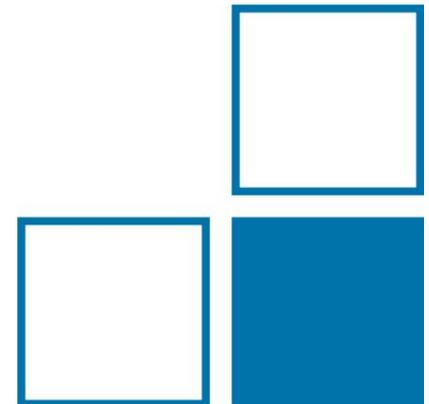


Numerische Modellierung des Wärmetransports bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen

AK Thermophysik, Aachen

09.03.2015

Maya Krause, Eva Katharina Rafeld



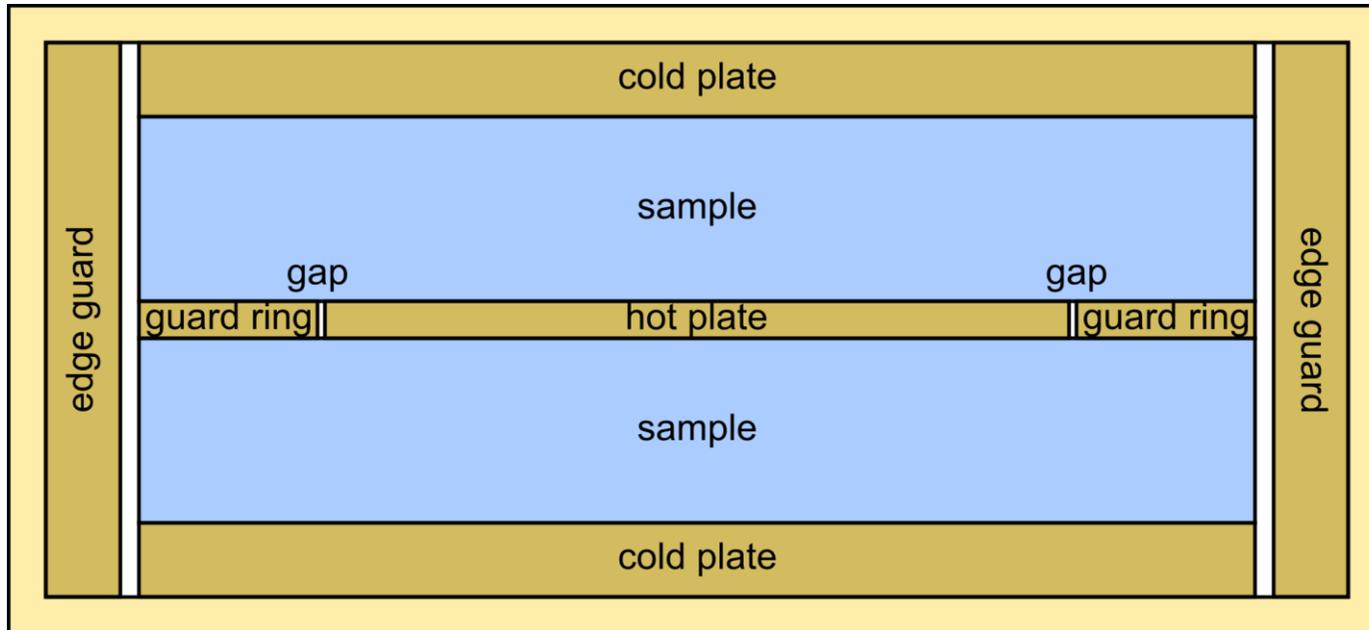
- EMRP-Projekt SIB 52 Thermo
 - WP 4: Strahlungstransport
- numerisches Modell
 - Randbedingungen
 - Variation der Variablen
 - Arbeitsgleichungen
- Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

„Metrology for thermal protection materials“

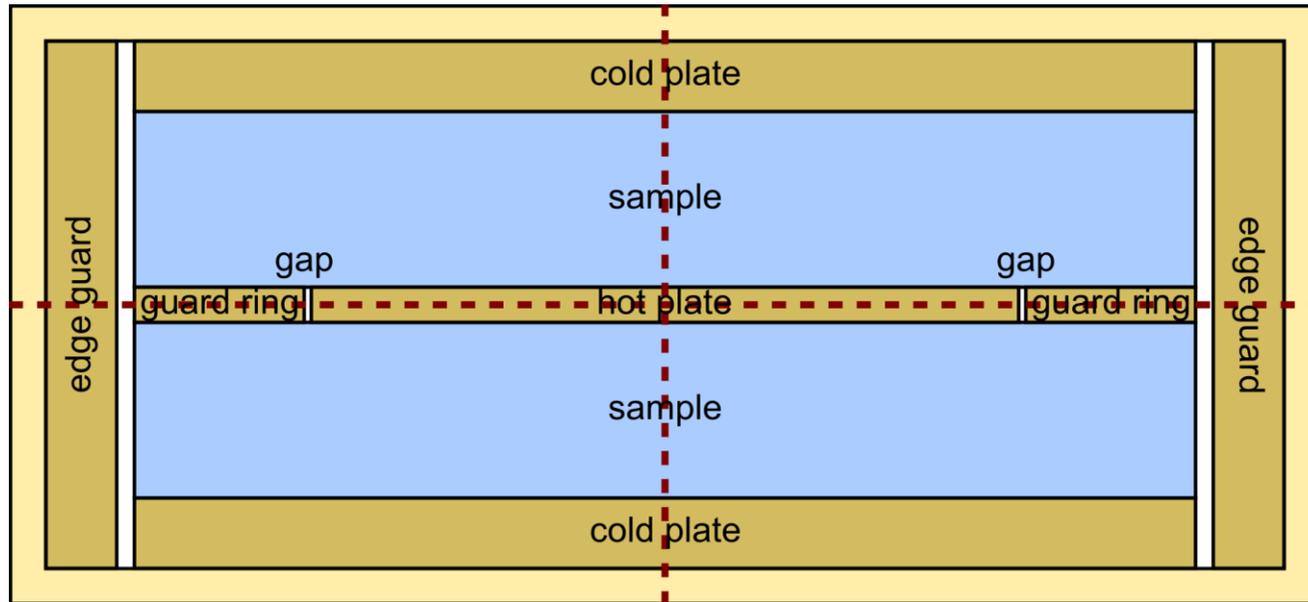
Partner: NPL (UK), CMI (CZ), LNE (F), MKEH (H), PTB (D)

