

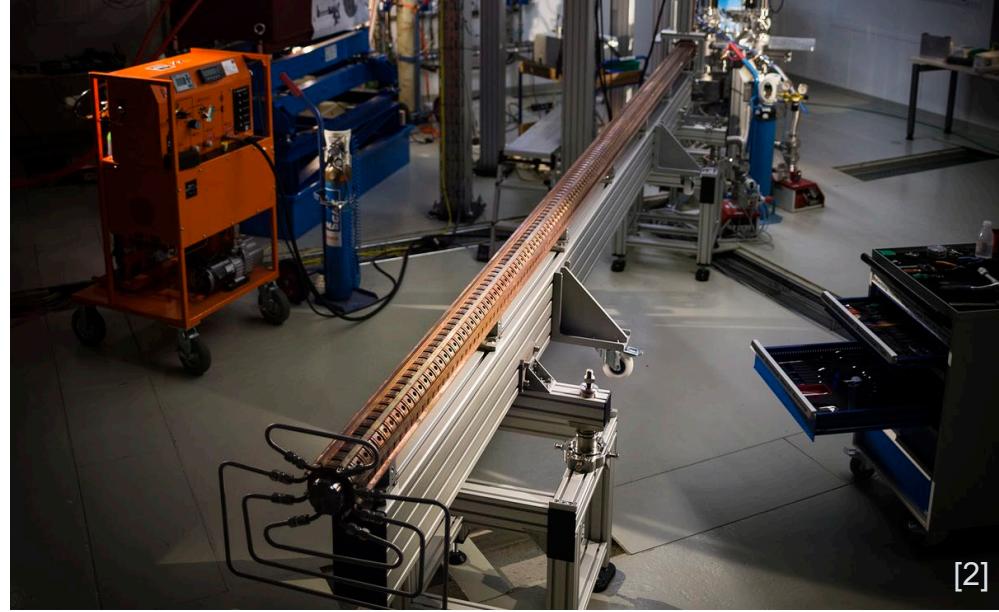


# Prototyp für eine einstufig CMRC-gekühlte Stromzuführung

# Motivation

Bedarf an elektrischer Leistung für kryogene Anwendungen

- Supraleitende Magnetsysteme z.B. für Teilchenbeschleuniger
- supraleitende Stromkabel im Stromnetz<sup>[1]</sup>



Stromzuführungen für den Stromtransport von  $T_U$  zur Anwendung bei  $T_0$

Stromzuführungen tragen maßgeblich zum Wärmeeintrag auf das kryogene System bei

- ohm'sche Verluste in resistiven Abschnitten
- Längswärmeleitung



Optimierungsbedarf resistiver Stromzuführungen

# Optimierungsansätze für resistive Stromzuführungen

## Leistungsgekühlte Stromzuführung (CC-CL)

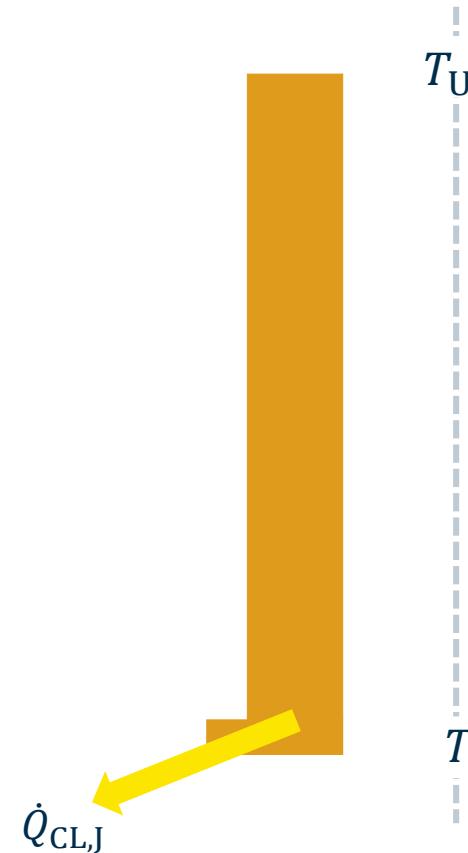
- einfaches Design
- Wärmeaufnahme am kalten Ende

theoretischer Leistungsbedarf:

$$P_{CC-CL} = 123 \text{ W/kA}^{[4]}$$

praktische Umsetzung:

- Kühlung mit einem Cryocooler
- Bad-Kühlung am kalten Ende

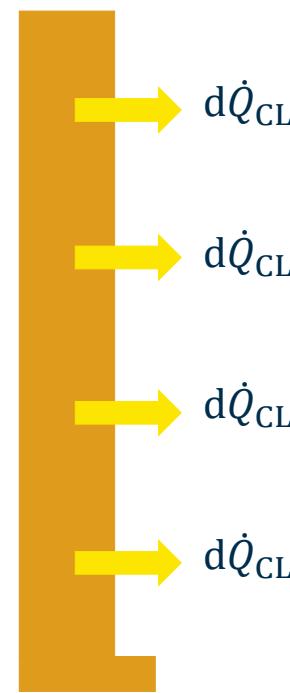


## Kontinuierlich gekühlte Stromzuführung ( $\infty$ -CL)

- thermodynamisch optimales Design
- Wärmeaufnahme an der Quelle

theoretischer Leistungsbedarf:

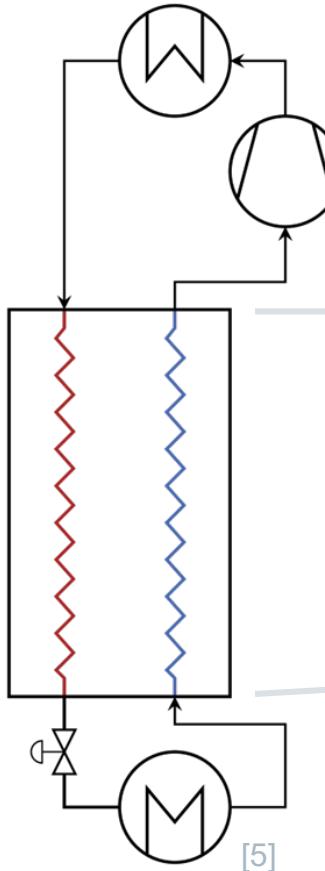
$$P_{\infty-CL} = 73 \text{ W/kA}^{[4]}$$



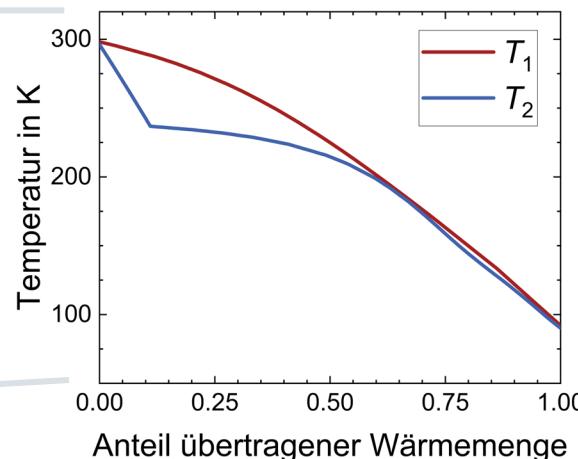
praktische Umsetzung:

- Kühlung mit abdampfenden LN2
- Kühlung mit He-Gas
- CMRC-Kühlung

# Kryogene Gemischkältekreisläufe (CMRC)



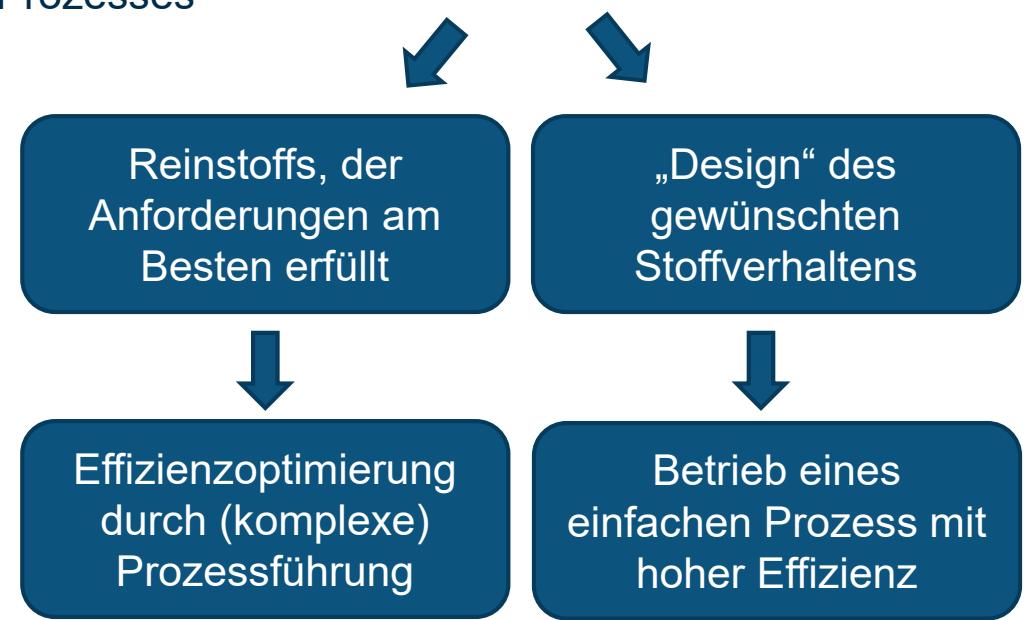
$$\text{Leistungsbedarf } P \propto \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2}$$



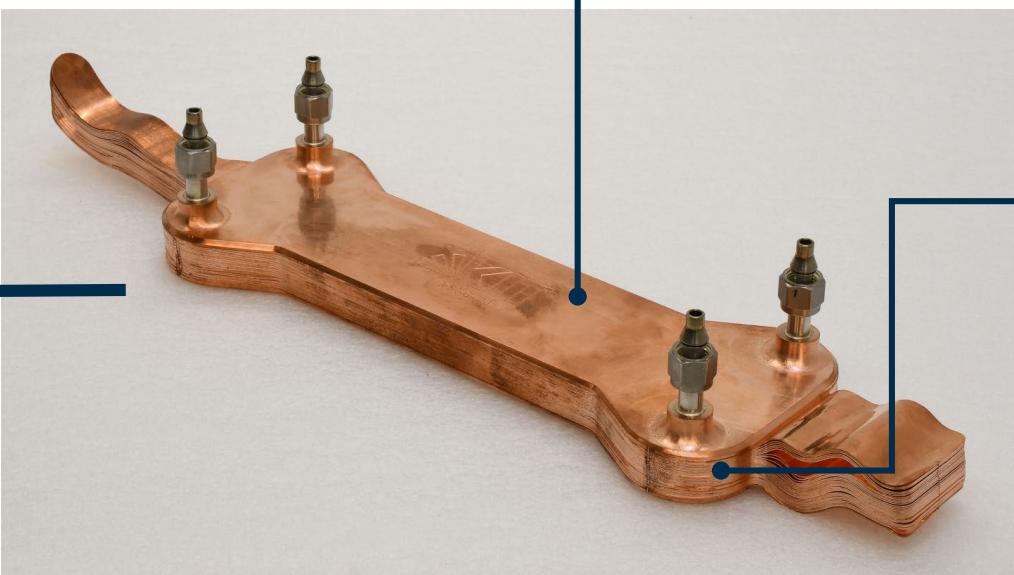
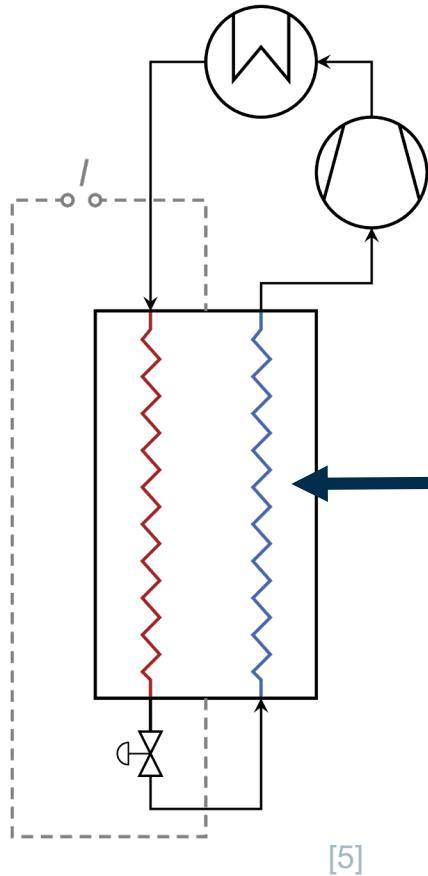
Kältemittelgemisch als  
Optimierungsparameter

