

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**

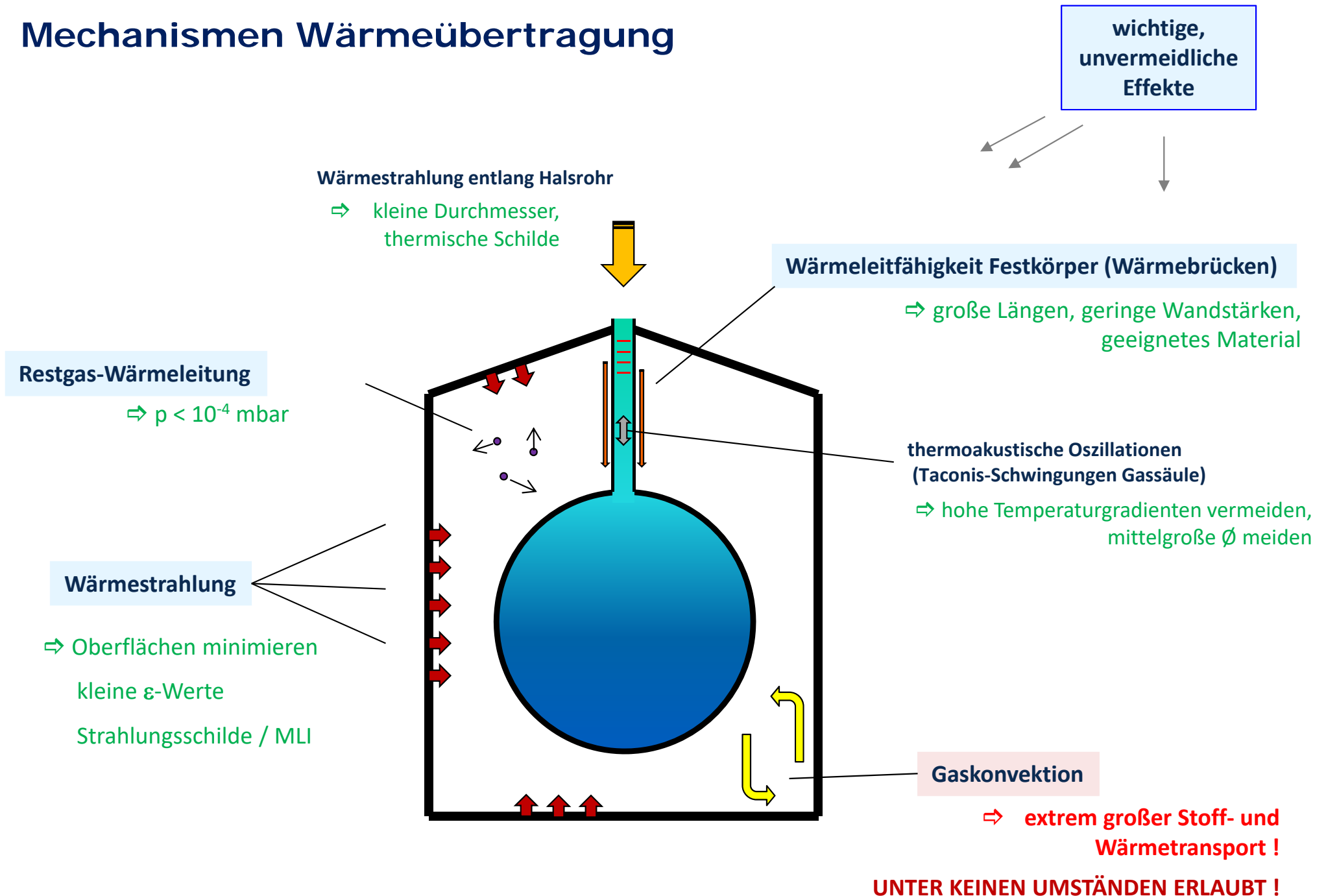


zusätzlicher Aufwand Kältemaschine: **260 W 2 kW ... 10 kW**

x Carnot; x Strohbridge ↗

⇒ Minimierung des Wärmeeintrags mit allen Mitteln !