- WP 1: Entwicklung neuer Messtechniken für Referenzmessinstrumente
- WP 2: Referenzmaterialien
 - zwei CaSi-Materialien unterschiedlicher Dichte
- WP 3: Industrielle Messtechniken
- WP 4: Einfluss der Wärmestrahlung
 - analytische und numerische Modellierung

- Workpackage 4: Einfluss des Strahlungstransports auf Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit GHP
 - analytisches Modell
 - **numerisches (FEM) Modell**
 - Vergleich analytischer und numerischer Daten
 - experimentelle Überprüfung der theoretischen Modelle



- Platten-Material: Kupfer
- Proben-Material: Dämmstoff, porös, semitransparent
- Material in Spalten und Dämmstoffporen: Luft



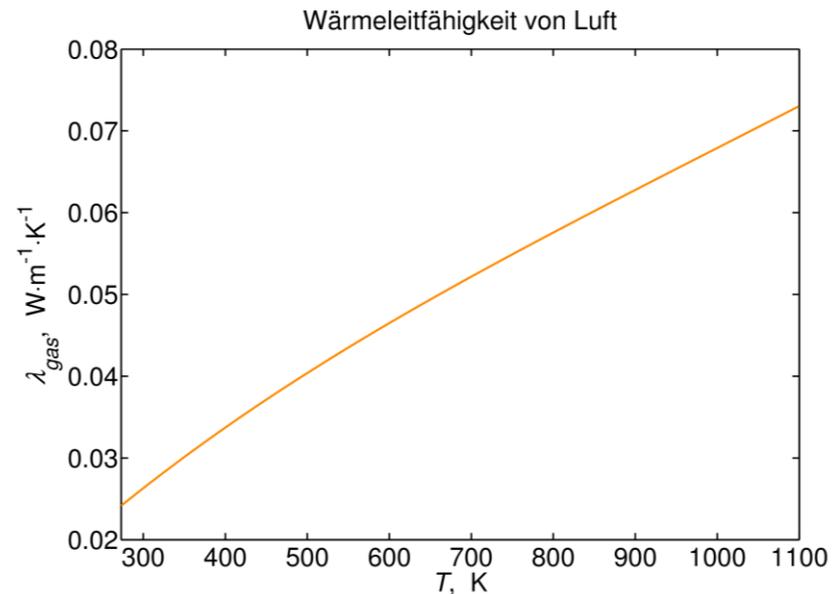
- Implementierung in COMSOL (Version 5.0)
 - Ausnutzung der Symmetrien: 2D, rotationssymmetrisch
 - Heat Transfer Module
 - Heat Transfer in Porous Media
 - Heat Transfer with Radiation in Participating Media
 - Surface-to-Surface Radiation

- Stationäre Wärmetransportgleichung

$$0 = \nabla \cdot (\lambda_c \cdot \nabla T) + Q + Q_{rad}$$

$$\lambda_c = (1 - \phi) \cdot \lambda_s + \phi \cdot \lambda_{gas}$$

- Wärmeleitfähigkeit der Probe, λ_s
- Wärmeleitfähigkeit von Luft, λ_{gas}
- Wärmestrahlung, Q_{rad}

