

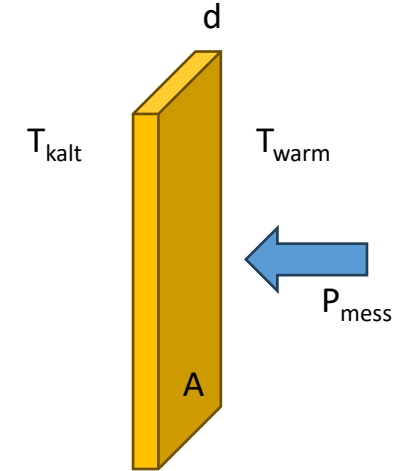
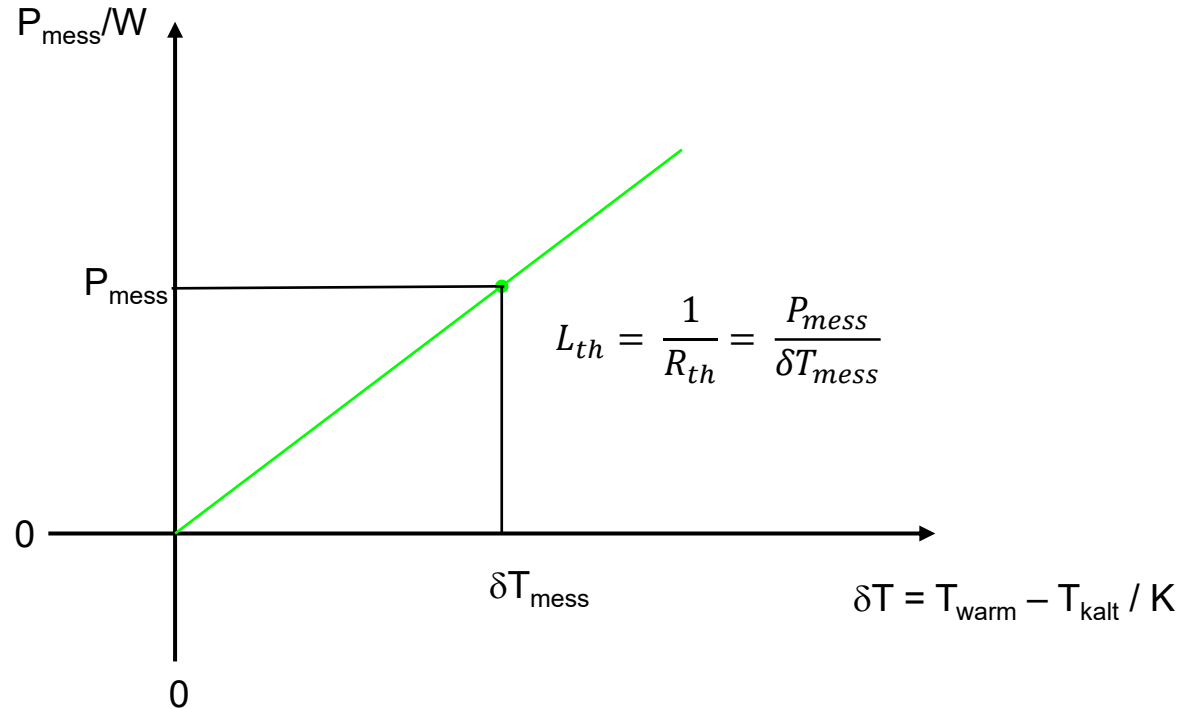
# Der wahren Wärmeleitfähigkeit ein Schritt näher – Eine verbesserte Auswertung von Messungen mit Zweiplattengeräten



