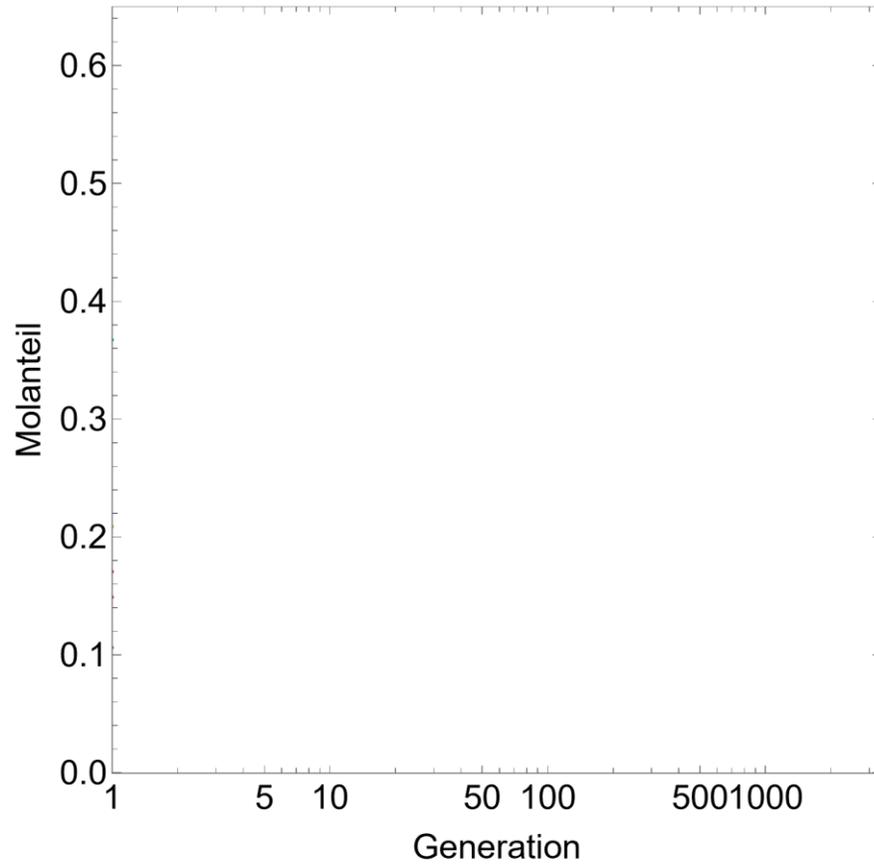
- resistiver Teil zweigeteilt
 - CMRC-Kühlung zwischen T_a und $T_{CMRC,0}$
 - Kühlung mit Cryocooler zwischen $T_{CMRC,0}$ und T_J
- Gemischoptimierung auf $T_{CMRC,0} = 90\text{ K}$