Mechanismen Wärmeübertragung



Restgas-Wärmeleitung

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

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

\bar{l} : mittlere freie Weglänge

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

ψ	H ₂	He	Air	Ar	CO ₂	Kr	Xe
λ in mW/m·K bei 15°C, 1 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

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

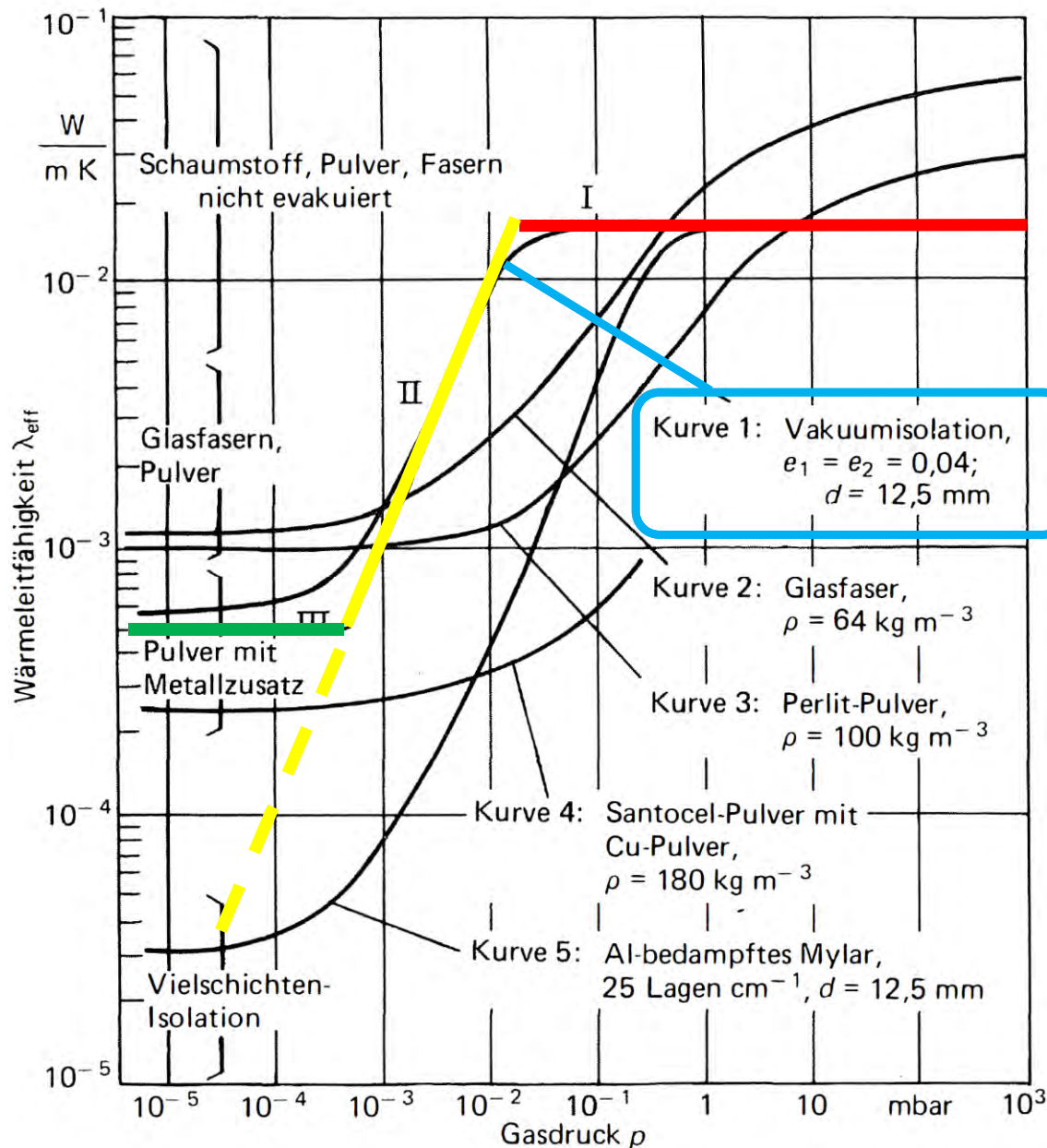
$l \gg d$

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

$$\lambda \propto p$$

λ unabhängig von d

