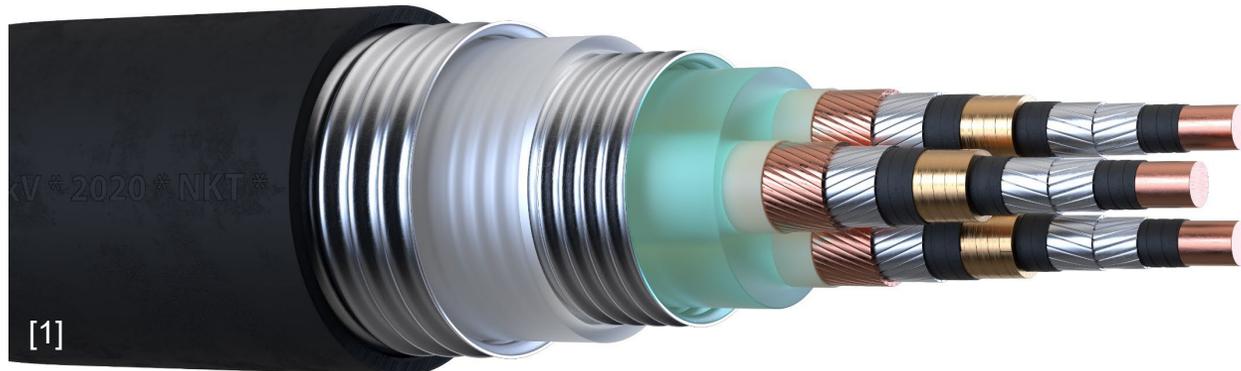


Konzentrationsverschiebungen in einem kryogenen Gemischkälte- kreislauf mit mikrostrukturiertem Wärmeübertrager

J. Arnsberg, S. Grohmann, DKV-Tagung 2021, AA I.22, 19.11.2021

Motivation

- Kühlbedarf bei Temperaturen zwischen 55 K und 100 K
 - Hochtemperatursupraleitende Anwendungen
 - Stromzuführungen für supraleitende Anwendungen
 - Stickstoffverflüssigung
- Bevorzugung geschlossener Prozesse



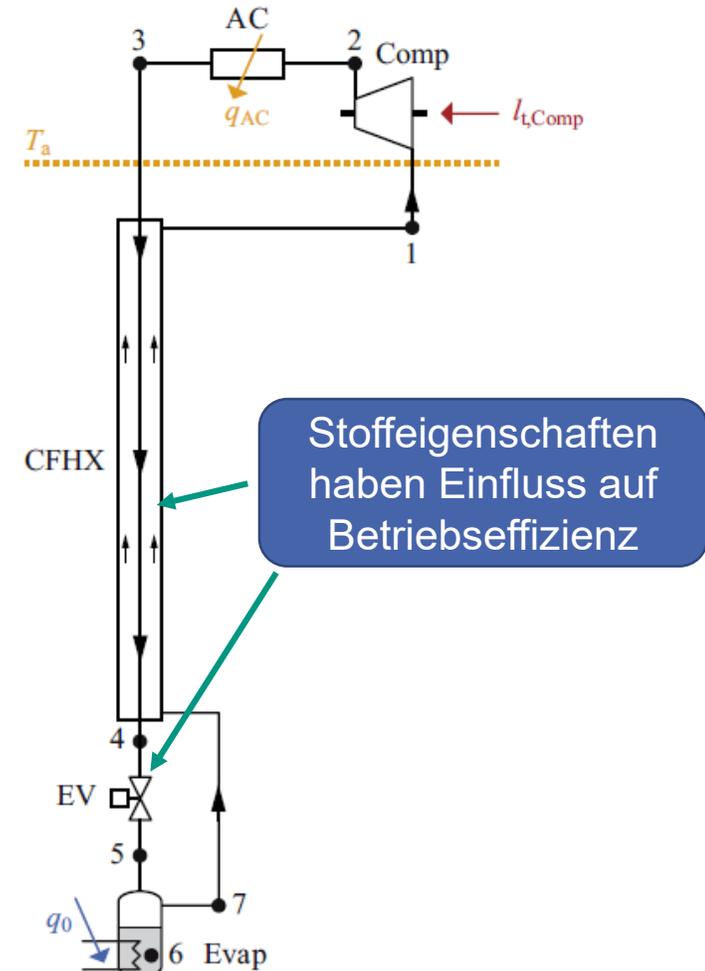
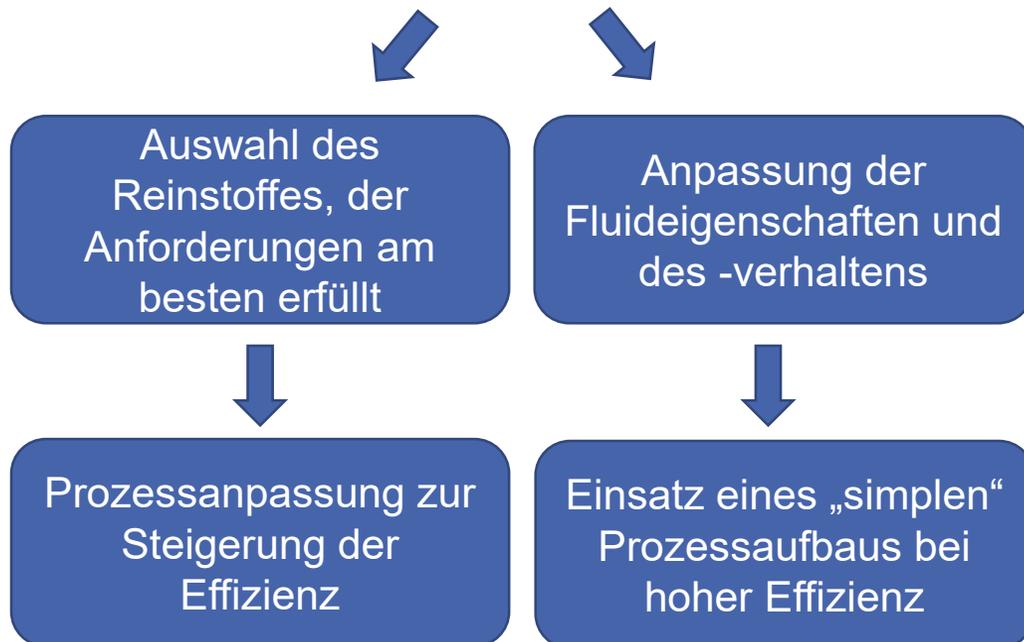
[1] www.nkt.de



