
Wärme- und Stoffübertragung I

Wärmeleitung in einer mehrschichtigen ebenen Wand mit
Konvektion

Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer
Dr.-Ing. Dr. rer. pol. Wilko Rohlf

Lernziele

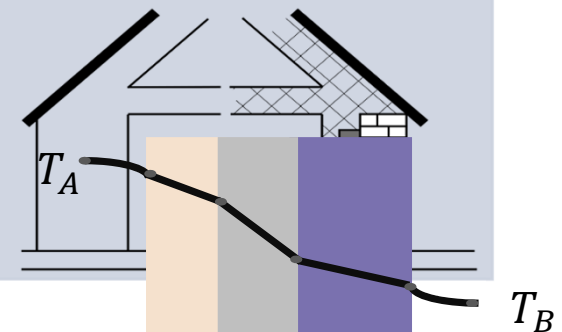
• Einführung in die Konvektion

- Was ist Konvektion?
- Was ist ein Wärmeübergangskoeffizient und was setzt dieser in Relation?



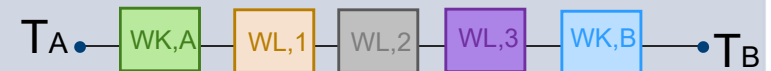
• Temperaturprofil in mehrschichtiger Wand mit Konvektion

- Wie verläuft das Temperaturprofil in einer mehrschichtigen, ebenen Wand unter Berücksichtigung von Konvektionswiderständen?



• Wärmewiderstand in einer mehrschichtigen, ebenen Wand mit Konvektion

- Wie stellt sich der Gesamtwiderstand in einer mehrschichtigen ebenen Wand mit Konvektion dar?
- Wie lässt sich der Wärmestrom in einer mehrschichtigen ebenen Wand mit Konvektion berechnen?



Wärmeübertragung mit und ohne Einfluss des konvektiven Wärmewiderstands

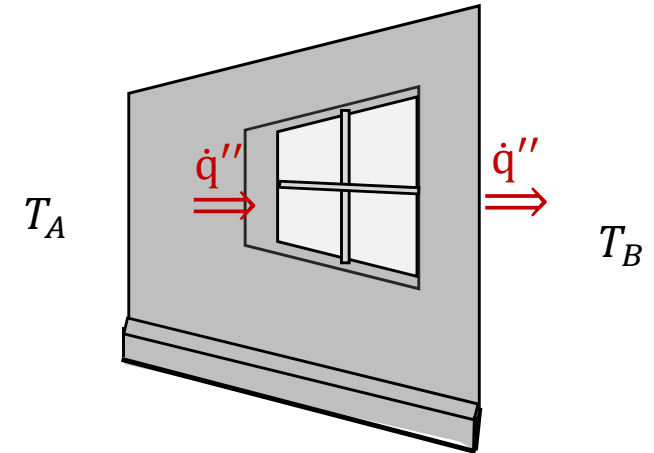
Beispiel: Fenster

Vergleich des Wärmeverlustes mit und ohne konvektivem Wärmewiderstand

Wärmeverlust ohne konvektivem Widerstand

$$W_L = \frac{\delta_G}{\lambda_G} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,8 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,005 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$\dot{q}'' = -\frac{T_B - T_A}{W_L} = -\frac{-20^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{0,005} = 8.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$



Wärmeverlust mit Konvektion

$$\dot{q}'' = ? \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Innentemperatur:

$$T_A = 20^\circ\text{C}$$

Außentemperatur:

$$T_B = -20^\circ\text{C}$$

Glasdicke:

$$\delta_G = 4 \text{ mm}$$

Wärmeleitfähigkeit von Glas:

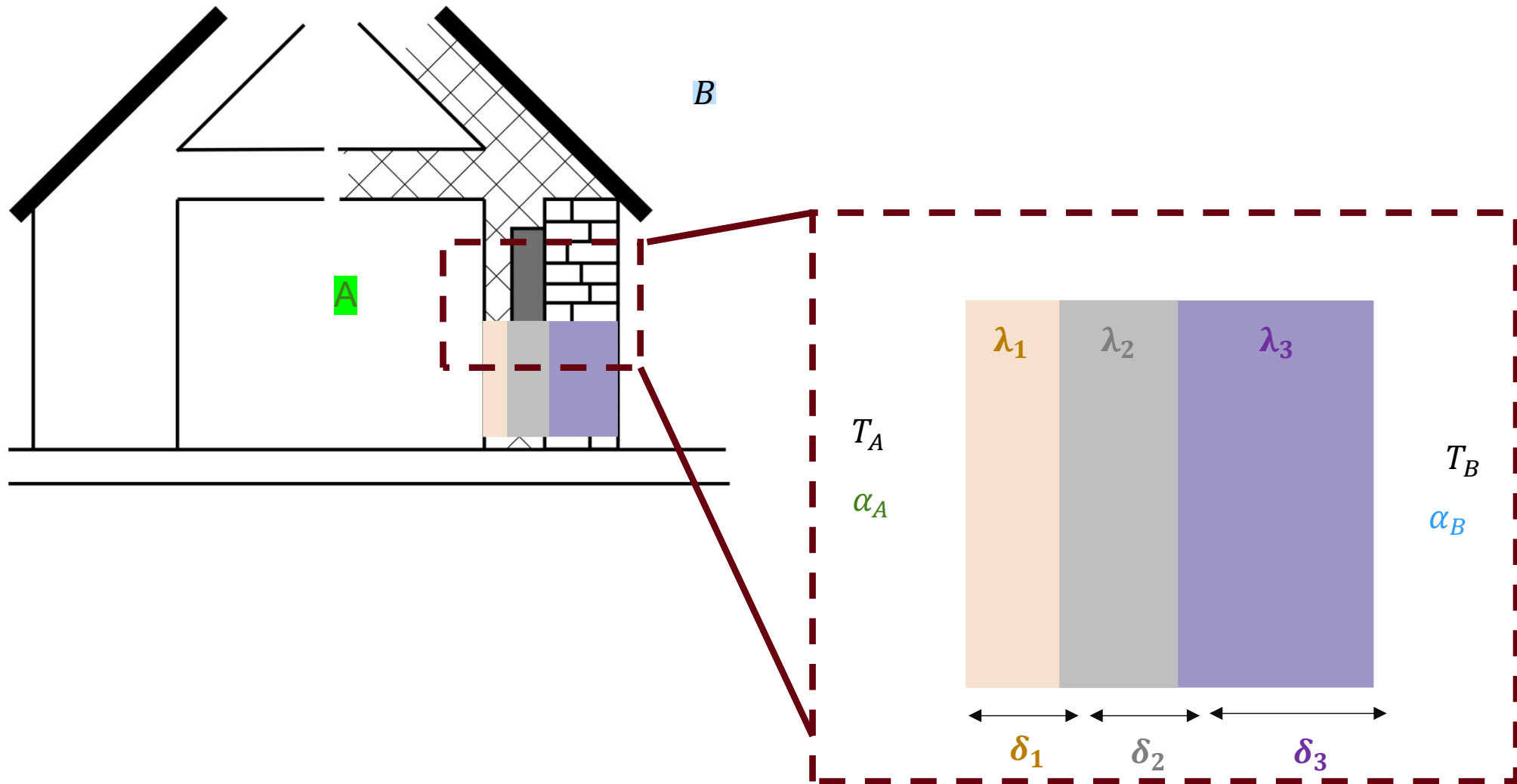
$$\lambda_G = 0,8 \text{ W/mK}$$

Wärmedurchgangskoeffizient:

$$\alpha_A, \alpha_B = ? \text{ W/m}^2\text{K}$$

Mehrschichtige Wand mit Konvektion

Beispiel: Hauswand



Temperaturprofil in mehrschichtiger Wand mit Konvektion

Annahmen:

- Stationärer Zustand
- Eindimensional
- Konstante Materialeigenschaften
- Konstante Querschnittsfläche