Restgas-Wärmeleitung



Restgaswärmeleitung vs. Druck
reine Vakuumisolation, N_2

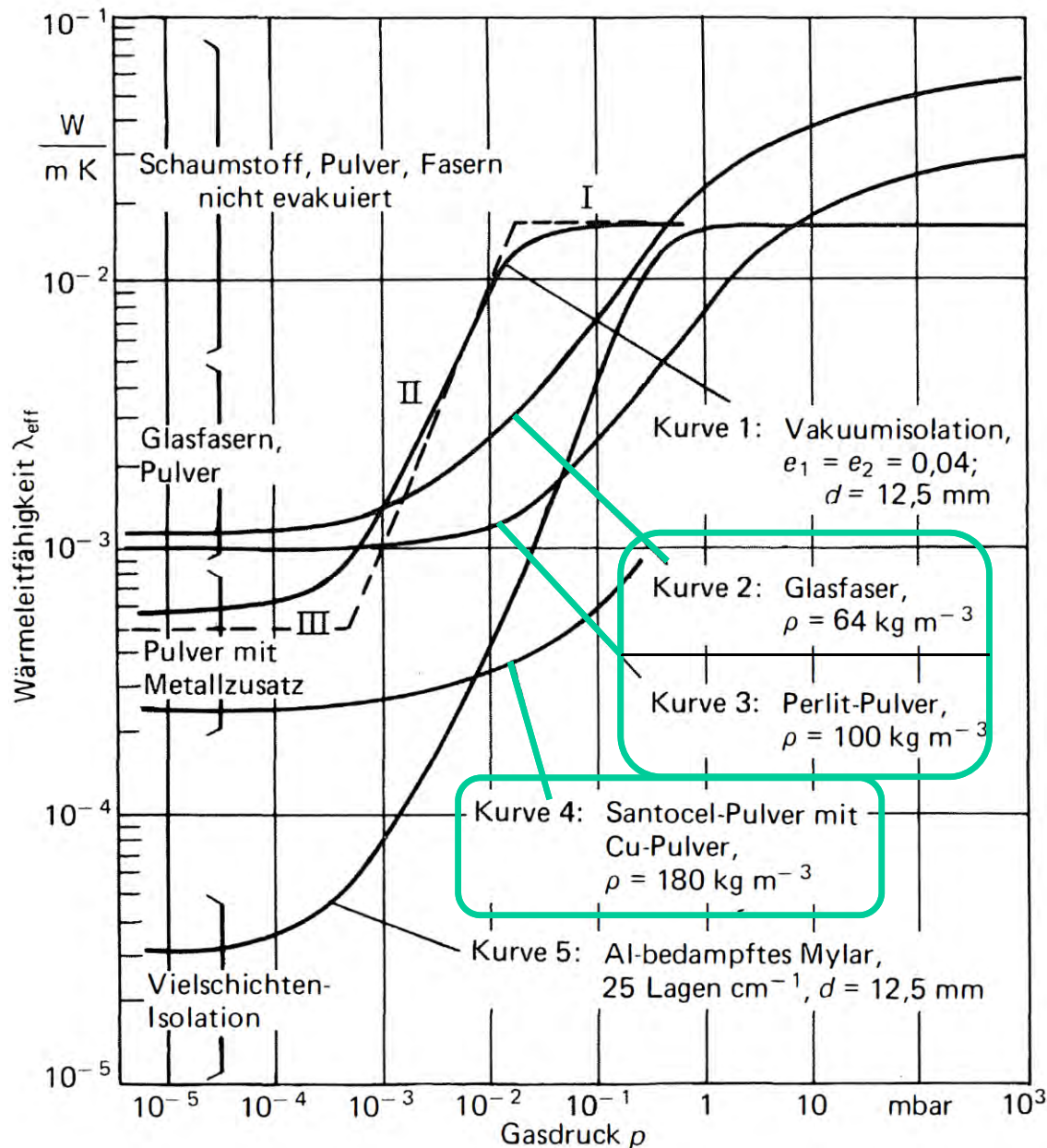
I Kontinuumsbereich
druckunabhängige Gaswärmeleitung
 $\lambda = f(\psi, d)$

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

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

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

Restgas-Wärmeleitung



Maßnahmen zur Reduktion:

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

und/oder:

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

und/oder:

- Reduktion Teilchengeschwindigkeit:

schwere Gase

gut: N_2 , CO_2 , Kr, organische Verbindungen

schlecht: He, H_2

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

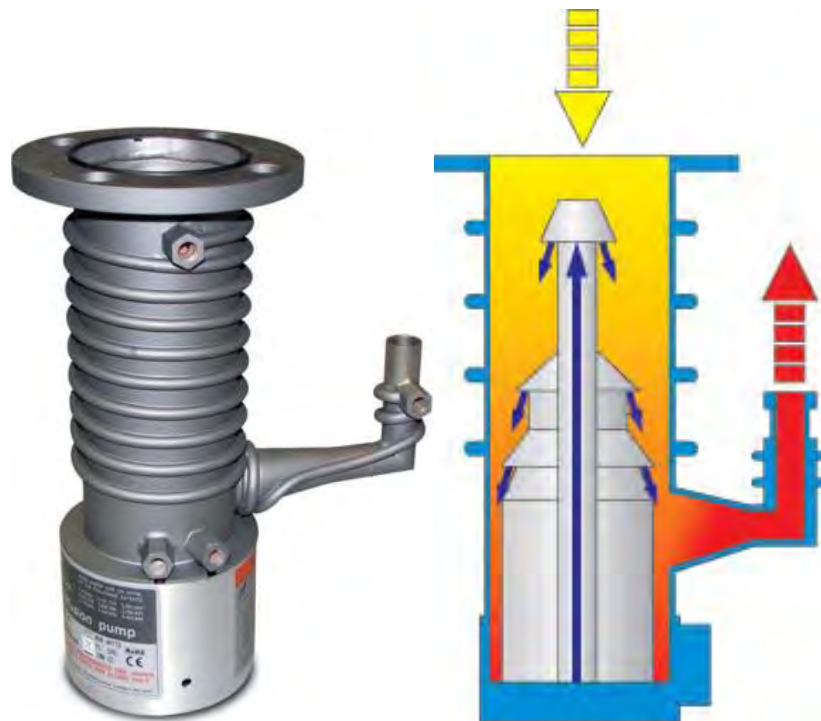
Druckbereich	Bezeichnung	Erzeugung	Anwendung
300 1 mbar	Großvakuum viskose Strömung	Membranpumpe	Inertisierung, ...
1 ... 10^{-3} mbar	Feinvakuum Knudsenströmung	Drehschieberpumpe	Vakuumisolation mit Pulver
10^{-3} ... 10^{-7} mbar	Hochvakuum Molekularströmung	Turbo + Membranpumpe; Diffusions- + Drehschieberp.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

Isolationsvakuum



**Membran-
Vakuumpumpe**

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



Öldiffusionspumpe

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



Hochvakuum-Pumpstand
(Drehschieber- +
Turbopumpe)

Turbomolekularpumpe



Isolationsvakuum

Beispiel: Vakuumkammer, $V = 1$ 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) Leakage / 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 N_2 , O_2 , ...; insbesondere polares H_2O)

dynamisches Gleichgewicht zwischen Oberfläche und Gasraum, Ablösung in Stunden ... Wochen

\Rightarrow Ausheizen bei $70 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$

