

ZAE BAYERN

Thermische Optimierung einer Vakuumverglasung

K. Güttler, H. Weinläder, H.-P. Ebert

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.

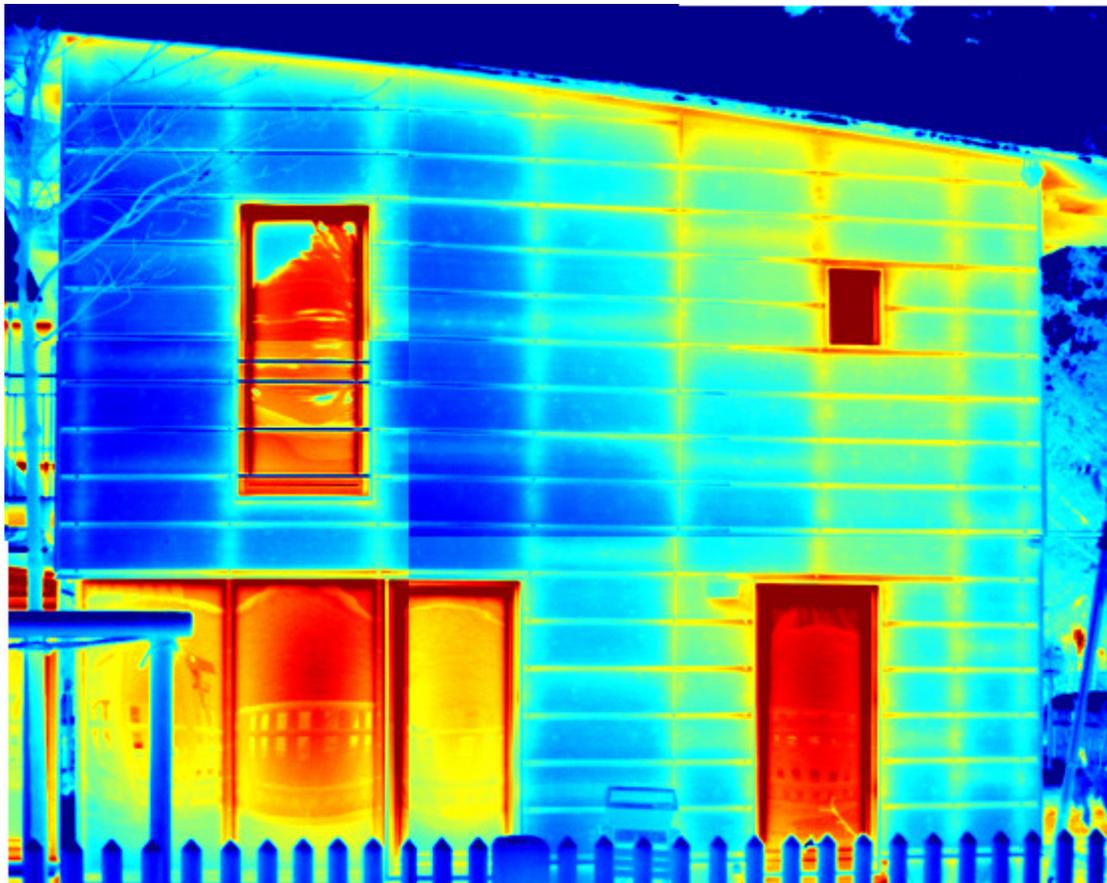
Am Hubland

97074 Würzburg

Guettler@zae.uni-wuerzburg.de

- Motivation
- Diskussion und Optimierung der einzelnen Wärmetransportmechanismen im Vakuumisolierverglasung
- Messung des Stützenbeitrags zum Wärmetransport durch die Vakuumverglasung

Fenster stellen thermische Schwachstellen in Gebäuden dar:



- **Fassade:**
 $U \leq 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- **Doppelverglasung:**
 $U \approx 1.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- **Dreifachverglasung:**
 $U \approx 0.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Ziel:

Neue Verglasung mit folgenden Eigenschaften:

- dünner und
- leichter als Dreifachverglasung
- mit **$U < 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$**

Idee:

Evakuieren des Scheibenzwischenraumes einer Doppelverglasung

- ⇒ Eliminierung der Wärmeübertragung durch Gaswärmeleitung und Konvektion
- ⇒ „**Vakuumisolierglas**“ (VIG)

Umsetzung:

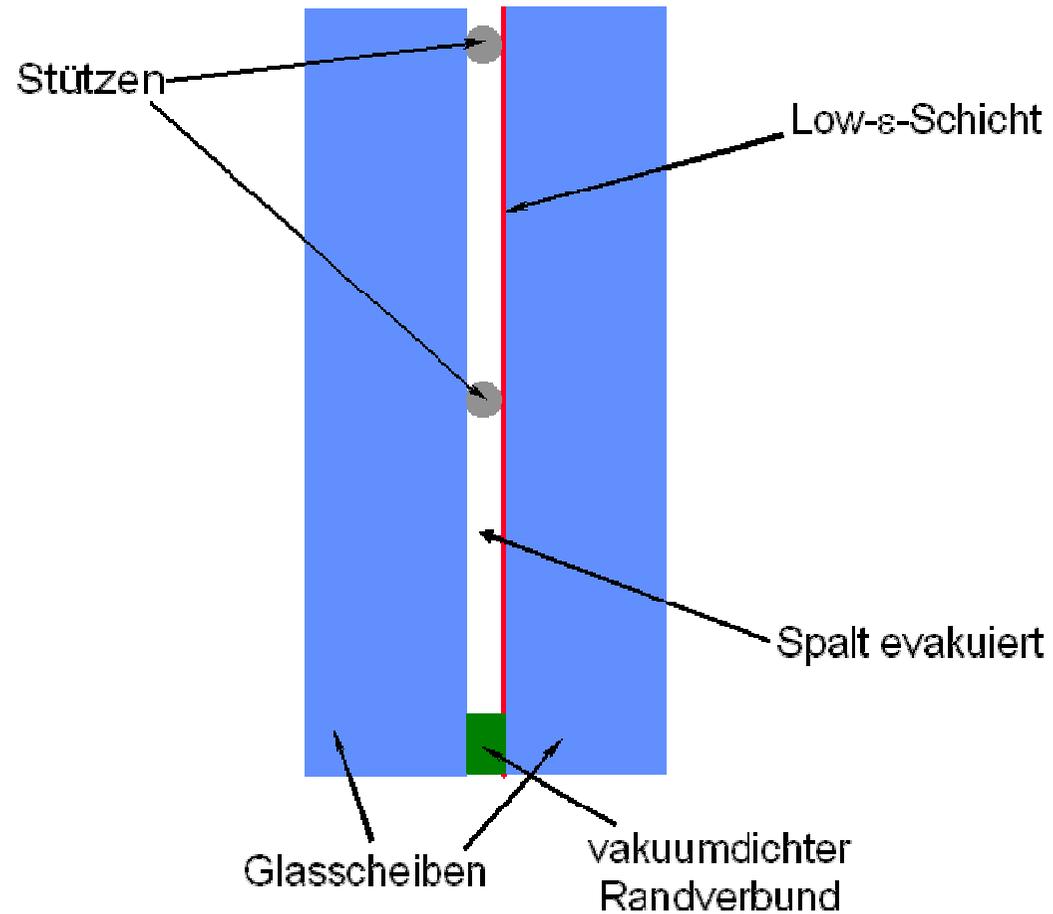
Forschungsprojekte



und



VIG-Aufbau



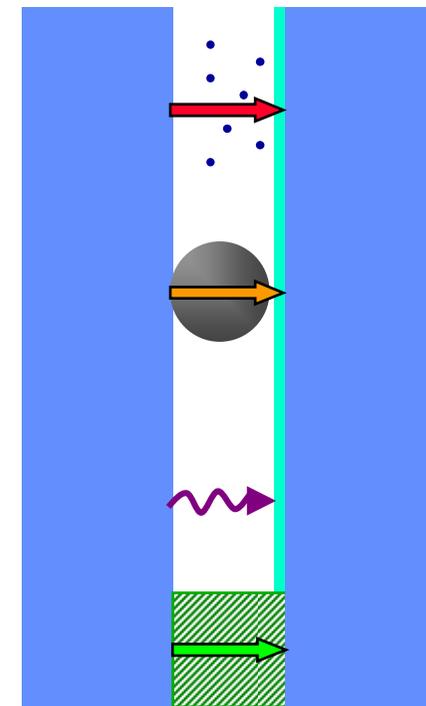
2 x 4 mm Float-Glas
System-Dicke ≤ 9 mm

Totaler Wärmedurchlasskoeffizient von VIG:

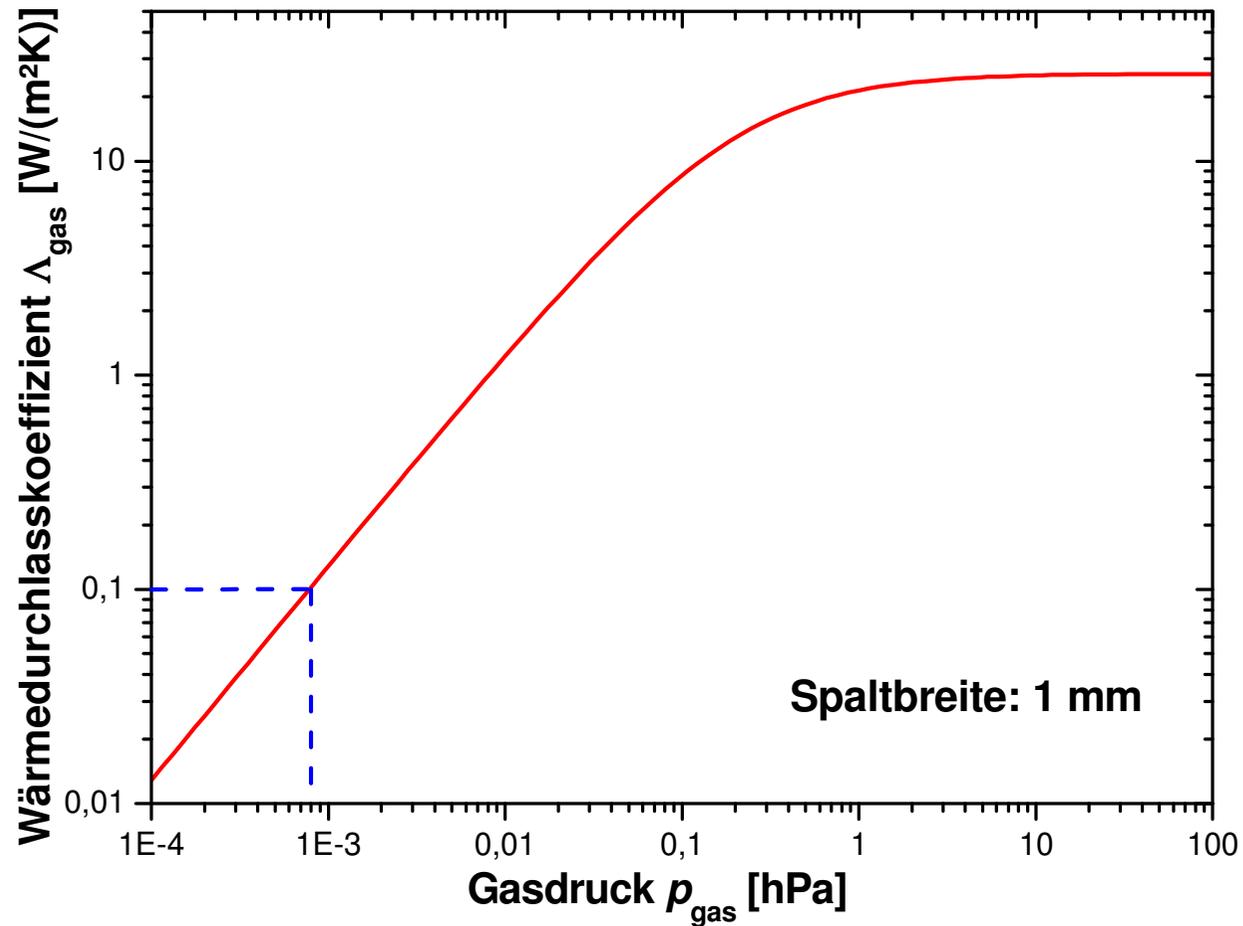
$$\Lambda_{\text{VIG}} = \Lambda_{\text{gas}} + \Lambda_{\text{stütz}} + \Lambda_{\text{rad}} + \Lambda_{\text{RV}} \quad (\leq 0,5) \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

⇒ Thermische Systemoptimierung!

- Λ_{gas} : Wärmeleitung durch das Restgas
- $\Lambda_{\text{stütz}}$: Wärmeleitung durch die Stützen
- Λ_{rad} : Wärmestrahlung zw. den Glasplatten
- Λ_{RV} : Wärmeleitung durch den Randverbund