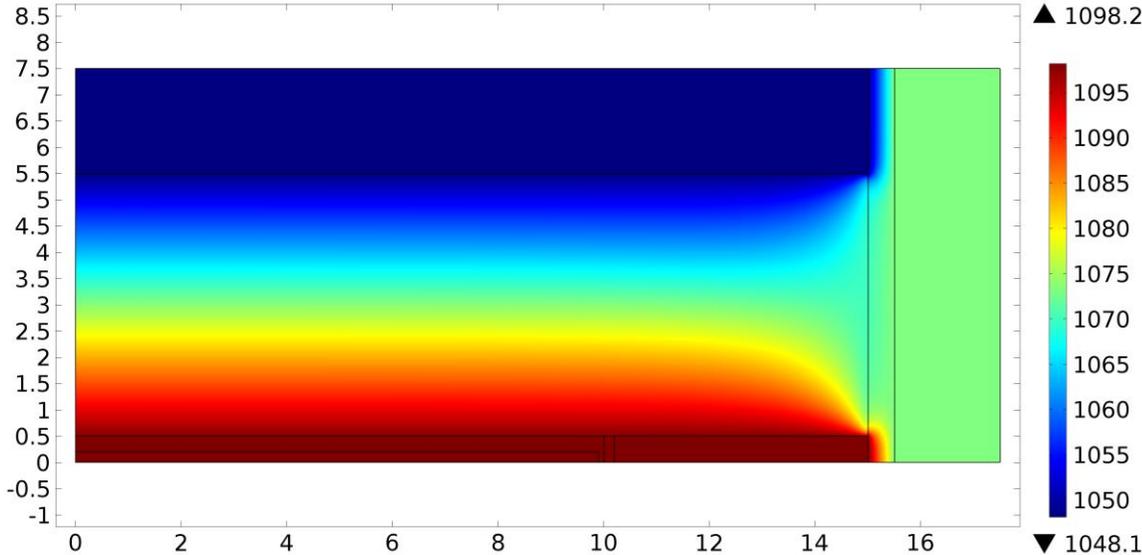


- Probenmaterial:

$$\lambda_s = 0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (\rho = 400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, c_p = 950 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$$

- mittlere Temperatur, $T_{mean} = (T_h + T_c)/2$
- Temperaturdifferenz über die Probe, $T_{diff} = T_h - T_c$
- Porosität der Probe, ϕ
- Absorptionskoeffizient der Probe, ac
- Streukoeffizient der Probe, sc
- Probendicke, d
- Breite des Guard Rings, w_{gr}
- Emissionsgrad der Heiz-/Kühlplatten, ε

- mit und ohne Strahlung

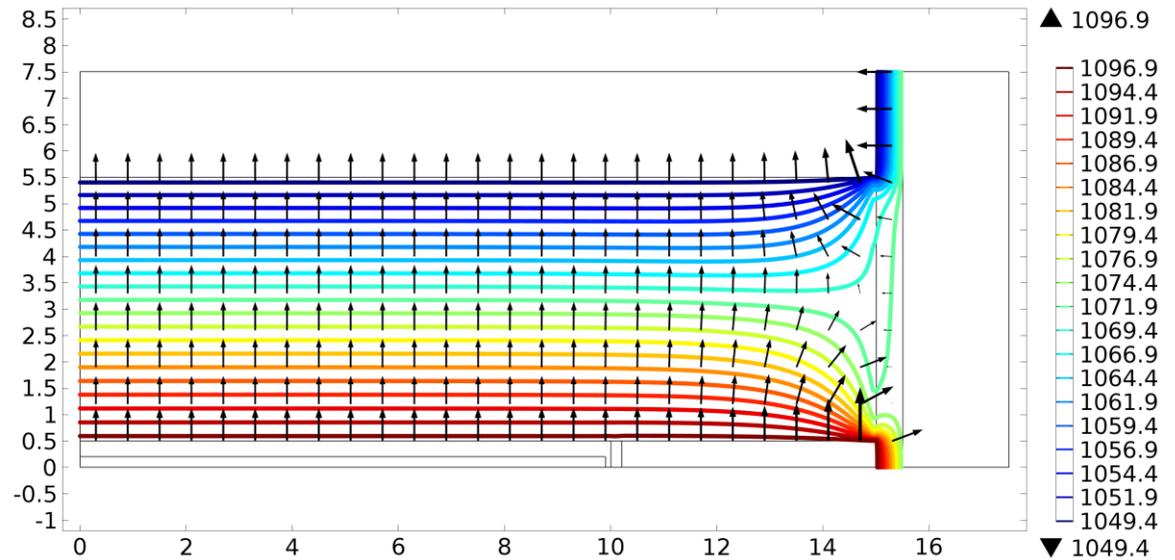


$$T_{mean} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{diff} = 50 \text{ K}$$

**Temperatur-
Verteilung, K**

**Isothermen mit
Wärmestrom-
vektoren**



Fourier-Gesetz:

Wärmestromdichte $\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T$

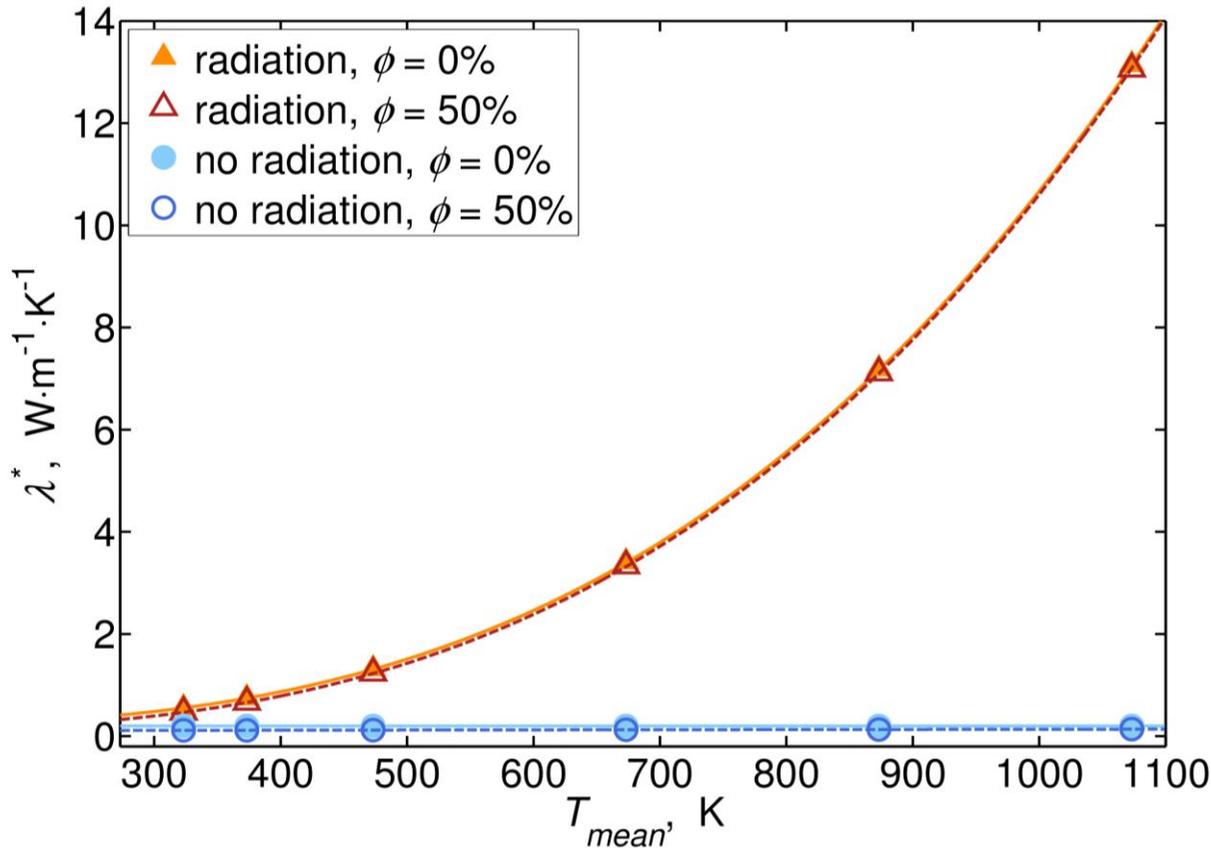
Gleichung für GHP-Messapparatur:

Wärmeleistung $\dot{Q} = \lambda^* \cdot A \cdot \frac{T_h - T_c}{d}$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda^* = \frac{d \cdot \dot{Q}}{A \cdot (T_h - T_c)}$

$$\lambda^* = (1 - \phi) \cdot \lambda_s + \phi \cdot \lambda_{gas} + \lambda_{rad}(T^3)$$

$$\lambda^* = (1 - \phi) \cdot \lambda_s + \phi \cdot \lambda_{gas} + \lambda_{rad}(T^3)$$