Dr. Andreas Kloss

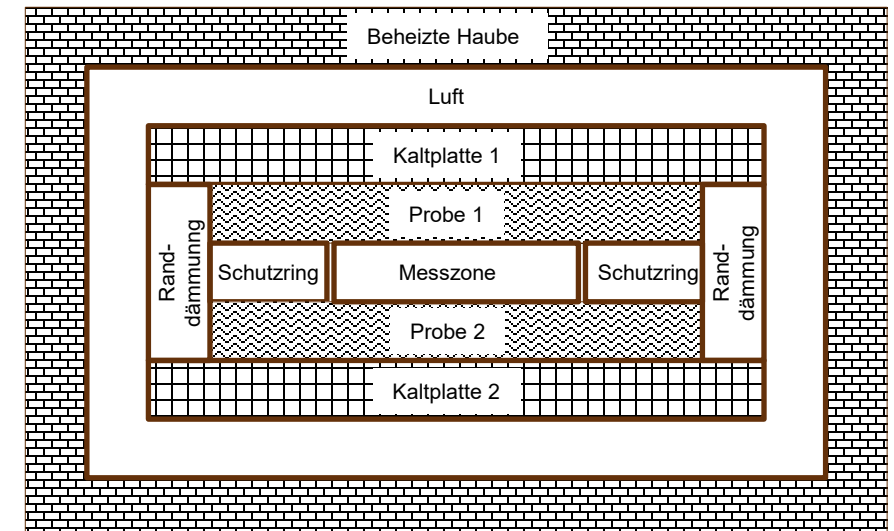


# Stationäre Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit – 1. Messverfahren

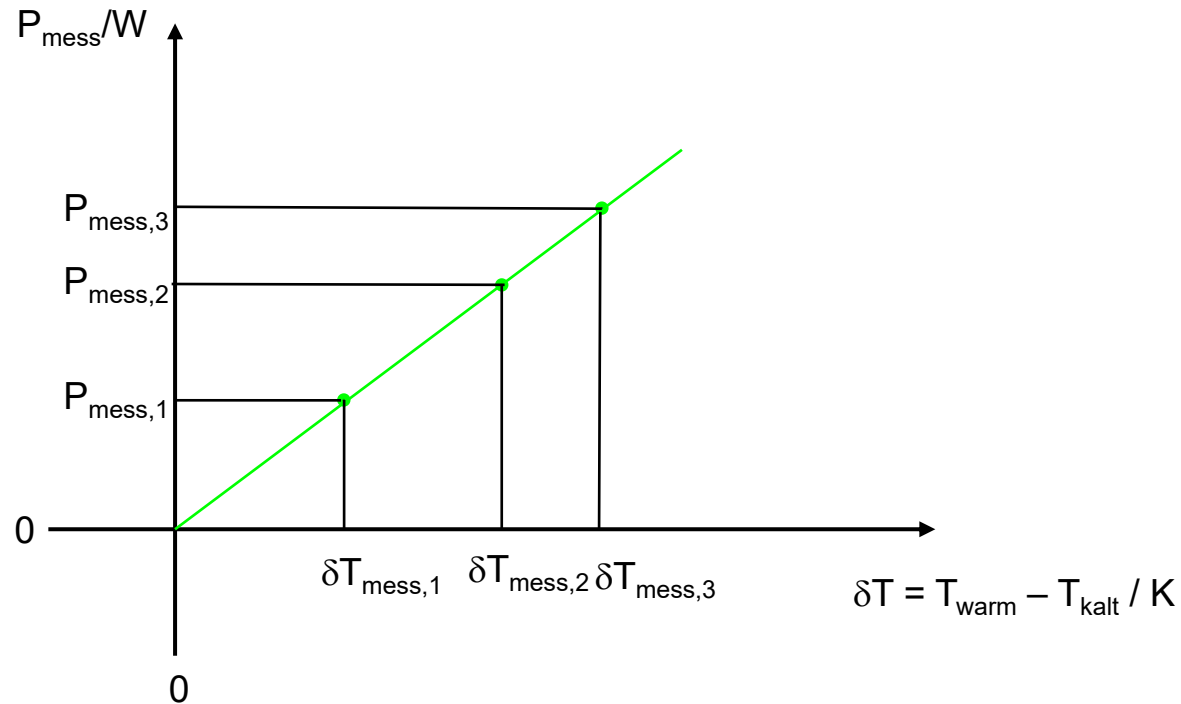


1. Messung von  $T_{\text{warm}}$ ,  $T_{\text{kalt}}$ ,  $P_{\text{mess}}$
2. Berechnung  $R_{\text{th}} = 1/L_{\text{th}}$
3. Berechnung  $\lambda_{\text{th}}$  aus  $R_{\text{th}}$ ,  $d$ ,  $A$

$$\lambda = \frac{1}{R_{\text{th}}} * \frac{d}{A} = \frac{P_{\text{mess}}}{\delta T_{\text{mess}}} * \frac{d}{A}$$