[2] commons.wikimedia.org

Motivation

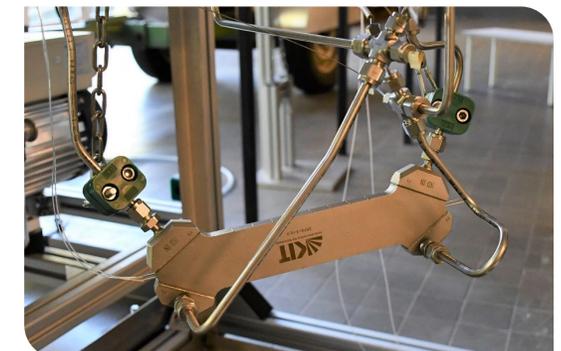
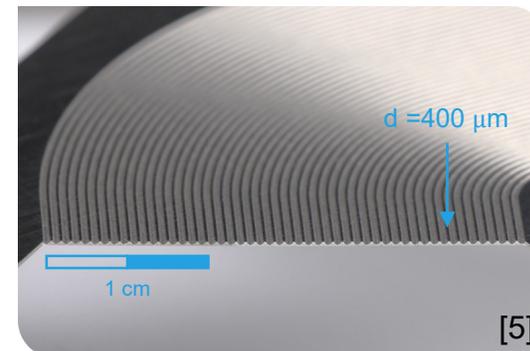
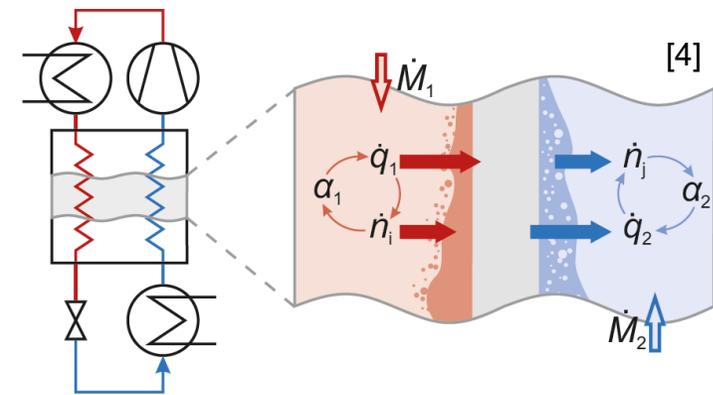
- Schlüsselkomponente in jedem Kälteprozess ist das **Arbeitsmedium**, besonders dessen
 - Zustands- und Transportgrößen
 - Zustandsänderungen während des thermodynamischen Kreisprozesses



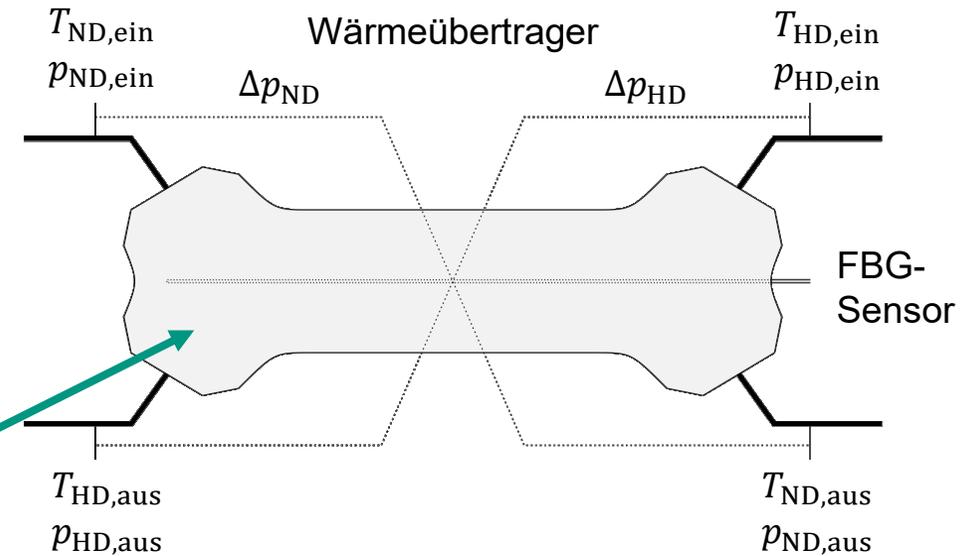
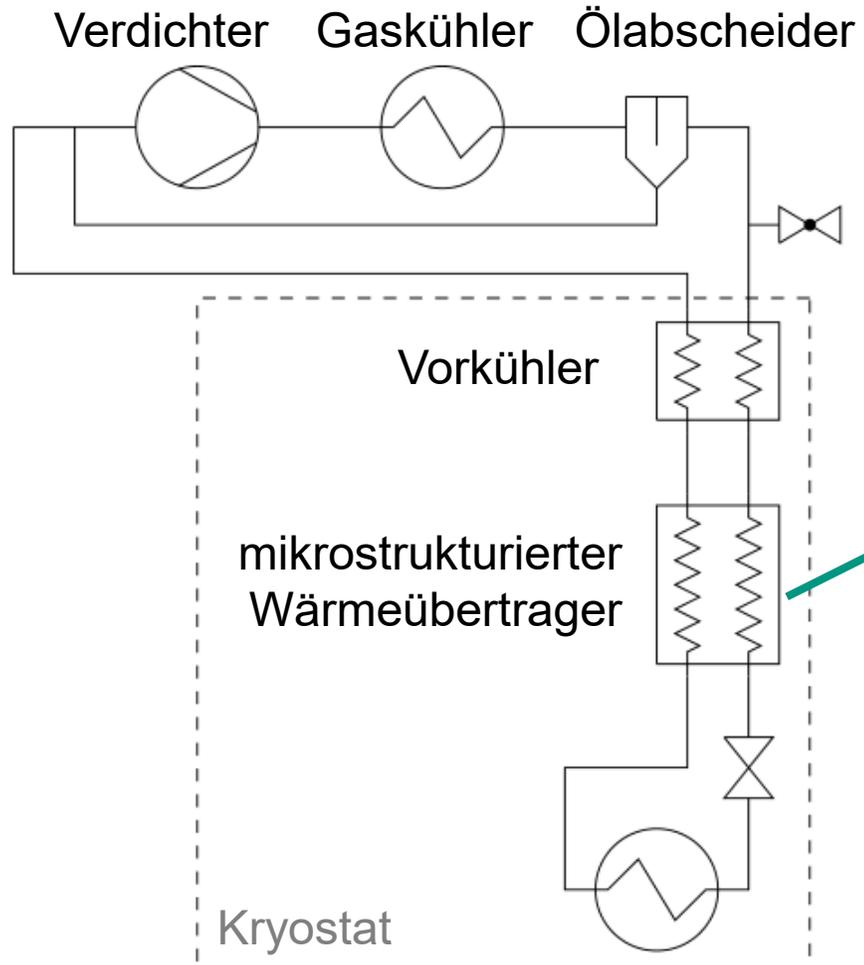
Entwicklung mikrostrukturierter Wärmeübertrager