Standardwerte

$$\lambda_s = 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\phi = 0 \%$$

$$T_{diff} = 50 \text{ K}$$

$$d = 5 \text{ cm}$$

$$w_{gr} = 4.8 \text{ cm}$$

$$r_{hp} = 10 \text{ cm}$$

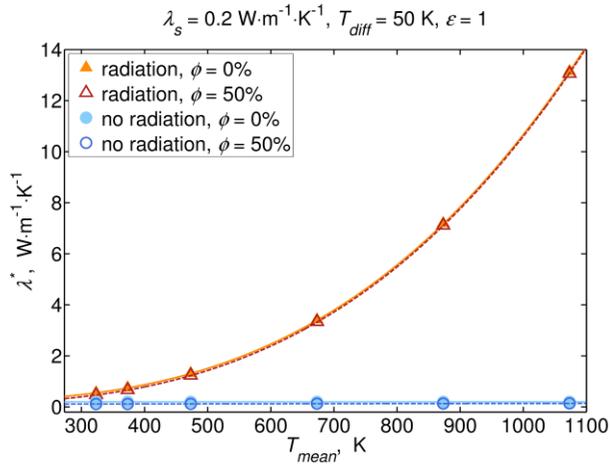
$$ac = 500 \text{ m}^{-1}$$

$$sc = 700 \text{ m}^{-1}$$

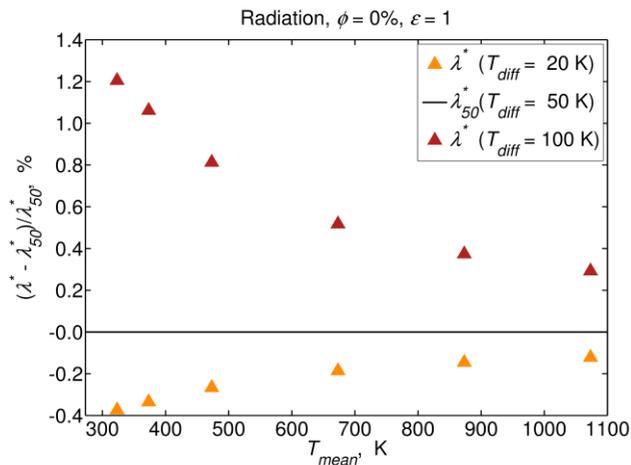
$$\varepsilon = 1$$

➔ Strahlung dominiert Wärmetransport

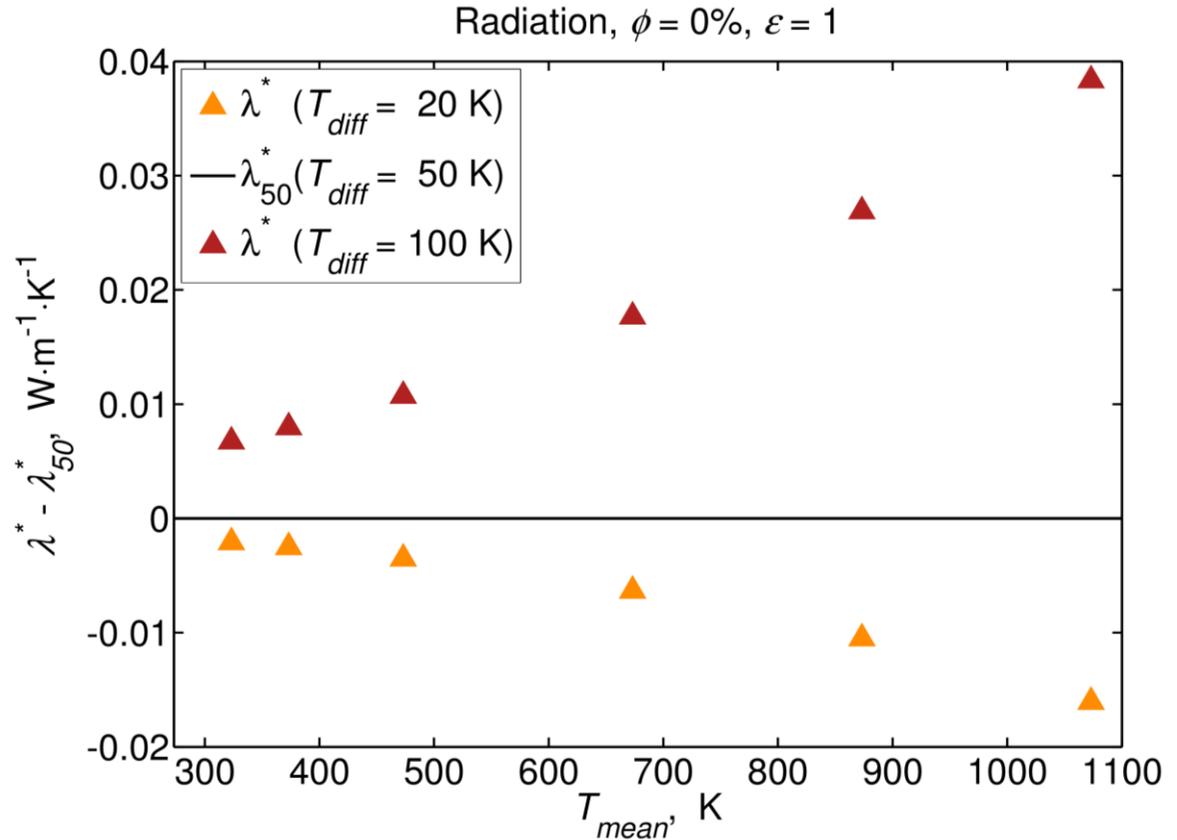
[COMSOL-Modell berücksichtigt keine Strahlung in Poren]



