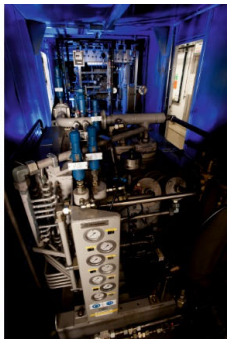
Karlsruher Institut für Technologie

Berechnung einer optimalen aktiv gekühlten Schildtemperatur

H. Neumann



Inhalt

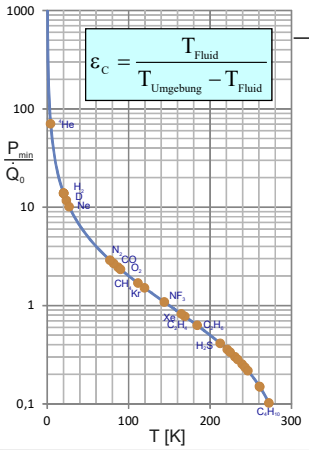
- Einführung
  - Relevanz der thermischen Isolierung
  - MLI als potentiell beste thermische Isolierung
  - MLI-Grenzen hinsichtlich Lagenzahl
  - aktiv gekühlte thermische Schild
- Berechnung
- Ergebnisse
- Schlußfolgerung
- Ausblick

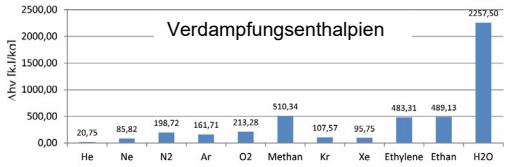
Einführung – Relevanz der thermischen Isolation

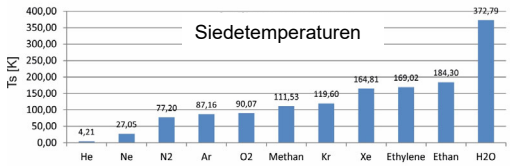
Kryotechnik → $\Delta T = T_{Umgebung} - T_{Fluid}$ → sehr groß

→ Verdampfungsenthalpien Δh_v klein

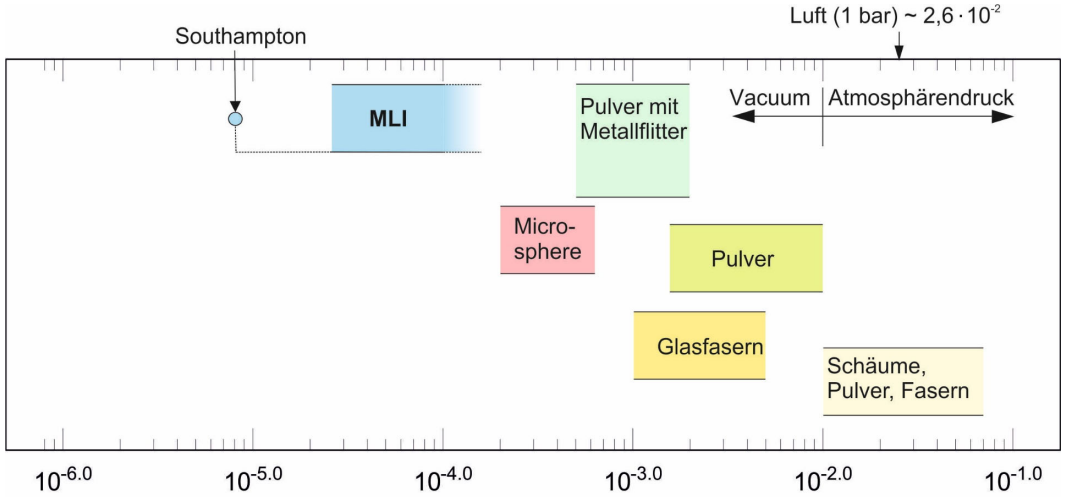
→ Energieaufwand für Kälteerzeugung sehr groß (Carnot)