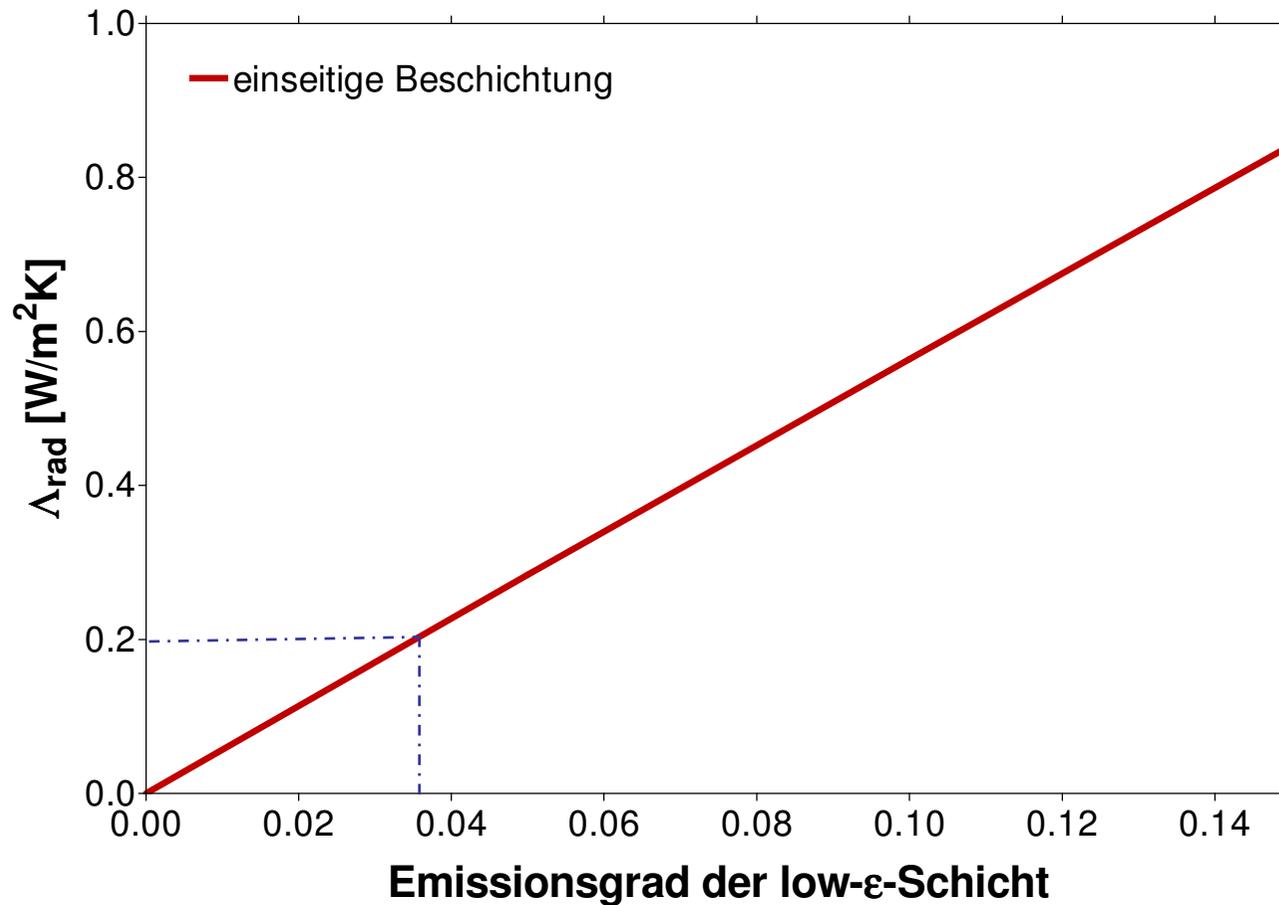


Einfluss der Gaswärmeleitung

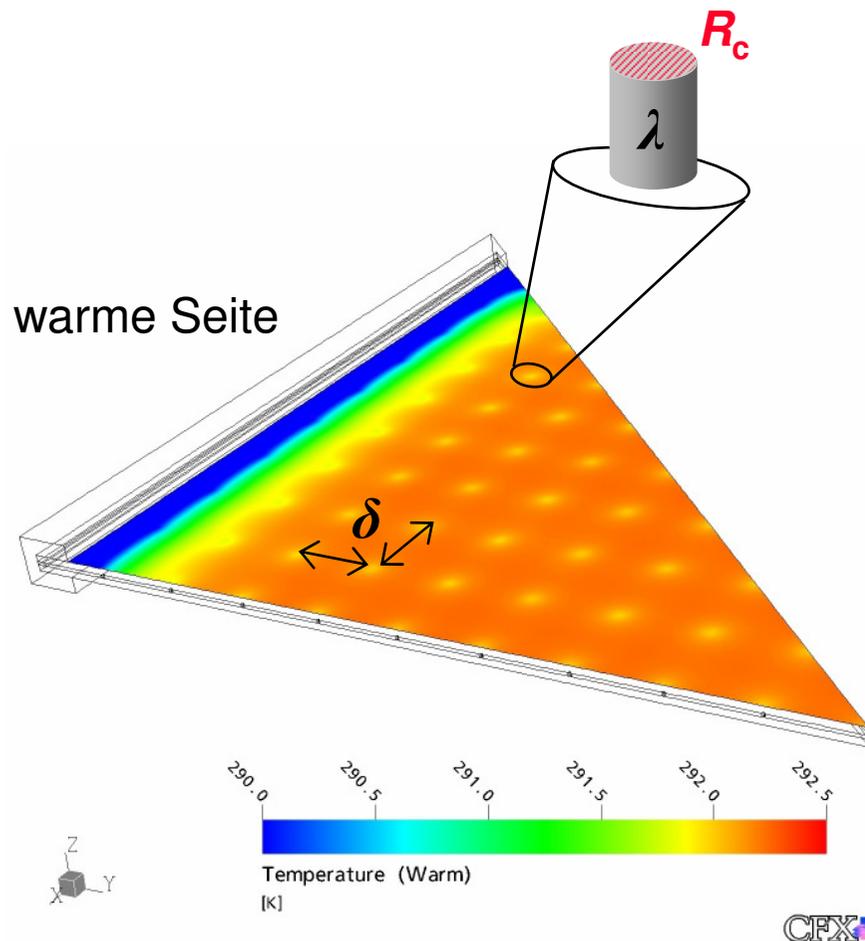


⇒ Gasdruck < 10⁻³ hPa

Einfluss der Wärmestrahlung



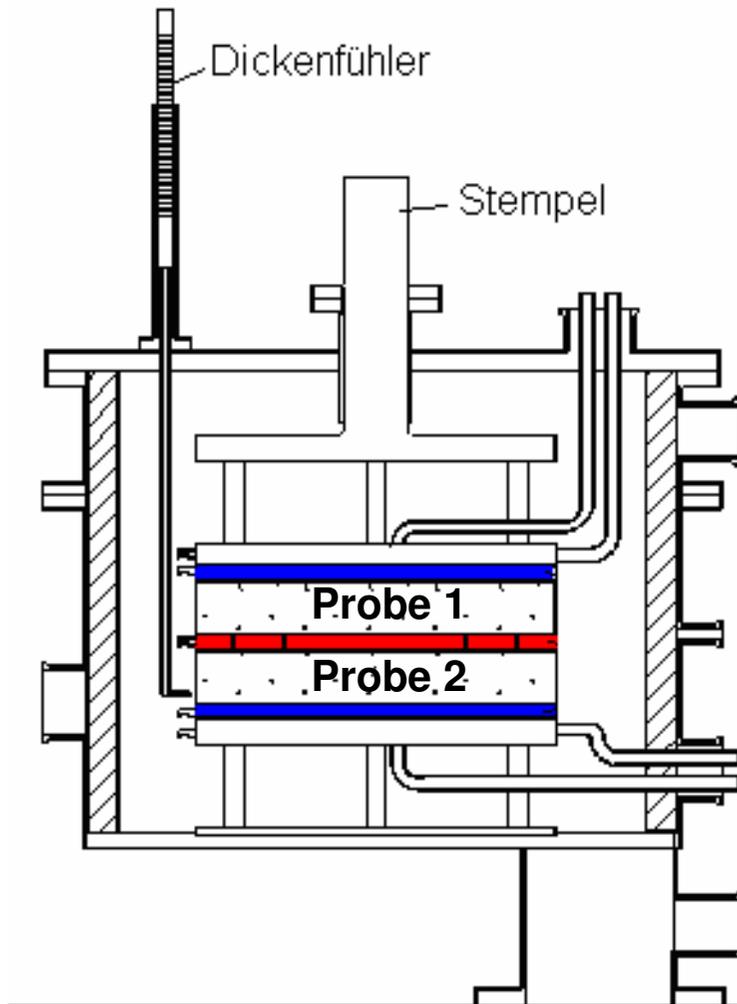
⇒ Bei einseitiger Beschichtung ist Softcoating mit $\epsilon = 0,03$ erforderlich!



$\Lambda_{\text{stütz}}$ hängt ab von:

- dem Stützenmaterial $\rightarrow \lambda$
- der Stützengeometrie (Form, Größe)
- dem Stützenabstand δ
- dem Wärmekontaktwiderstand R_c zwischen Stütze und Glasscheibe

\Rightarrow Optimierung anhand Messungen in Zweiplattenapparatur

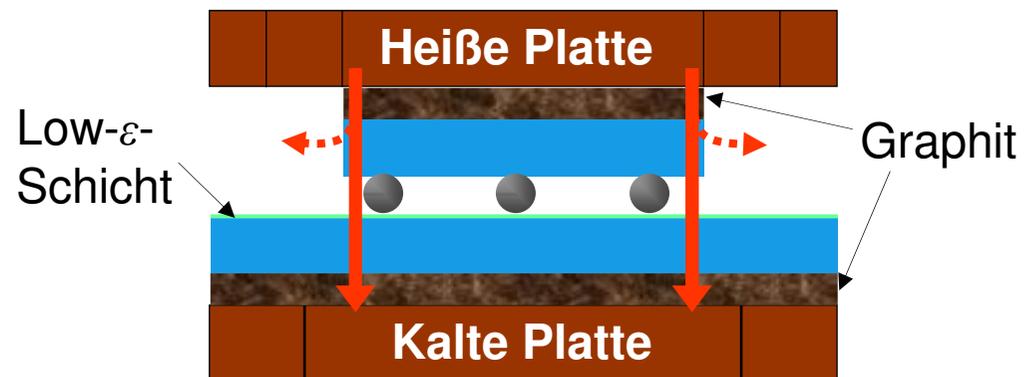


Bestimmung von $\Lambda_{\text{stütz}}$:

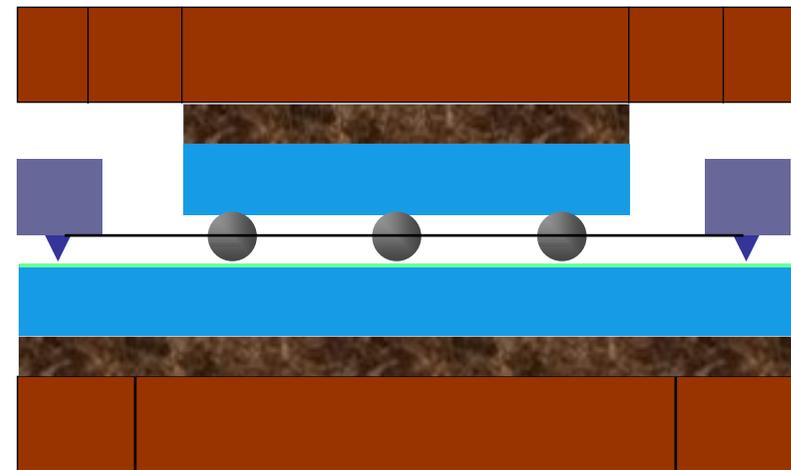
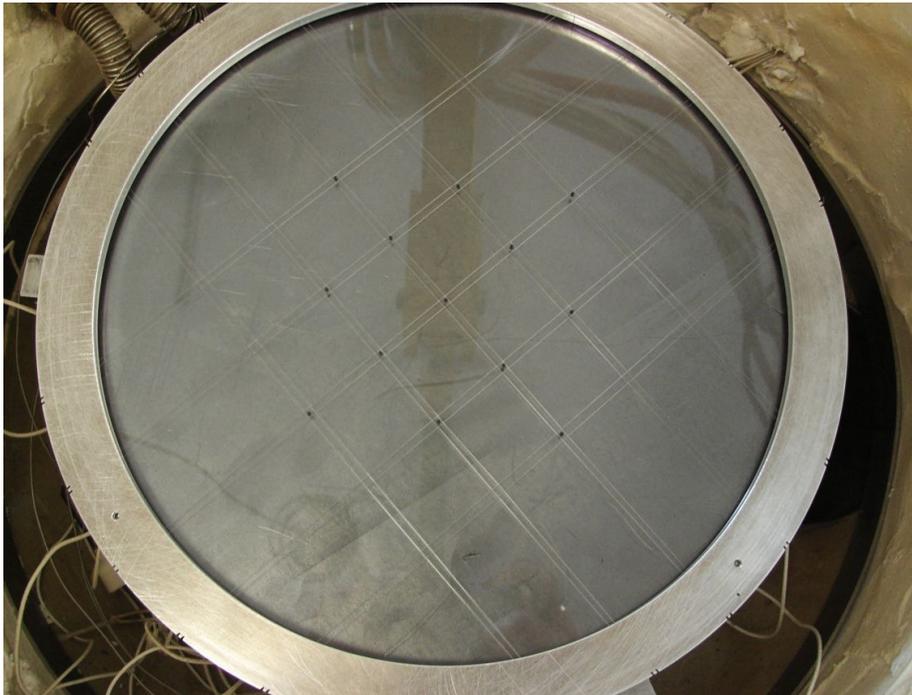
- Vakuumkammer evakuiert auf 10^{-5} hPa: $\Lambda_{\text{gas}} \rightarrow 0$

$$\Rightarrow \Lambda_{\text{stütz}} \approx \Lambda_{\text{mess}} - \Lambda_{\text{rad}}$$