Drücke	
p_{HD}	10 ... 25 bar
p_{ND}	1 ... 10 bar

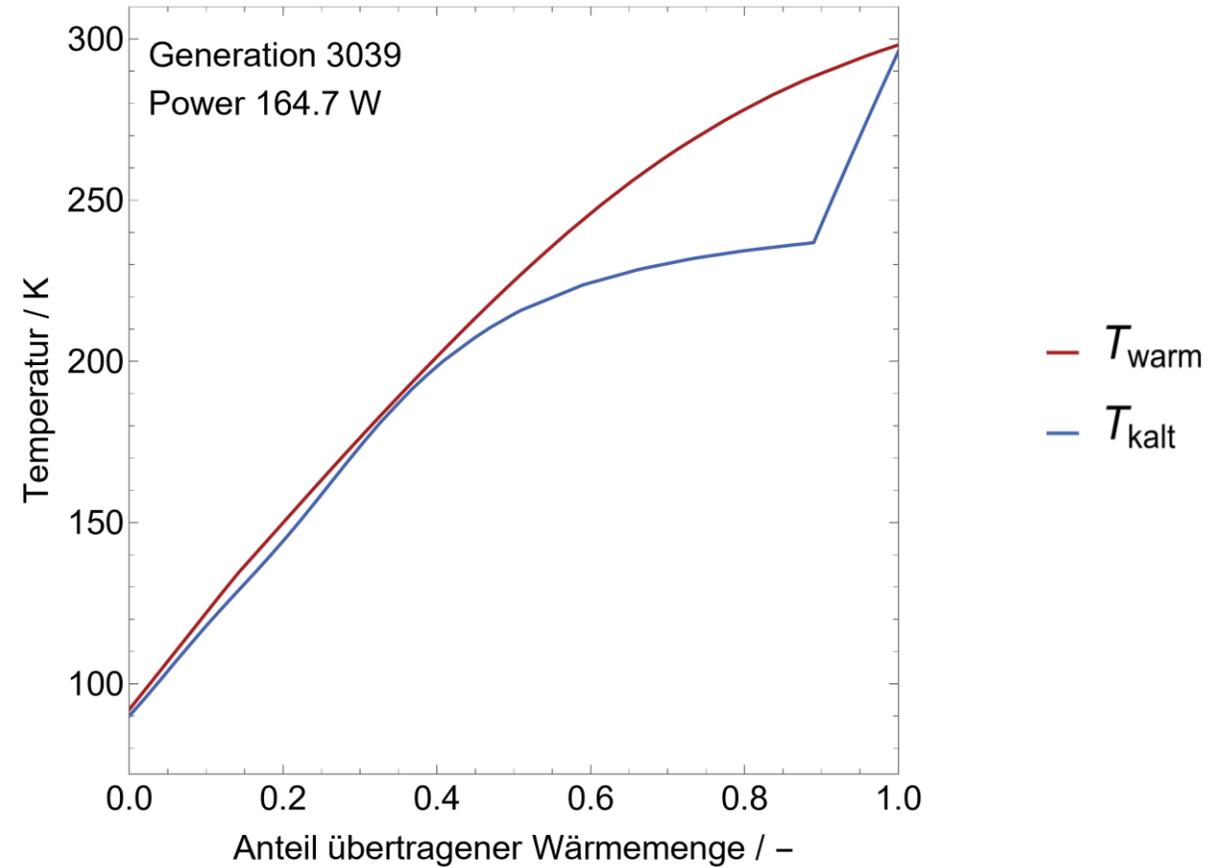
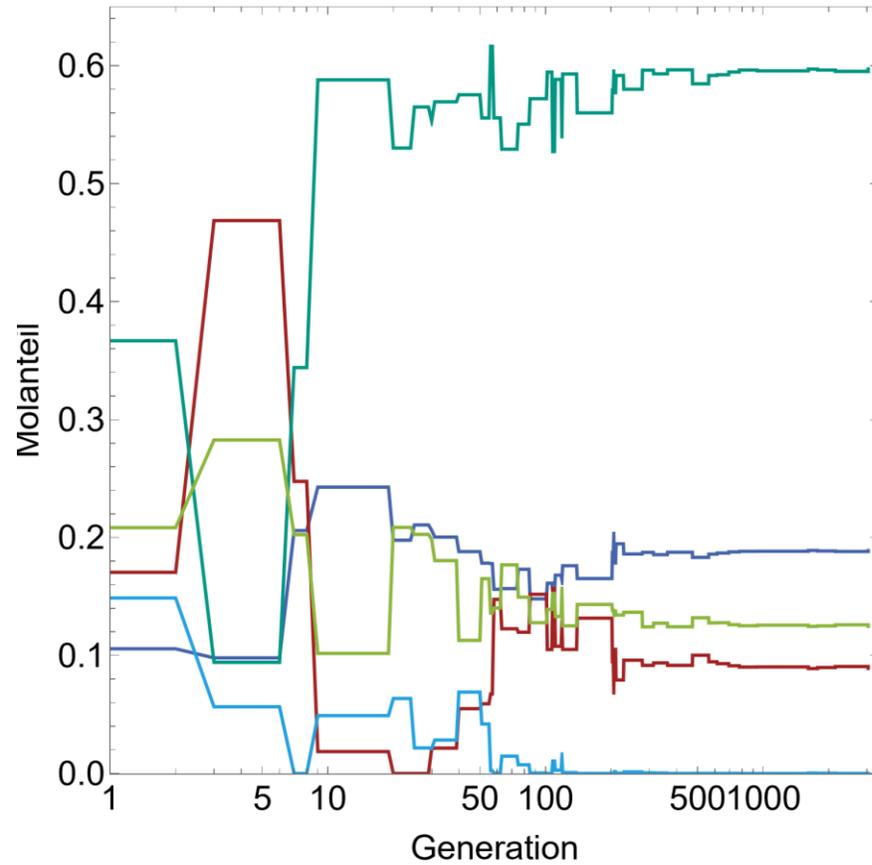
Gemischkomponenten	
$N_2, C_{1...3}, Ne$	0 ... 1



