

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Experimentelle Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von komplexen anisotropen Strukturen

F. Hemberger

Sitzung des AKT 09.03.2015 in Aachen

Kontakt:

ZAE Bayern | Frank Hemberger | Am Galgenberg 87 | 97074 Würzburg
T +49 931 70564-326 | frank.hemberger@zae-bayern.de

© ZAE Bayern



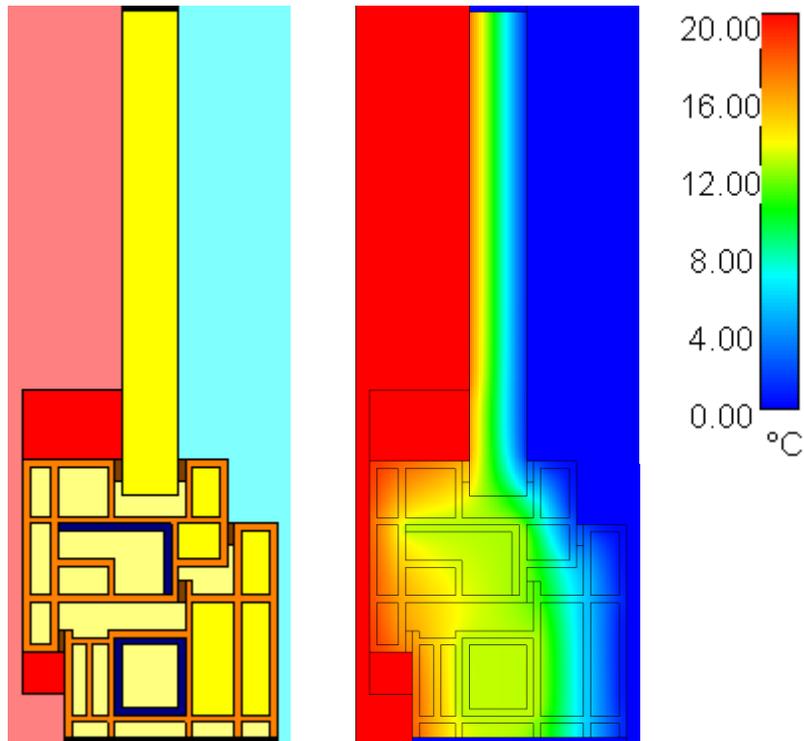
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



- 1. Motivation**
- 2. Fallbeispiele**
- 3. Messeinrichtung**
– evakuierbare Zweiplattenapparatur
- 4. Thermische Kontaktwiderstände**
– Korrekturverfahren
- 5. Laterale Wärmeströme**
– Korrekturverfahren

Warum messen und nicht nur simulieren?



ZAE Bayern: Simulation des U-Wertes
eines Fensterrahmenprofils nach DIN

- Thermische Kontaktwiderstände
und Übergangskoeffizienten
– unbekannt oder nur teilweise zugänglich
- Konvektion und Strahlung
in Hohlräumen und im Außenbereich
– oft nur stark vereinfacht umgesetzt
- Multi-Skalenproblematik
bei numerischen Simulationen

Honeycomb Tragstrukturen



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Ziel:

- thermische Optimierung der Tragestrukturen für die Solarpaneele der Mercury Sonde „Bepi Colombo“
- zuverlässige Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Vakuum
- $\lambda_{\text{eff}} = 1 - 2 \text{ W(m}\cdot\text{K)}^{-1}$

- Oberflächen aus CFC
- Wabenkern aus CFC oder Aluminium
- verschiedene Verklebungen





www.rossie.com



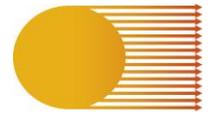
Quelle: NASA

- **sehr niedrige effektive Wärmeleitfähigkeit im Hochvakuum**
- **vergleichsweise hohe laterale Wärmeleitfähigkeit, metallisierte Kunststoff- oder Keramikfolien**
- **unterschiedlichste Konzepte bei den Abstandshaltern**

Stützstruktur für Vakuumisoliationsverglasung



Experimenteller Aufbau in der Zweiplattenapparatur (©ZAE Bayern)

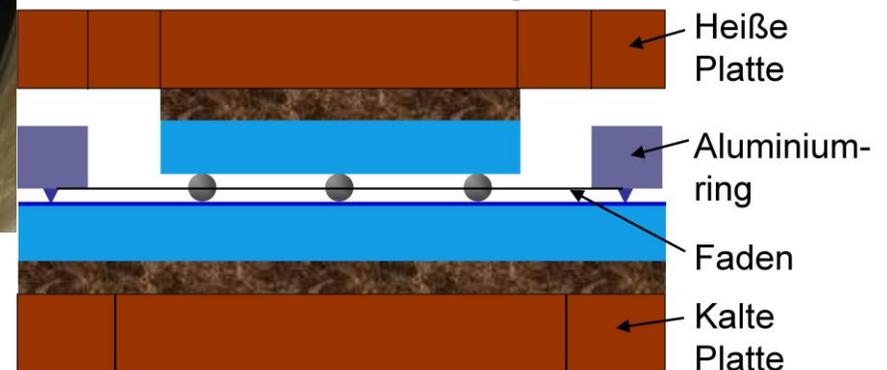


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Vakuumisoliationsverglasung
mit innerer Stützstruktur
(©ZAE Bayern)