- Externer Belastungsdruck: $1 \cdot 10^3$ hPa



Positionierung von kugelförmigen Stützen mit Hilfe eines Fadengitters



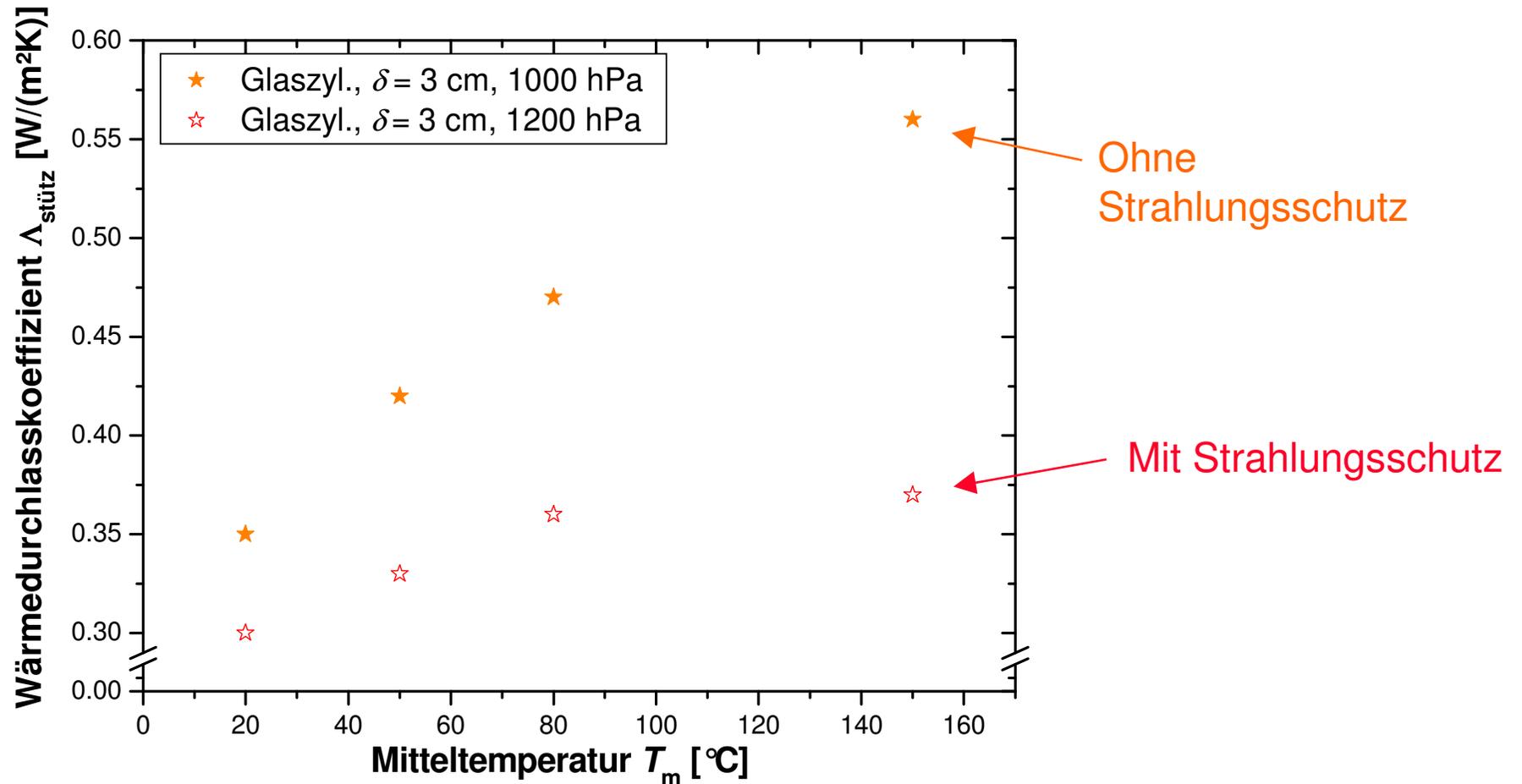
Vergleichsmessungen zeigten:

Ergebnisse mit Gitter liegen generell tiefer als ohne Gitter ($\approx 0.04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

⇒ **Seitlicher Strahlungsverlust ist nicht vernachlässigbar!**

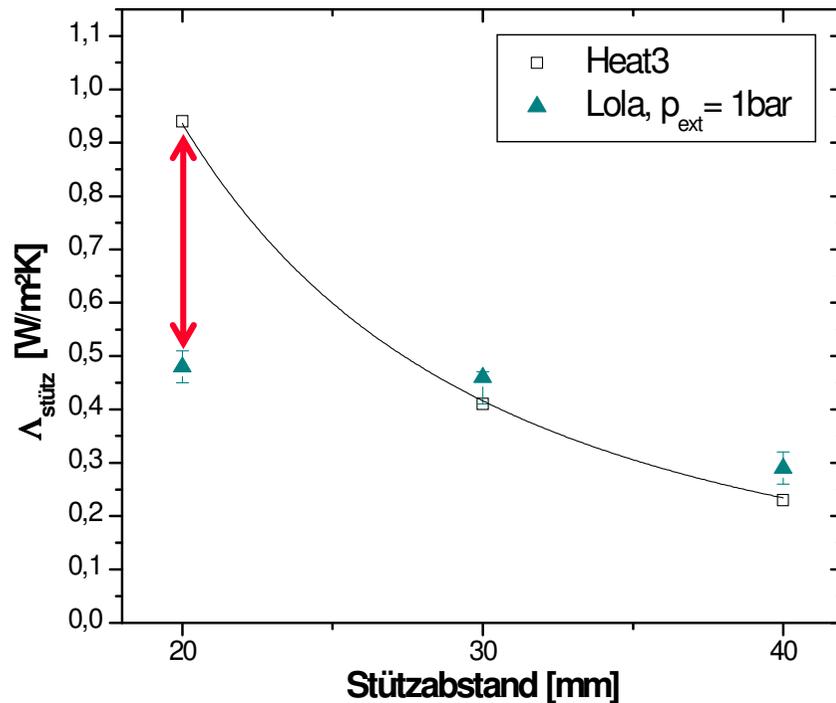
Temperaturabhängige Messungen

Für **Glaszylinder** mit Durchmesser = 1 mm und Höhe = 1 mm



Abstandsabhängige Messungen

für **Edelstahlzylinder** mit Durchmesser = 0,5mm und Höhe = 1mm



Je kleiner der Stützabstand,
desto größer ist die Abweichung
zwischen Simulation und
Messung.

Abstand 2 cm: **50 %** Abweichung!

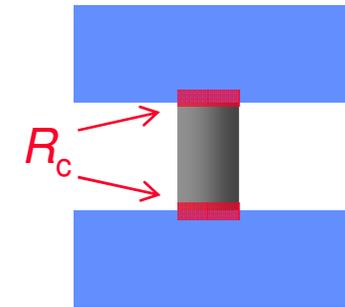
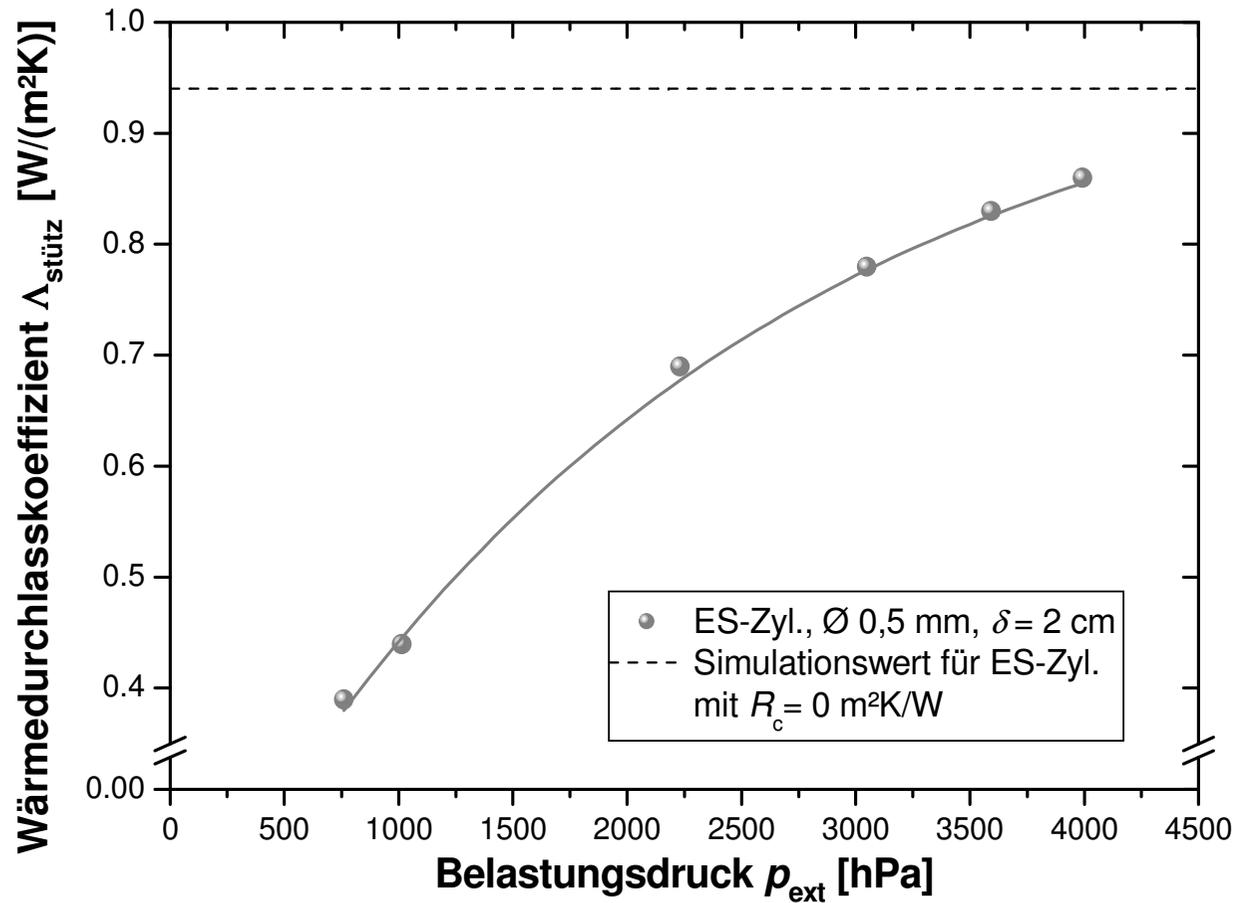
Grund:

Der Wärmekontakt-
widerstand R_c zwischen
Glasscheibe und Stütze ist
nicht vernachlässigbar!