prozentuale
Abweichungen

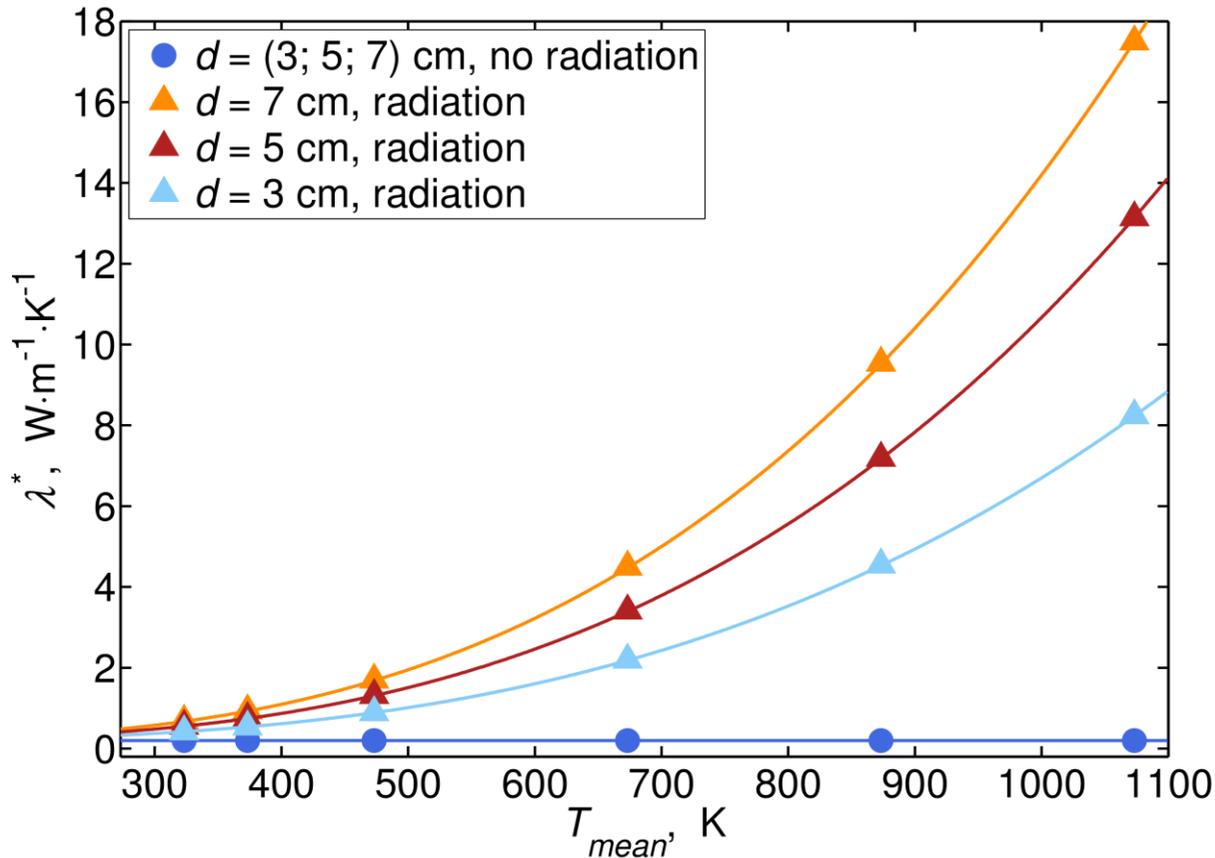


absolute Abweichungen von $T_{diff} = 50 \text{ K}$



➔ geringer Einfluss auf λ^*

$$\phi = 0\%, T_{diff} = 50 \text{ K}, \varepsilon = 1$$



Standardwerte

$$\lambda_s = 0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\phi = 0 \%$$

$$T_{diff} = 50 \text{ K}$$

$$d = 5 \text{ cm}$$

$$w_{gr} = 4.8 \text{ cm}$$

$$r_{hp} = 10 \text{ cm}$$

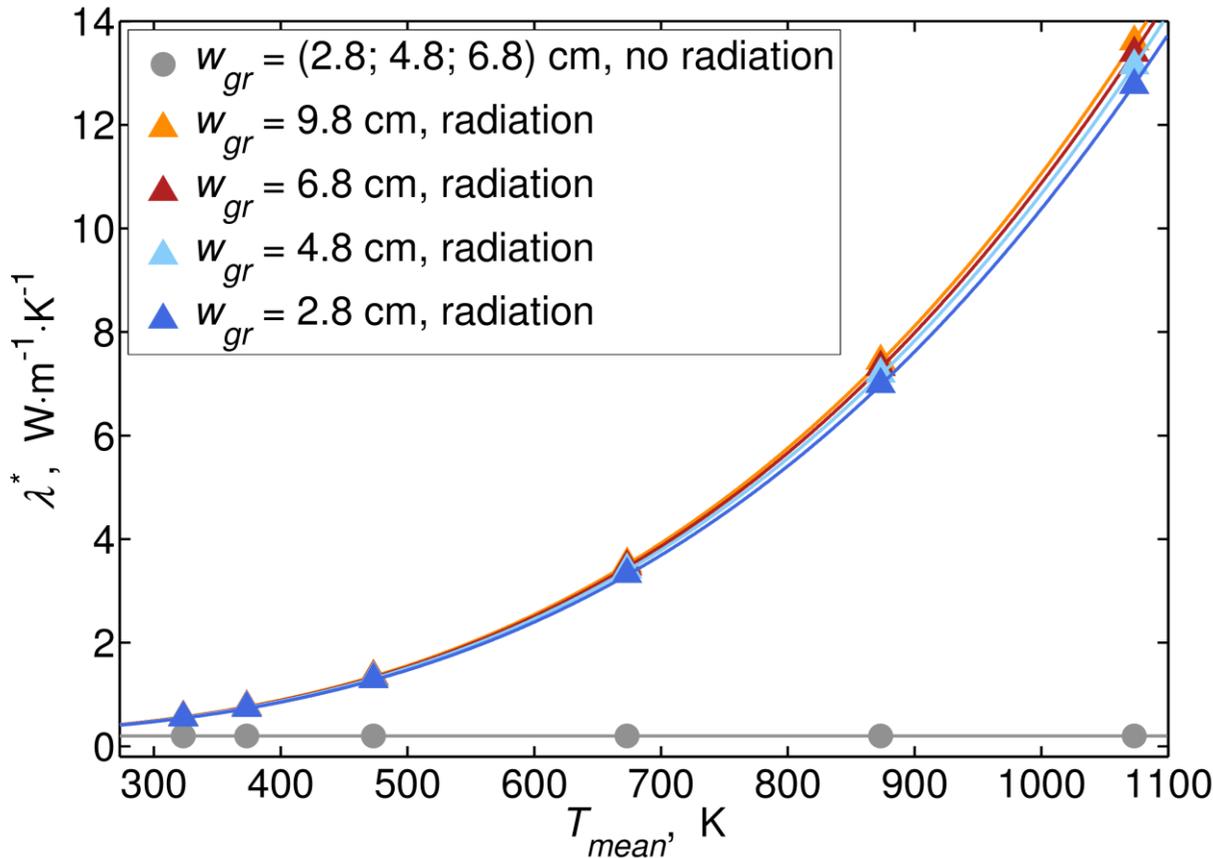
$$ac = 500 \text{ m}^{-1}$$

$$sc = 700 \text{ m}^{-1}$$

$$\varepsilon = 1$$

➔ Probendicke beeinflusst Strahlungsanteil des Wärmetransports wesentlich.