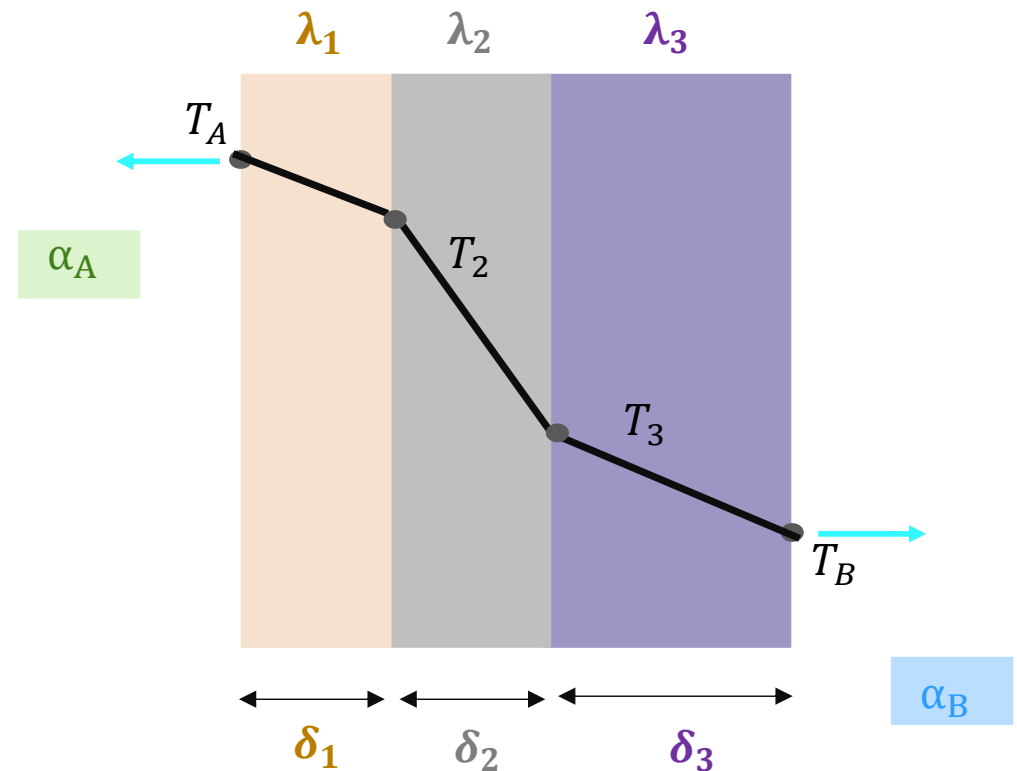
λ_i : Wärmeleitfähigkeit in jeder Schicht

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{iso}} \ll \lambda_1, \lambda_3 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$$

α_A : Wärmeübergangskoeffizient im Innenraum

α_B : Wärmeübergangskoeffizient außerhalb des Hauses

$$\alpha_A, \alpha_B : \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$



Temperaturprofil in mehrschichtiger Wand mit Konvektion

Annahmen:

- Stationärer Zustand
- Eindimensional
- Konstante Materialeigenschaften
- Konstante Querschnittsfläche