Belastungsdruckabhängige Messungen

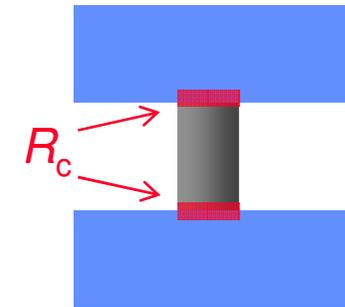
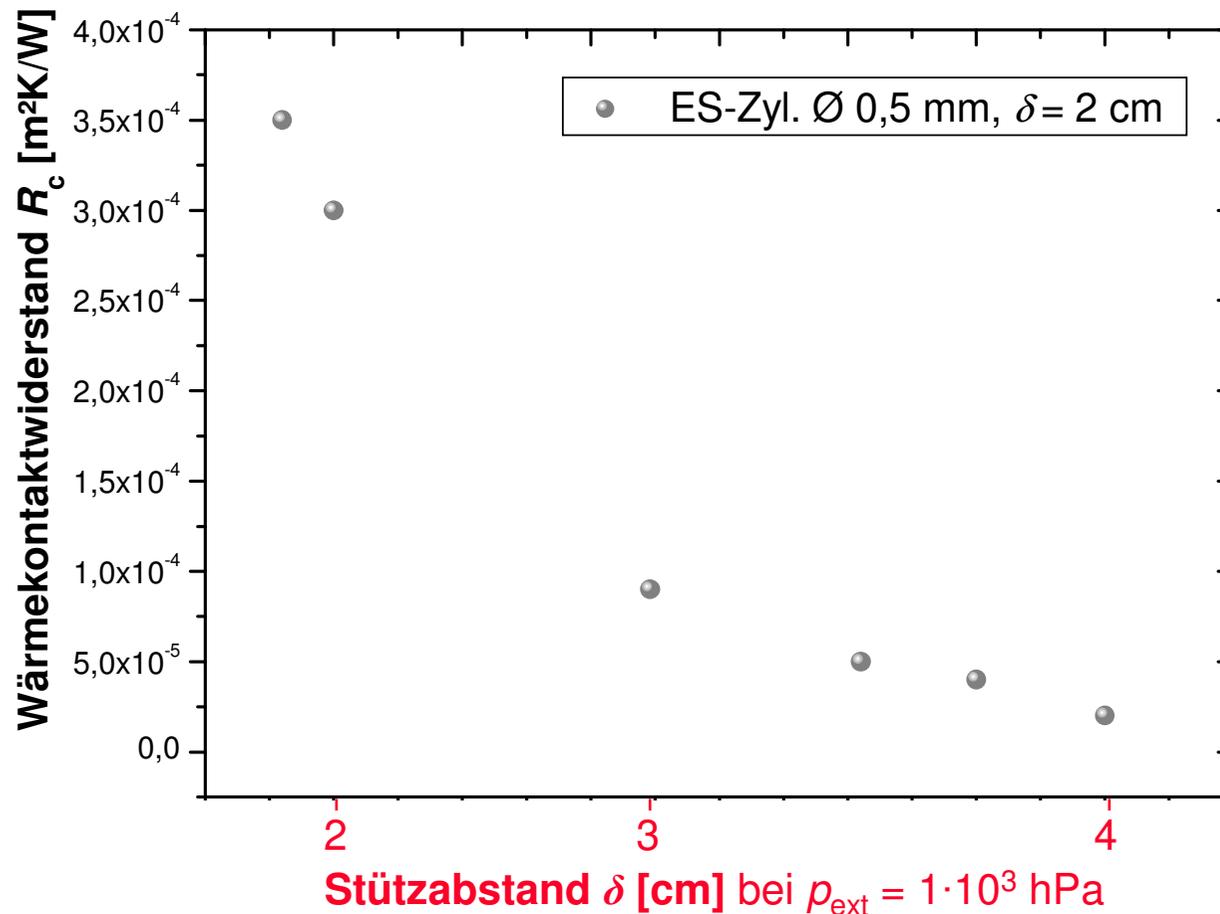


ZAE BAYERN



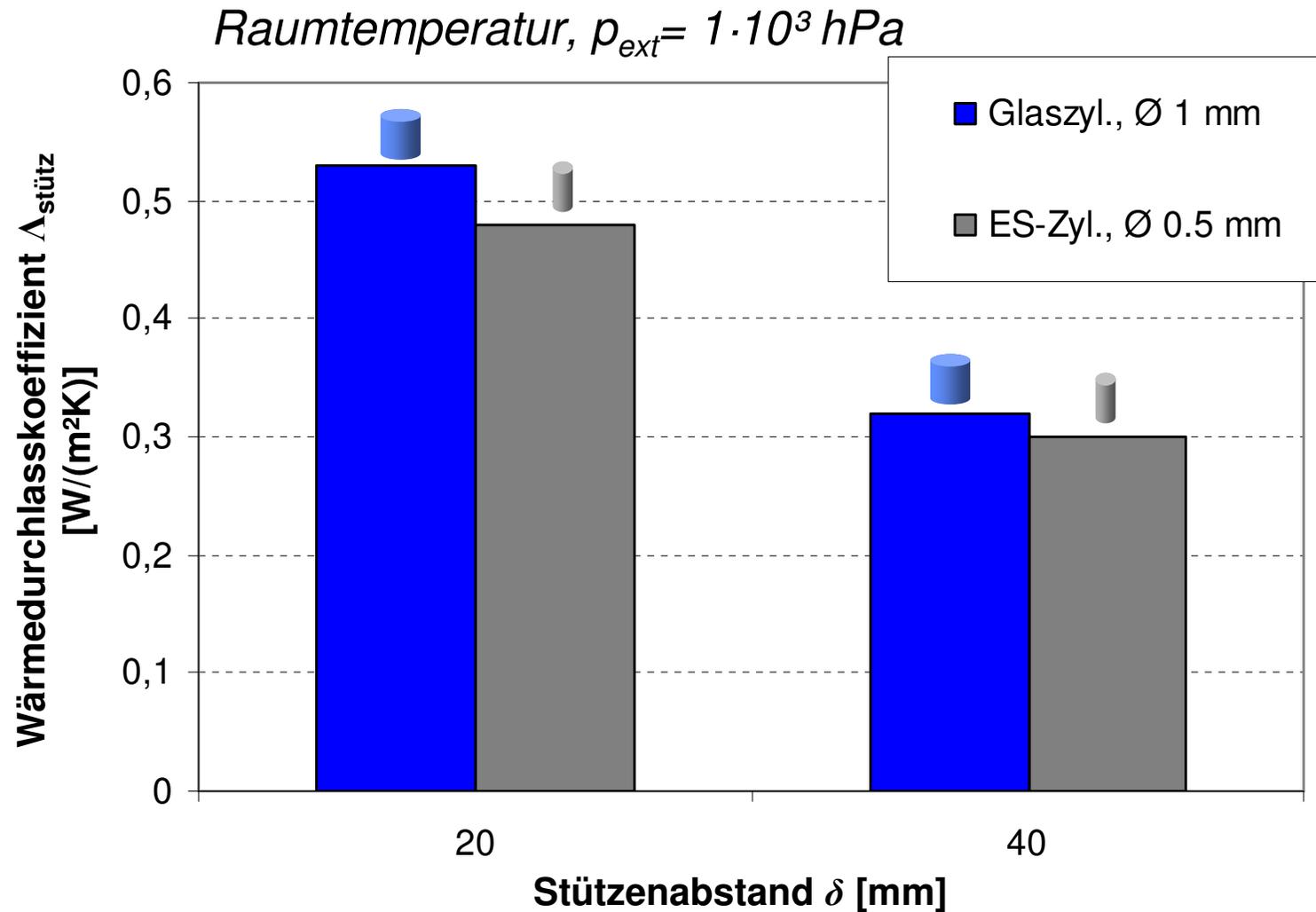
Bestimmung von R_c

Vergleich des gemessenen $\Lambda_{\text{stütz}}$ mit den Simulationenwerten für definierte R_c



⇒ Berechnung von $\Lambda_{\text{stütz}}$ für beliebige Stützabstände möglich

Übersicht über Messergebnisse

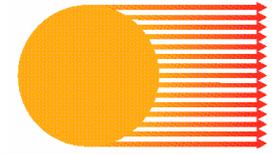


Bilanz für thermisch optimiertes VIG:

Λ_{gas}	0,02 W/(m²K)
$\Lambda_{\text{stütz}}$	0,30 W/(m²K)
Λ_{rad}	0,17 W/(m²K)
$\Lambda_{\text{VIG}} = \Lambda_{\text{gas}} + \Lambda_{\text{stütz}} + \Lambda_{\text{rad}}$	0,49 W/(m²K)
U_{VIG}	0,45 W/(m²K)

Ziel-U-Wert ist realistisch und praktisch umsetzbar!

