

Thermische Isolation

Kryotechnik: “perfekte” thermische Isolation extrem wichtig:

- großes ΔT (200 300 K)
- kleine Verdampfungsenthalpien
- extreme Carnotfaktoren / schlechte Effizienzzahlen η

Beispiel:

zusätzlicher Wärmeeintrag: **1 W @ 4 K**



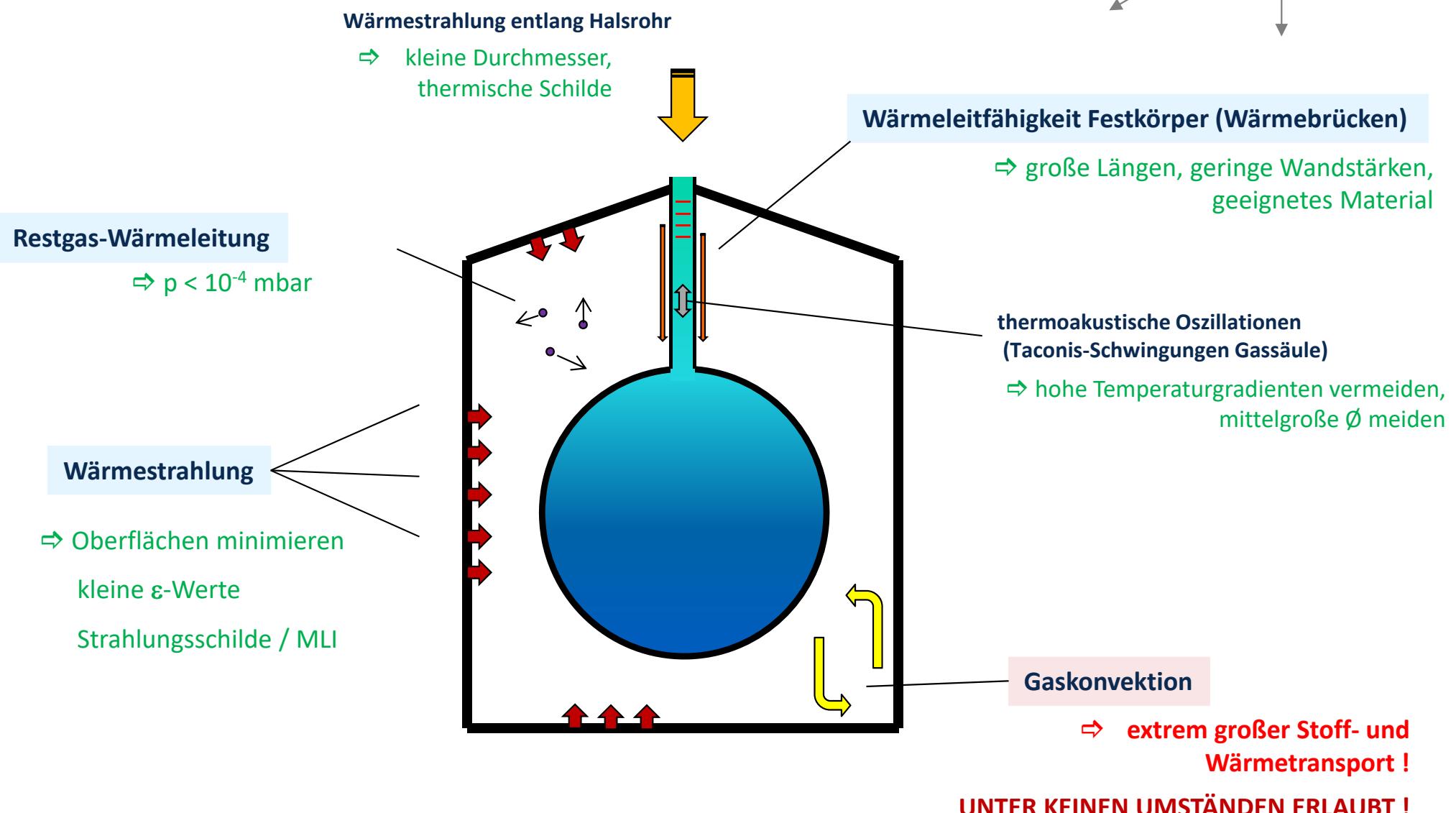
zusätzlicher Aufwand Kältemaschine: **260 W 2 kW ... 10 kW**

x Carnot; x Strobridge ↗

⇒ Minimierung des Wärmeeintrags mit allen Mitteln !

Mechanismen Wärmeübertragung

wichtige,
unvermeidliche
Effekte



Restgas-Wärmeleitung

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

\bar{l} : mittlere freie Weglänge

Luft (300 K): $v \approx 500 \text{ m/s}$ \Rightarrow großes λ für leichte Gase

Luft: $\bar{l} \cdot p = 66 \mu\text{m} \cdot \text{mbar}$

| ψ | H_2 | He | Air | Ar | CO_2 | Kr | Xe |
|---|--------------|-------------|-----------|----|---------------|----|----|
| λ in $\text{mW/m}\cdot\text{K}$ bei $15^\circ\text{C}, 1 \text{ bar}$ | 180 | 152 | ~ 25 | 17 | 16 | 9 | 5 |