Schlüsselkomponente jedes Kältekreislaufs ist das **Arbeitsmittel**, vor allem seine

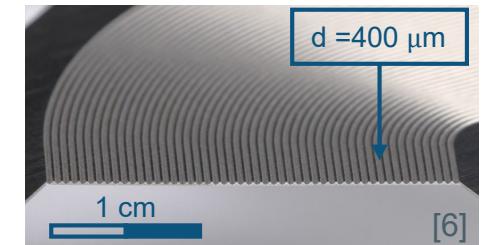
- Zustands- und Transportgrößen (EoS)
- Zustandsänderungen während des thermodynamischen Prozesses



# CMRC-gekühlte Stromzuführungen

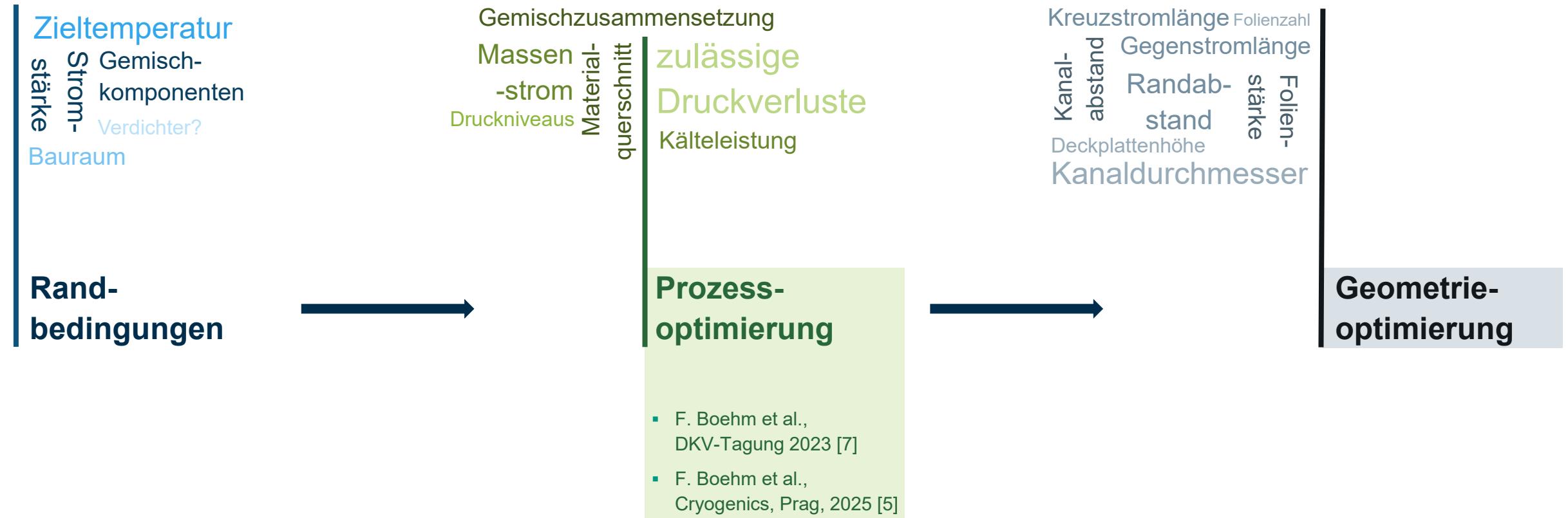


**Skalierbare** Konstruktion aus mikrostrukturierten Folien



**Skalierbare** Technologie für **hocheffiziente** Stromzuführungen jeglicher Stromstärke

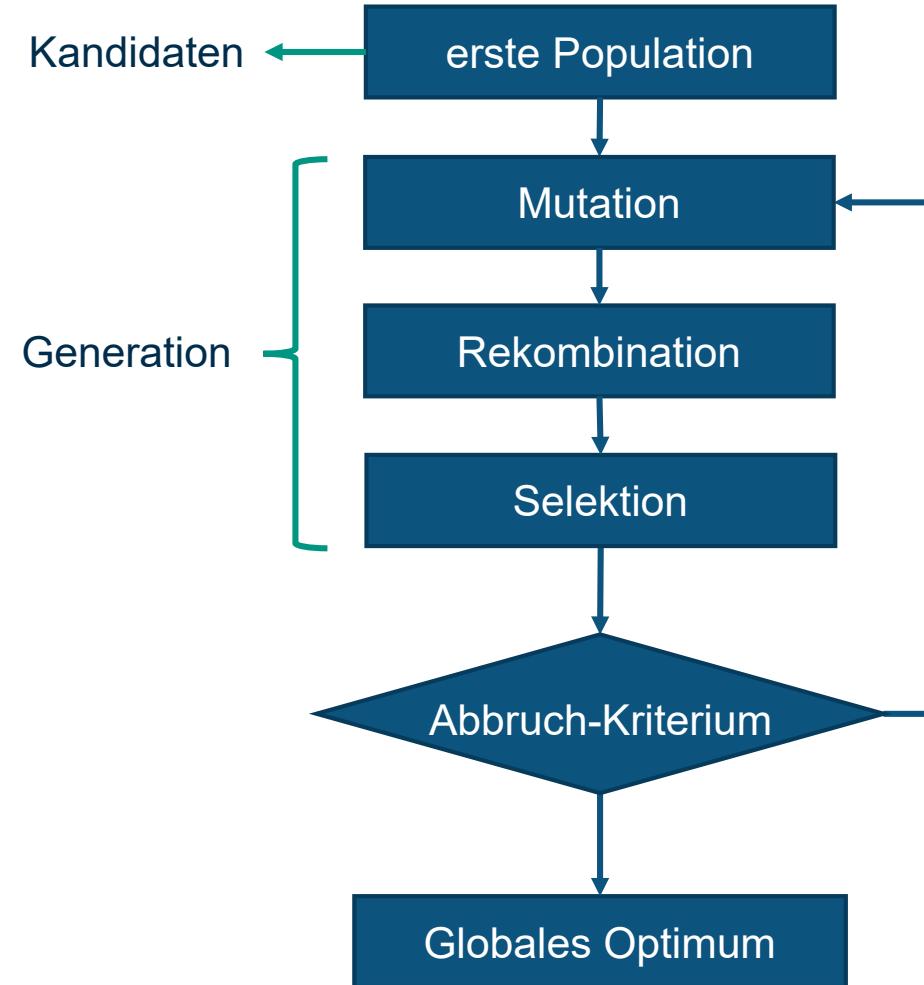
# Auslegung von CMRC-gekühlten, mikrostrukturierten Stromzuführungen



# Geometrieoptimierung

## Differential Evolution (DE)<sup>[9,10]</sup>

- Problem nicht analytisch ableitbar