Vielen Dank



ZAE BAYERN



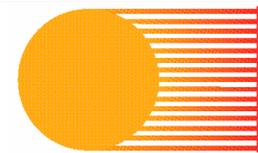
Das Projekt
Produktionstechniken für
Vakuum-Isolier-Glas wird
unterstützt vom



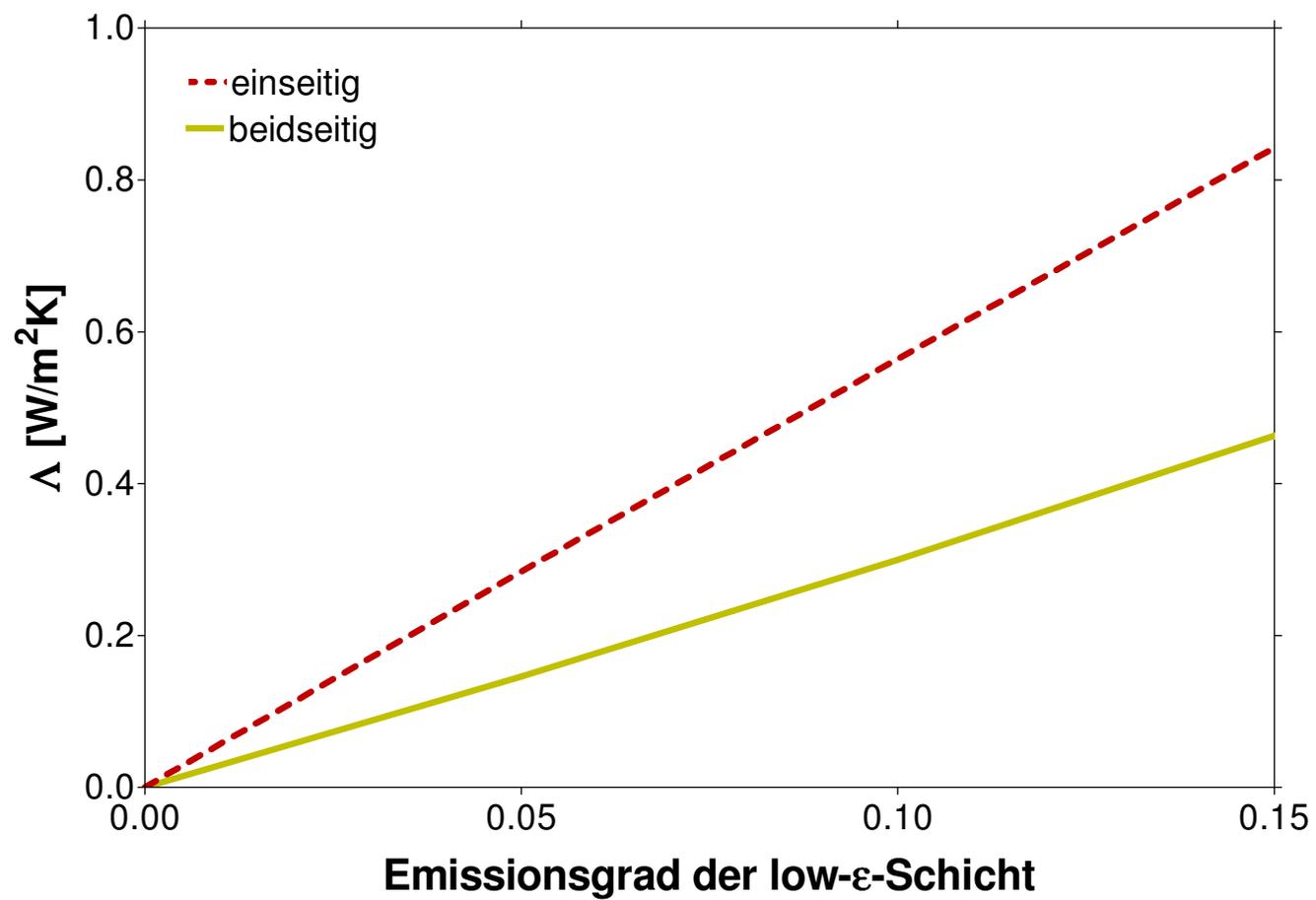
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Weitere Infos unter

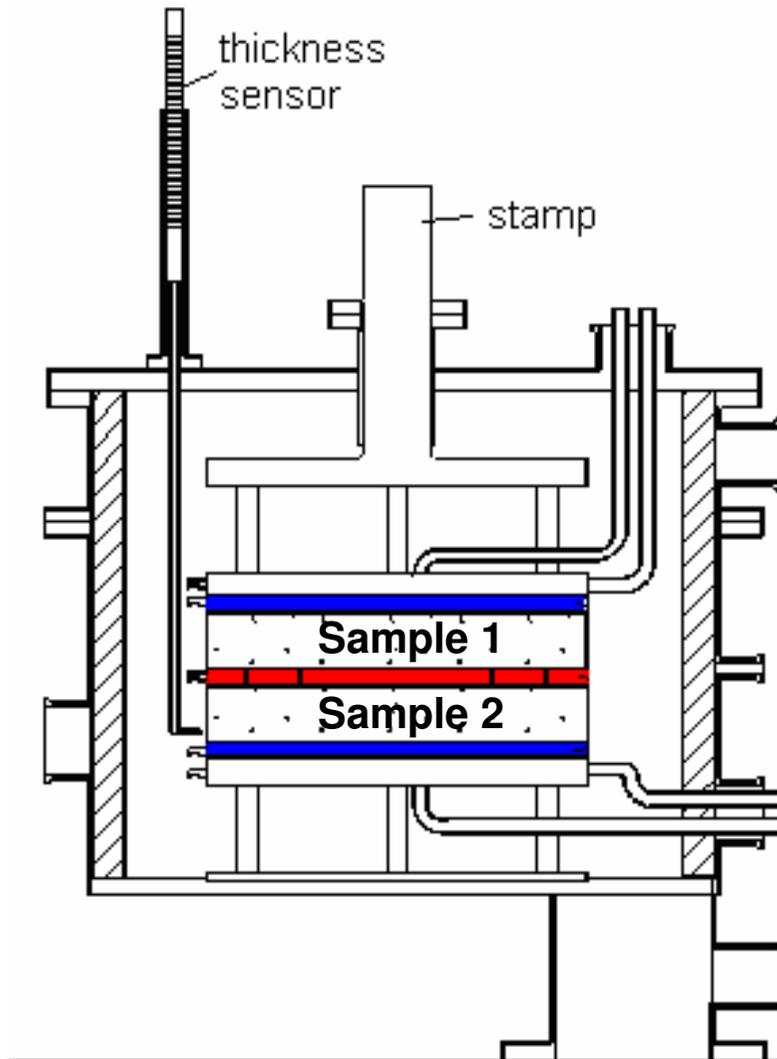
<http://www.vig-info.de>



ZAE BAYERN



Evakuierbare Zweiplattenapparatur



Messbedingungen:

- 1) Stationärer Zustand
- 2) Eindimensionaler (vertikaler) Wärmestrom

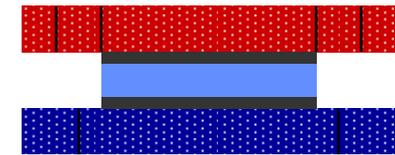
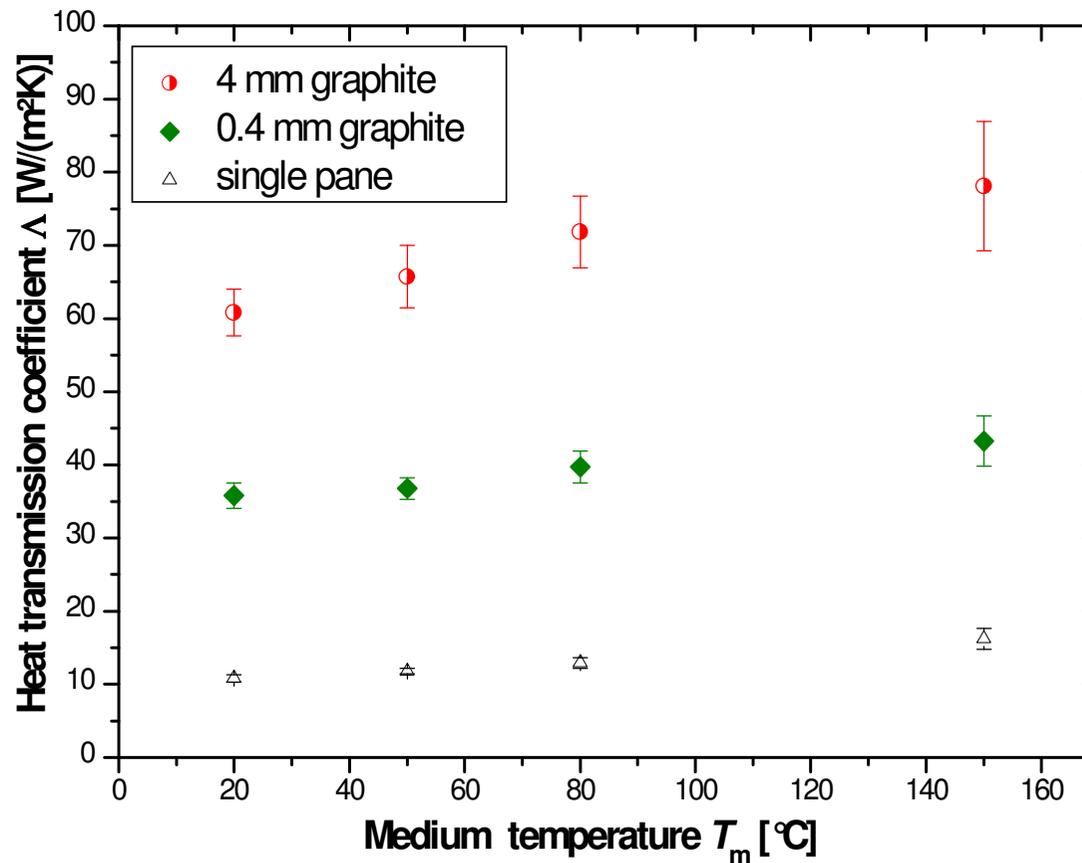
$$\Lambda = \frac{P_{el}}{2 \cdot A \cdot \Delta T}$$

Messbereich:

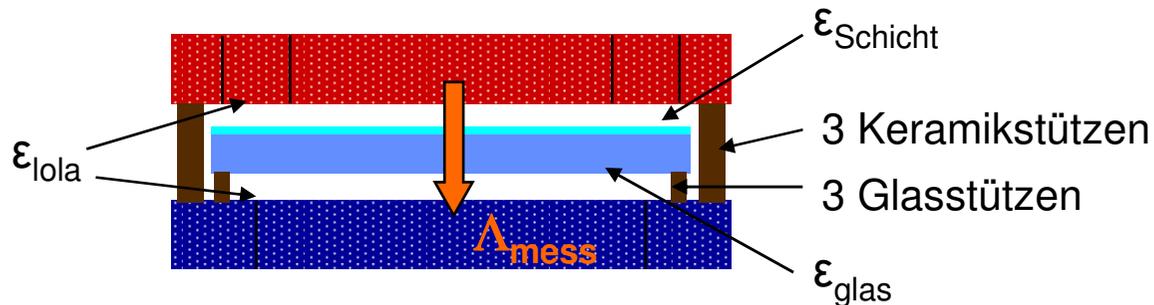
- Temperatur: - 200 °C bis 400 °C
Gasdruck: 10^{-5} bis 1000 hPa
Ext. Belastungsdruck: 0 bis 4000 hPa

Modified Sample preparation

Test measurements with one glass pane



Versuchsaufbau:



Aus Λ_{mess} kann $\epsilon_{\text{Schicht}}$ berechnet werden, wenn ϵ_{glas} und ϵ_{lola} bekannt sind:

- ϵ_{lola} gemessen: 90 %
- ϵ_{glas} (Literaturwert): 84 %

Messbedingung:

Voll evakuiert (10^{-5} hPa)

→ Λ_{gas} unterdrückt

→ $\Lambda_{\text{mess}} = f(\epsilon_{\text{schicht}})$

Ergebnis:

$$\epsilon_{\text{Schicht}} = (6,6 \pm 0,5) \%$$



Strahlungsaustausch im VIG:

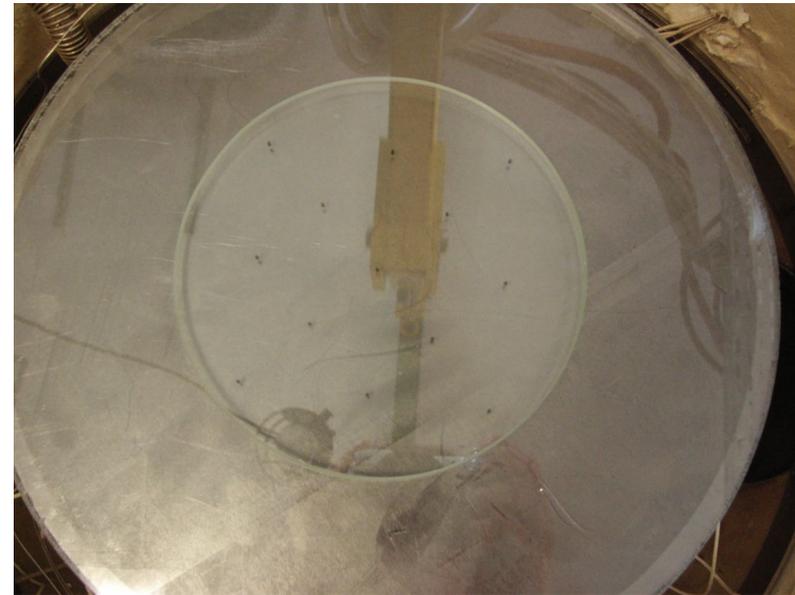
$$\Lambda_{\text{rad}} = (0,37 \pm 0,03) \text{ W/m}^2\text{K}$$

(bei Raumtemperatur)

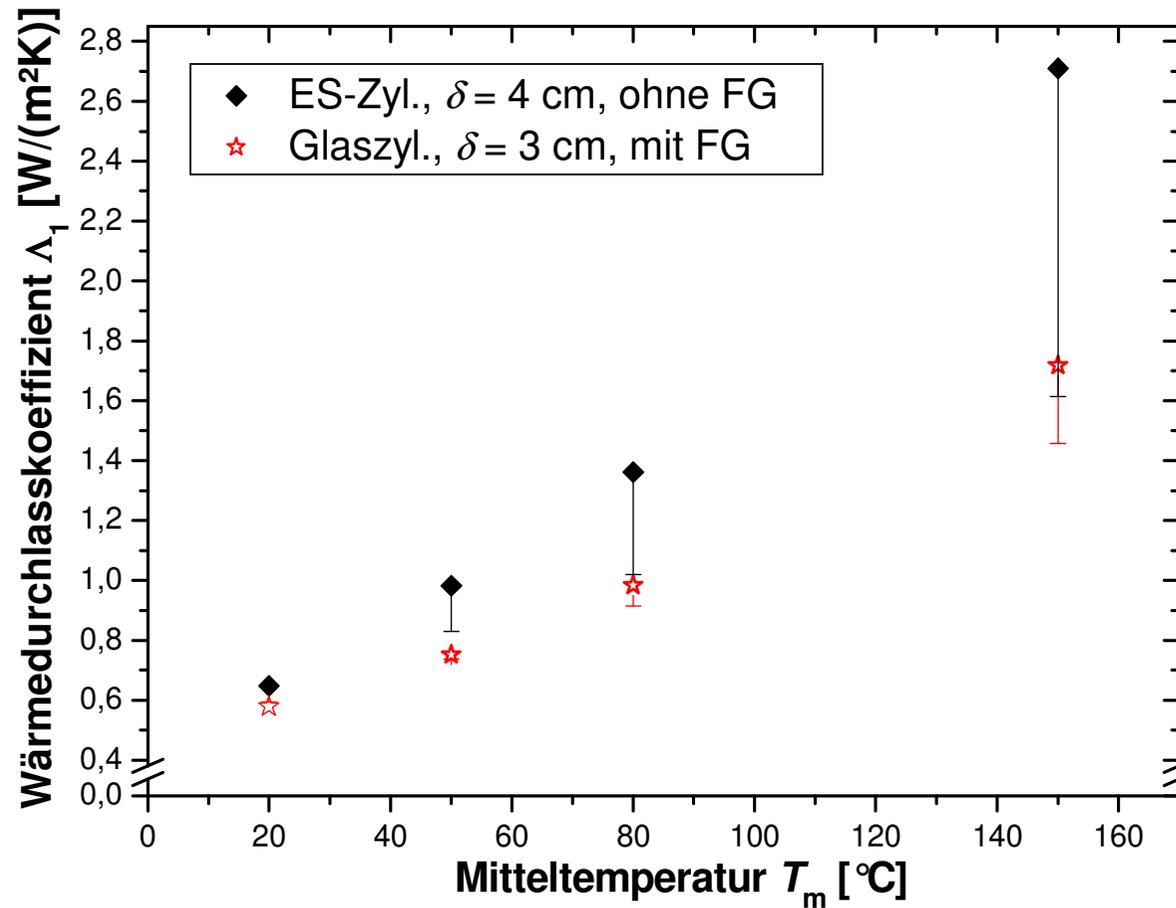
Modified Sample Preparation

Problems:

- Low and inhomogeneous thermal coupling between sample and apparatus
- High lateral heat flux