experimentelle Bestimmung
des Beitrags der Stützen
zum Wärmetransport



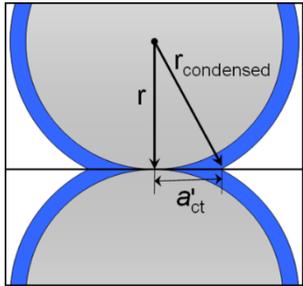
Querschnitt durch den Messaufbau (©ZAE Bayern)

Ausgefrorenes Gas in einer Kryoisolation

- speziell entwickelter Probenbehälter für die Zweiplattenapparatur



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

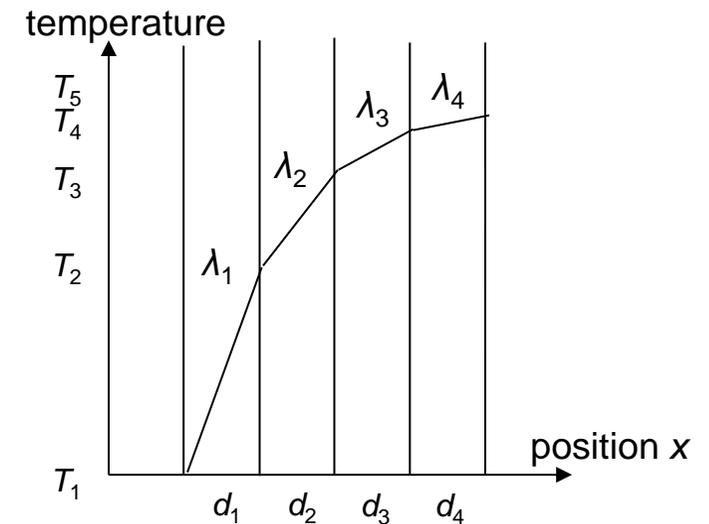
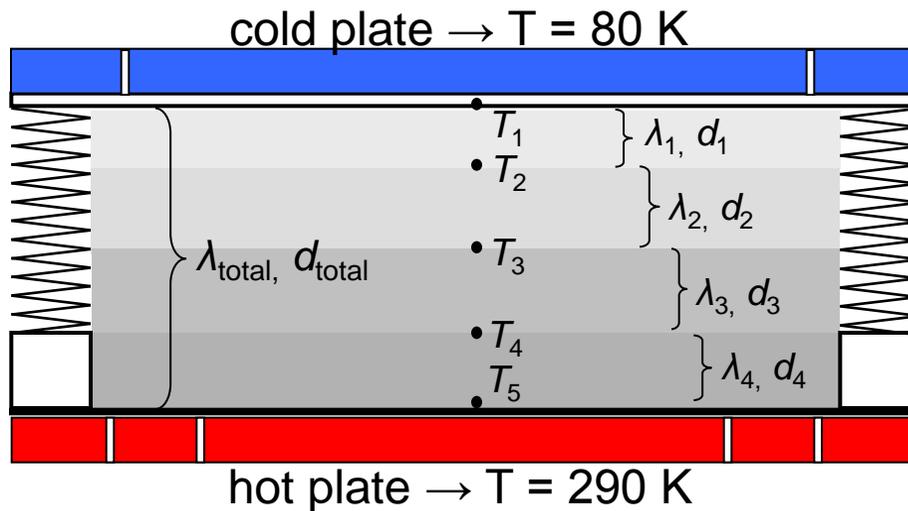