- breiter Parameterraum (allein **neun Geometrieparameter**)
- globale Optimierung → „Exploration & Exploitation“
- parallele Berechnung einzelner Kandidaten  [11]



# Geometrieoptimierung- Randbedingungen & Verlauf

## Allgemeine Randbedingungen:

- Stoffgemisch: N<sub>2</sub>-HC-Gemisch
- Massenstrom: 39 g/s
- Drücke: 18.3 bar / 5.83 bar
- Stromstärke: 10 kA

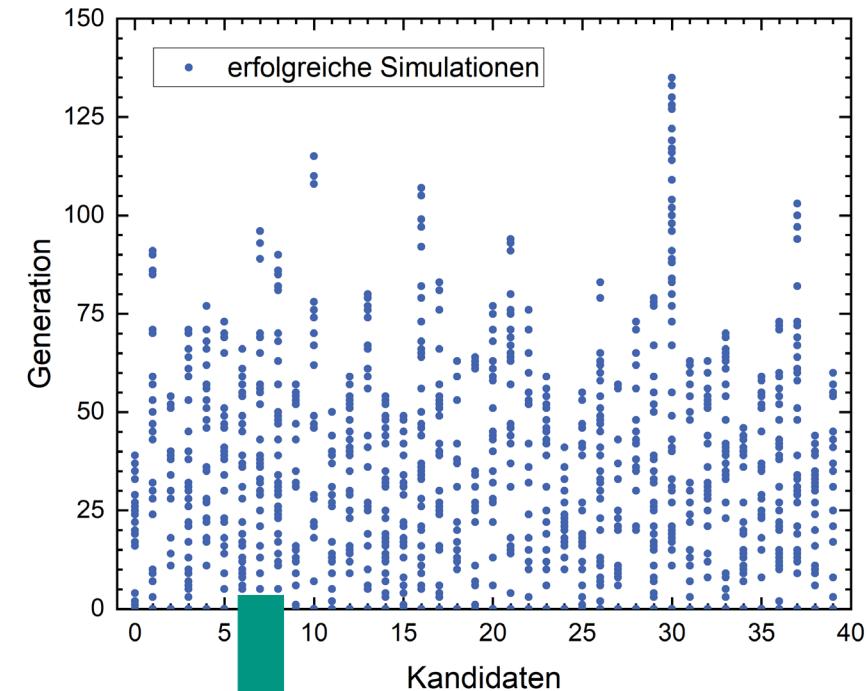
Ergebnisse aus  
Prozessoptimierung<sup>[11]</sup>

Zielgröße der Optimierung: Wandtemperatur  $T_w(L)$

## Plausibilitätscheck

- $\Delta p_{ND} < 0.5 p_{ND,\text{ein}}$
- $p_{HD,\text{aus}} > p_{ND,\text{ein}}$
- $T_{HD,\text{aus}} > T_{ND,\text{ein}}$