Druckabhängigkeit: unterschiedliche Mechanismen zu unterscheiden (d = Spaltbreite)

viskose Strömung

$p > 1 \text{ mbar}$

$l \ll d$

$$\lambda = f(\psi, d)$$

$$\lambda \propto T^{0.6 \dots 0.9}$$

λ unabhängig von p

Übergangsbereich

$l \approx d$

$$\lambda = f(\psi, p, d)$$

Molekularströmung

$p < 10^{-3} \text{ mbar}$

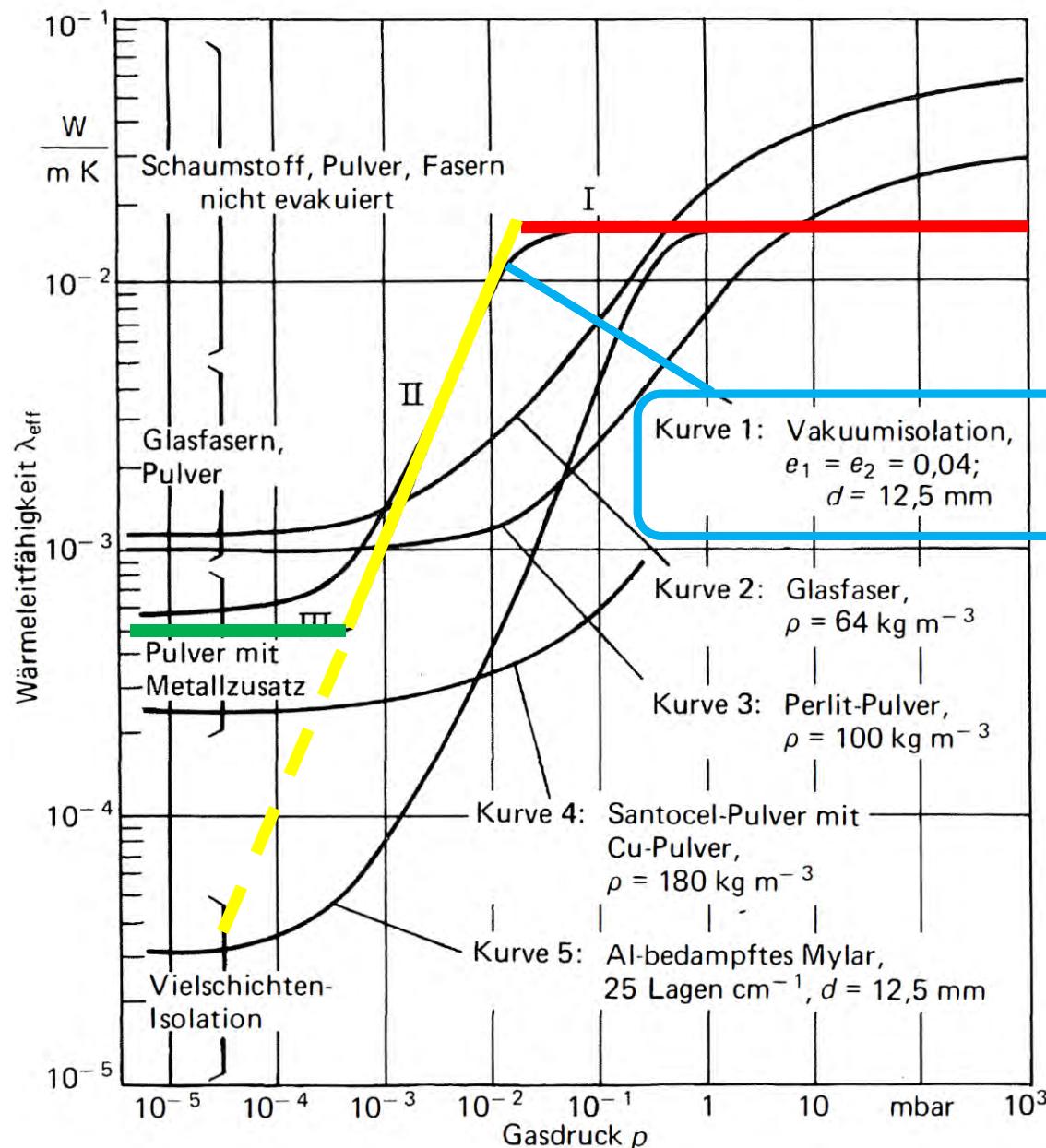
$l >> d$

$$\lambda = f(\psi)$$

$$\lambda \propto p$$

λ unabhängig von d

Restgas-Wärmeleitung



Restgaswärmeleitung vs. Druck
reine Vakuumisolierung, N_2

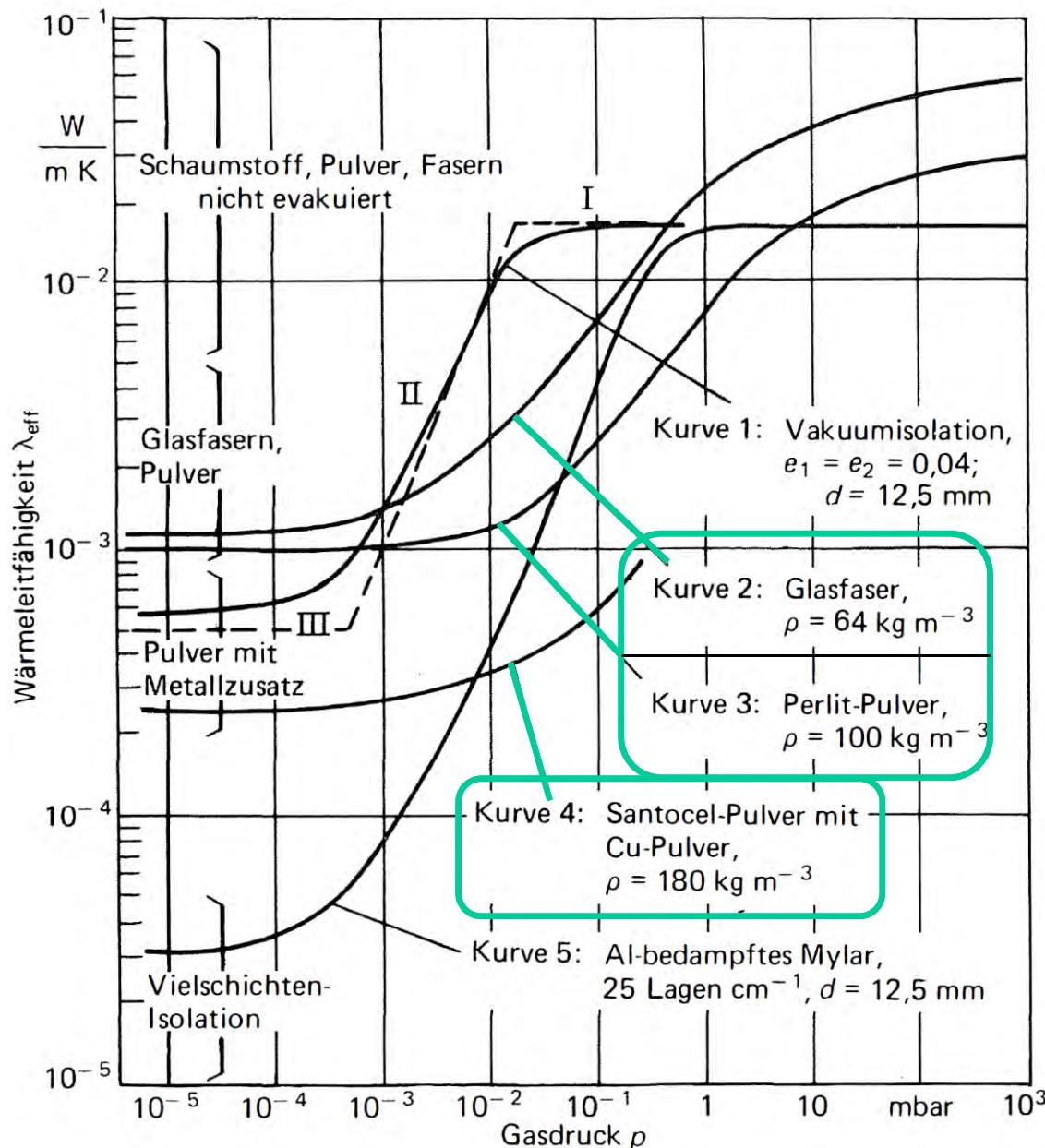
I Kontinuumsbereich
druckunabhängige Gaswärmeleitung $\lambda = f(\psi, d)$

II molekularer Bereich
druckproportionale Gaswärmeleitung
 $\lambda \propto p$

III $p < 5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$
andere Effekte dominierend

→ Reduktion verbleibender
Moleküle/Atome: $p < 10^{-5} \text{ mbar}$

Restgas-Wärmeleitung



Maßnahmen zur Reduktion:

⇒ Reduktion verbleibender Moleküle/Atome: $p < 10^{-5} \text{ mbar}$

und/oder:

⇒ Reduktion der freien Weglänge:
Füllung Grobvakuum mit feinem Pulver o.ä.

und/oder:

- Reduktion Teilchengeschwindigkeit:

schwere Gase

gut: N₂, CO₂, Kr, organische Verbindungen

schlecht: He, H₂

Isolationsvakuum