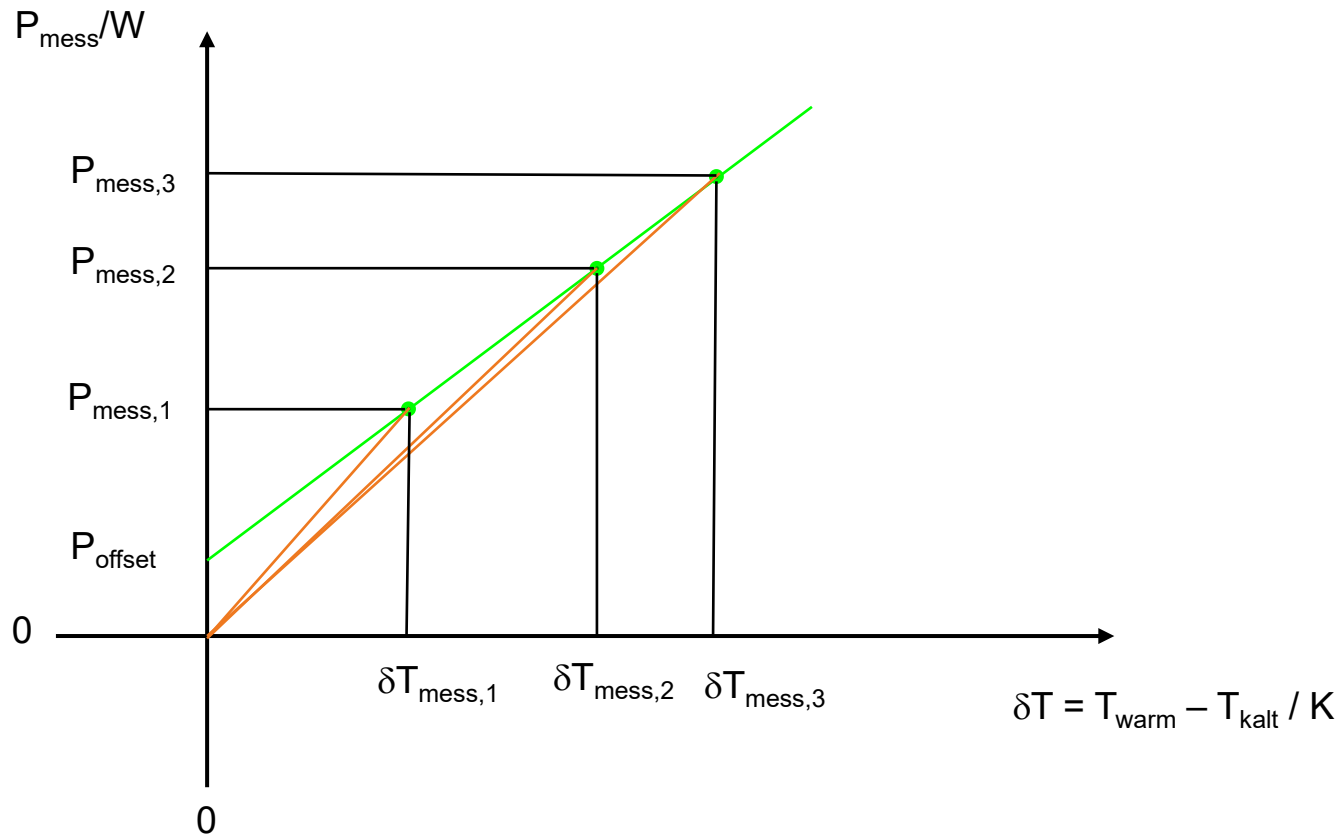
# Stationäre Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit – 2. Idealfall: $P \sim \delta T$



$$L_{th} = \frac{1}{R_{th}} = \frac{P_{\text{mess},1}}{\delta T_{\text{mess},1}} = \frac{P_{\text{mess},2}}{\delta T_{\text{mess},2}} = \frac{P_{\text{mess},3}}{\delta T_{\text{mess},3}}$$

- $P_{\text{mess}} \sim \delta T_{\text{mess}}$
- $\delta T_{\text{mess}}$  ist beliebig
- $P_{\text{mess}} (\delta T = 0 \text{ K}) = 0 \text{ W}$