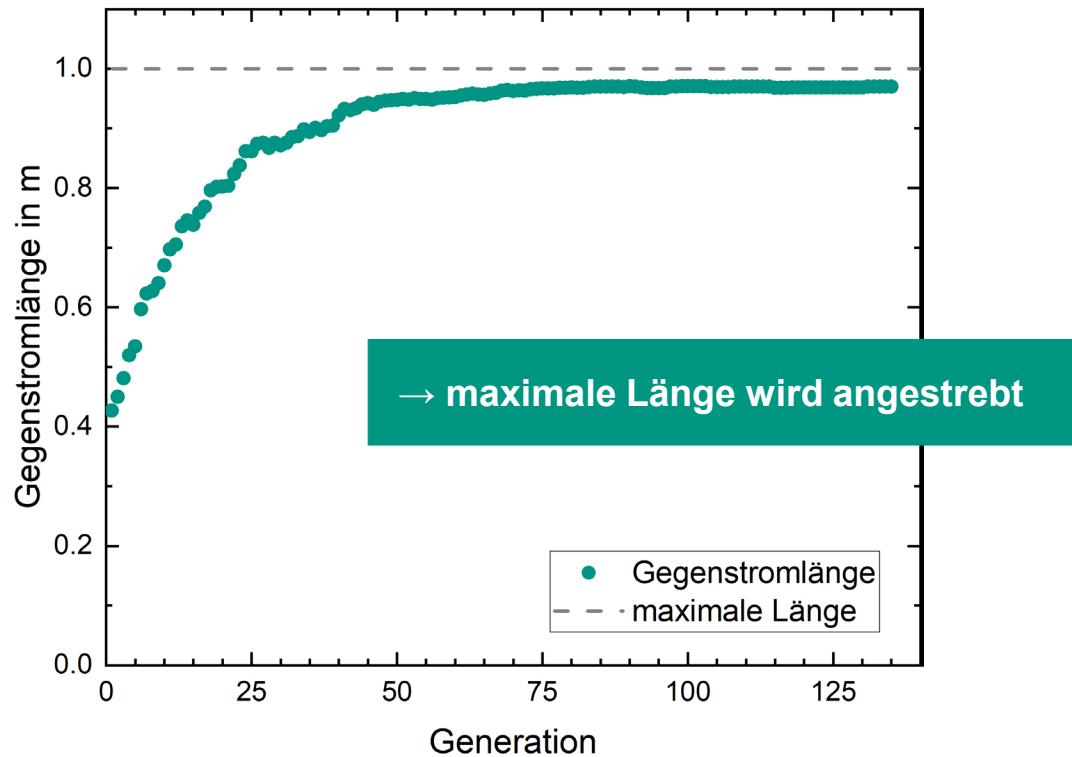
## Verlauf der Simulation:



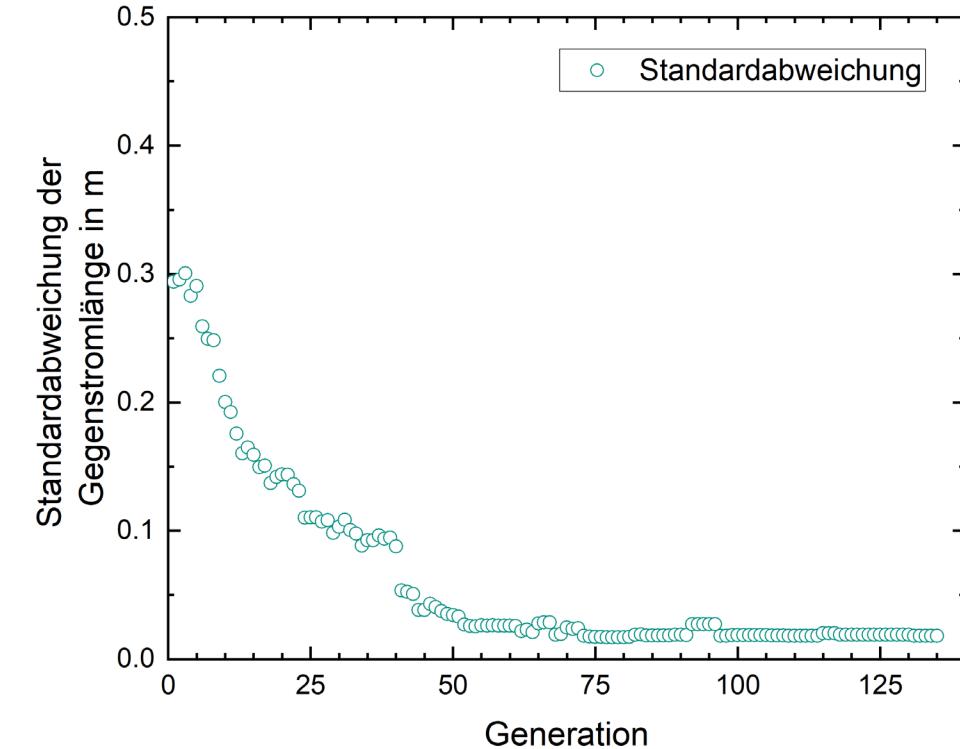
ca. 5400 Kandidaten  
durchgerechnet!