gas inlet

resealable gas-tight bellow



electrical
feedthrough



Latentwärmespeicher

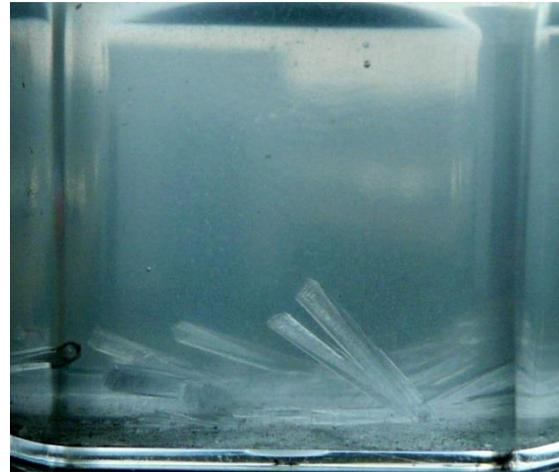


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

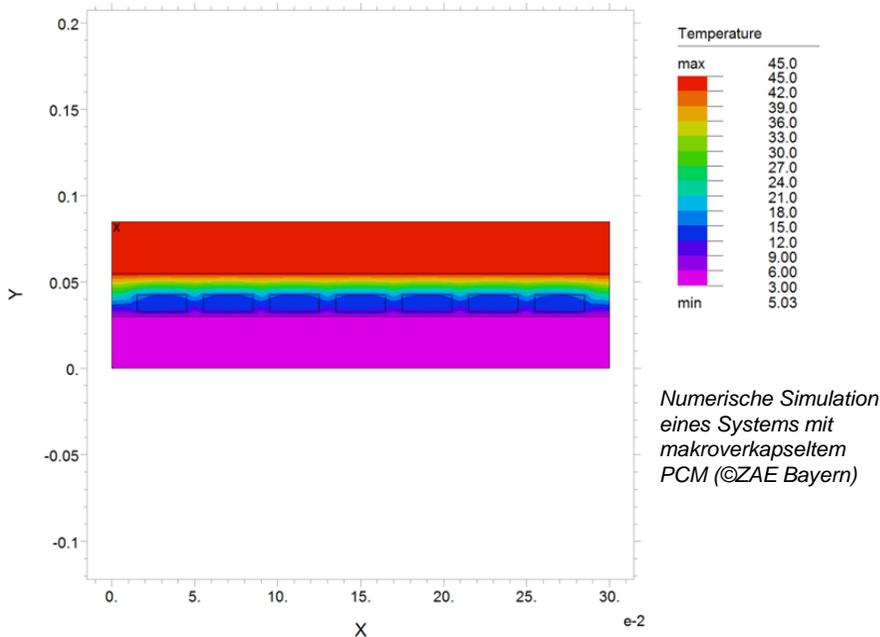


Experimentelle Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit eines Systems mit makroverkapseltem PCM (©ZAE Bayern)



Kristallisation bei einem Salzhydrat (©ZAE Bayern)

- effektive Wärmeleitfähigkeit eines PCM's während des Phasenübergangs
- effektive Wärmeleitfähigkeit kompletter Komponenten



Kühldeckenelement mit PCM (©ZAE Bayern)

Wärmewiderstand von kompletten Baugruppen



ZAE BAYERN

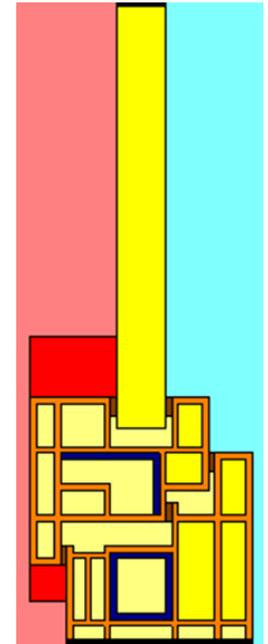
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



Hot Box Probenhalter mit Dachfenster (©ZAE-Bayern)

incl. Wärmebrücken

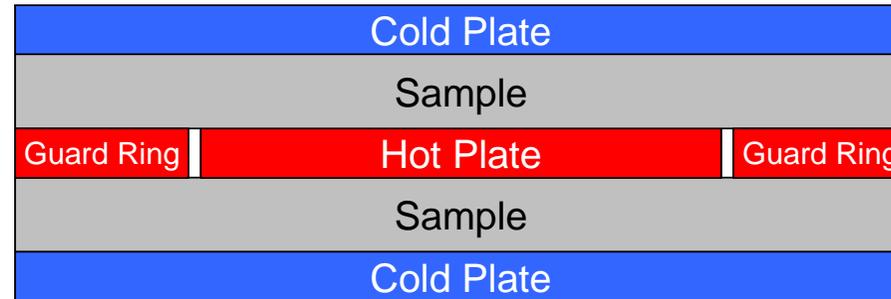
- Gebäudebereich
- Automotive
- Appliances



ZAE Bayern:
Simulation des
U-Wertes eines
Fensterrahmenprofils
nach DIN



Zweiplattengerät



Einige Anforderungen aus der Norm:

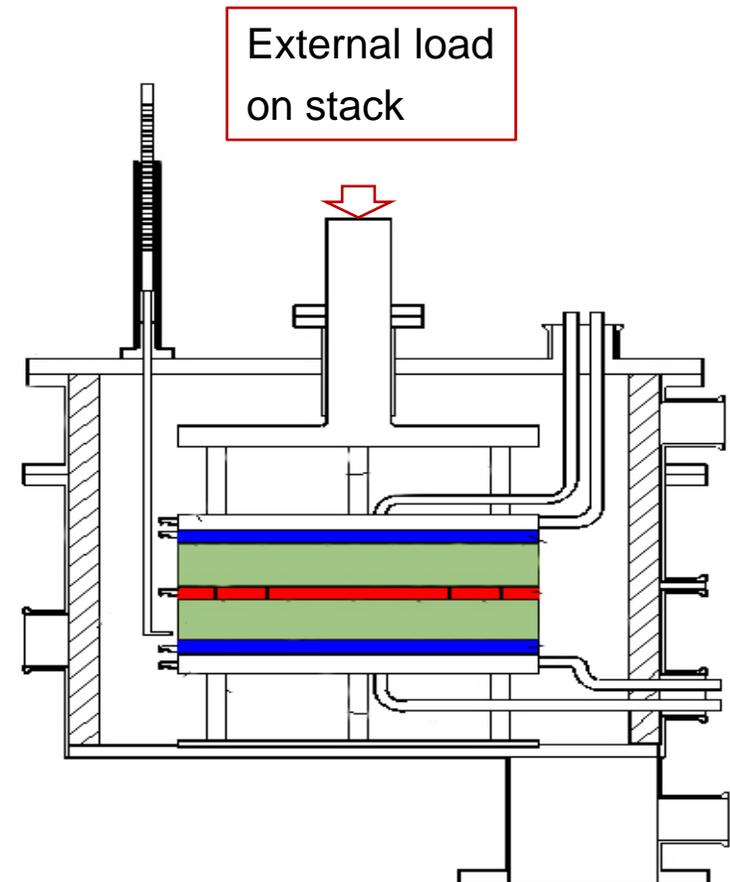
- Mindestwärmedurchlasswiderstand $0.5 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$,
(entspricht bei $0.02 \text{ W}/(\text{mK})$ einer Dicke von 1 cm) 
- homogene Proben (Inhomogenität kleiner 10% Prüfkörperdicke, Ausnahme Schichtproben) 
- Einschränkungen bei starren Proben infolge von Kontaktwiderständen (0.5% des
Wärmewiderstandes der Probe)
(z. B. Probe mit $0.02 \text{ W}/(\text{mK})$ und 2 cm Dicke erlaubt max. äquivalent Luftspalt von 0.13 mm) 
- Probendimensionen beschränkt durch
 - Gerätegröße
 - **Wärmewiderstand der Probe (Kontaktwiderstand)** 
 - **Querwärmeströme** 

Evakuierbare Zweiplattenapparatur

- Temperatur: -190°C bis +500°C
interner Gasdruck: 10^{-5} bis 1000 mbar
(Luft, N₂, Ar, He etc.)
externer Lastdruck: 0 bis 3 bar
Emissivität der Plattenoberflächen: 0.8
Wärmeleitfähigkeitsbereich: 0.0001 bis 0.1 W(m·K)⁻¹



Zweiplattenapparatur Lola3 (©ZAE Bayern)



Plattenverfahren - Messgrößen



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

| | |
|----------------------------------|------------|
| Elektrische Heizleistung | P |
| Temperaturgradient: | ΔT |
| Fläche der zentralen Messplatte: | A |
| Probendicke: | d |

Gemessener Wärmedurchgangskoeffizient:

$$k = \frac{P}{2A \cdot \Delta T} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Wärmedurchlasskoeffizient:

$$\Lambda = k - \text{Übergangskoeffizienten} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

(Effektive) Wärmeleitfähigkeit:

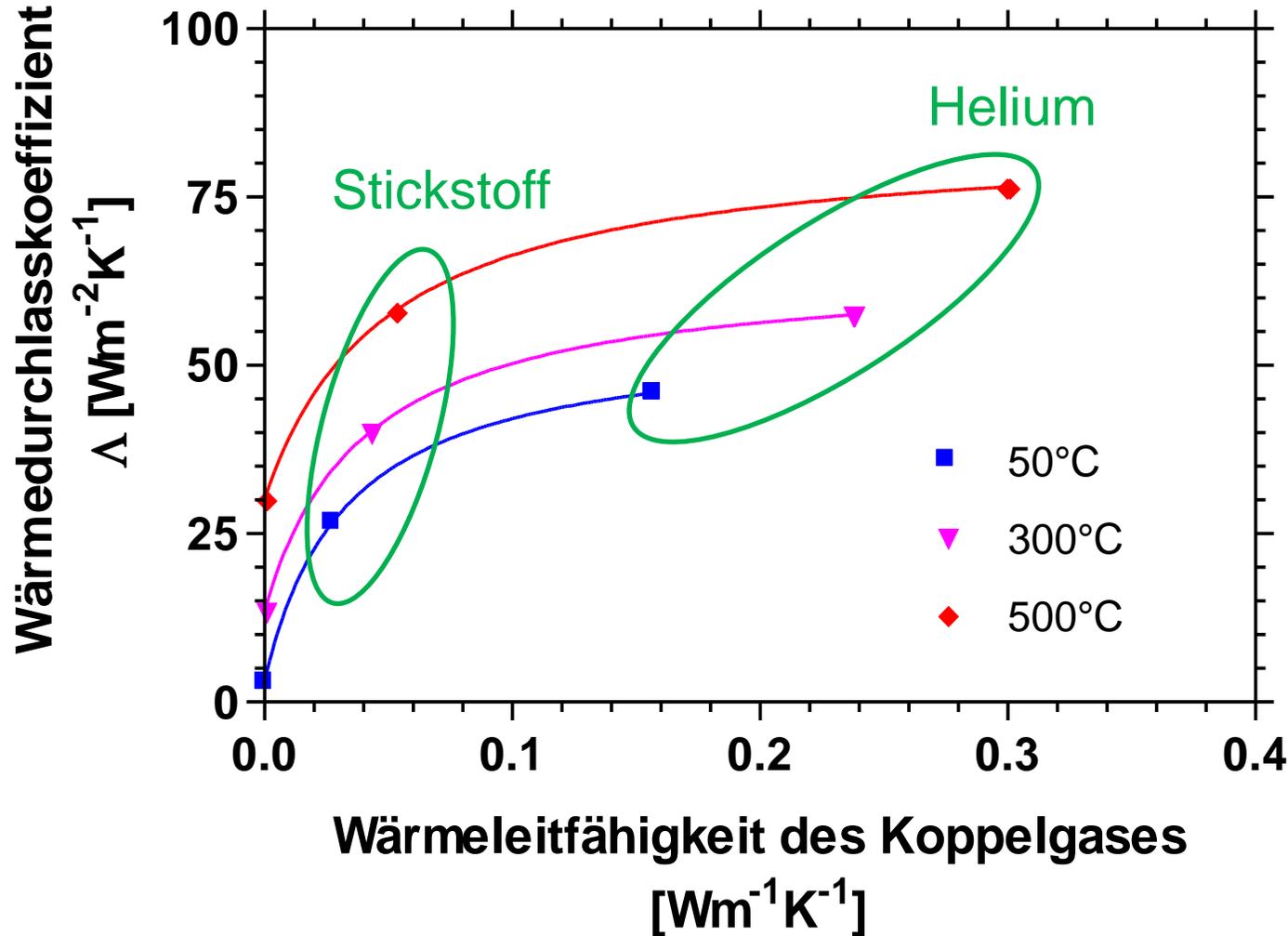
$$\lambda = \Lambda \cdot d \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Vermessung von harten Proben mit hoher Wärmeleitfähigkeit



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

BK7-Referenzprobe – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit



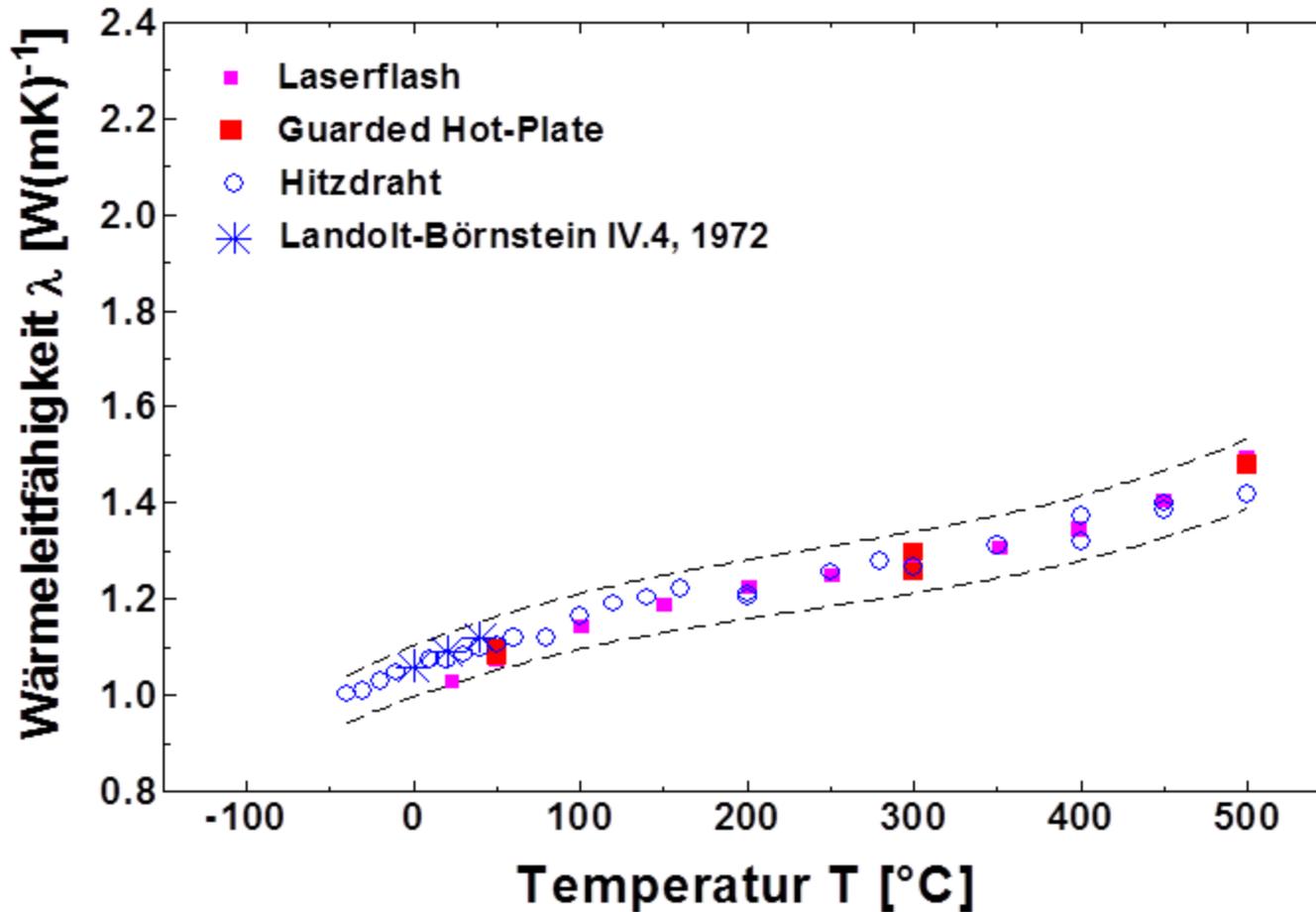
$$\Lambda_{total} = \left(\frac{1}{\Lambda_{glass}} + \frac{2}{\Lambda_{rad} + \frac{\lambda_{gas}}{d_{gap}}} \right)^{-1}$$