Einführung – MLI als potentiell beste thermische Isolierung

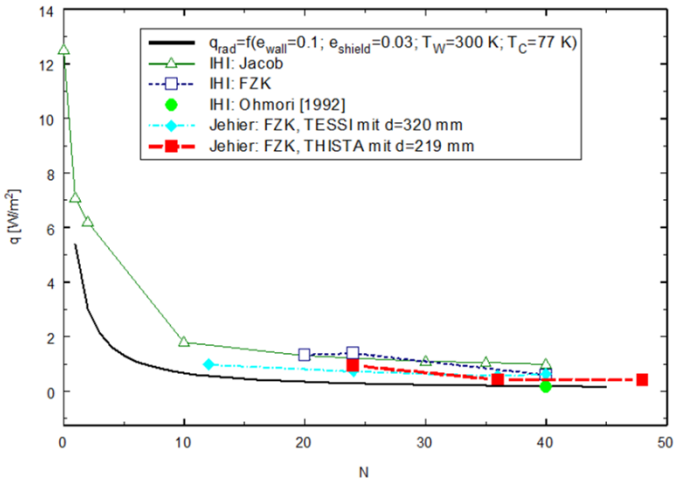


Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)] zwischen ~ 300 K - 77 K

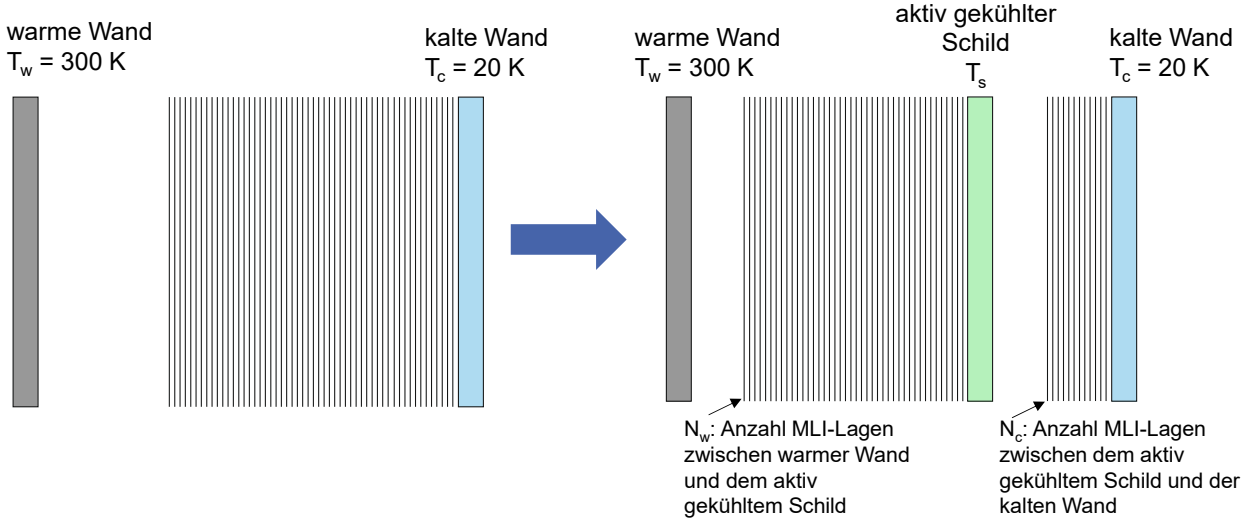
Einführung – MLI-Grenzen hinsichtlich Lagenzahl

- Isolationswirkung pro Lage nimmt mit Anzahl der Lagen ab.

⇒ **aktiv gekühlte Schilde werden für weitere Reduktion der Wärmeübertragung verwendet**



Einführung – der aktiv gekühlte Schild

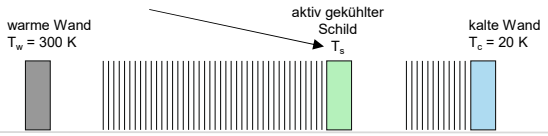


Einführung – der aktiv gekühlte Schild

- LN_2 (~80 K) wird üblicherweise zur Kühlung eines thermischen Schildes eingesetzt
  - LN_2 ist preiswert und steht praktisch überall zur Verfügung

Ist dies die optimale Lösung?

- Bei einem zweistufigen Kleinkühler, kann man die Temperatur der ersten Stufe prinzipiell einstellen. Hierbei ergeben sich folgende Fragen:
  - Wieviel Antriebsenergie kann man mit einem aktiv gekühlten Schild eingespart werden? (Kühlung mit der ersten Stufe des Kleinkühlers)
  - Welches ist die optimale Temperatur des aktiv gekühlten Schildes



Berechnung

- Berechnung Wärmeübertragung durch MLI
  - hängt einerseits von temperaturabhängigen Materialeigenschaften ab
    - Festkörperwärmeleitung
    - Emissionskoeffizient
  - und andererseits von
    - Änderung der Wärmeübertragungsfläche von Lage zu Lage, z.B. bei Zylindern
    - Änderung des Restgasdruckes von Lage zu Lage
- Die Wärmeübertragungsmechanismen
  - Wärmestrahlung
  - Restgaswärmeleitung
  - Festkörperwärmeleitung
- müssen streng genommen von Lage zu Lage berechnet werden