- Numerisches Modell zur Berechnung von Wärmeübertragern [3]
 - iterative Lösung der Erhaltungsgleichungen
 - Beschreibung von Wärme- und Stofftransport in Zweiphasenströmungen über empirische Korrelationen
 - parasitäre Wärmelasten berücksichtigt

- Entwicklung neuartiger Wärmeübertrager
 - hohe Effizienz durch kleine Gradienten
→ große Wärmeübertragungsfläche
 - Entwicklung Wärmeübertrager mit Minikanälen in Kooperation mit KIT-IMVT



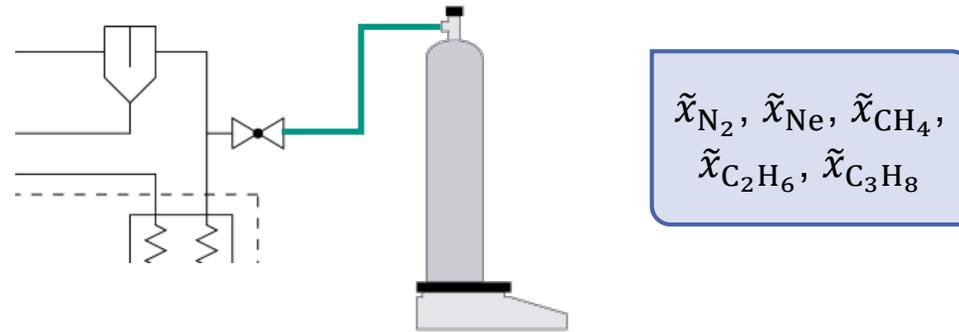
Versuchsaufbau



Komponente i	Stoffmengenanteile \tilde{x}_i in mol-%
Stickstoff	20 – 30
Methan	22 – 29
Ethan	15 – 20
Propan	28 – 34
Neon	0 – 8

Bestimmung der Gemischzusammensetzung

- gravimetrisch bei Befüllung:



- im Betrieb über Gaschromatographie:



[6] www.agilent.com

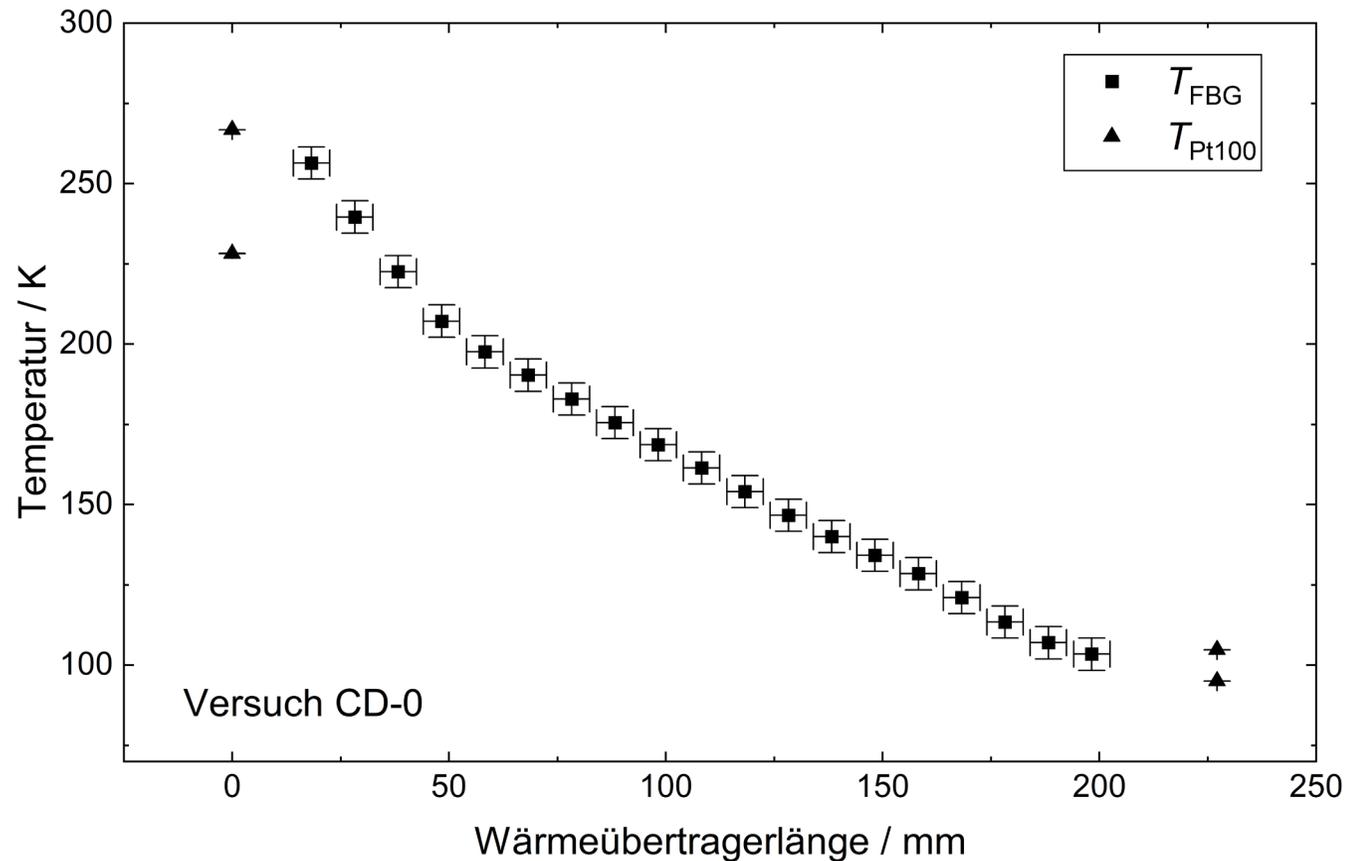
- im Betrieb: Veränderung der Gemischzusammensetzung

- Ursachen:

- Flüssigkeitsansammlungen
- Strömungsgeschwindigkeiten der Phasen
- Absorption in Verdichteröl