Wärmeleitfähigkeit BK7 Referenzproben



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



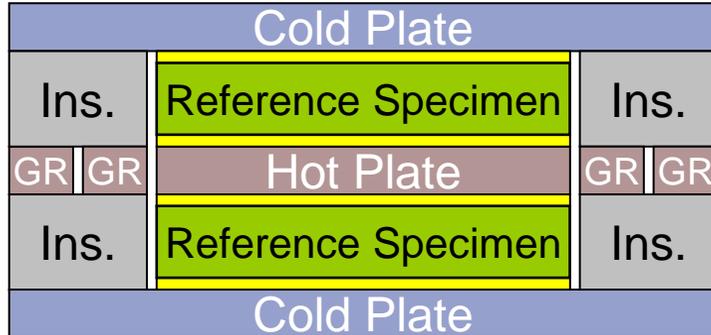
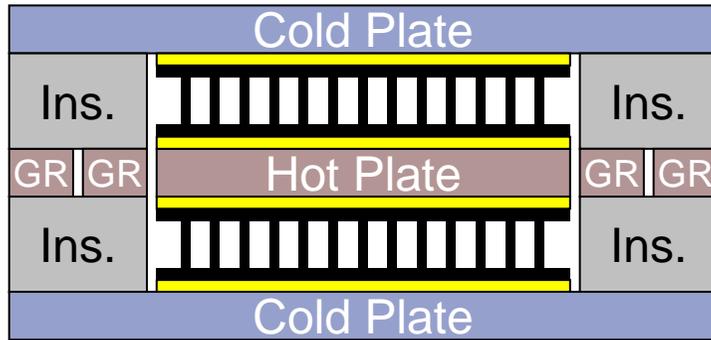
Harte Proben mit hoher Wärmeleitfähigkeit



Übergangswiderstände, am Beispiel der Honeycomb Struktur



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung



©ZAE-Bayern

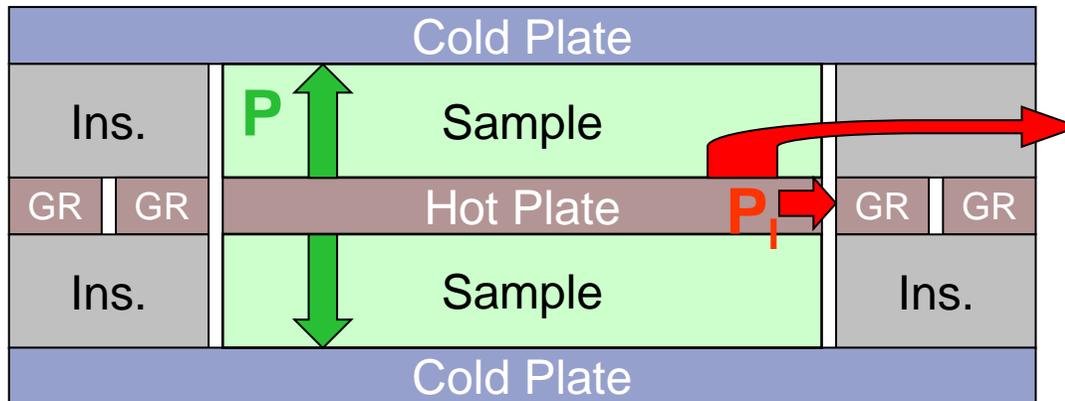
-  z. B. Grafitfolie oder Silikonplatte
-  Schutzring

Mit der bekannten Wärmeleitfähigkeit der Referenzprobe (BK7) wird der Wärmewiderstand der eingesetzten Grafitfolien bzw. Silikonplatten bestimmt.