Strahlung

$$\dot{Q}_{overall} = \dot{Q}_{i,i+1} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{T_i}} + \frac{1}{\varepsilon_{T_{i+1}}} - 1} \cdot (T_i^4 - T_{i+1}^4) \cdot (1-f) \cdot A_i$$

$$+ \frac{\kappa+1}{\kappa-1} \cdot \frac{\alpha}{2-\alpha} \cdot p_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R}{8 \cdot \pi \cdot (T_i + T_{i+1})}} \cdot (T_i - T_{i+1}) \cdot (1-f) \cdot A_i$$

$$+ \frac{\lambda_{T_{i+1}}}{s} \cdot (T_i - T_{i+1}) \cdot f \cdot C \cdot A_i$$

Festkörperwärmeleitung

Restgas-wärmeleitung

Berechnung

Strahlung

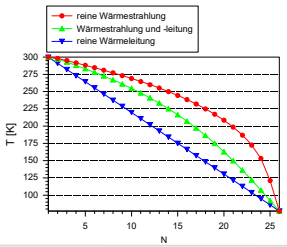
$$\dot{Q}_{overall} = \dot{Q}_{i,i+1} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{T_i}} + \frac{1}{\varepsilon_{T_{i+1}}} - 1} \cdot (T_i^4 - T_{i+1}^4) \cdot (1-f) \cdot A_i$$

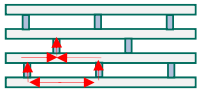
$$+ \frac{\kappa+1}{\kappa-1} \cdot \frac{\alpha}{2-\alpha} \cdot p_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R}{8 \cdot \pi \cdot (T_i + T_{i+1})}} \cdot (T_i - T_{i+1}) \cdot (1-f) \cdot A_i$$

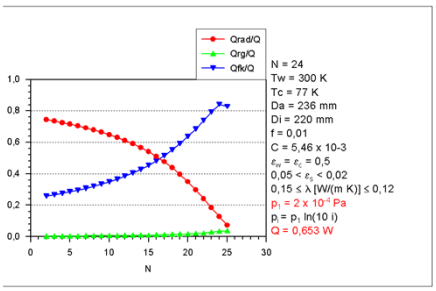
$$+ \frac{\lambda_{\overline{T}_{i,i+1}}}{s} \cdot (T_i - T_{i+1}) \cdot f \cdot C \cdot A_i$$

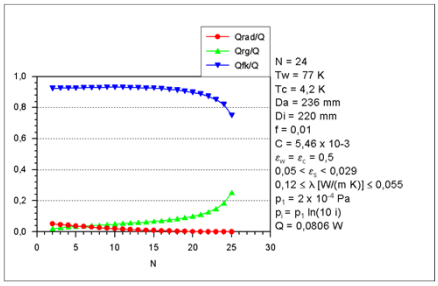
Festkörperwärmeleitung

Restgas-wärmeleitung









Berechnung

- Mit ausreichender Genauigkeit kann der Wärmeübergang durch MLI auch als Summe der einzelnen Wärmeübertragungsanteile berechnet werden. Hierbei werden die Mittelwerte der temperaturabhängigen Werte verwendet.

$$\Rightarrow \dot{Q}_{gesamt} = \dot{Q}_{Strahlung} + \dot{Q}_{Restgaswärmeleitung} + \dot{Q}_{Festkörperwärmeleitung}$$

mit: $$\dot{Q}_{Strahlung} = \frac{\sigma \cdot (T_W^4 - T_C^4)}{\frac{1}{\varepsilon_W} + \frac{1}{\varepsilon_C} - 1 + N \cdot \left(\frac{2}{\varepsilon_S} - 1\right)} \cdot (1-f) \cdot A_C$$

für den Wärmeübergang durch Strahlung

Berechnung

$$\Rightarrow \dot{Q}_{gesamt} = \dot{Q}_{Strahlung} + \dot{Q}_{Restgaswärmeleitung} + \dot{Q}_{Festkörperwärmeleitung}$$

mit: $\dot{Q}_{Restgaswärmeleitung} =$

$$\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \cdot \frac{\alpha}{2-\alpha} \cdot p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R}{8 \cdot \pi \cdot (T_w + T_c)}} \cdot (T_w - T_c)(1-f) \cdot A_c$$

für den Wärmeübergang durch Restgaswärmeleitung

Berechnung

$$\Rightarrow \dot{Q}_{gesamt} = \dot{Q}_{Strahlung} + \dot{Q}_{Restgaswärmeleitung} + \dot{Q}_{Festkörperwärmeleitung}$$