Definition: **Vakuum** $\Leftrightarrow p < 300 \text{ mbar}$ Absolutdruck

1 bar = 10^5 Pa ; 1 mbar = 100 Pa = 1 hPa

1 atm = 1013,25 mbar = 760 torr



atmosphärischer Druck:
~ 1 bar abs.
0 psig; 14,7 psia

| Druckbereich | Bezeichnung | Erzeugung | Anwendung |
|--|--|---|----------------------------|
| 300 1 mbar | Grofvakuum viskose Strömung | Membranpumpe | Inertisierung, ... |
| $1 \dots 10^{-3} \text{ mbar}$ | Feinvakuum Knudsenströmung | Drehschieberpumpe | Vakuumisolation mit Pulver |
| $10^{-3} \dots 10^{-7} \text{ mbar}$ | Hochvakuum Molekularströmung | Turbo + Membranpumpe; Diffusions- + Drehschieberp. | Hochvakuum-Isolation |
| $10^{-7} \dots 10^{-12} \text{ mbar}$ | Ultrahochvakuum (UHV) Molekularströmung | + Getterpumpen + Cryovakuumpumpen | Oberflächen-Analyse |
| $10^{-12} \dots 10^{-14} \text{ mbar}$ | Extremes Hochvakuum (XHV) | (wie oben bzw. Weltraum) | Grundlagenforschung |

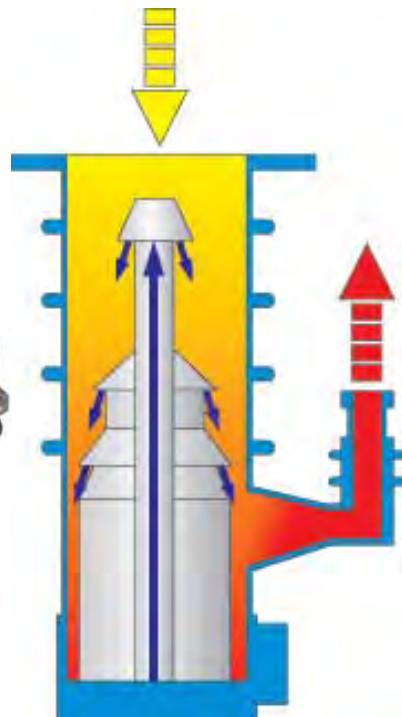
Isulationsvakuum



Membran-
Vakuumpumpe

Drehschieberpumpe

einstufig: bis ca. 10^{-1} mbar
zweistufig: bis ca. 10^{-3} mbar



Öldiffusionspumpe

robust, fast wartungsfrei, ideal für Helium
(hohe Saugleistung)



Turbomolekularpumpe



Hochvakuum-Pumpstand
(Drehschieber- +
Turbopumpe)