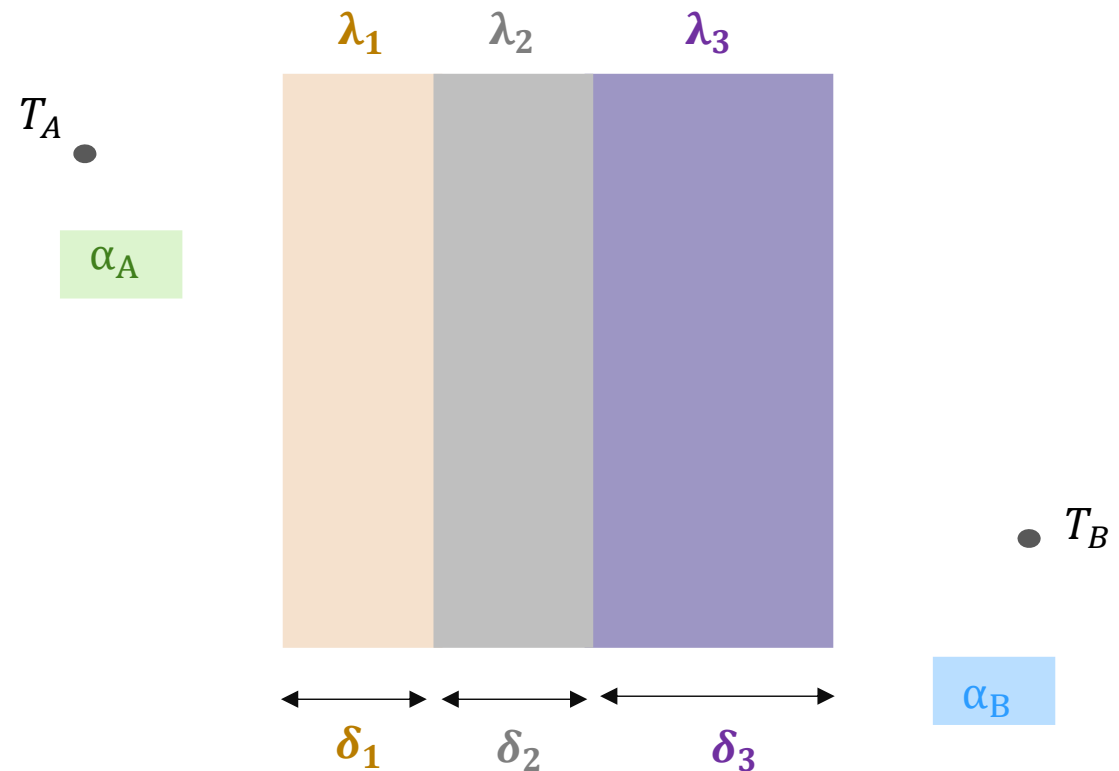
λ_i : Wärmeleitfähigkeit in jeder Schicht

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{iso}} \ll \lambda_1, \lambda_3 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$$

α_A : Wärmeübergangskoeffizient im Innenraum

α_B : Wärmeübergangskoeffizient außerhalb des Hauses

$$\alpha_A, \alpha_B : \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$



Temperaturprofil in mehrschichtiger Wand mit Konvektion

Annahmen:

- Stationärer Zustand
- Eindimensional
- Konstante Materialeigenschaften
- Konstante Querschnittsfläche

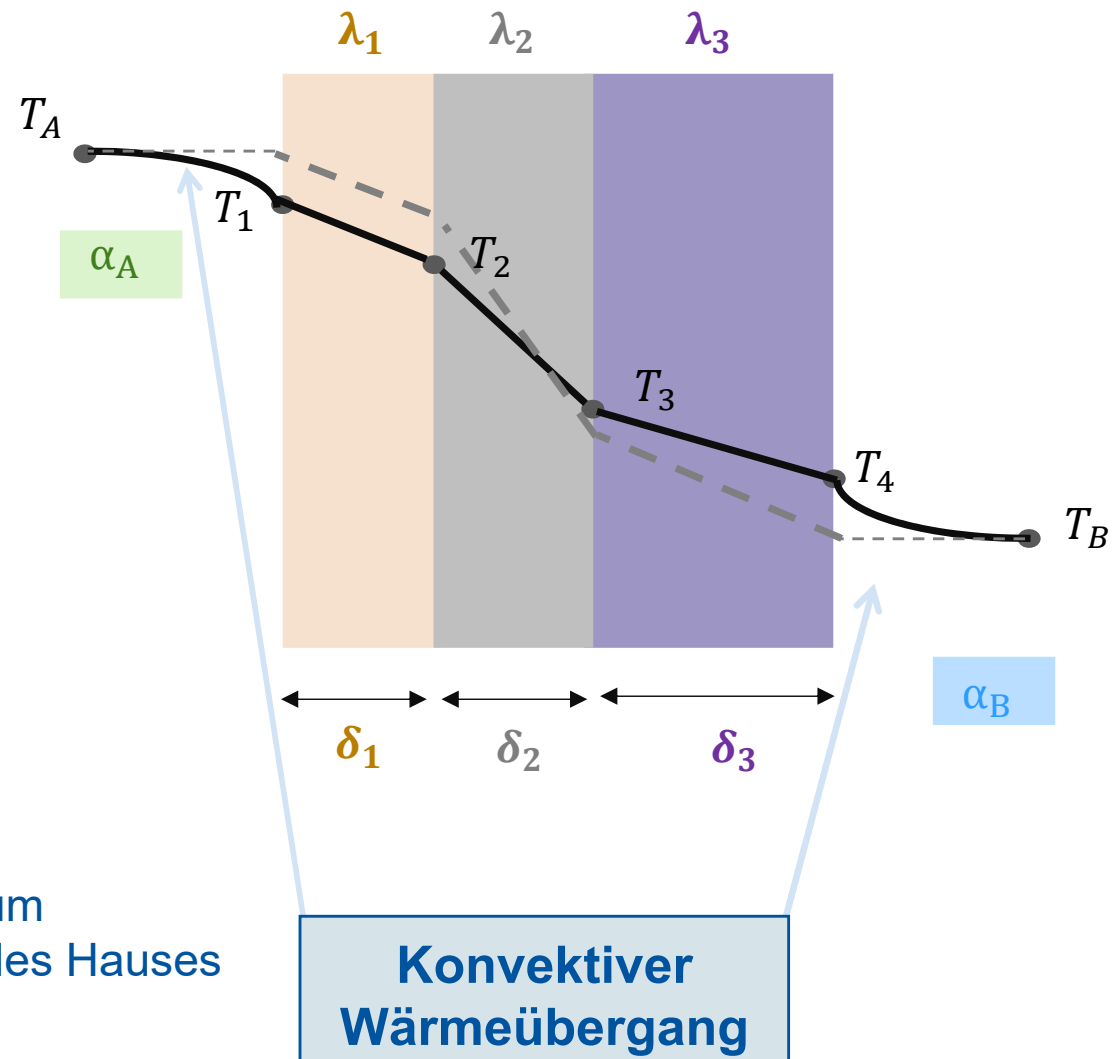
λ_i : Wärmeleitfähigkeit in jeder Schicht