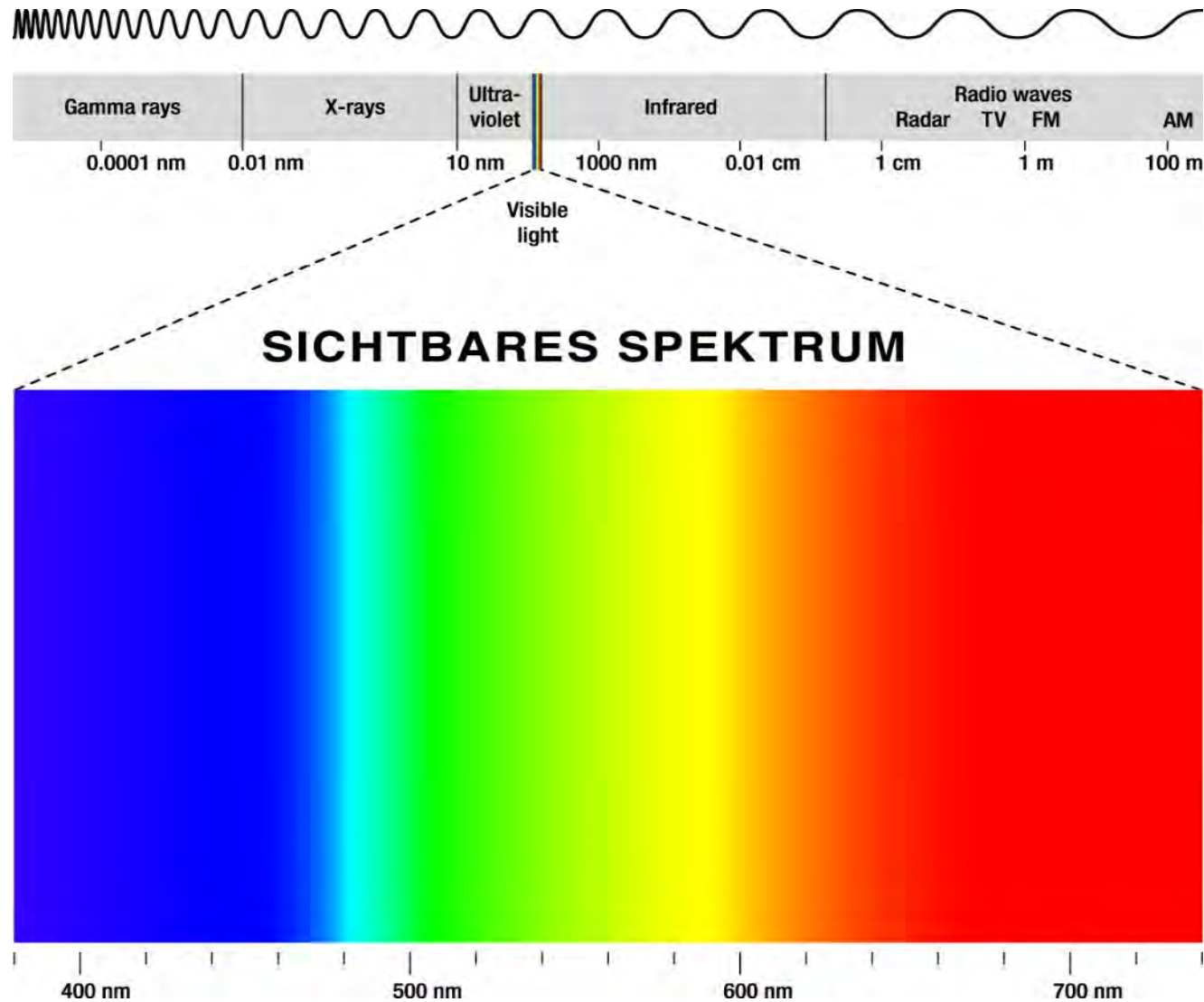
3) Permeation

- insbesondere alle nichtmetallischen Materialien betroffen; charakteristische Durchgangszahlen für alle Material/Gas-Kombinationen)
- H_2 – Permeation durch Metalle