# Stationäre Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit – 3. Die Realität: $P(\delta T=0) \neq 0$



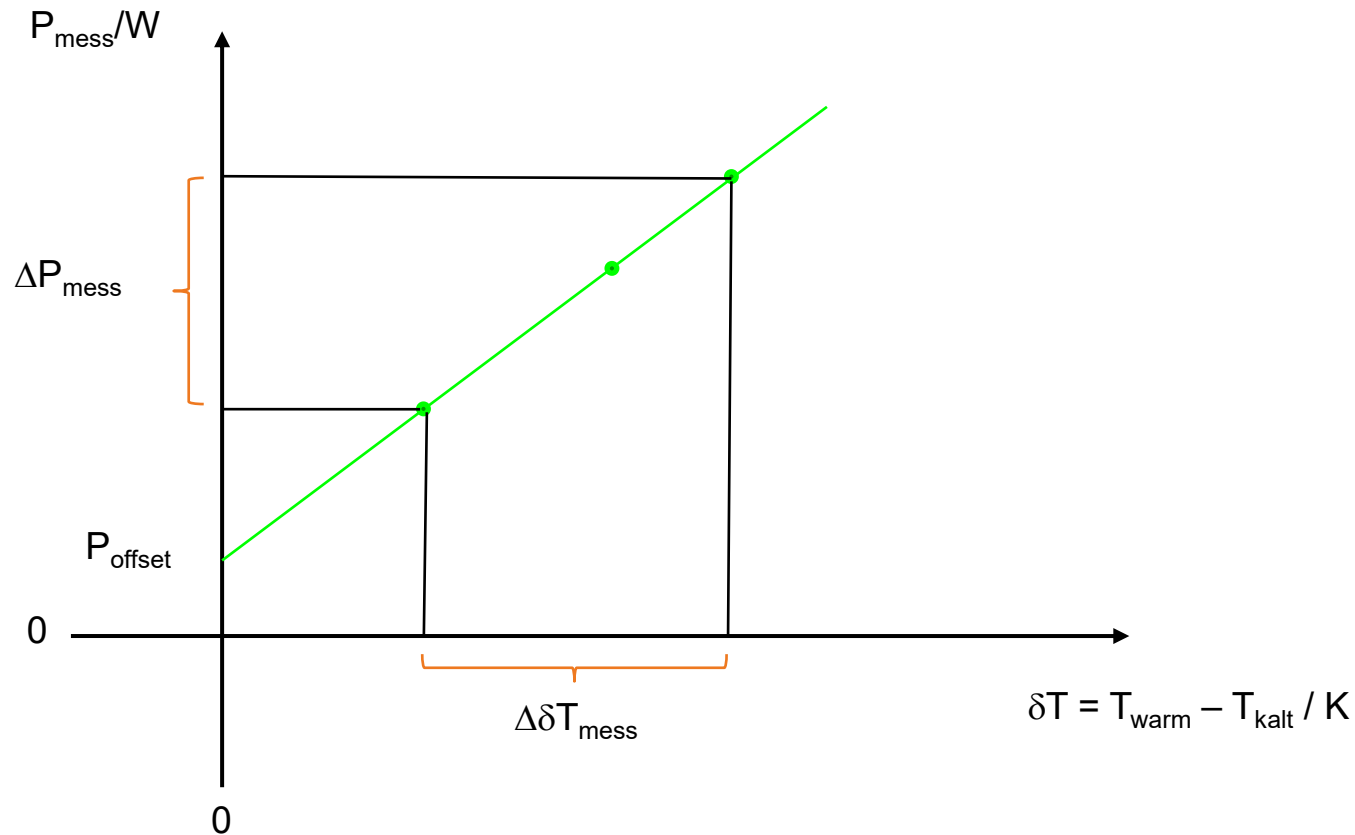
$$\frac{P_{mess,1}}{\delta T_{mess,1}} \neq \frac{P_{mess,2}}{\delta T_{mess,2}} \neq \frac{P_{mess,3}}{\delta T_{mess,3}} \approx L_{th} = \frac{1}{R_{th}}$$

**CEN/TS 15548-1 (Nov. 2011):**

“Adjust and maintain the power input ... that is required to keep the sum of the imbalance and edge heat loss errors within 0,5 %.”

- Berechneter Wert von  $L_{th} = 1/R_{th}$  hängt von  $\delta T \rightarrow P_{mess}$  ab
- Je größer  $\delta T$ , um so kleiner der rel. Fehler  $P_{offset}/P_{mess}$
- Aber: Wert von  $L_{th} = 1/R_{th}$  ist **der Anstieg von  $P_{mess}(\delta T_{mess})$**   $\neq$  konstant