Isolationsvakuum

Beispiel: Vakuumkammer, $V = 1 \text{ Liter}$

$$p = 1 \text{ bar} \Rightarrow 1,25 \text{ g Luft}$$

$$p = 10^{-6} \text{ mbar} \Rightarrow 10^{-9} \text{ g Luft!}$$

Detailprobleme Vakuumherstellung:

1) Leckage / Kaltleck

- fehlerhafte Schweiß-/Lötverbindungen (Lunker, ...)
- mechanische / elektrische Durchführungen
- Ventile, Dichtungen (Leckrate z. B. $2 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ \Leftrightarrow einstömende Gasmenge)

2) Gasabgabe Oberflächen (Monolagen N₂, O₂, ...; insbesondere polares H₂O)

dynamisches Gleichgewicht zwischen Oberfläche und Gasraum, Ablösung in Stunden ... Wochen
 \Rightarrow Ausheizen bei 70 ... 200 °C

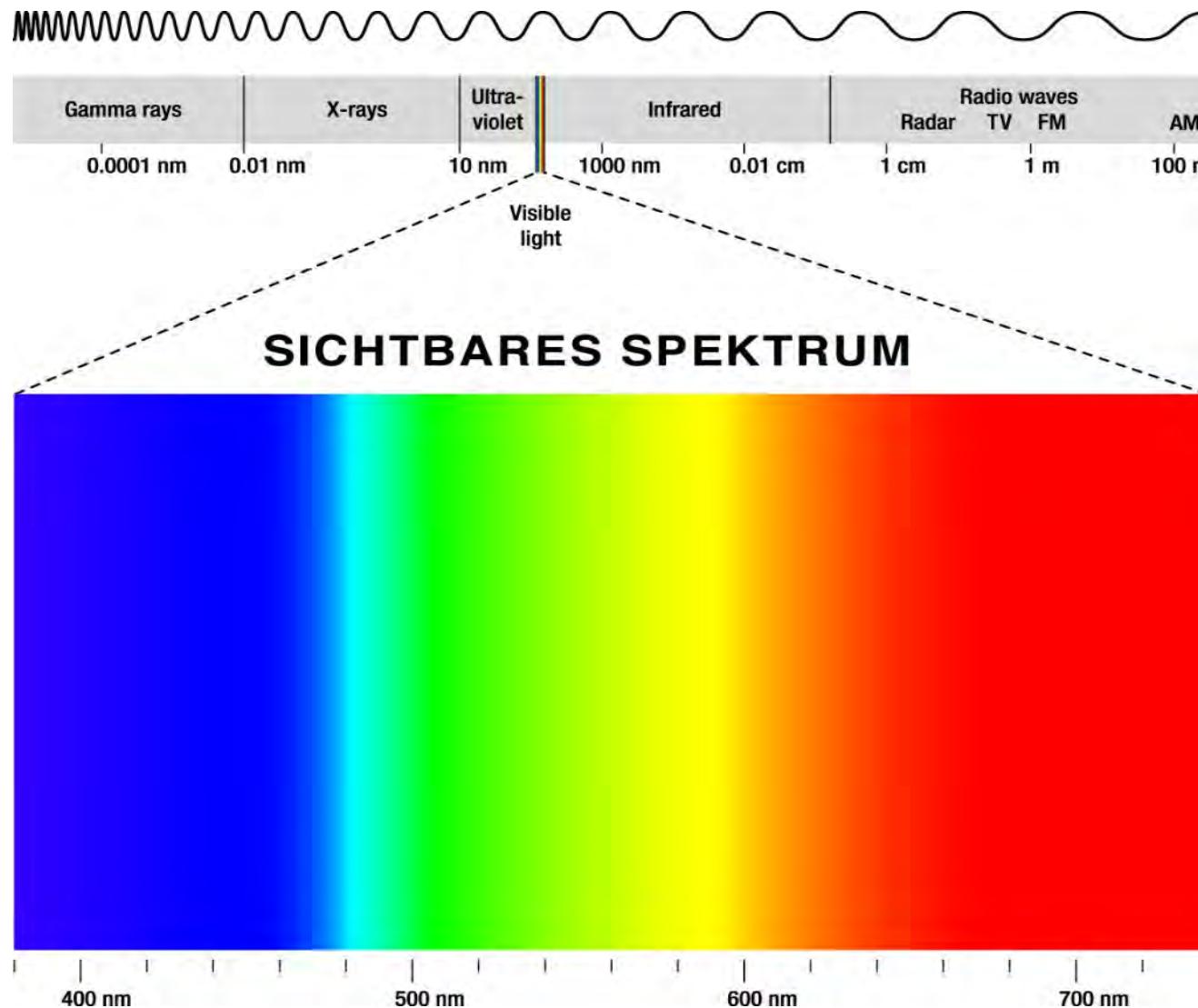
3) Permeation

- insbesondere alle nichtmetallischen Materialien betroffen; charakteristische Durchgangszahlen für alle Material/Gas-Kombinationen)
- H₂ – Permeation durch Metalle
- He – Permeation durch Glas

4) Eingeschlossene Volumina (unbemerktes “trapped gas”, langsamer Druckausgleich)

- Schraube / Sensor in Sackloch
- Stecker; Überwurfmuttern
- PVC-isolierte Kupferlitze