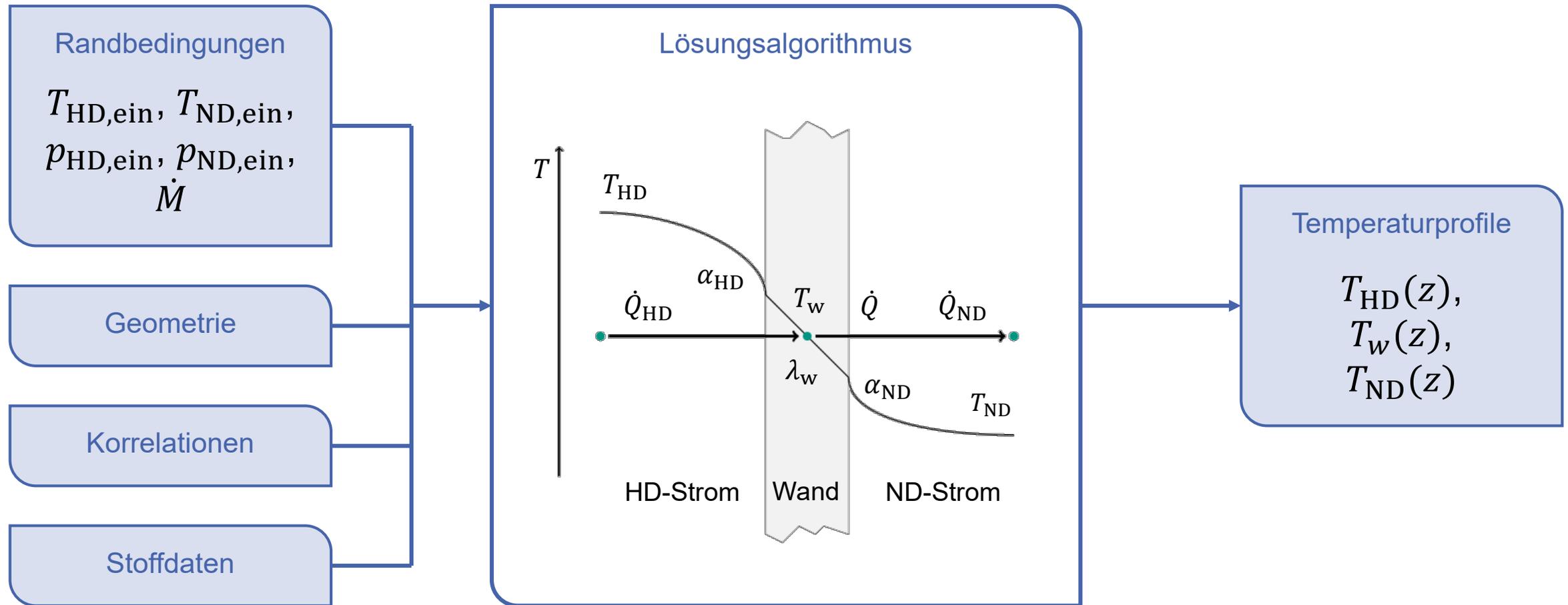
➔ Anlageneinfluss auf die Verschiebung der Zusammensetzung

Messergebnisse



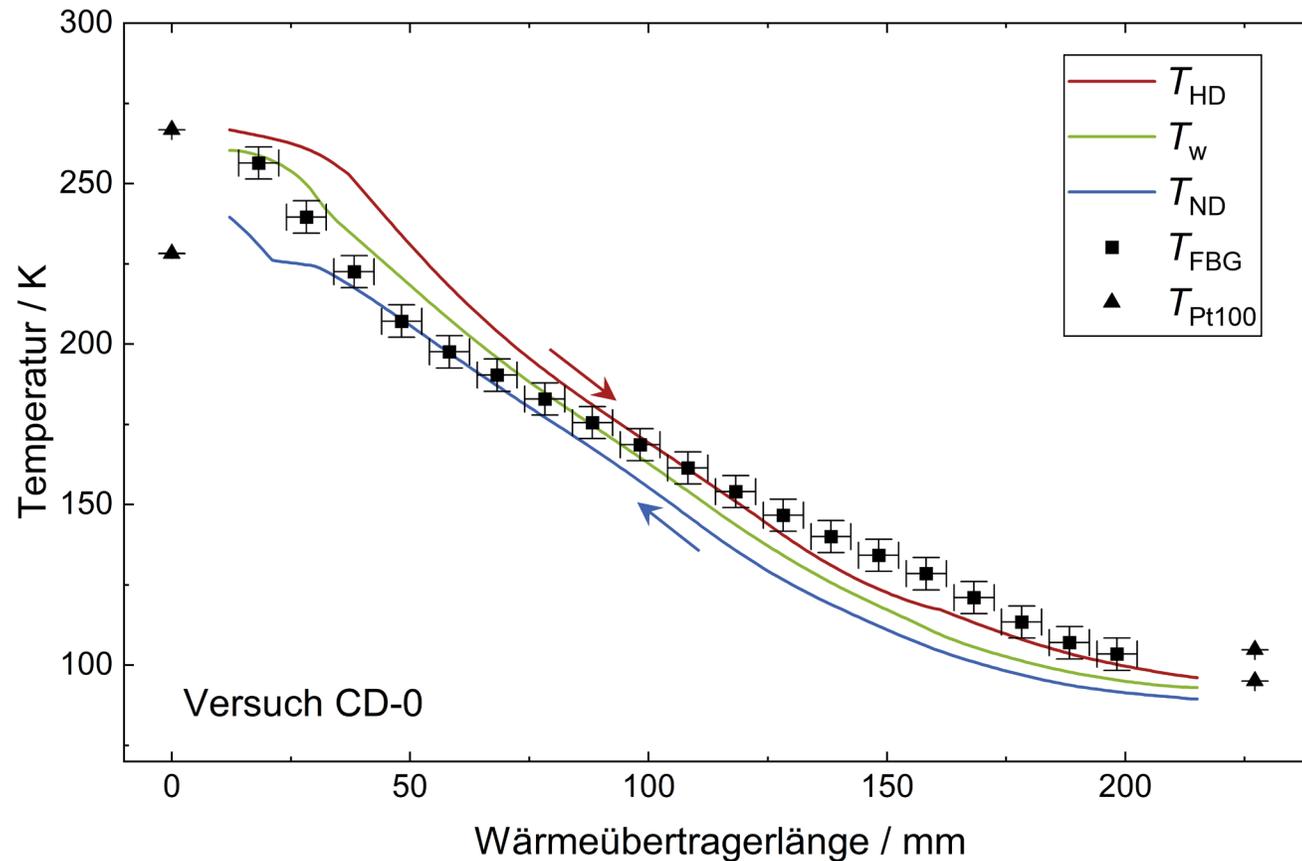
- Messdatenaufzeichnung und Probennahme im stationären Betriebszustand
- Auswertung und Berechnung der Unsicherheit nach GUM
- vollständige Ausnutzung des Wärmeübertragers
- Wandtemperaturen liegen zwischen den Temperaturen in den Fluidströmen

Numerisches Modell [3]



[4] D. Gomse, 2019.