# Stationäre Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit – 4. aus dem Anstieg von $P_{\text{mess}}(\delta T)$



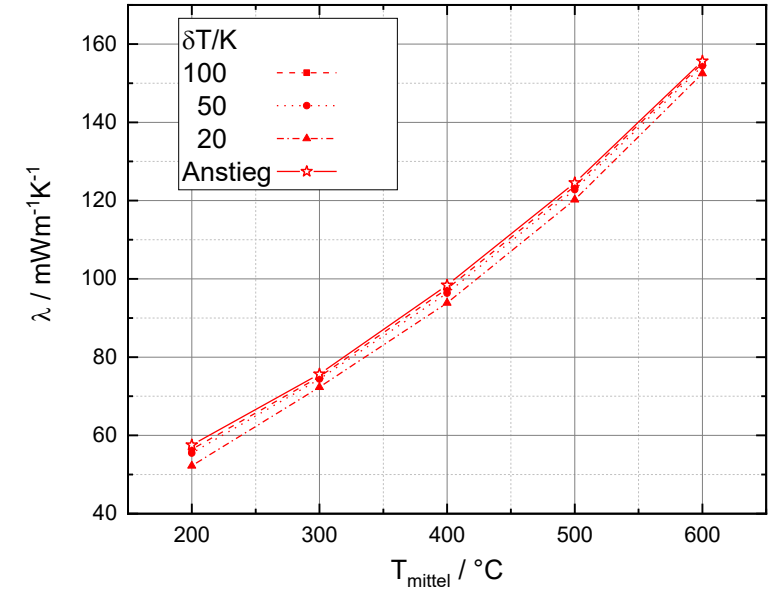
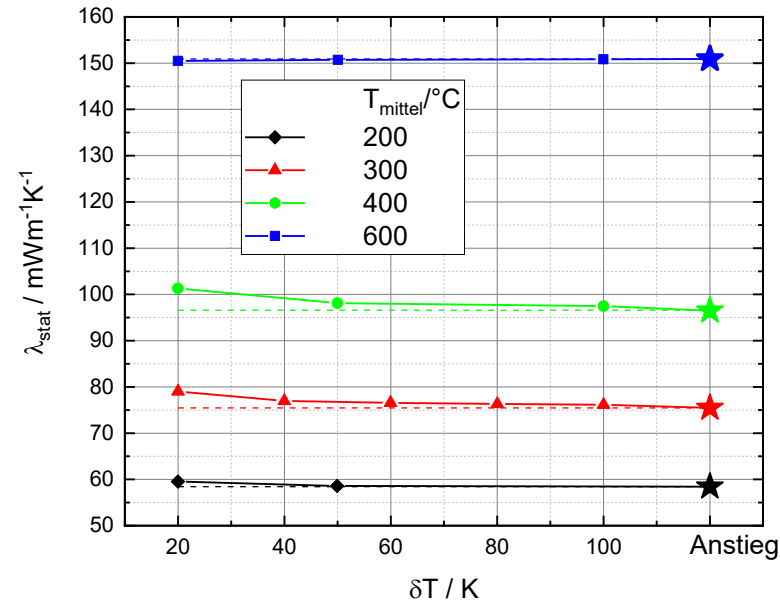
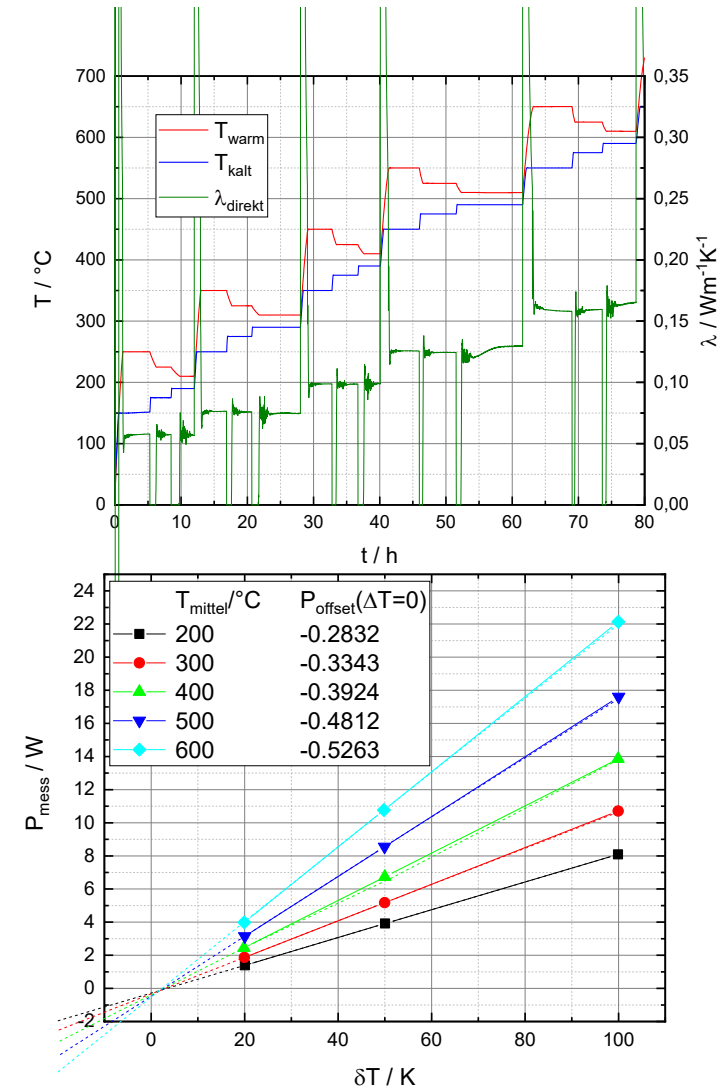
$$L_{th} = \frac{1}{R_{th}} = \frac{\Delta P_{\text{mess}}}{\Delta \delta T_{\text{mess}}} = \frac{dP(\delta T)}{d\delta T}$$

1. Messung von  $T_{\text{warm}}$ ,  $T_{\text{kalt}}$ ,  $P_{\text{mess}}$  für >2 verschiedene  $\delta T$  bei  $T_{\text{mittel}} = (T_{\text{warm}} + T_{\text{kalt}})/2 = \text{konstant}$
2. Linearer Fit der Punkte  $P_{\text{mess}}(\delta T)$
3. Berechnung  $\lambda$  aus Anstieg und  $d$ ,  $A$

$$\lambda = \frac{1}{R_{th}} * \frac{d}{A} = \frac{dP_{\text{mess}}(\delta T)}{d\delta T_{\text{mess}}} * \frac{d}{A}$$