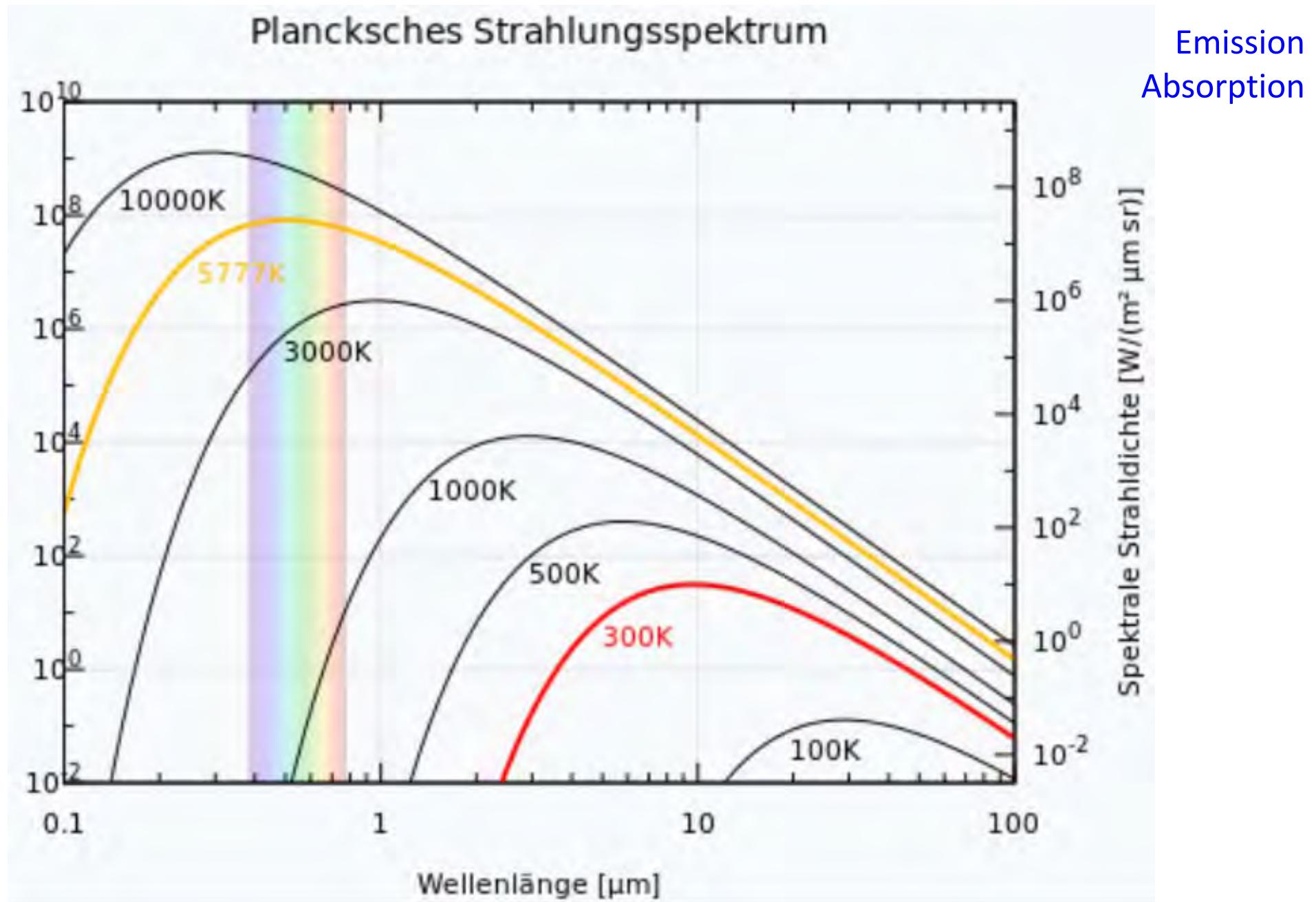
Thermische Strahlung



elektromagnetische
Strahlung

Thermische Strahlung

Schwarzkörper-Strahlung



Thermische Strahlung

$$\dot{Q}_{rad} = A \cdot \varepsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
 $\varepsilon_{1,2}$ Emissionskoeffizient bzw. System-Emissionsgrad

| Oberfläche | ε (typ.) |
|--|----------------------|
| Ruß | 1 |
| Cu oxidiert | 0,78 |
| mechan. poliert | 0,02 |
| elektropoliert | 0,006 |
| Al, Oxidschicht 1 µm | 0,3 |
| elektropoliert | 0,01 |
| metallisierte Folie (Ag, Au, Cu, Al, ...) | 0,02 |
| Glas | 0,94 |
| Eis (ausgefrorenes Gas) | 0,96 |

| T | $\sigma \cdot T^4$ | λ_{max} |
|-------|------------------------------------|-----------------|
| 300 K | 460 W·m ⁻² | 10 µm |
| 80 K | 2,3 W·m ⁻² | 36 µm |
| 4 K | 10 ⁻⁵ W·m ⁻² | 725 µm |

- ⇒ kleine Oberflächen (kugelförmig; zylindrisch)
- ⇒ kleine Emissionsgrade
 - poliert (Cu, Ag, Ni ...), ggf. vergoldet
 - Glasdewargefäße metallisiert
 - Gaskondensate vermeiden
- ⇒ ΔT^4 reduzieren (Strahlungsschilde; Verankerungen auf Zwischentemperatur; MLI)