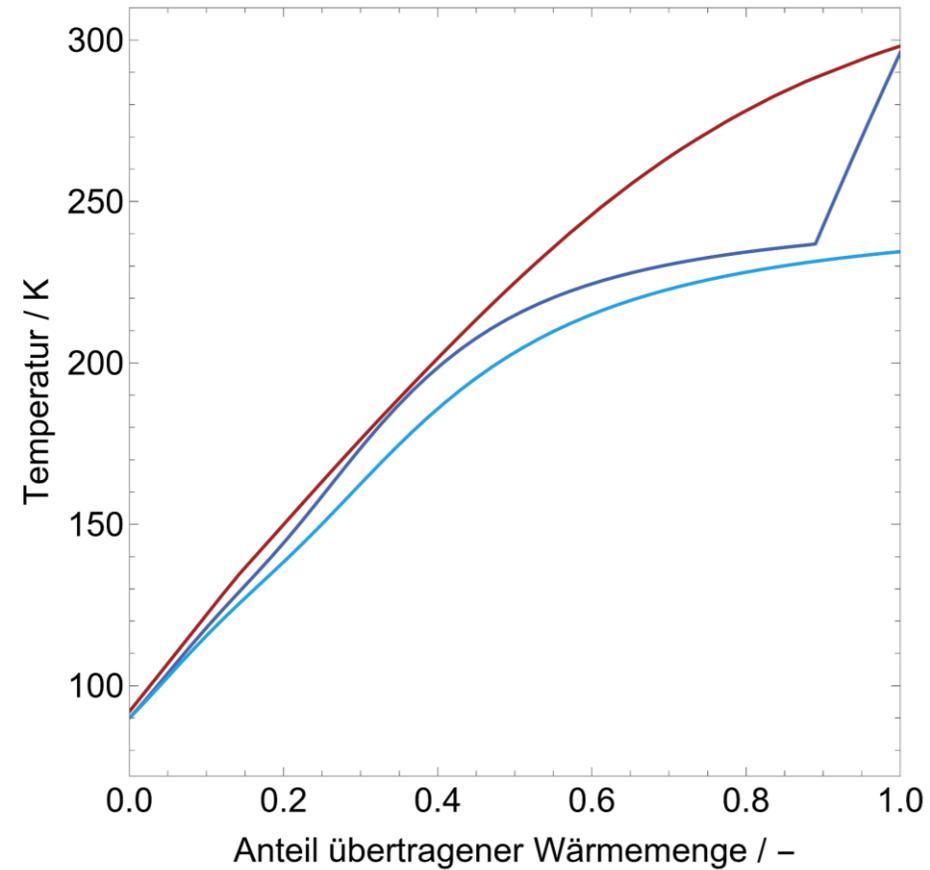
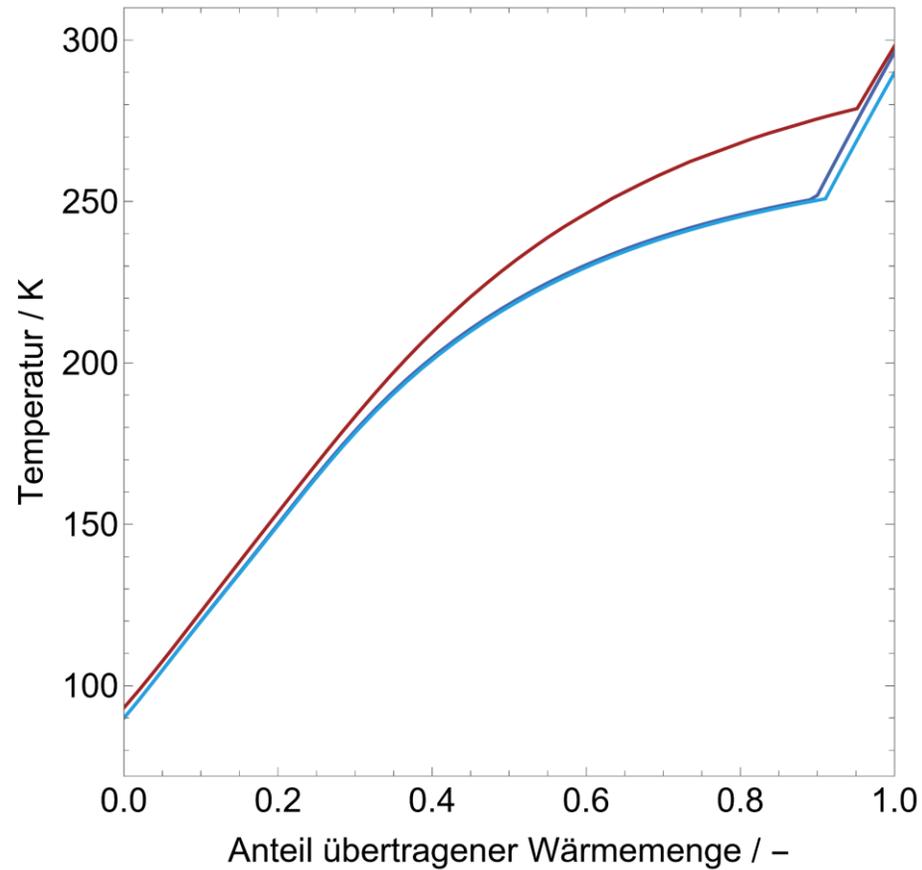
Evolution