# Konvergenzverhalten – Massenstrom

Mittelwert über einzelne Generation:

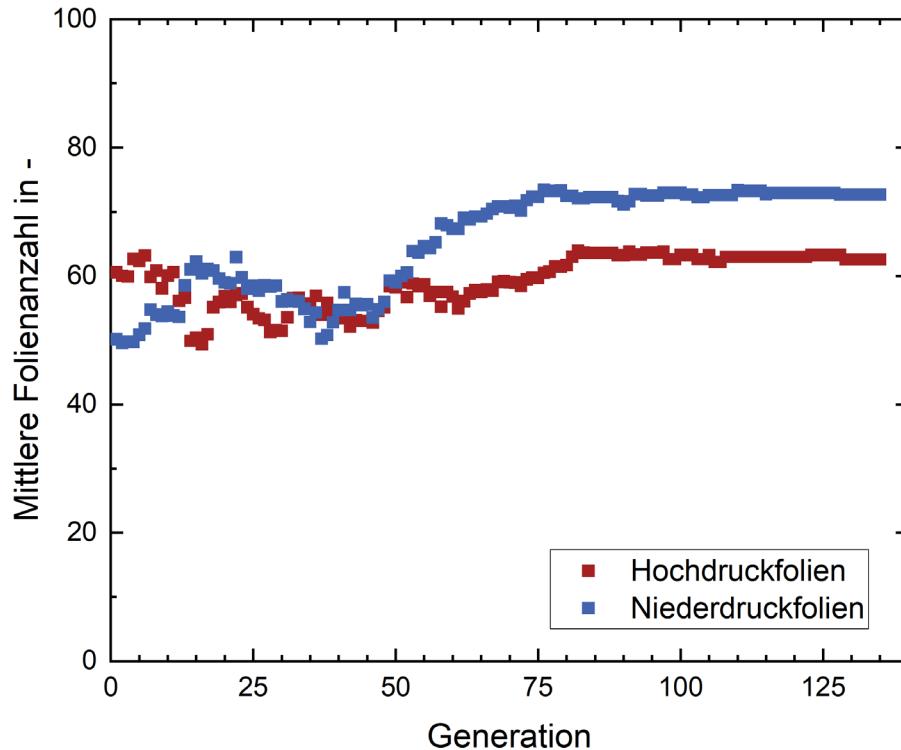


Standardabweichung über einzelne Generation:

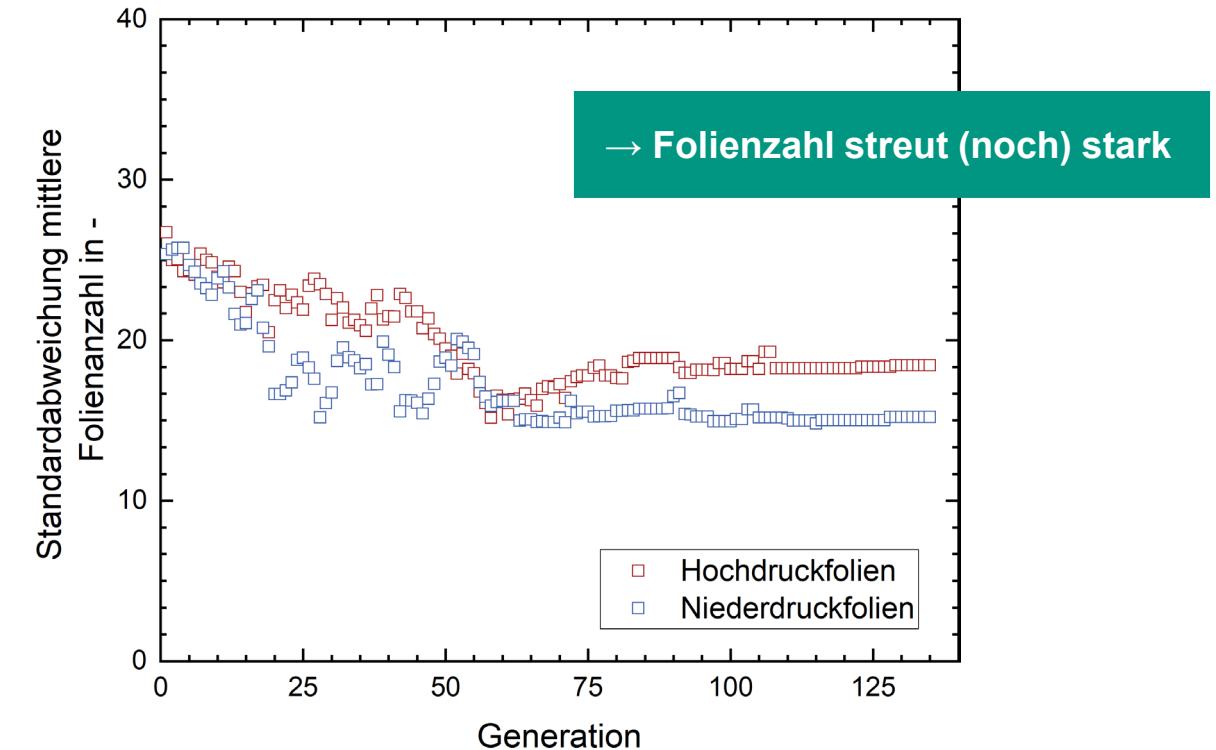


# Konvergenzverhalten – Folienanzahl

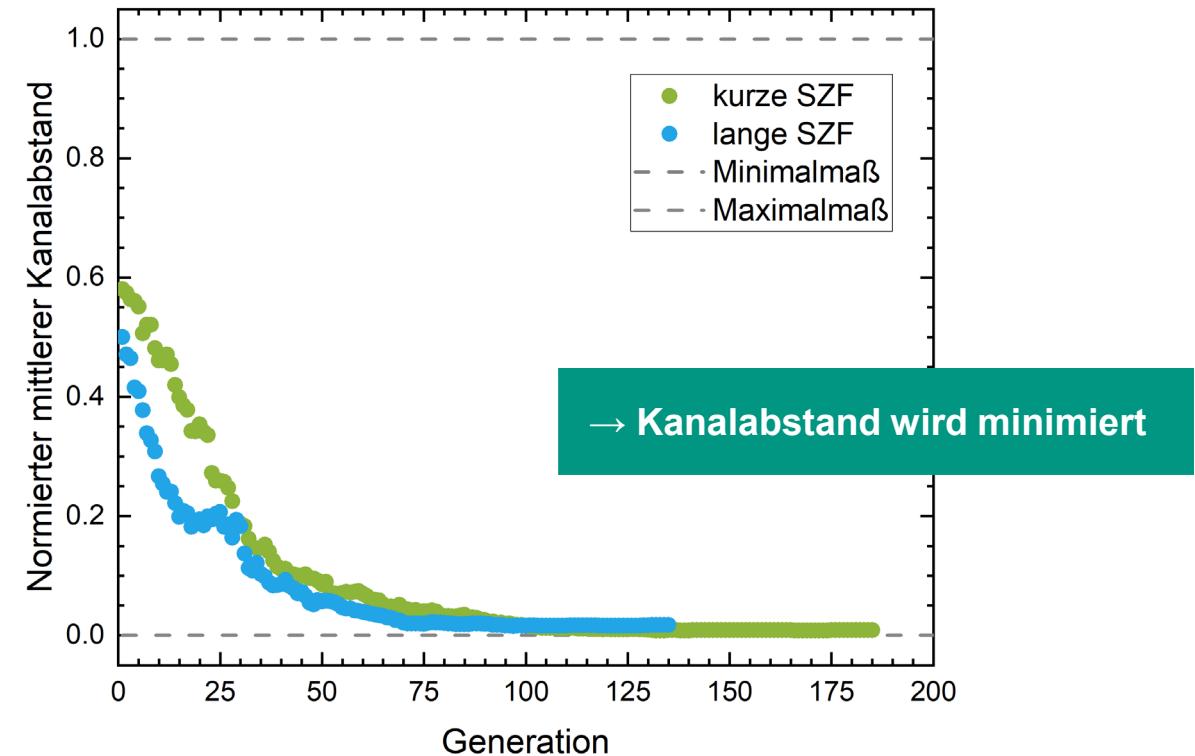
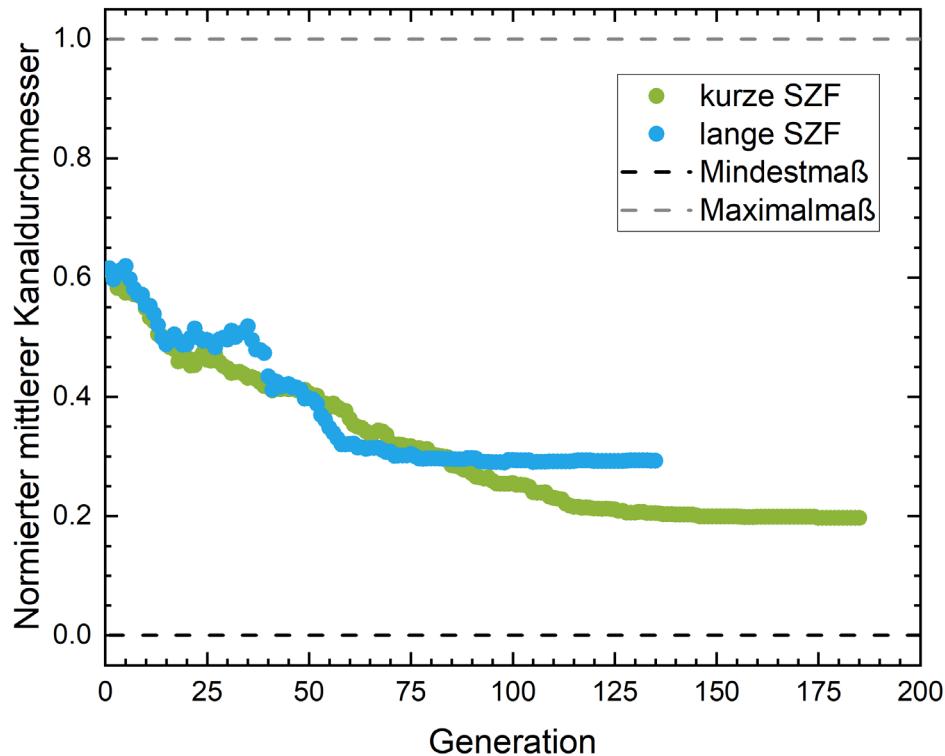
Mittelwert über einzelne Generation