# Messung mit 25 mm CMS-Fasermatte 130 kgm<sup>-3</sup>

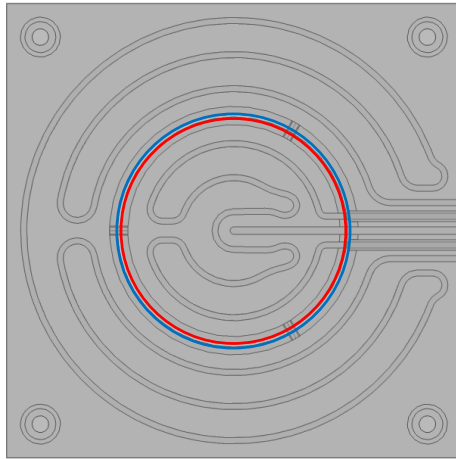
## $\lambda$ -Kurve aus Anstieg



- $T_{\text{mittel}}$ : 200...600 °C;  $\delta T$ : 20 K 50 K 100 K
- $P_{\text{mess}} \sim \Delta T$
- Offset-Power: -0.53...-0.28 W
- $\lambda$  aus Anstieg: Grenzwert für große  $\delta T$

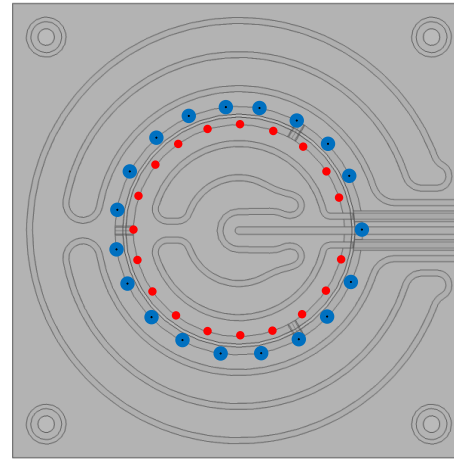
# Ursachen für parasitäre Wärmeflüsse $P_{\text{offset}}$

## Spaltverstimmung



ideal:

$$\frac{1}{A} \cdot \int_{\text{Spalt,Mess}} T dA = \frac{1}{A} \cdot \int_{\text{Spalt,Schutz}} T dA$$



real:

$$\frac{1}{n} \sum_i T_{\text{Mess},i} = \frac{1}{n} \sum_i T_{\text{Schutz},i}$$

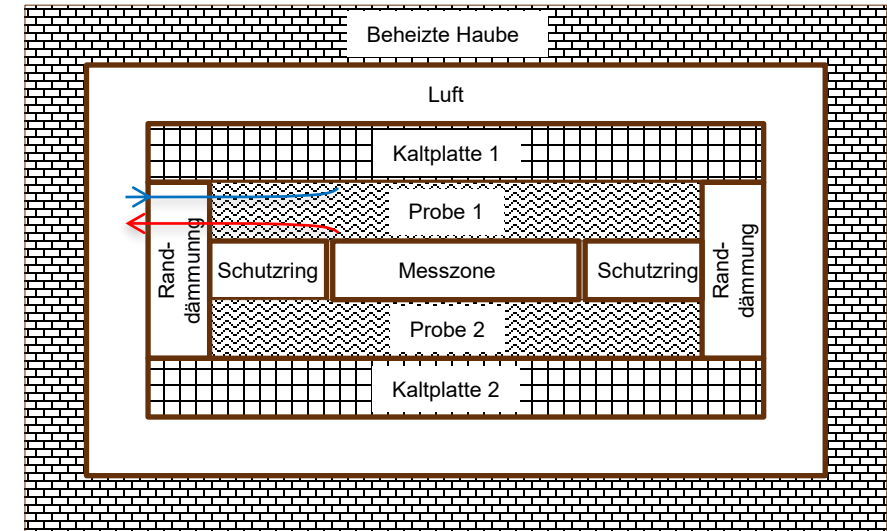
FE-Simulation:

$$\Delta T = 0.07 \text{ K} \triangleq$$

$$0.31 \text{ W} (1 \dots 15 \% \cdot P_{\text{mess}})$$

Mittlere Temperaturdifferenz Spaltwände  $\neq$  Temperaturdifferenz aus Thermokette