Validierung des Simulationsmodells



- experimentelle Eintrittsbedingungen
- zirkulierende Zusammensetzung:

Stoffmengenanteile in mol-%			
\tilde{z}_{N_2}	\tilde{z}_{CH_4}	$\tilde{z}_{C_2H_6}$	$\tilde{z}_{C_3H_8}$
25,3	29,5	16,1	29,1

$$U(\tilde{z}_i) \leq 0,6 \text{ mol-\%, } k = 2.$$

➡ zufriedenstellende Vorhersage der Messdaten

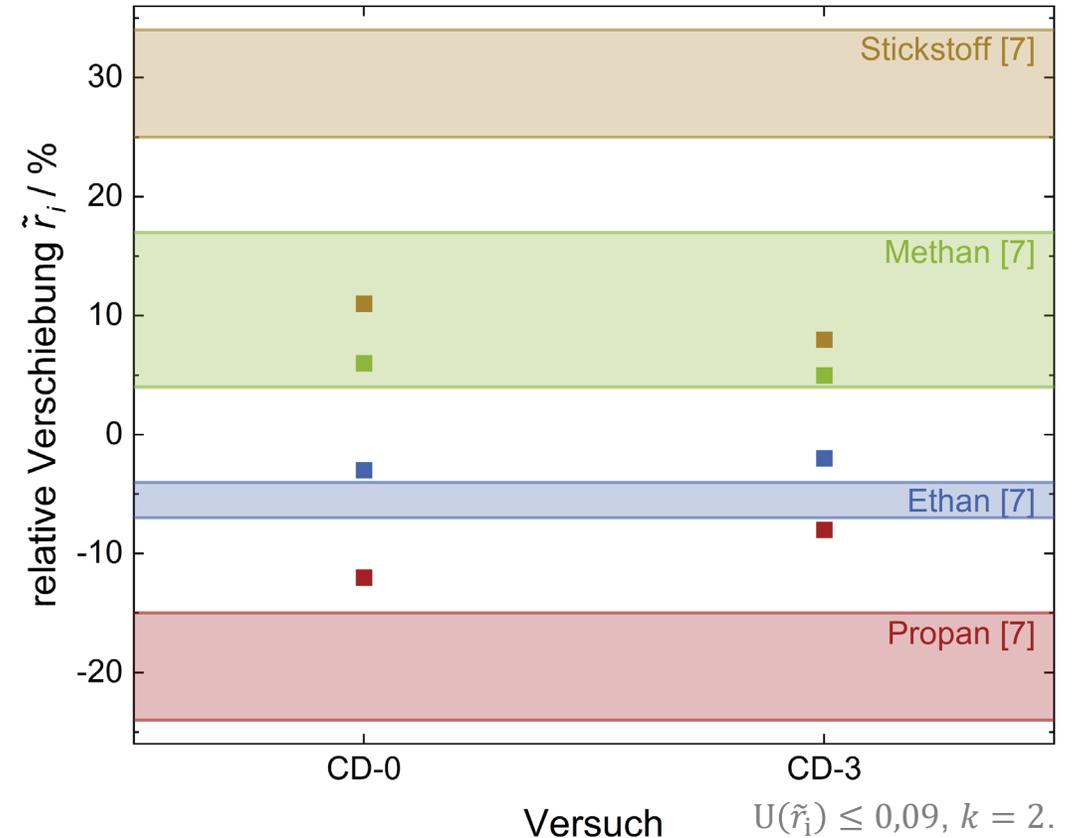
Verschiebung der Zusammensetzung

- relative Verschiebung:

$$\tilde{r}_i = \frac{\tilde{z}_i - \tilde{x}_i}{\tilde{x}_i}$$

- Verschiebung der Zusammensetzung um geringeres Maß, als in der Literatur beschrieben

➔ geringes inneres Volumen des Wärmeübertragers



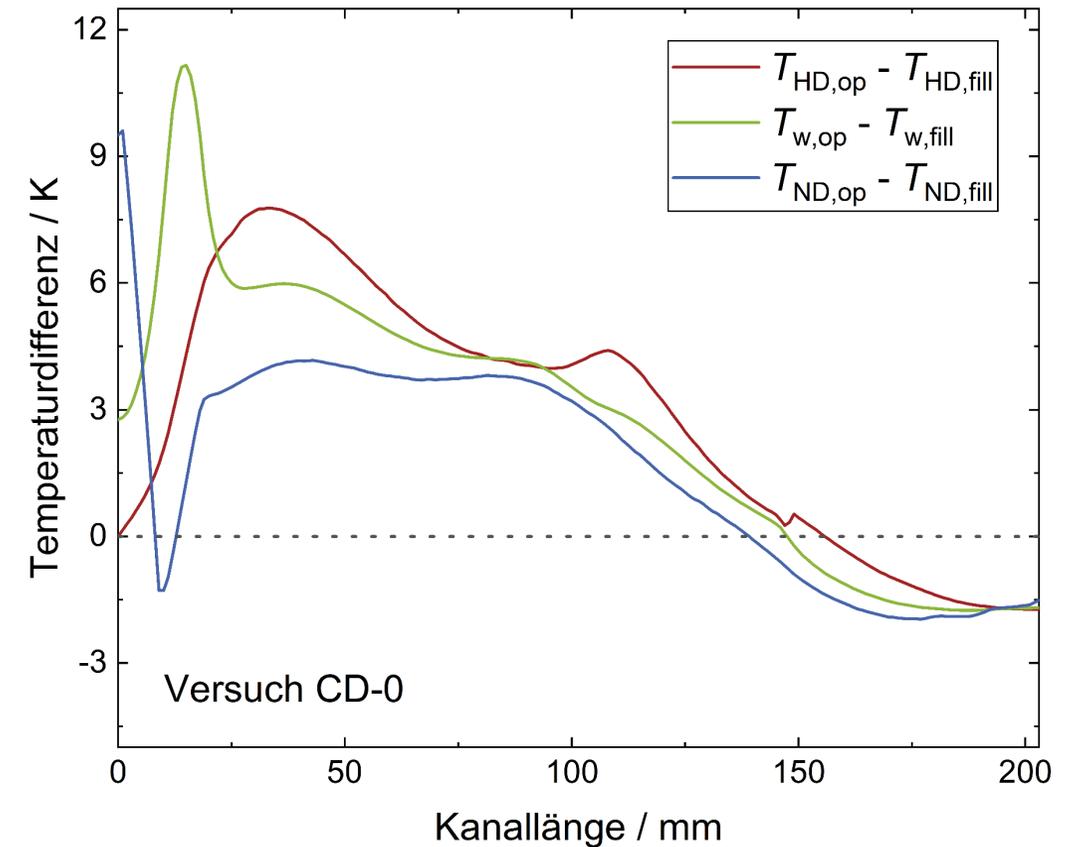
[7] N. Lakshmi Narasimhan und G. Venkatarathnam, 2010.