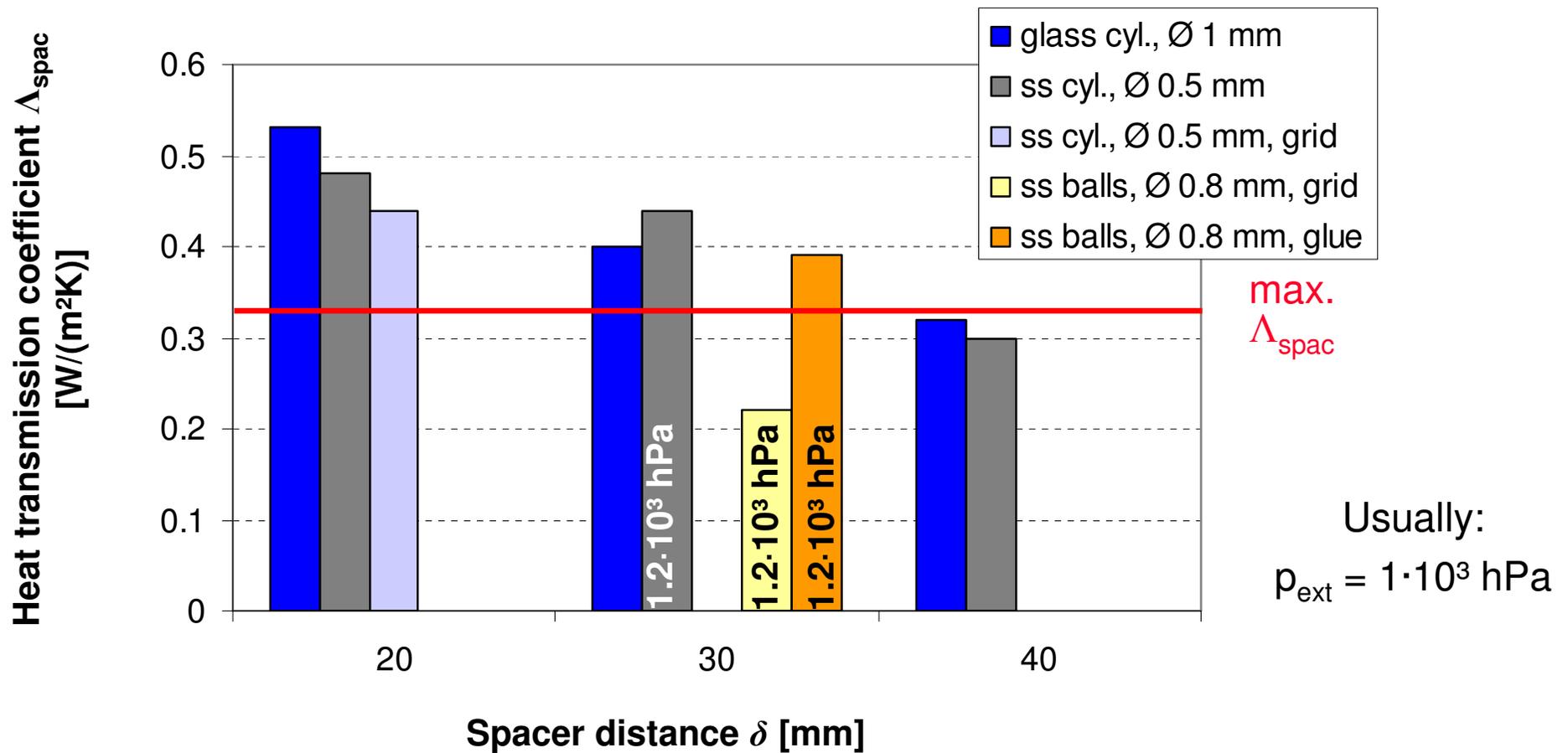


Temperaturabhängige Messungen



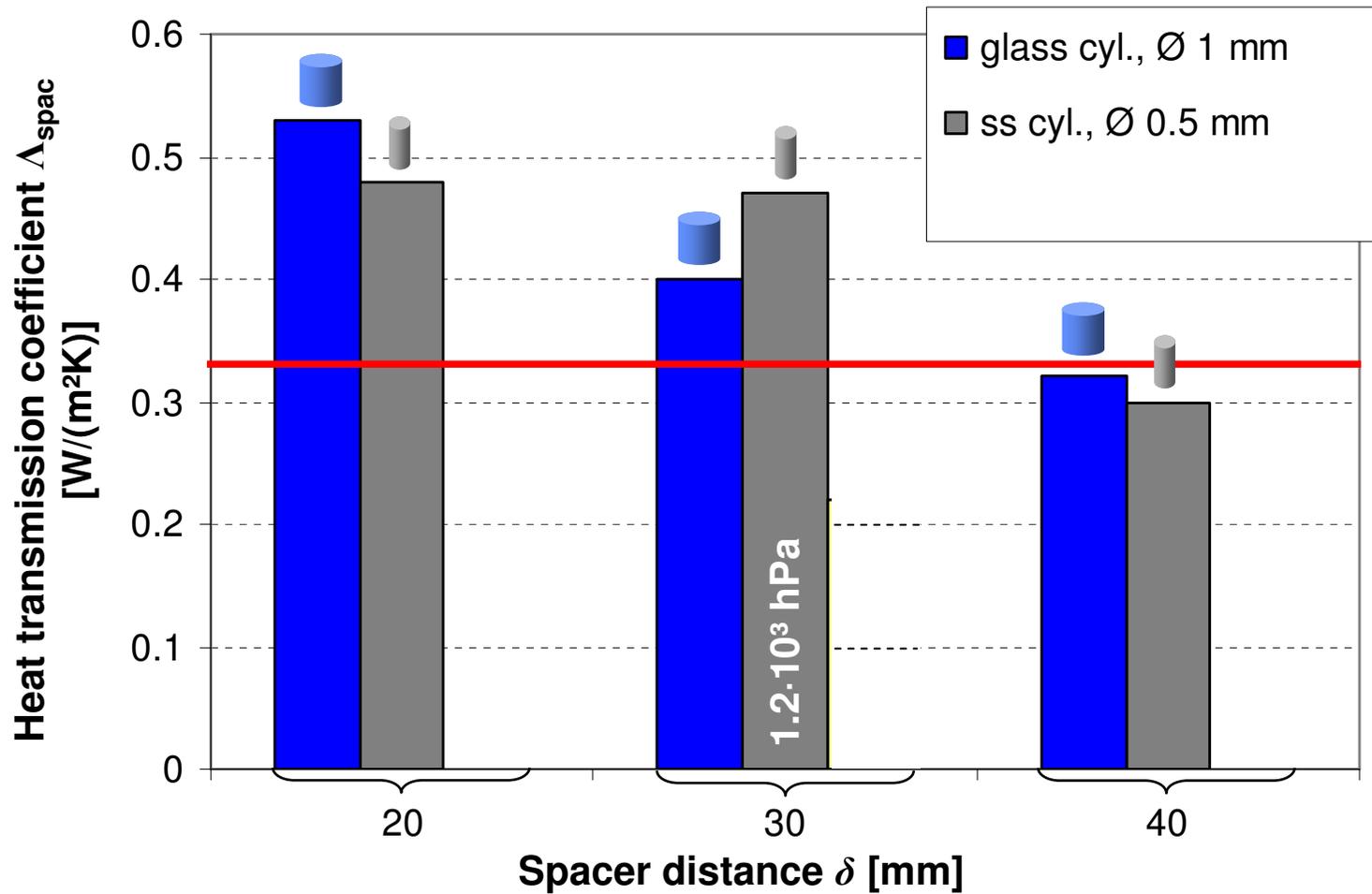
Results

Measured Λ_{spac} for different spacer systems at room temperature

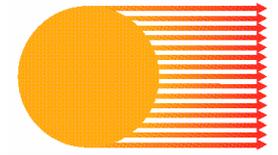


Einfluss der Stützen

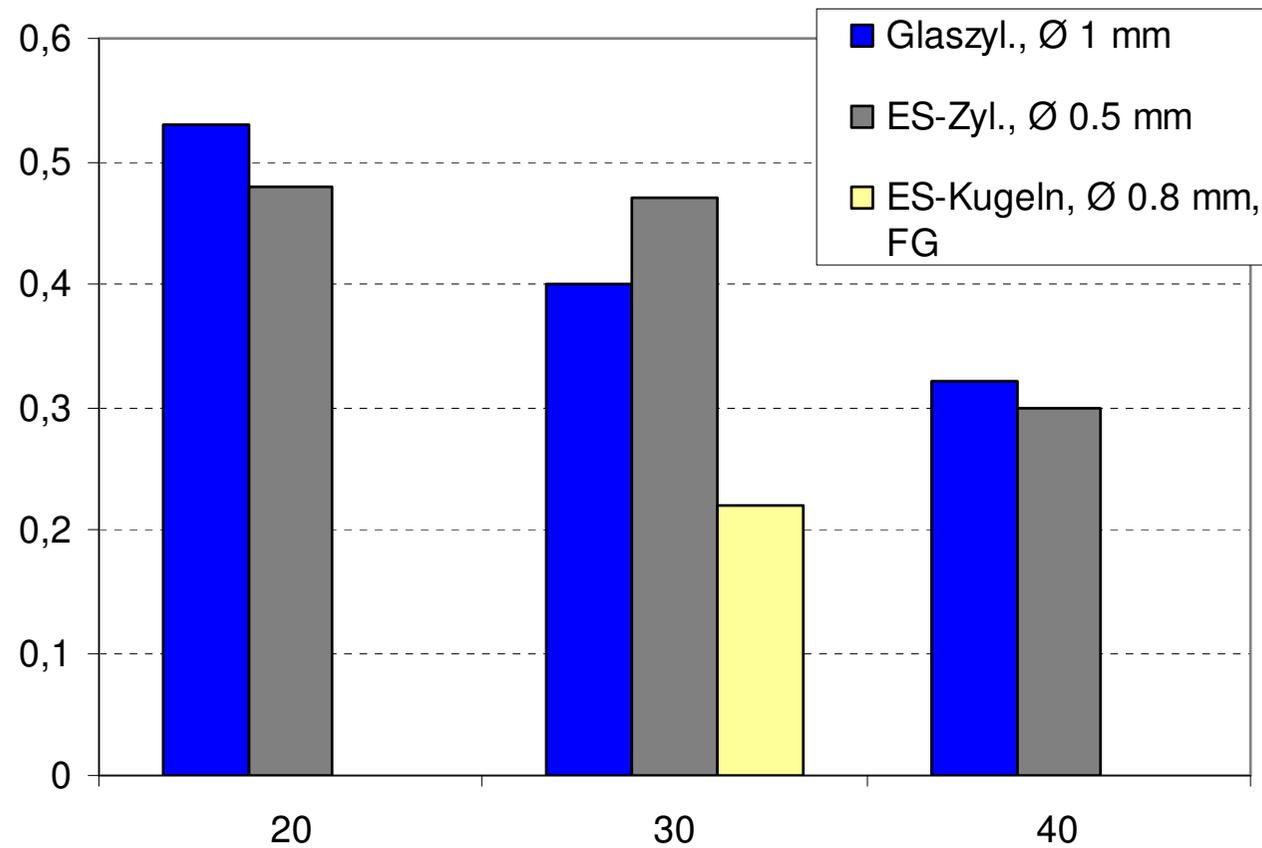
Messergebnisse bei Raumtemperatur:



Usually:
 $p_{\text{ext}} = 1 \cdot 10^3 \text{ hPa}$



ZAE BAYERN



Conclusion



- The experimental investigation of different spacer systems proved the feasibility of stable VIG with $U_g < 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

⇒ e.g. thin cylinders of stainless steel: **$U_g = 0.44 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$**

(with one low- ε -coating of $\varepsilon = 0.03$)

- The thermal contact resistance between spacers and glass panes significantly influences heat transfer through VIG
- ⇒ The knowledge of R_c for the used cylinders is relevant for further simulations and the optimization of VIG