## Randverluste



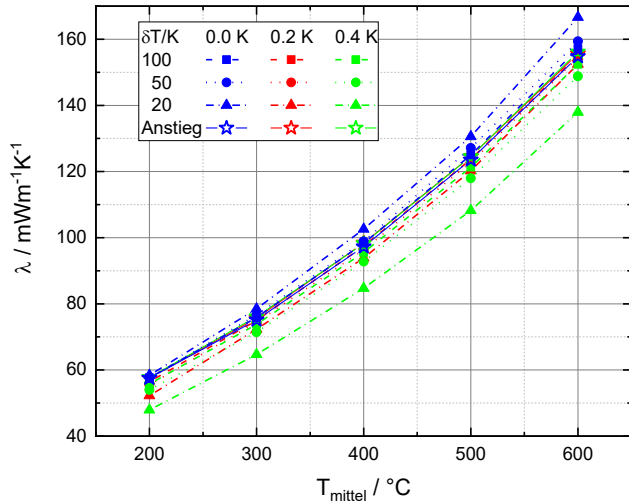
Nettowärmestrom  $\neq 0$ , wenn

$$T_{\text{Haube}} \neq \frac{T_{\text{warm}} + T_{\text{kalt}}}{2}$$

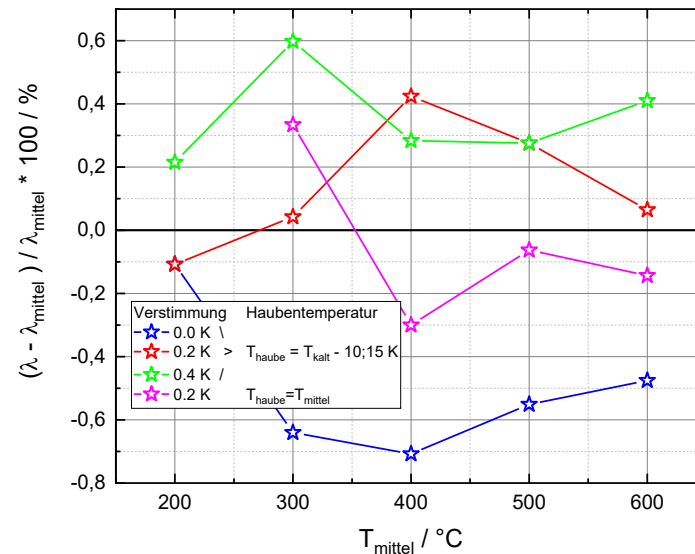
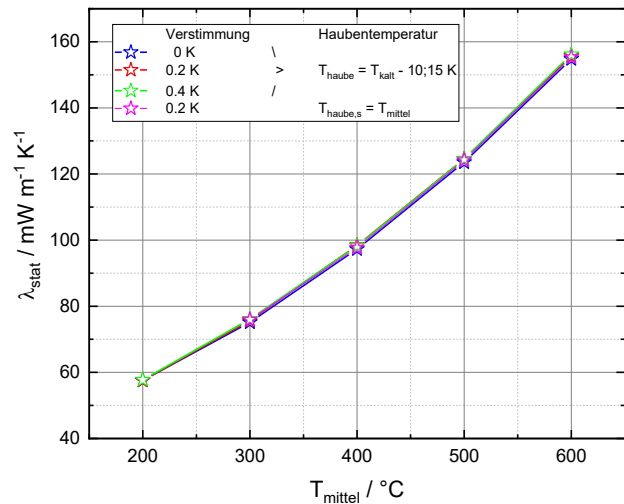
- Effekt durch Randdämmung gemindert
- Gefahr, dass Kaltplatten überheizen

# Einfluss parasitärer Wärmeflüsse

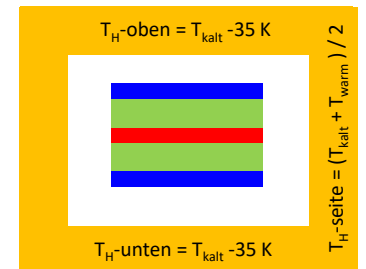
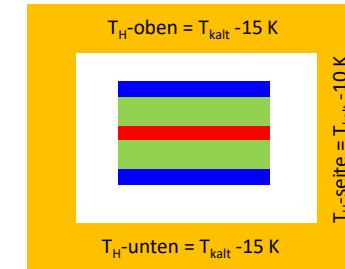
## Spaltverstimmung



- Spaltverstimmung:  $\Delta T_{\text{Spalt}}$ : 0.0; 0.2; 0.4 K  
 $\rightarrow \approx \pm 0.2 \text{ W}$  (1...10 %)
- Kurven parallel nach oben oder unten verschoben
- Kurven für  $\Delta T = 100 \text{ K}$  liegen am dichtesten zusammen aber noch deutlicher Unterschied
- Kurven aus Auswertung über Anstieg praktisch identisch: maximale relative Abweichung vom Mittel:  $\pm 0.7 \%$