Einfluss Verschiebung der Zusammensetzung

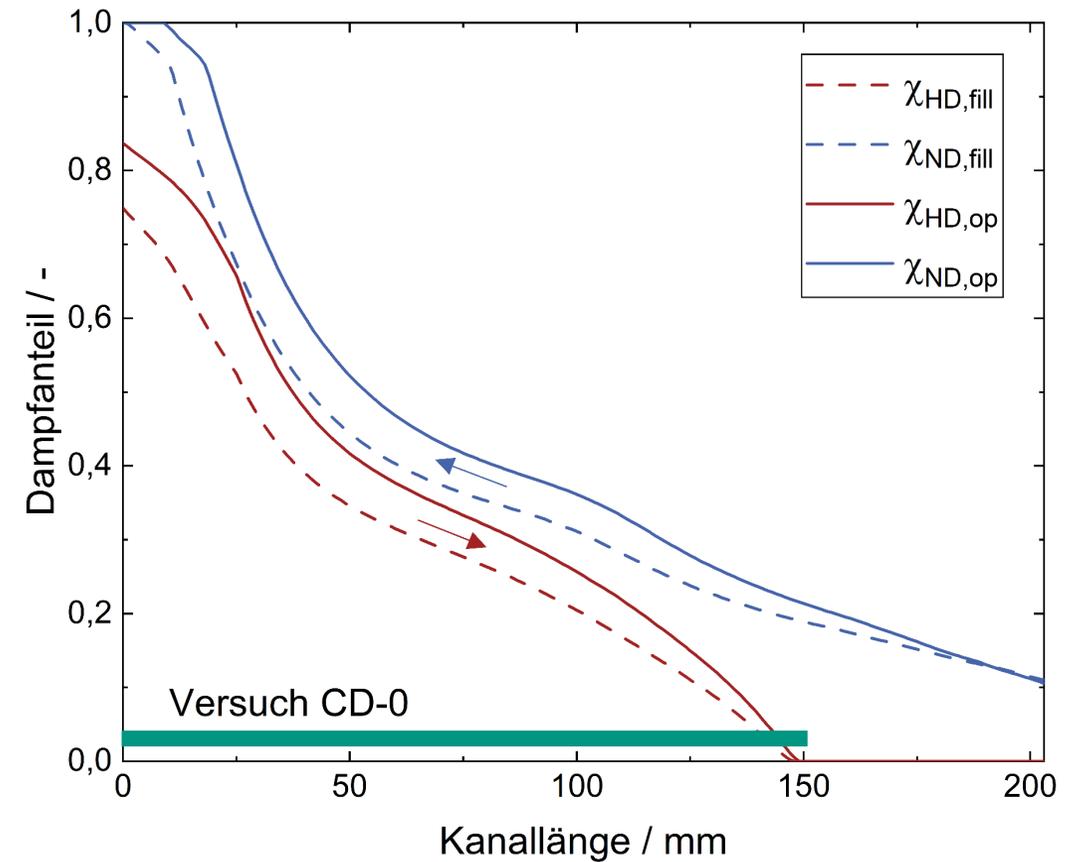
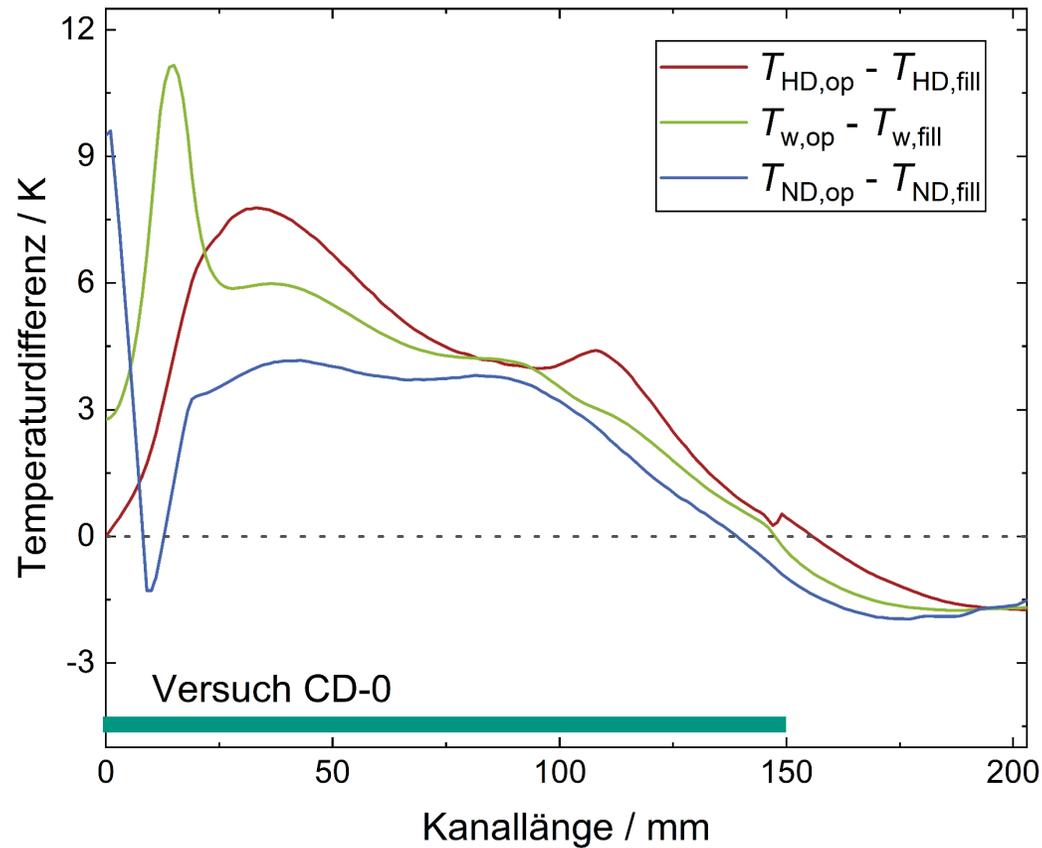
- Simulation mit:
 - Zusammensetzung eingefülltes Gemisch \tilde{x}_i
 - $T_{HD,fill}(z)$
 - Zusammensetzung aus Gaschromatographie \tilde{z}_i
 - $T_{HD,op}(z)$

- Temperaturänderung durch Verschiebung der Zusammensetzung:

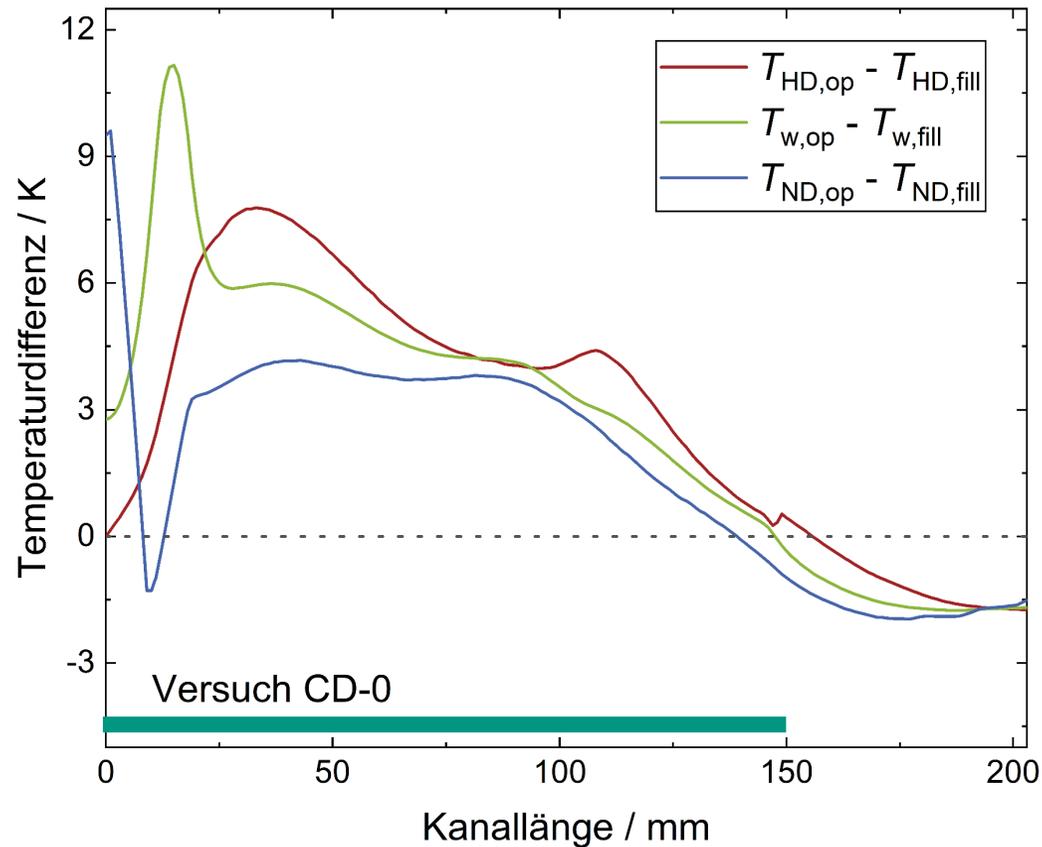
$$\Delta T_{HD}(z) = T_{HD,op}(z) - T_{HD,fill}(z)$$



Einfluss Verschiebung der Zusammensetzung

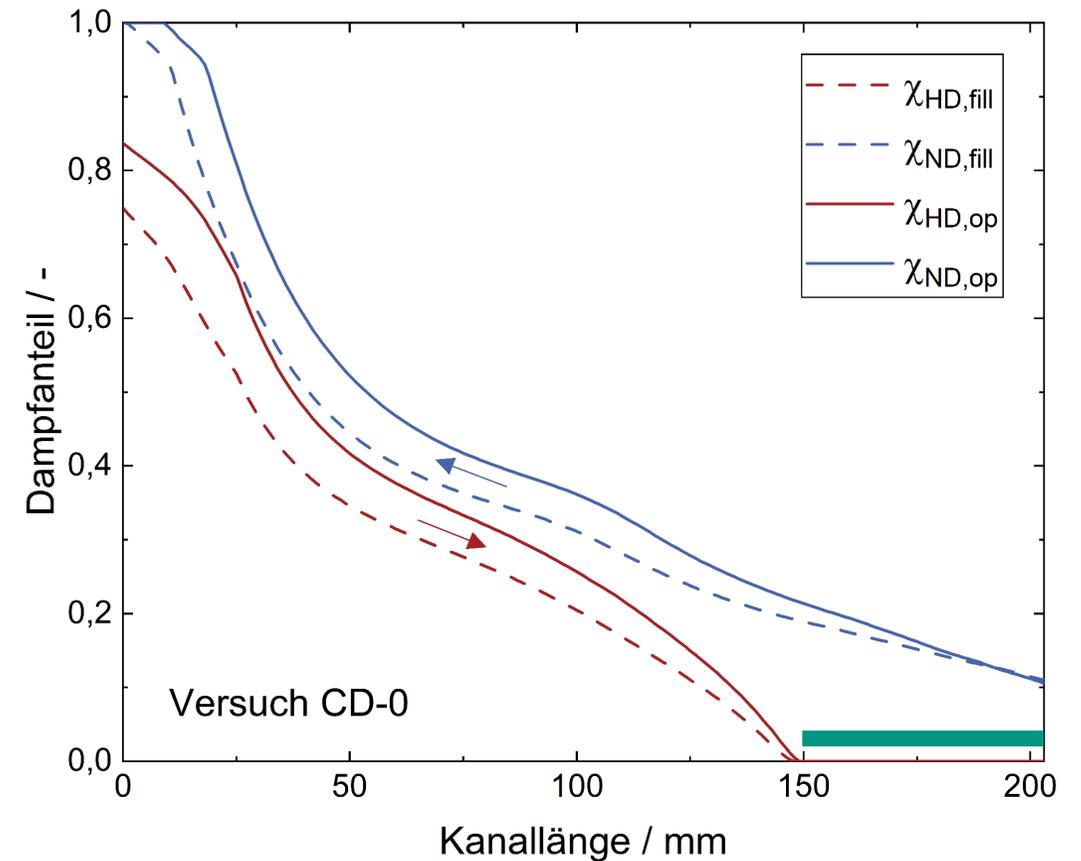
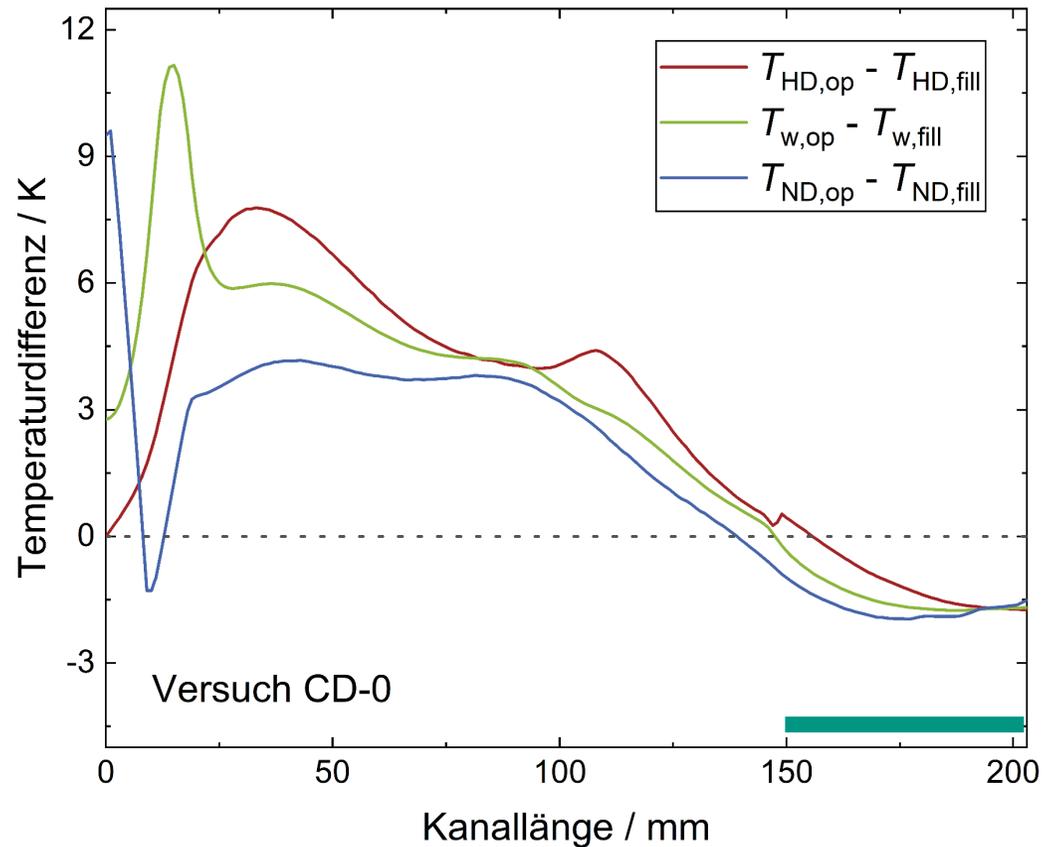