Thermische Strahlung

Fallbeispiel: Heliumkryostat

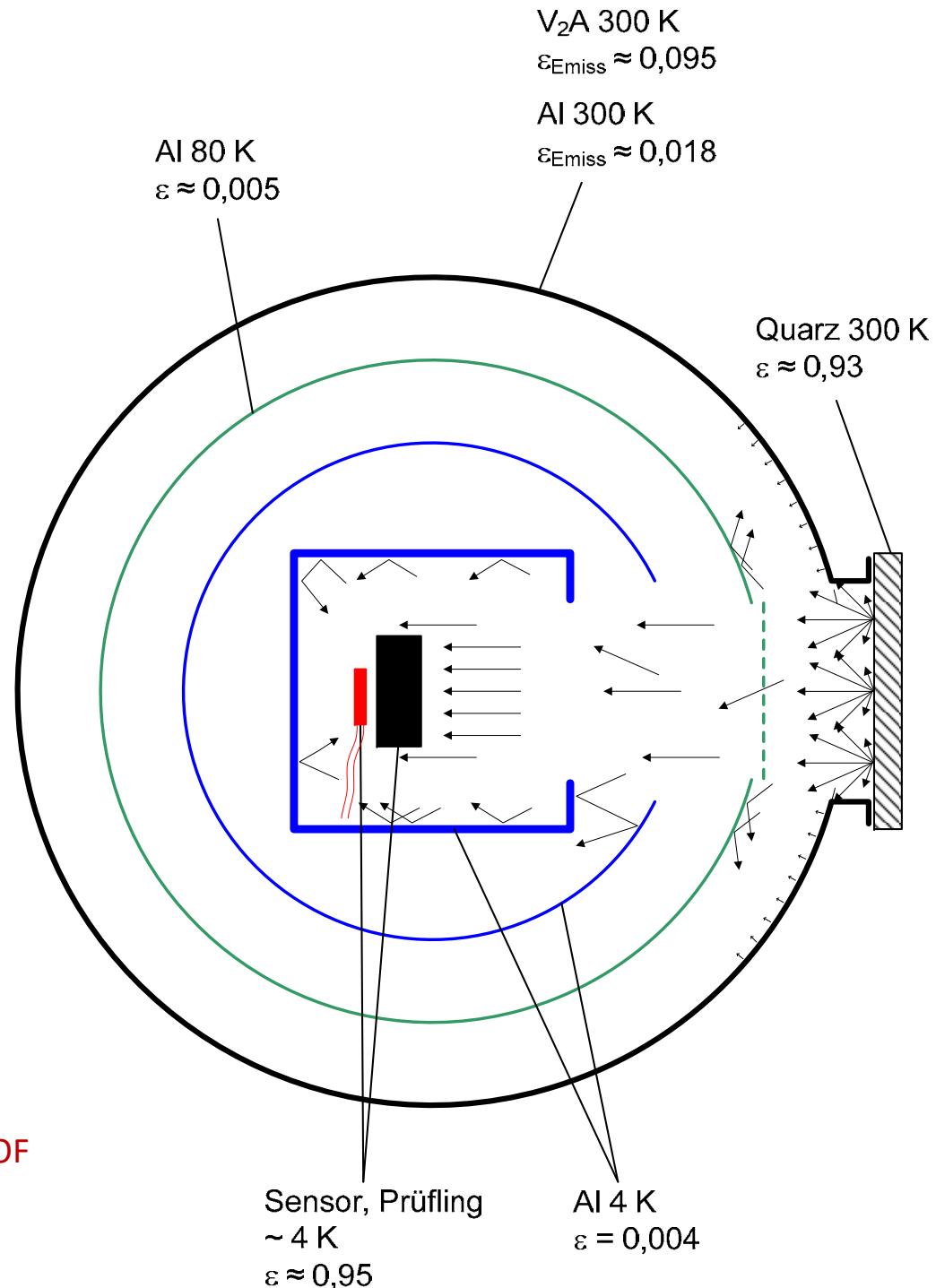
300 K: Außenbehälter + Sichtfenster

80 K: LN₂-Schild

4 K: innerer Schild, Sensor und Testobjekt
(hier: Glaskeramik)

Wärmestrahlung durch Pfeile angedeutet
(Pfeillänge entspricht Intensität)

⇒ gute Verspiegelung ergibt Vielfach-Reflexion der 300 K – Wärmestrahlung;
letztendlich absorbiert durch “schwarze” OF
Sensor and Testobjekt



Vakumsuperisolation (MLI)

Vielschicht-Vakumsuperisolation (engl. multi layer insulation – MLI)

hochreflektierende Folien ($\epsilon \approx 0,02$) + schlecht wärmeleitende Zwischenlagen

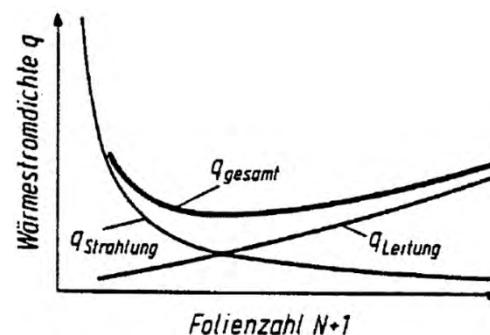
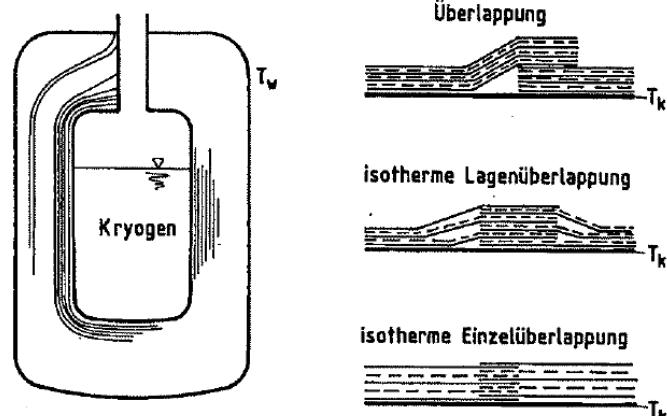
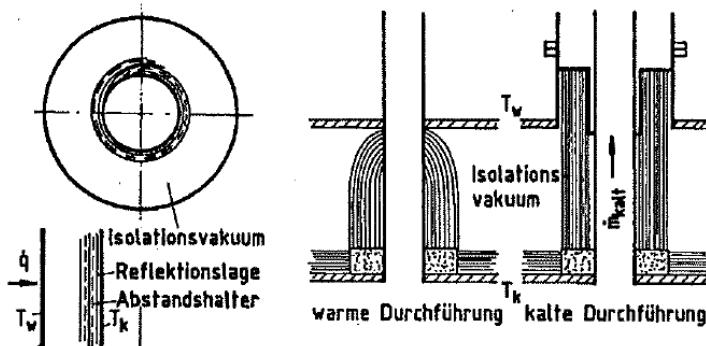
Kalte Flächen mit typ. 20 ... 50 Doppellagen umgeben

nur geringes ΔT zw. benachbarten Lagen \Rightarrow sehr effiziente Reduzierung q Strahlung