Thermischer Kontaktwiderstand bekannt



Korrektur von lateralen Wärmeströmen



Annahme: Laterale Verluste unabhängig von ΔT .

- mit zunehmenden ΔT , verringert sich der Anteil der lateralen Verluste an der gemessenen Heizleistung
- Verlustkorrektur: zwei unterschiedliche ΔT bei jeder Mitteltemperatur
- Extrapolation $\Delta T \rightarrow \infty$ liefert wahren Wert für die (effektive) Wärmeleitfähigkeit

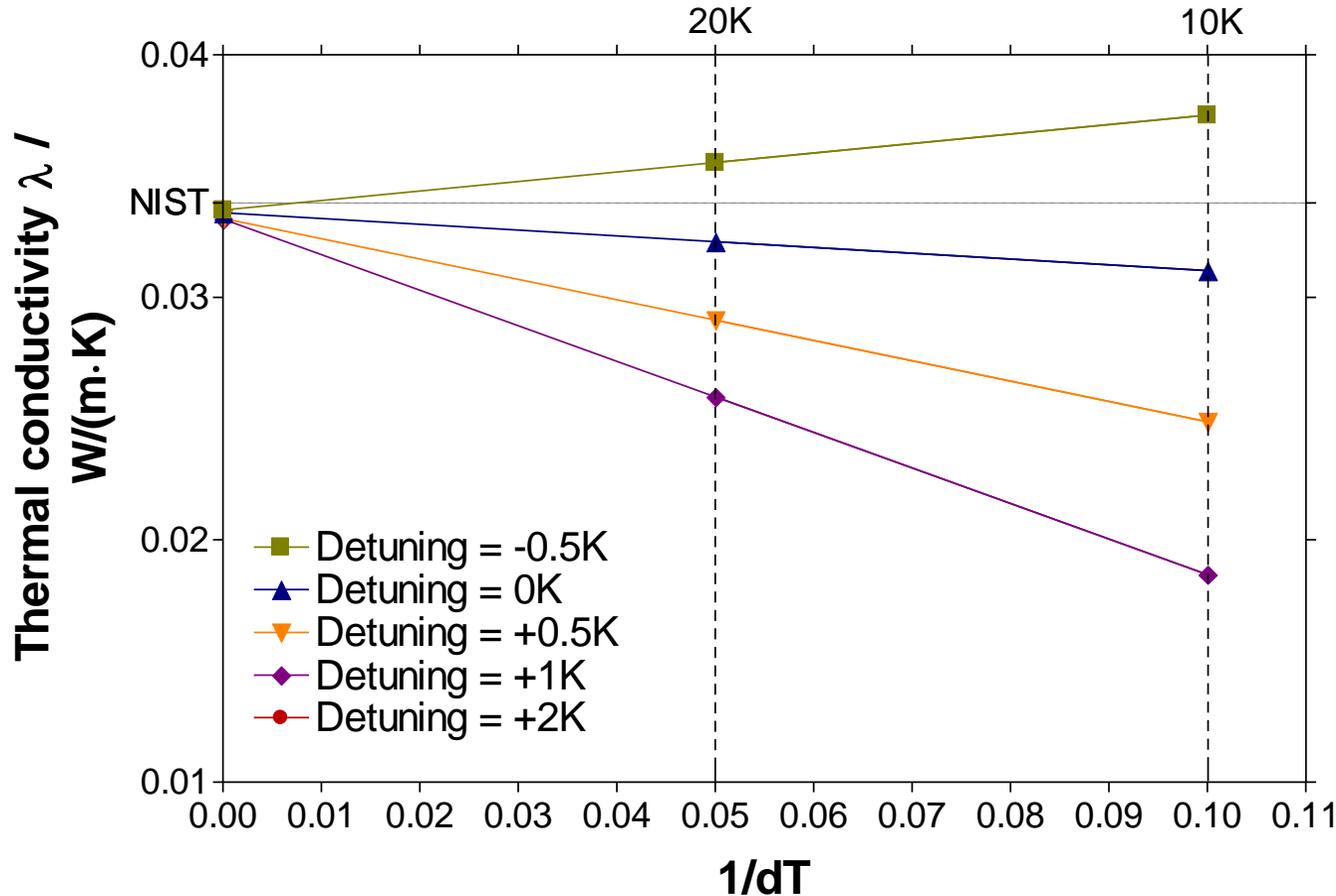
Experimentelle Korrektur von lateralen Wärmeströmen



ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Prove of concept: Testmessung mit der GHP TITAN 456