Evolution

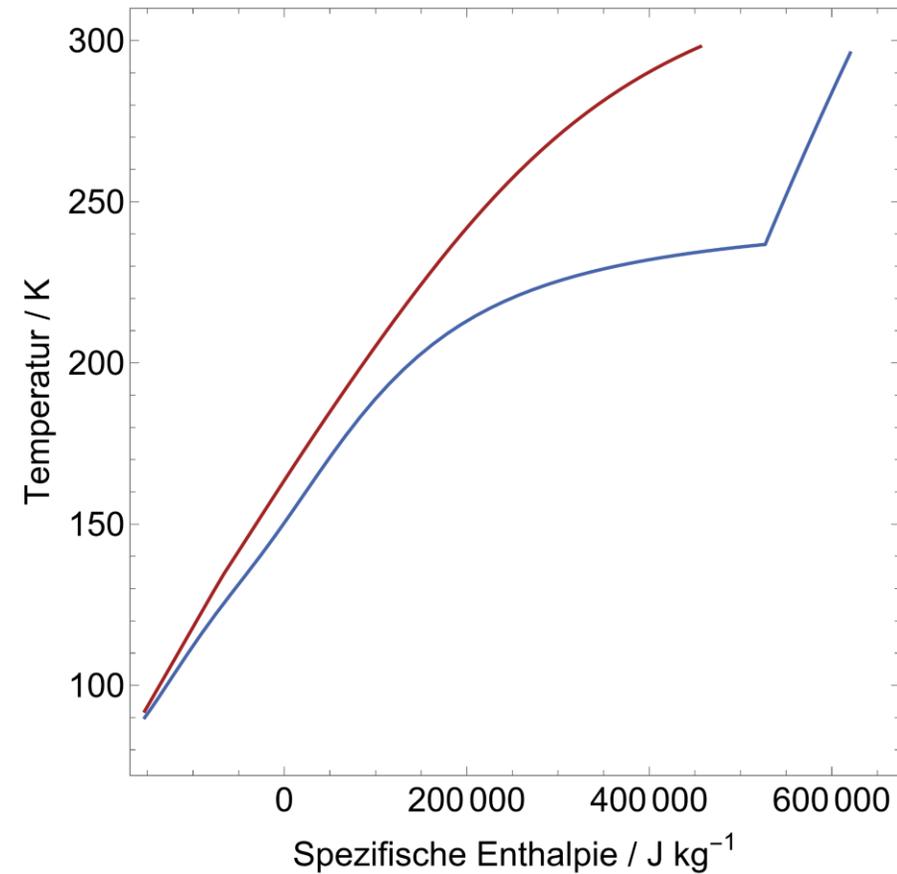
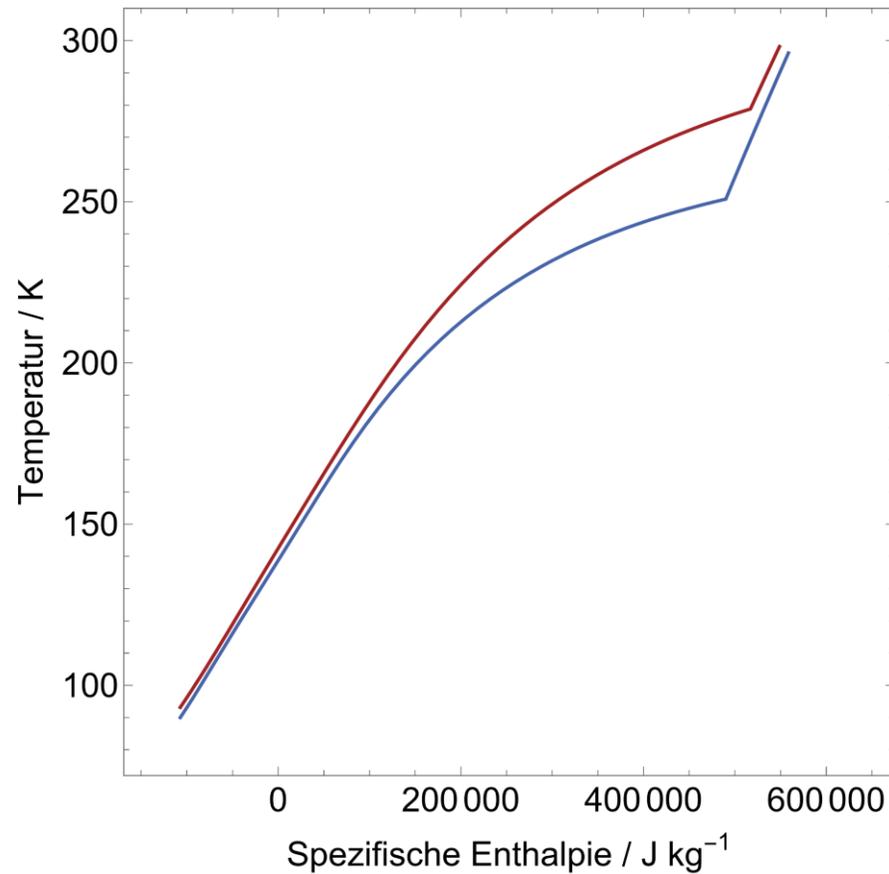