- He – Permeation durch Glas

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

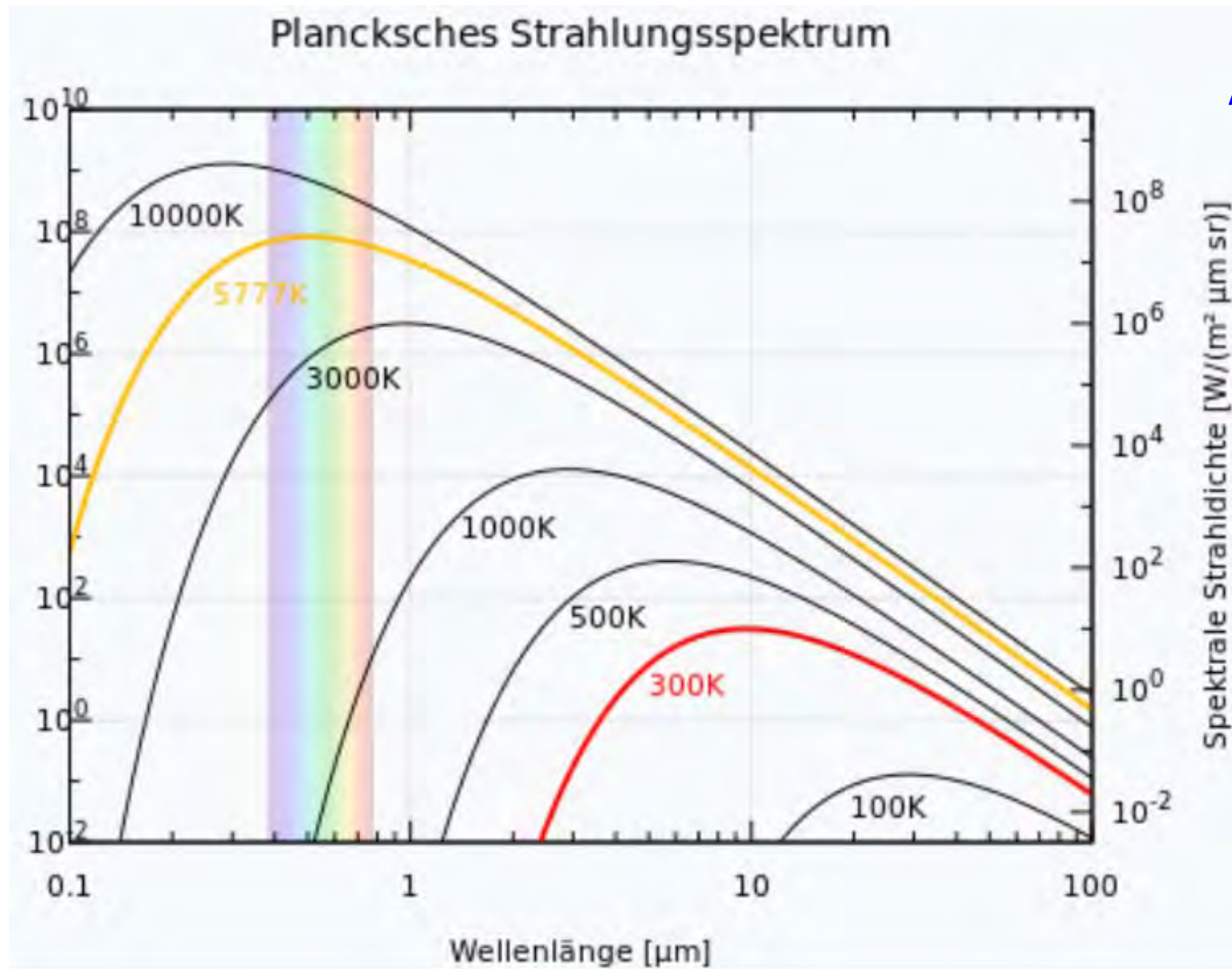
- Schraube / Sensor in Sackloch
- Stecker; Überwurfmuttern
- PVC-isolierte Kupferlitze