Standardabweichung über einzelne Generation

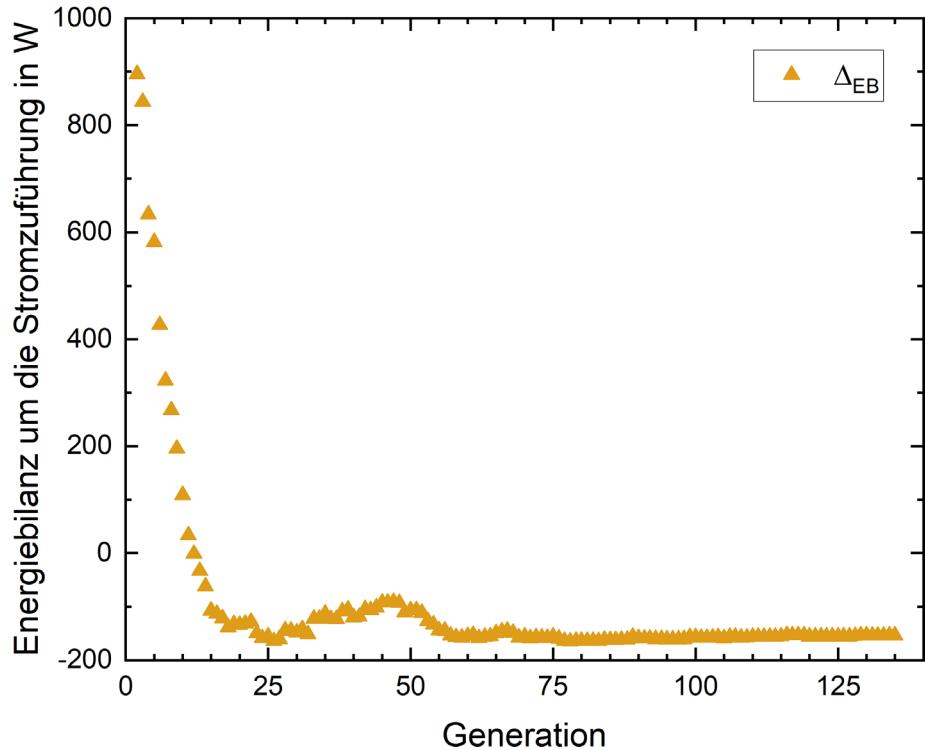


# Konvergenzverhalten – Kanalgeometrie



# Konvergenzverhalten – Konsistenz

Überprüfung anhand Energiebilanz um die Stromzuführung:



Betrachtung der Energiebilanz

- Simulationen scheinen nicht gegen den erwarteten Wert ( $\Delta E_{EB} = 0$  W) zu streben
- Untersuchung zeigt:
  - Simulationen brechen zu früh ab

```
Iterations: 100%|██████████| 1000/1000 [5:29:08<00:00, 19.75s/iteration, t_list_len=2159,
t_stream=7.496s, t_wall=20.216s, t_loop=28.730s, epsilon=1.000000e-05, tolerances(a,r)=1.000000e-05,
1.000000e-06, deviation=100.626W]
```

- d.h. Simulationen sind nicht auskonvergiert, wenn Bewertung durch DE vorgenommen wird

 neue Design-Studie notwendig

# Zusammenfassung & Ausblick

thermodynamische Optimierung von Stromzuführungen erfordert Kühlung entlang der gesamten Länge

- CMRC-gekühlte, mikrostrukturierte Stromzuführungen

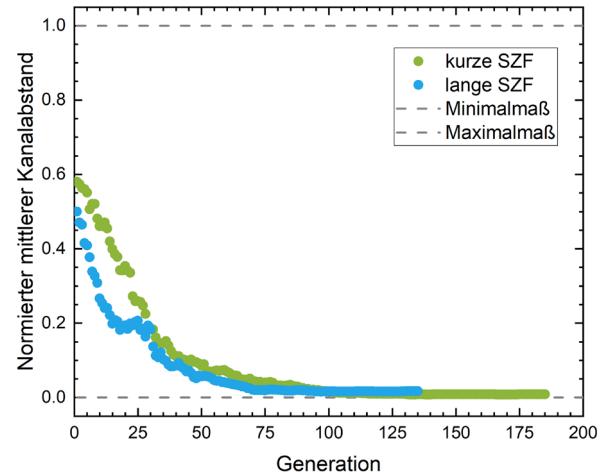


**breiter Parameterraum** bei Auslegung von CMRC-gekühlten Stromzuführungen

- Geometrieoptimierung mit „Differential Evolution“-Algorithmus

erste Ergebnisse zeigen:

- ✓ **Parameterraum** von ursprünglich neun auf fünf Parameter **einschränkbar**
- ✓ höhere Anzahl an Iterationen pro Generation benötigt
- ✓ Rechnungen auf mehr Nodes, um Rechendauer zu reduzieren



Erprobung der Stromzuführungen in COMPASS



# Quellenverzeichnis

- [1] F. Boehm and S. Grohmann, „Modelling and optimization of cryogenic mixed-refrigerant cycles for the cooling of superconducting power cables”, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2024. DOI 10.1088/1757-899X/1301/1/012132.
- [2] M. Breig, KIT, <https://www.kit.edu/kit/27996.php>, zuletzt geprüft: 12. November 2025.
- [3] <https://www.theva.de/startschuss-fuer-superlink-kabelprojekt/>, zuletzt geprüft: 12. November 2025
- [4] E. Shabagin, “Development of a CMRC cooled 10 kA current lead for HTS applications”. Doktorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [4] D. Gomse, T. Kochenburger, J. Brandner and S. Grohmann, „Entwicklung eines Wärmeübertragers für kryogene Gemischkältekreisläufe“, DKV-Tagung 2016, Kassel, AA.I.19, 18. November 2016.
- [5] F. Boehm, J. Arnsberg and S. Grohmann, “Optimization Tool for Cryogenic Mixed-Refrigerant Cycles Applied on HTS and Hybrid LTS Current Leads, Cryogenics 2025 Conference, Prague, CZ, April 7-11, 2025.
- [6] D. Gomse and S. Grohmann, „Heat transfer and pressure drop in the main heat exchanger of a cryogenic mixed refrigerant cycle”, ICEC27-ICMC 2018, Oxford, England, September 3-7, 2018.
- [7] F. Boehm und S. Grohmann, “Modellierung und Optimierung kryogener Gemischkältekreisläufe”, DKV-Tagung 2023, Hannover, AA I.16, 24. November 2023.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] <https://www.python.org/>, zuletzt geprüft: 12. November 2025.
- [12] [https://www.scc.kit.edu/dienste/bwUniCluster\\_2.0.php](https://www.scc.kit.edu/dienste/bwUniCluster_2.0.php), zuletzt geprüft: 12. November, 2025.