→ absichtliche Verstimmung des Schutzrings



NIST SRM 1450 C

Präzise Korrektur von lateralen Wärmeströmen möglich



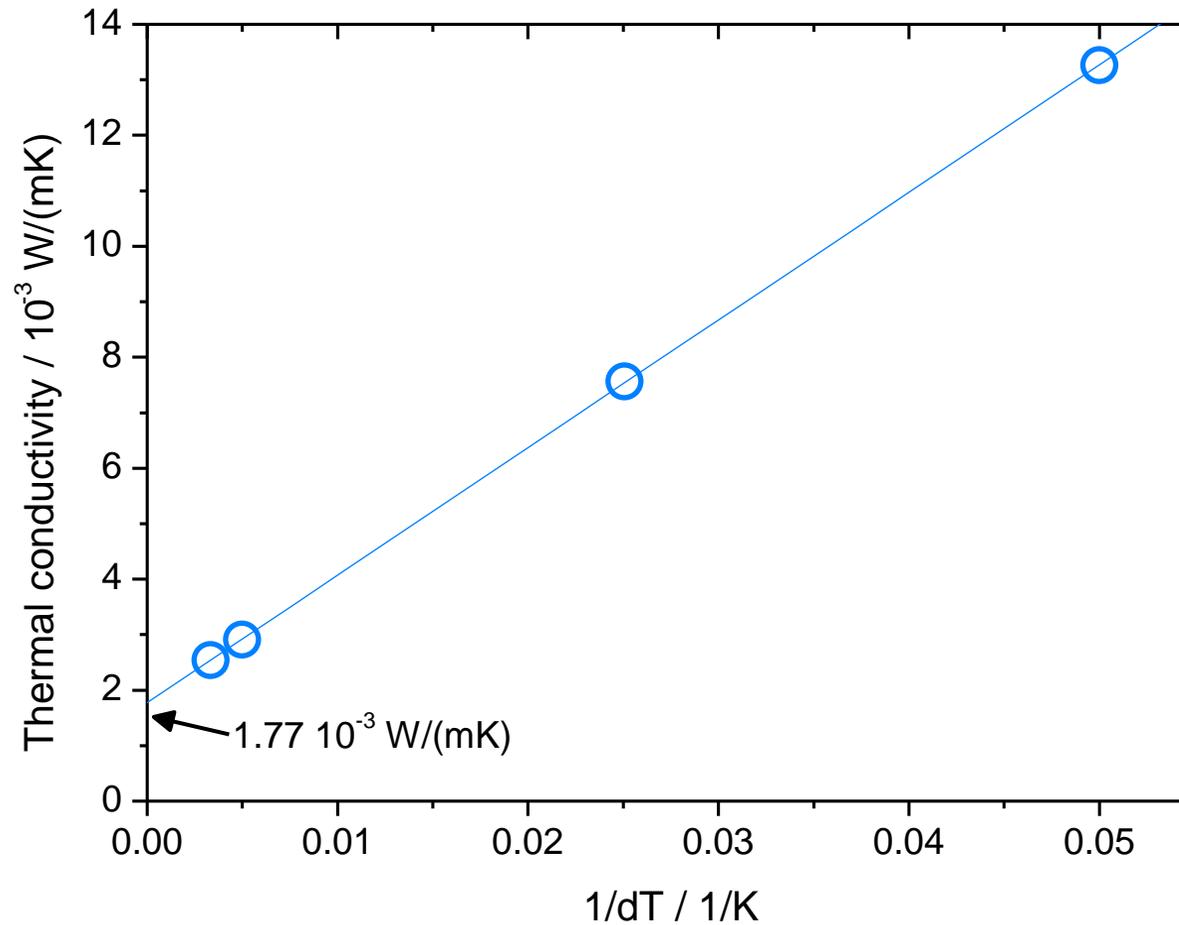
Thermal resistance of honeycomb structures - overview of uncertainties according to GUM

Relative uncertainty of

| | |
|--|---------------|
| Reference material thermal conductance | 5.00% |
| Reference material thermal conductance measurement | 3.85% |
| Contact resistance | 32.90% |
| Sample conductance measurement | 7.19% |
| Corrected sample transmittance | 10.70% |
| Sample thickness | 0.27% |
| <u>Corrected sample effective thermal conductivity</u> | <u>10.70%</u> |

Expanded corrected sample effective thermal conductivity (k=2): 21.50%

Beispiel: Evakuierte „Multi-Layer Insulation“ bei 498K



www.rossie.com

Fortgeschrittene Korrekturverfahren ermöglichen die Vermessung von

- anisotropen Proben
- mit harten Oberflächen
- mit hoher oder sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit

in Plattenapparaturen mit geeigneter experimenteller Ausstattung, d. h.

- Freie Wahl der Atmosphäre
- Reproduzierbare oder besser kontrollierbare mechanische Belastung des Probenstapels während der Messung



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum
für Angewandte
Energieforschung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Aktuelle und ehemalige Mitarbeiter des ZAE Bayern die an den vorgestellten Inhalten u. a. gearbeitet haben:
Matthias Geißler, Ulrich Heinemann, Jörg Hetfleisch, Stefan Rausch, Katrin Swimm, Stephan Vidi