Einfluss Verschiebung der Zusammensetzung

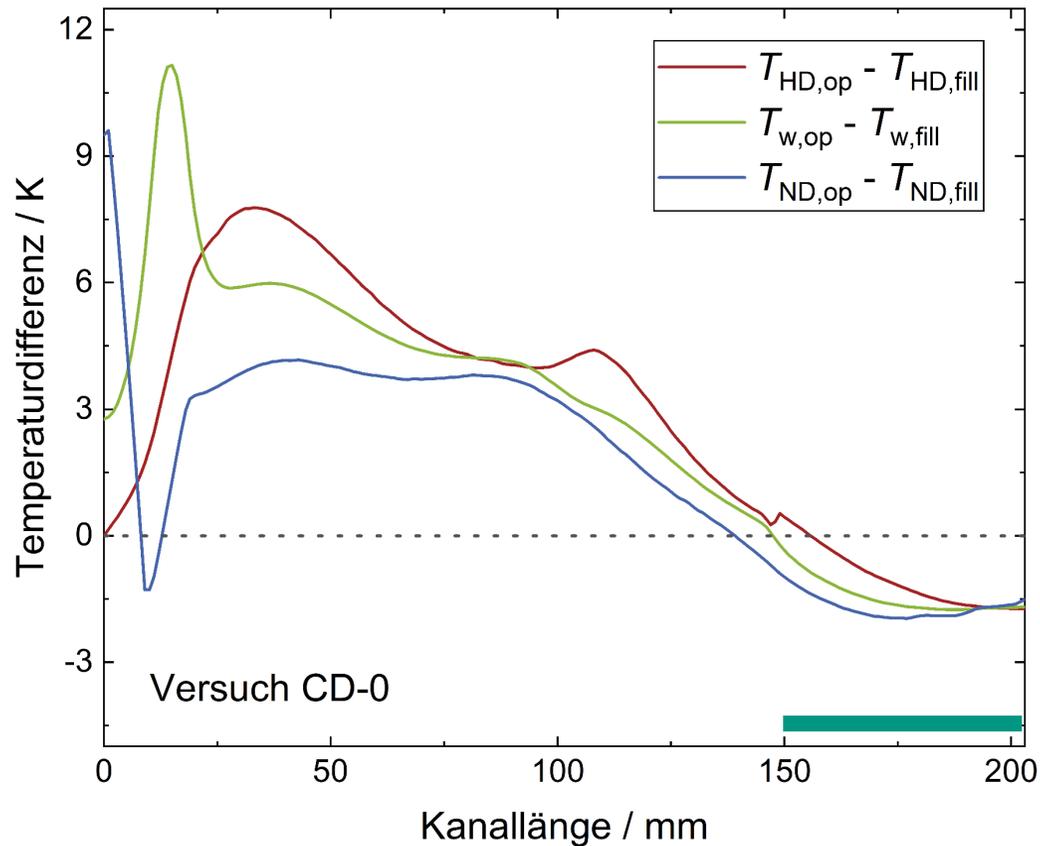


- Zunahme der Temperaturen im Bereich bis 150 mm Wärmeübertragerlänge
 - Erhöhung des lokal vorliegenden Dampfanteils $\chi(z)$ aufgrund höherer Tiefsiederkonzentration
 - $T = f(p, \chi)$, resultierend: Erhöhung der lokalen Temperatur

Einfluss Verschiebung der Zusammensetzung



Einfluss Verschiebung der Zusammensetzung



- Zunahme der Temperaturen im Bereich bis 150 mm Wärmeübertragerlänge
 - Erhöhung des lokal vorliegenden Dampfanteils $\chi(z)$ aufgrund höherer Tiefsiederkonzentration
 - $T = f(p, \chi)$, resultierend: Erhöhung der lokalen Temperatur
- Verringerung der Temperaturen im Wärmeübertrager nach vollständiger Kondensation des HD-Stroms
 - Erhöhung des Tiefsiederanteils in zirkulierender Zusammensetzung
 - Resultierend: verringerte Siedetemperatur

Zusammenfassung

- Zuverlässigkeit des numerischen Modells
 - geringfügige Unterschätzung der Kühltemperatur
 - unter Berücksichtigung der verwendeten Zustandsgleichungen zufriedenstellende Ergebnisse

- Verschiebung der Zusammensetzung
 - in mikrostrukturierten Wärmeübertragern offenbar geringer ausgeprägt als erwartet
 - Erhöhung der lokalen Dampfanteile beeinflusst Temperaturverläufe im inneren Wärmeübertrager signifikant

- ➔ Experimentelle Bestimmung der Zustandsgleichungen (EoS) relevanter Stoffgemische mit Phasengleichgewichtsprüfstand CryoPHAEQTS in Zukunft möglich

- [1] <https://www.nkt.de/presse-events/nkt-entwickelt-den-prototyp-fuer-das-weltweit-laengste-supraleitende-stromkabel>, zuletzt geprüft 09.11.2021
- [2] R. Müller, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16200206>
- [3] D. Gomse, „Development of heat exchanger technology for cryogenic mixed-refrigerant cycles,“ PhD thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2019.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] <https://www.agilent.com/en/product/gas-chromatography/gc-analyzers/energy-chemical-gc-analyzers/liquefied-petroleum-gas-analyzers>, zuletzt geprüft 03.11.2020.
- [7] N. Lakshmi Narasimhan und G. Venkatarathnam, „A method for estimating the composition of the mixture to be charged to get the desired composition in circulation in a single stage JT refrigerator operating with mixtures,“ Cryogenics, Jg. 50, Nr. 2, S. 93–101, 2010. doi: 10.1016/j.cryogenics.2009.12.004.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!