$$\phi = 0\%, T_{diff} = 50 \text{ K}, \varepsilon = 1$$



Standardwerte

$$\lambda_s = 0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\phi = 0 \%$$

$$T_{diff} = 50 \text{ K}$$

$$d = 5 \text{ cm}$$

$$w_{gr} = 4.8 \text{ cm}$$

$$r_{hp} = 10 \text{ cm}$$

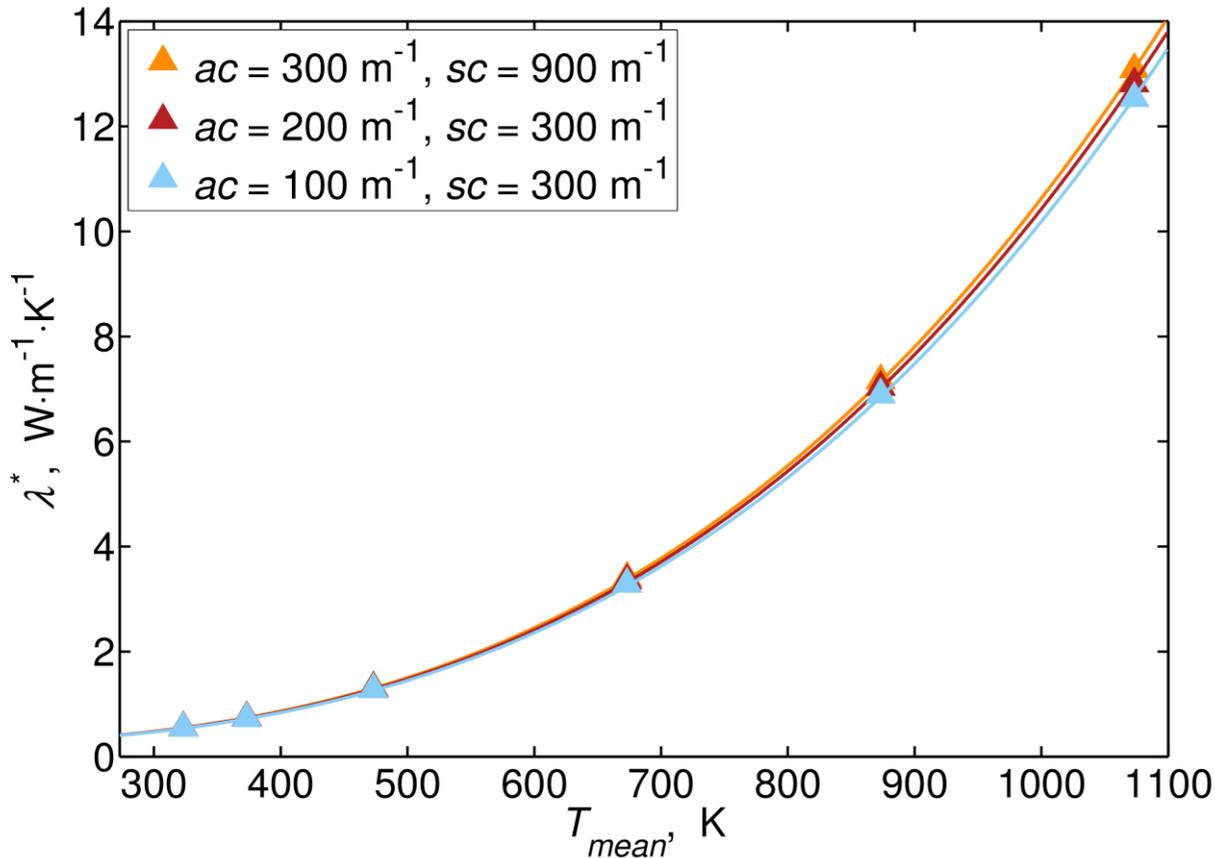
$$ac = 500 \text{ m}^{-1}$$

$$sc = 700 \text{ m}^{-1}$$

$$\varepsilon = 1$$

➔ Je schmaler der Guard Ring, desto größer der Einfluss des Edge Guards.