Mit: $\dot{Q}_{Festkörperwärmeleitung} =$

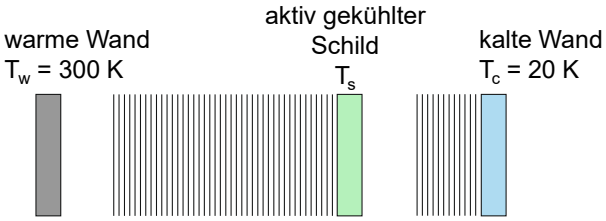
$$\frac{\mu_1 + \mu_2 \cdot \left(800 - \frac{T_w + T_c}{2 \cdot K}\right) + \mu_3 \cdot ln\left(\frac{T_w + T_c}{2 \cdot K}\right)}{\delta_N} \cdot (T_w - T_c) \cdot f \cdot C \cdot A_c$$

für den Wärmeübergang durch Festkörperwärmeleitung

Berechnung

- Berechnung des Wärmeüberganges von
  - warmer zu kalter Wand ohne dem aktiv gekühltem Schild: $\dot{Q}_t = f(N_t)$

  oder
  - warmer Wand zu dem aktiv gekühltem Schild: $\dot{Q}_w = f(N_w)$
  - und von dem aktiv gekühltem Schild zur kalten Wand: $\dot{Q}_c = f(N_c)$



$\dot{Q}_w = f(N_w)$ $\dot{Q}_c = f(N_c)$

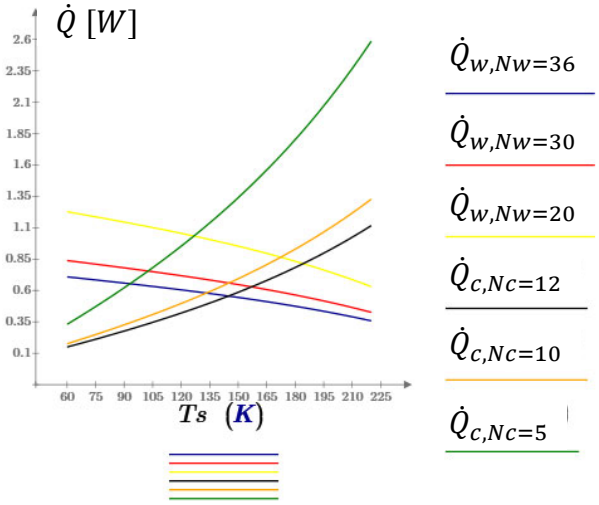
Berechnung

- Carnot Leistungsziffer für ideale Kältemaschine: $\varepsilon_t = \frac{T_c}{T_w - T_c} = \frac{\dot{Q}_t}{P_t}$
  - zwischen warmer und kalter Wand ohne dem thermischen Schild
- oder für einen idealen zweistufigen Kleinkühler
  - $\varepsilon_w = \frac{T_s}{T_w - T_s} = \frac{\dot{Q}_w}{P_w}$ und $\varepsilon_c = \frac{T_c}{T_s - T_c} = \frac{\dot{Q}_c}{P_c}$
  - zwischen warmer Wand und dem aktiv gekühltem Schild: ε_w
  - und zwischen dem aktiv gekühltem Schild und der kalten Wand: ε_c
- benötigt für den zweistufigen Kleinkühler die Anschlussleistung: $P_{wc} = P_w + P_c$
- Das Verhältnis der Anschlussleistungen mit und ohne dem thermischen Schild ergibt sich zu:

$$R(N_w, N_c, T_s) = \frac{\boldsymbol{P_t}}{\boldsymbol{P_{wc}}} = \frac{\frac{\dot{Q}_t}{\varepsilon_t}}{\frac{\dot{Q}_w}{\varepsilon_w} + \frac{\dot{Q}_c}{\varepsilon_c}}$$

Ergebnisse

- Wärmeübergang $\dot{Q}\ [W]$ zwischen warmer Wand und dem thermischen Schild und zwischen dem thermischen Schild und der kalten Wand als Funktion der Temperatur des thermischen Schildes.
  - Mit steigender Temperatur des thermischen Schildes – T_s ↑
    - $\dot{Q}_w$ sinkt
    - $\dot{Q}_c$ steigt an