Vergleich erste und letzte Generation



- T_{warm}
- T_{kalt}
- $T_{\text{kalt,ohne Last}}$

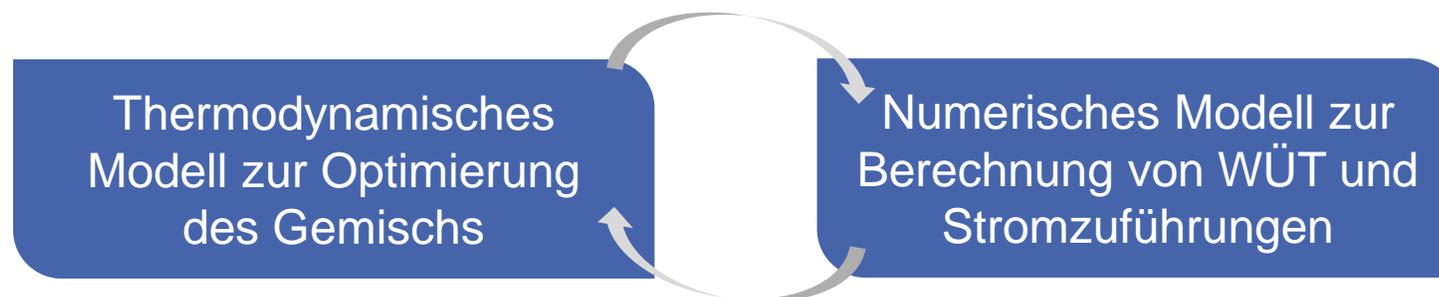
Vergleich erste und letzte Generation



— T_{warm}
— T_{kalt}

Zusammenfassung und Ausblick

- Thermodynamisches Modell zur Optimierung von CMRC
 - Zusammensetzung Gemischkomponenten und Betriebsdrücke
 - populationsbasierte Optimierung mit Differential Evolution
 - Modellierung verteilter Wärmelasten realisiert
- Iterative Optimierung Stromzuführung für supraleitende Anwendungen



Quellenangaben

- [1] <https://www.nkt.de/presse-events/nkt-entwickelt-den-prototyp-fuer-das-weltweit-laengste-supraleitende-stromkabel>, zuletzt geprüft: 24.10.2022
- [2] 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.
- [3] R. Storn und K. Price, „Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces“, *Journal of Global Optimization*, Bd. 11, S. 341-359, 1997. doi: 10.1023/A:1008202821328
- [4] K. Price, R. Storn und J. Lampinen, „Differential evolution - A practical approach to global optimization ; with 48 tabelle“, Springer Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-20950-8. 2005.
- [5] J. Arnsberg, M. Stamm, S. Grohmann, „Aufbau des Compact Accelerator Systems Teststand (COMPASS)“, de, 2022. DKV Tagung Magdeburg, AA.I.19, 18.11.2022.