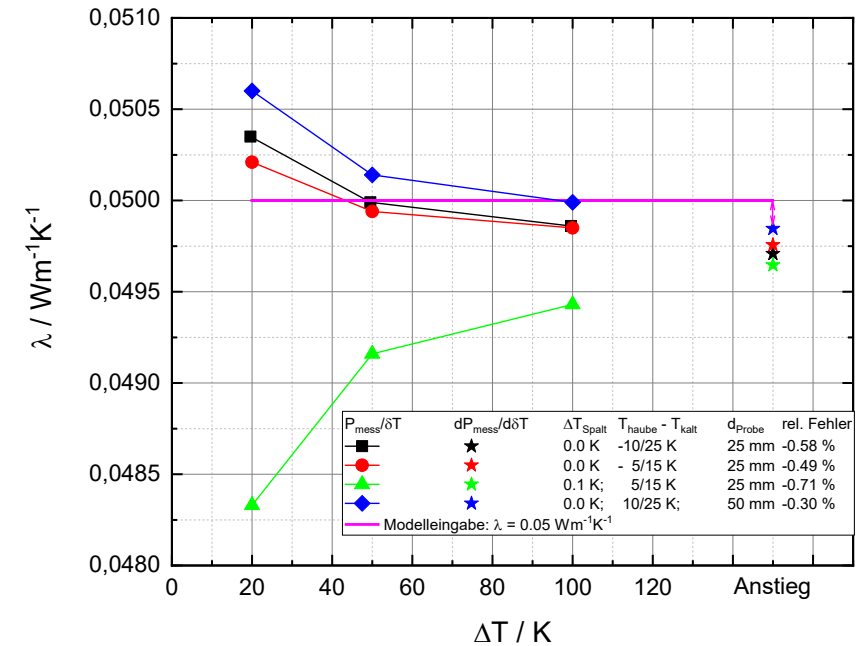
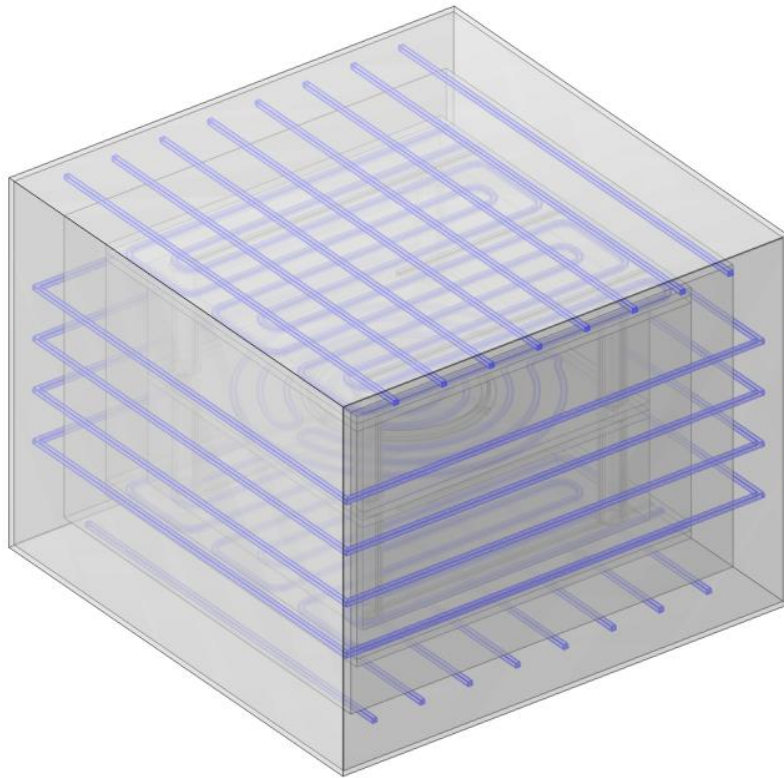
## Randverluste



Haubentemperatur geändert:

- Seitliche Haubentemperatur deutlich höher:  
 $T_{\text{kalt}} - 10 \text{ K} \rightarrow T_{\text{mittel}}$
- Obere und untere Haubentemperatur deutlich niedriger:  
 $T_{\text{kalt}} - 35 \text{ K}$
- maximale relative Abweichung vom Mittel:  $\pm 0.5 \%$

# Was ist wahr? - Anwendung auf Simulation



## FE-Modell (COMSOL®):

- Wärmeleitung, Strahlung
- Messzone, Schutzring, Kaltplatten
- geheizte innere Haube (3 Zonen, weitere Schichten)
- 7 geregelte Heizungen
- reale Materialparameter

## Parameter:

- $T_{\text{mittel}} = 500 \text{ °C}$
- Probe: 300 mm x 300 mm
- $\lambda_{\text{Probe}}: 0.05 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

- Abweichung vom „richtigen“  $\lambda$ -Wert: <1%
- mögliche Ursachen für Restabweichung:
  - Wärmestromprofil im Spalt
  - Nichtlinearität von  $\lambda(T)$

# Was bringt es?

- verlässliche Annäherung an den wahren Wert der Wärmeleitfähigkeit
  - keine „Gerätekosten“
  - rein physikalische Auswertung
  - Erstellung von Referenzproben außerhalb des bekannten Messraums ( $T > 800\text{ °C}$ )
- geringer Aufwand für Kalibriermessung
  - $T_{\text{mittel}}$  = konstant; mehrere  $\delta T$
  - Vermessung einer Referenzprobe,  $\lambda$  aus Anstieg von  $P_{\text{mess}}(\delta T)$  bestimmt
  - Kalibrierung von Zweiplattengeräten (z.B. Korrektur der Spaltverstimmung)
- Verringerung des Einflusses der speziellen Gerätekonstruktion
  - Gestaltung des Spalts zwischen Messzone und Schutzring
  - Positionierung der Thermoelemente
  - Gestaltung Randdämmung
  - Gestaltung Randheizung