Thermische Strahlung



elektromagnetische
Strahlung

Emission
Absorption



Thermische Strahlung

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

Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$\epsilon_{1,2}$ 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

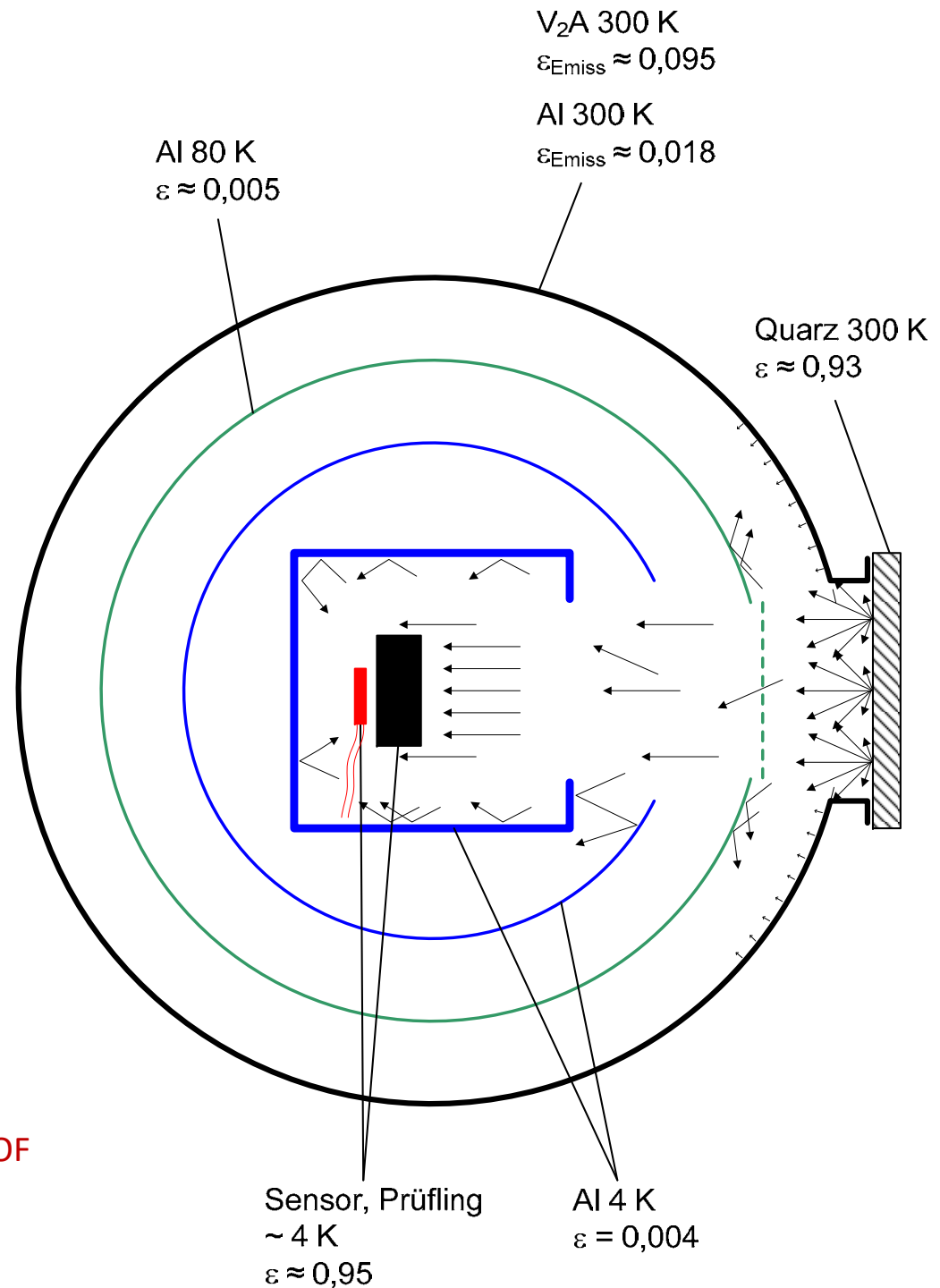
300 K: Außenbehälter + Sichtfenster

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



Vakuumsuperisolation (MLI)

Vielschicht-Vakuumsuperisolation (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:

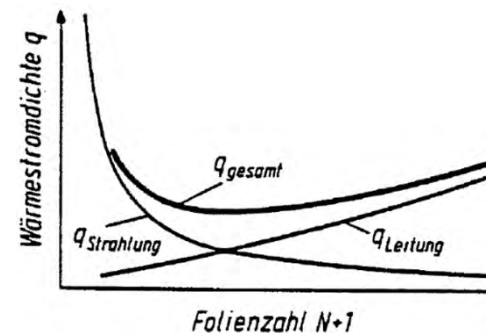
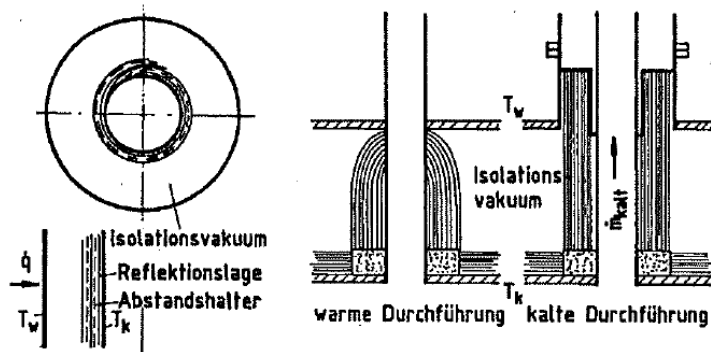
a) Doppellage reine Al-Folie + Glasfasergewebe (ausheizbar; unbrennbar, f. LH₂;))

b) 6 μm Mylarfolie mit Al-Bedampfung 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 + Glasfasergewebe-
MLI (RUAG Space GmbH, Wien)



besonders wirksam bei $T > 77 \text{ K}$ (wg. T^4 -Abhängigkeit)
geringe Packungsdichte (10 ... 20 Lagen/cm) für geringes λ_{\perp}
hohes λ_{\parallel} \Rightarrow bei Stoßstellen zu beachten

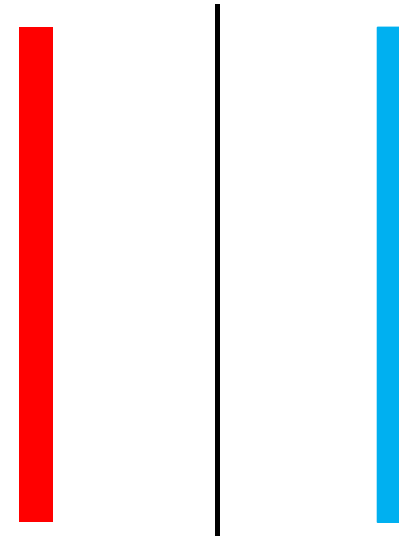
- sehr aufwändige und sorgfältige Applikation
- evakuieren schwierig und langwierig (Perforation, schmale Bahnen, Ausheizen)
- bei Vakuumzusammenbruch: MLI verzögert Luftkontakt

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

Vakuumsuperisolation (MLI)

Parameter:

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



Gedankenexperiment:
reine Strahlungswärmeleitung

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

Vakuumsuperisolation (MLI)

Parameter:

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

Modellierungsansätze:

- Physikalisches Modell

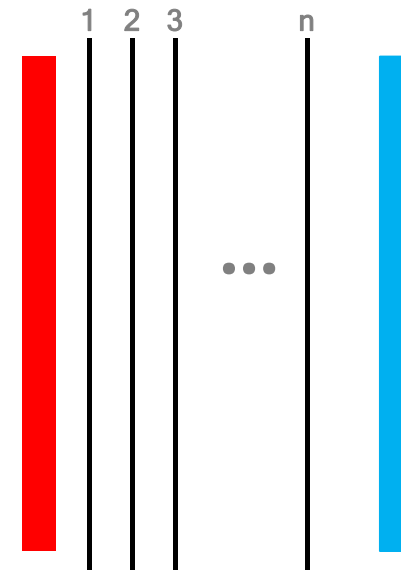
Strahlung $Q_{\text{rad}} = f(\epsilon, \phi, A, (T_1^4 - T_2^4))$

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

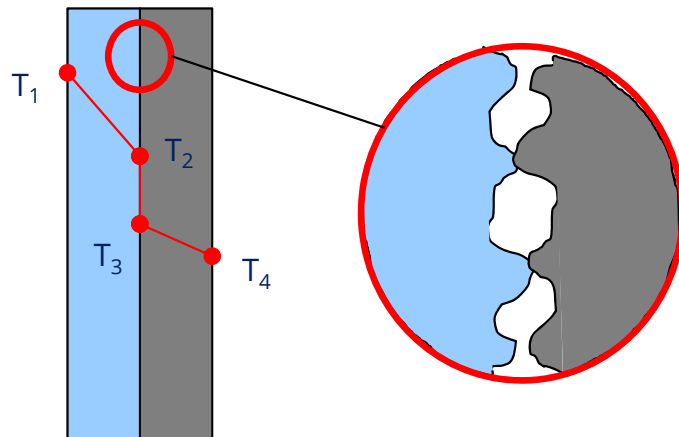
FK-Wärmeleitung $Q_{\text{solid}} = f(T, \lambda)$

Parameter tw. unbekannt
schlechteres Vakuum zw. den Lagen

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



Gedankenexperiment:
reine Strahlungswärmeleitung



Wärmeübergang Folie - Spacer:

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

A – Kontaktfläche, m^2

h_c – Kontakt-WÜ-koeffizient, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

T_2/T_3 – Temperaturen, K

p_c – Kontaktdruck, Pa

← Anpressdruck, uniaxial

Vakuumsuperisolation (MLI)

Parameter:

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

Modellierungsansätze:

- Physikalisches Modell

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

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

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

Parameter tw. unbekannt
schlechteres Vakuum zw. den Lagen

- Lockheed-Gleichungen

empirisch ermittelt aus LH₂-Messungen mit flachen Isolationsproben

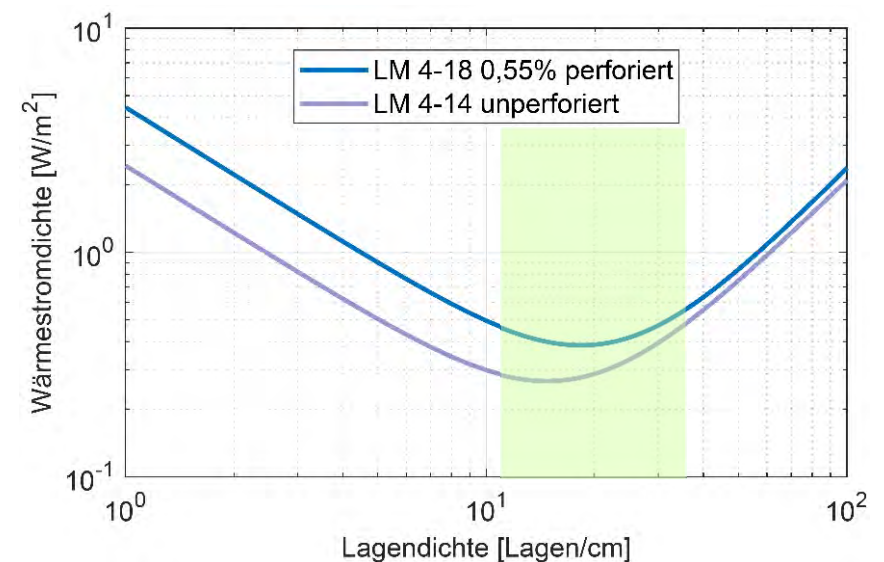
auf ausgewählte Materialkombinationen beschränkt

allgemeine Funktionsvorschrift

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



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



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

Isolationsmaterial	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