Radiation, $\phi = 0\%$, $T_{diff} = 50\text{ K}$, $\varepsilon = 1$



Standardwerte

$$\lambda_s = 0.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\phi = 0\%$$

$$T_{diff} = 50\text{ K}$$

$$d = 5\text{ cm}$$

$$w_{gr} = 4.8\text{ cm}$$

$$r_{hp} = 10\text{ cm}$$

$$ac = 500\text{ m}^{-1}$$

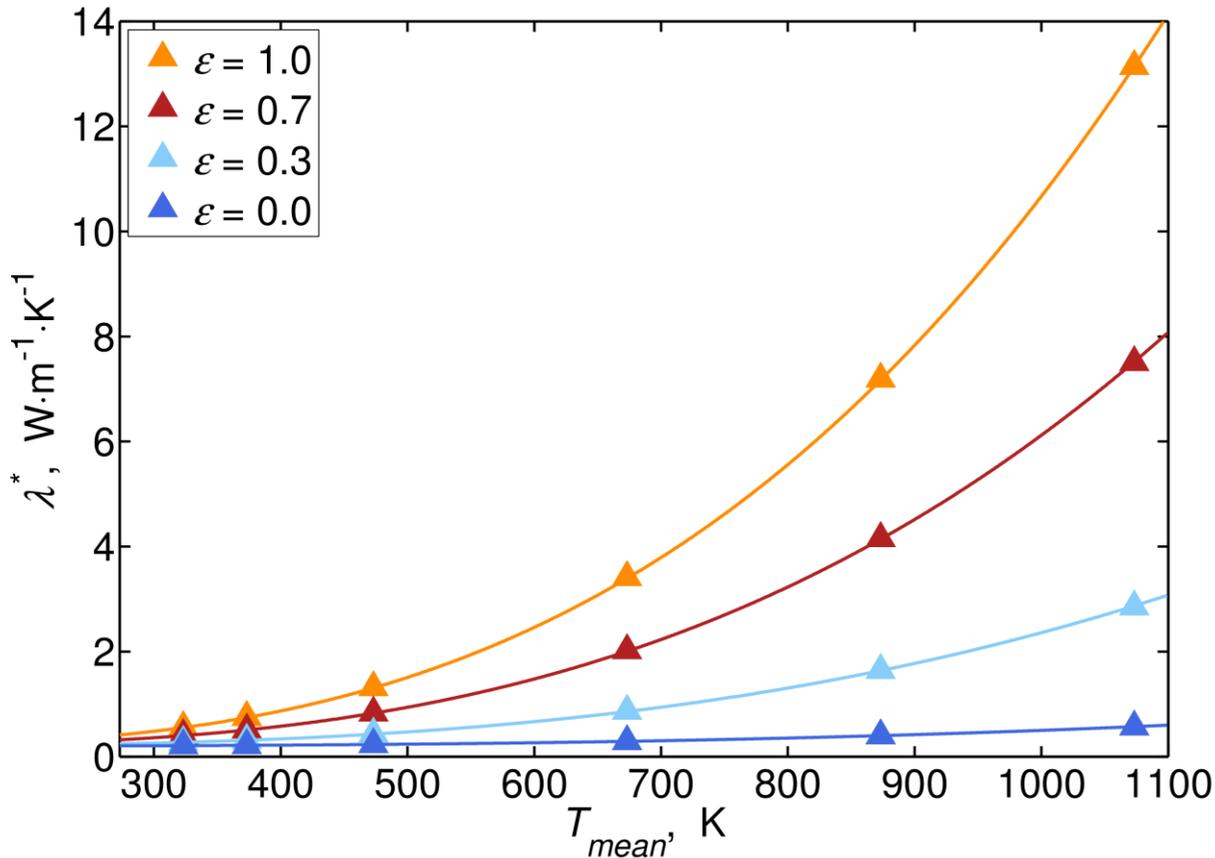
$$sc = 700\text{ m}^{-1}$$

$$\varepsilon = 1$$

➡ geringer Einfluss auf λ^*

➡ höhere Transparenz (ac, sc klein) führt zu geringerer λ^*

Radiation, $\phi = 0\%$, $T_{diff} = 50\text{ K}$



Standardwerte

$$\lambda_s = 0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\phi = 0 \%$$

$$T_{diff} = 50 \text{ K}$$

$$d = 5 \text{ cm}$$

$$w_{gr} = 4.8 \text{ cm}$$

$$r_{hp} = 10 \text{ cm}$$

$$ac = 500 \text{ m}^{-1}$$

$$sc = 700 \text{ m}^{-1}$$

$$\epsilon = 1$$

➔ starker Einfluss auf Wärmestrahlung

- großer Einfluss auf Messwert λ^* : Emissionsgrad, Probendicke
- geringer Einfluss auf Messwert λ^* : Temperaturdifferenz, Absorptions- und Streukoeffizient, Breite des Guard Rings

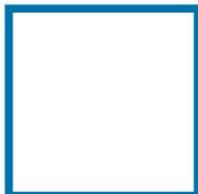
Ausblick

- Implementierung von Wärmetransport inklusive Strahlung in den Poren (Porenanzahl, Porengröße)
- Anpassung der Parameter (Geometrie, Materialien) an existierende Messinstrumente
- Vergleich der Modellierungsergebnisse mit analytischen Modellen und experimentellen Messdaten



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100
38116 Braunschweig



Maya Krause, Eva Katharina Rafeld
1.01 Fachgebiet Wärmetransport

Telefon: 0531 592-3212, -3213

E-Mail: maya.krause@ptb.de, eva.k.rafeld@ptb.de

www.ptb.de