Ausführung alternativ:

- Doppellage reine Al-Folie + Glasfaserweb (ausheizbar; unbrennbar, f. LH₂;
- 6 µm Mylarfolie mit Al-Beidampfung 0,025 µm (leichter; max. 100 °C)
bzw. wenige Atomlagen Au, Ag einseitig oder doppelseitig auf Polyester / Polyimidfolie,
genoppt, geknittert; vorkonfektionierte Pakete, mit Kryotape appliziert)



Aluminium-Folie + Glasfaserweb-
MLI (RUAG Space GmbH, Wien)

besonders wirksam bei $T > 77$ K (wg. T^4 -Abhängigkeit)

geringe Packungsdichte (10 ... 20 Lagen/cm) für geringes λ_{\perp}
hohes $\lambda_{//}$ \Rightarrow bei Stoßstellen zu beachten

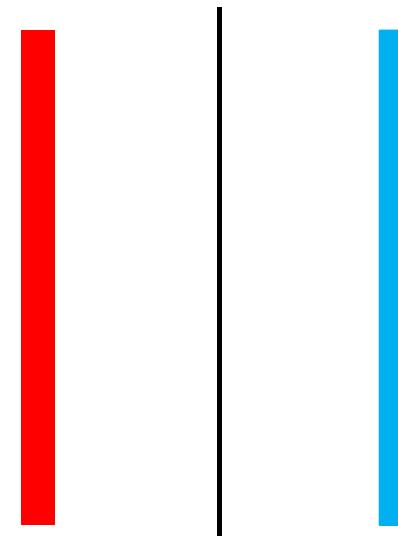
- sehr aufwändige und sorgfältige Applikation
- evakuieren schwierig und langwierig (Perforation, schmale Bahnen, Ausheizen)
bei Vakuumzusammenbruch: MLI verzögert Luftkontakt

Abb.: W. Lehmann, H. Neumann, KIT, VDI-Lehrgang Kryotechnik)

Vakumsuperisolation (MLI)

Parameter:

- Lagenanzahl / Strahlungsschilde
- Material der Strahlungsschilde
- Material der Zwischenlage
- Vakuumdruck
- Lagendichte
- Perforationsverhältnis



Gedankenexperiment:
reine Strahlungswärmeleitung

$$\dot{Q}_{N=1} = \frac{\dot{Q}_{N=0}}{2}$$

Vakumsuperisolierung (MLI)

Parameter:

- Lagenanzahl / Strahlungsschilde
- Material der Strahlungsschilde
- Material der Zwischenlage
- Vakuumdruck
- Lagendichte
- Perforationsverhältnis

Modellierungsansätze:

- Physikalisches Modell

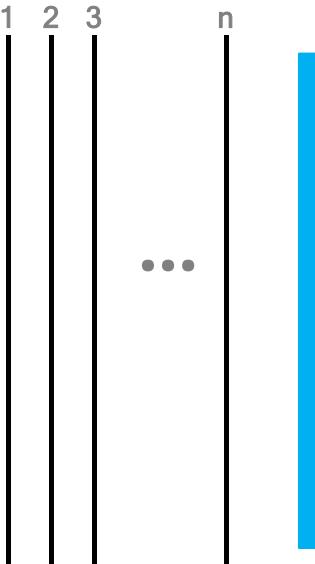
$$\text{Strahlung } Q_{\text{rad}} = f(\varepsilon, \phi, A, (T_1^4 - T_2^4))$$

$$\text{Gaswärmefleitung } Q_{\text{gas}} = f(\text{gas}, \alpha, p)$$

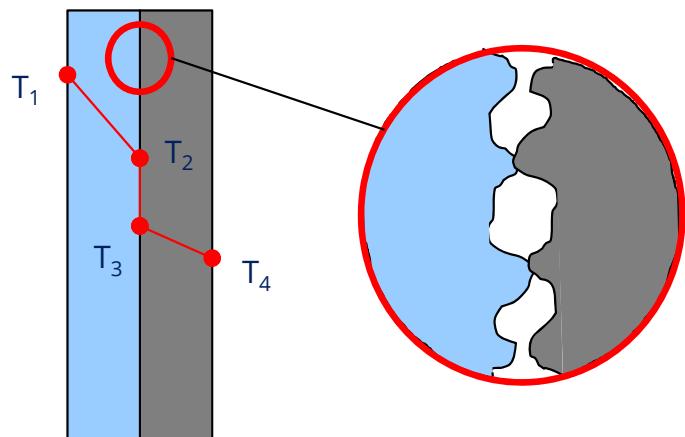
$$\text{FK-Wärmefleitung } Q_{\text{solid}} = f(T, \lambda)$$

}

Parameter tw. unbekannt
schlechteres Vakuum zw. den Lagen



$$\dot{Q}_{N=n} = \frac{\dot{Q}_{N=0}}{n + 1}$$



Wärmeübergang Folie - Spacer:

$$\dot{Q}_c = A \cdot h_c \cdot (T_3 - T_2) \propto p_c^3$$

A – Kontaktfläche, m²

h_c – Kontakt-WÜ-koeffizient, W/m²K

T_2/T_3 – Temperaturen, K

p_c – Kontaktdruck, Pa ← Anpressdruck, uniaxial

Gedankenexperiment:
reine Strahlungswärmefleitung

Vakumsuperisolation (MLI)

Parameter:

- Lagenanzahl / Strahlungsschilde
- Material der Strahlungsschilde
- Material der Zwischenlage
- Vakuumdruck
- Lagendichte
- Perforationsverhältnis

Modellierungsansätze:

- Physikalisches Modell

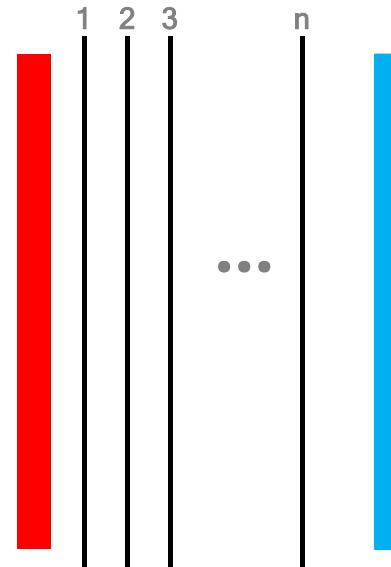
$$\text{Strahlung } Q_{\text{rad}} = f(\varepsilon, \phi, A, (T_1^4 - T_2^4))$$

$$\text{Gaswärmefluss } Q_{\text{gas}} = f(\text{gas}, \alpha, p)$$

$$\text{FK-Wärmefluss } Q_{\text{solid}} = f(T, \lambda)$$

}

Parameter tw. unbekannt
schlechteres Vakuum zw. den Lagen



Gedankenexperiment:
reine Strahlungswärmeleitung

$$\dot{Q}_{N=n} = \frac{\dot{Q}_{N=0}}{n+1}$$

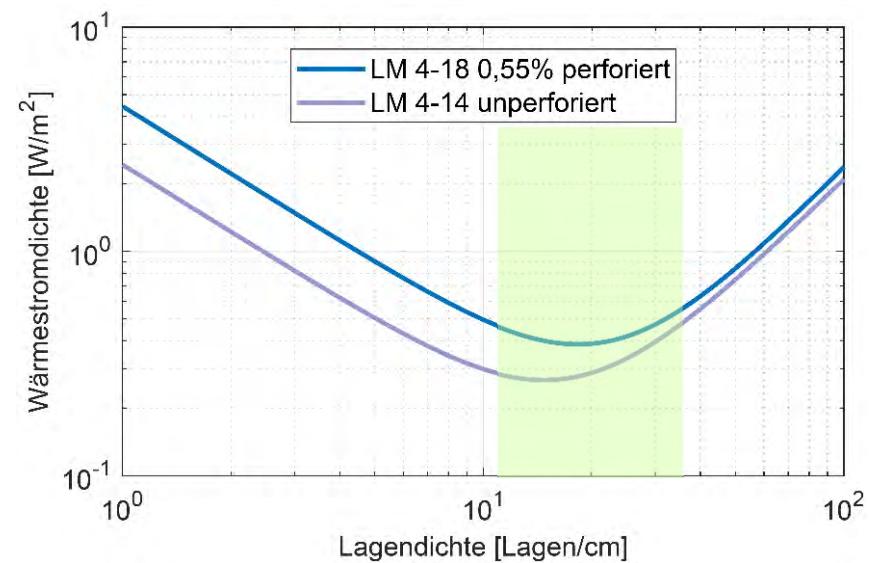
- Lockheed-Gleichungen

empirisch ermittelt aus LH₂-Messungen mit flachen Isolationsproben

auf ausgewählte Materialkombinationen beschränkt

allgemeine Funktionsvorschrift

$$\dot{q} = \frac{C_s(\bar{N})^{2,63} \cdot (T_h + T_c) \cdot (T_h - T_c)}{2 \cdot (N_s + 1)} + \frac{C_r \cdot \varepsilon_{TR} (T_h^{4,67} - T_c^{4,67})}{N_s} + \frac{C_g \cdot P}{N_s} \cdot \begin{cases} (T_h^{0,26} - T_c^{0,26}) & \text{für GHe} \\ (T_h^{0,52} - T_c^{0,52}) & \text{für GN}_2 \end{cases}$$



Isolation, technische Ausführung

generell: Kompromiss zwischen Aufwand und Isolationsqualität

| verbleibende Wärmeleitung zwischen 77 K und 300 K | mW/m·K | Anwendung |
|--|--------------|---|
| ohne Vakuum - Schaumisolation (PS, PU, Glasschaum) - Perlit, Silicagel, Aerogel ➡ + N ₂ - Spülgas | ~ 30 ~ 30 | LN ₂ , einfache Coldboxen, Trennsäulen Luftzerleger, LNG-Tanks |
| evakuierte Pulverschüttung ~ 10 ⁻³ mbar + Perlit / Silicagel / Vlies | ~ 2 | Standtanks LN ₂ , LOX, LAr stationär |
| reines Isolationsvakuum (~ 10 ⁻⁷ mbar) | ~ 5 | - |
| MLI (multi-layer insulation /Vielschicht-Vakuumisolation) Hochvakuum + 20...50 Lagen MLI) | ~ 0,04 | alle LHe + LH ₂ - Anwendungen |

Isolation, technische Ausführung

| Isulationsmaterial | Wärmefluß (W) durch 2,5 cm bezogen auf 1 m ² und zwischen 300 und 77 K |
|---|--|
| (Edelstahl) | (160 000) |
| Polyurethan-Schaum | 200 |
| Perlitpulver + Stickstoff | 300 |
| Perlitpulver + Vakuum | 8 |
| Vakuum zwischen Glas | 500 |
| Vakuum zwischen Glas + Versilberung | 8 |
| Vakuum-Superisolation | 0,3 |
| Vakuum-Superisolation mit Strahlungsschilden und Adsorptionsmittel | 0,06 |
| Theoretisches Minimum der Vakuum-Superisolation | 0,04 |