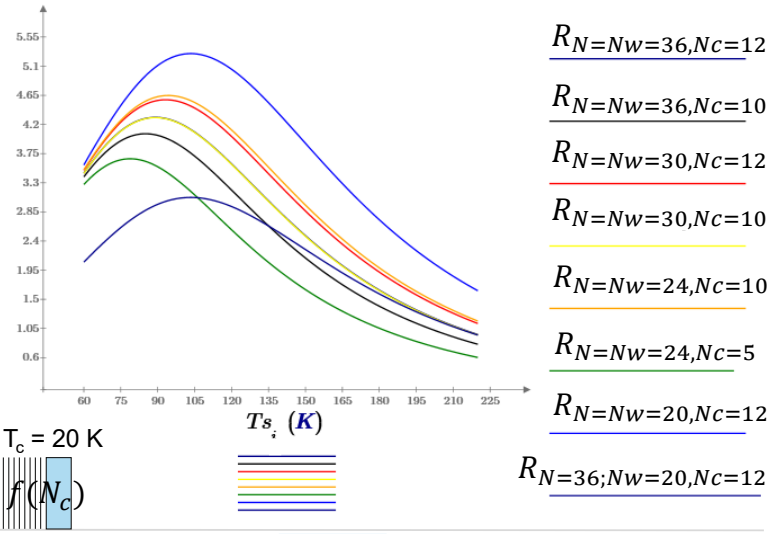


15 18.11.2022 H. Neumann Institut für Technische Physik | Kryotechnik

Ergebnisse

$$R(N, N_w, N_c) = \frac{P_t\ (N)}{P_{wc}(N_w, N_c)}$$

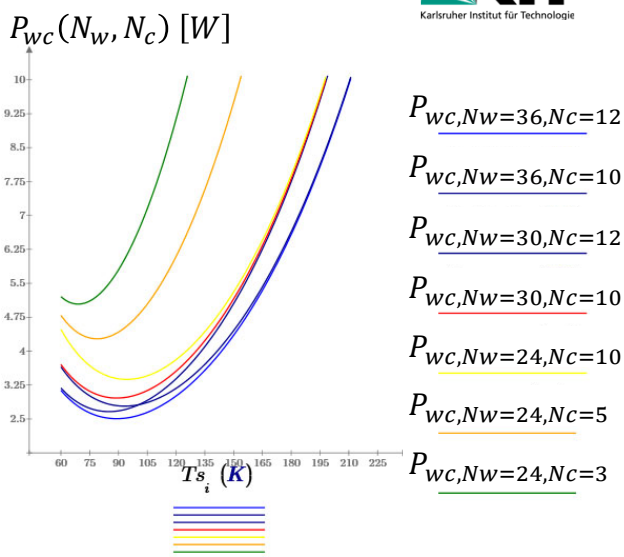
- Verhältnis der Anschlussleistung = Energieeinsparung durch Nutzung eines thermischen Schildes
- abhängig von
  - Lagenzahl N, N_w, N_c
- zeigt lokales Maximum für T_s



16 18.11.2022 H. Neumann Institut für Technische Physik | Kryotechnik

Ergebnisse

- Anschlussleistung eines idealen zweistufigen Kleinkühlers als Funktion der Temperatur der 1. Stufe für verschiedene Lagenzahlen
- Es existiert ein lokales Minimum für die Anschlussleistung
  - ⇒ Es gibt eine optimale Temperatur der des aktiv gekühlten Schildes, welche von der Lagenzahl (N_w, N_c) abhängt!



Schlußfolgerung

- Es wurde eine Methode aufgezeigt, um prinzipiell die optimale Temperatur eines aktiv gekühlten thermischen Schildes zu ermitteln
- Nachweis erbracht: Es gibt eine optimale Temperatur des aktiv gekühlten thermischen Schildes
  - ⇒ Bei dieser optimalen Temperatur benötigt man ein Minimum an Anschlussleistung
  - ⇒ Die optimale Temperatur mit der resultierend niedrigsten Anschluss-leistung hängt wesentlich von den Lagenzahlen (N_w, N_c) ab.
- $R = P_t/P_{wc}$ zeigt das Verbesserungspotential bei Verwendung eines thermischen Schildes und hängt vom Vergleichsfall ab

Ausblick

- Ermittlung $\frac{dP_{wc}}{dT_s} = 0$ und Untersuchung des Einflusses weiterer Parameter neben den Lagenzahlen
- Ermittlung realer temperaturabhängiger Leistungsziffern für die einzelnen Stufen einer realen Kältemaschine und Ersatz der Carnot-Leistungsziffern
- Festlegung realistischer Vergleichsfälle, um für diese tatsächliche Verbesserungspotentiale aufzuzeigen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!