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{iso}} \ll \lambda_1, \lambda_3 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$$

α_A : Wärmeübergangskoeffizient im Innenraum

α_B : Wärmeübergangskoeffizient außerhalb des Hauses

$$\alpha_A, \alpha_B : \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

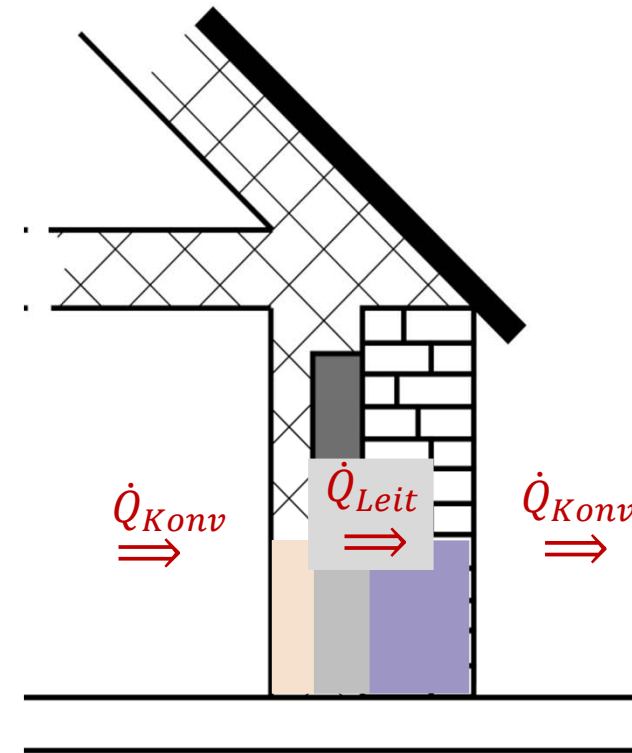


Wärmewiderstand in einer mehrschichtigen, ebenen Wand mit Konvektion

Annahmen:

- Stationärer Zustand
- Eindimensional
- Konstante Materialeigenschaften
- Konstante Querschnittsfläche

$$\dot{Q}_{\text{Konv, innen}} = \dot{Q}_{\text{Leit, Wand}} = \dot{Q}_{\text{Konv, außen}}$$



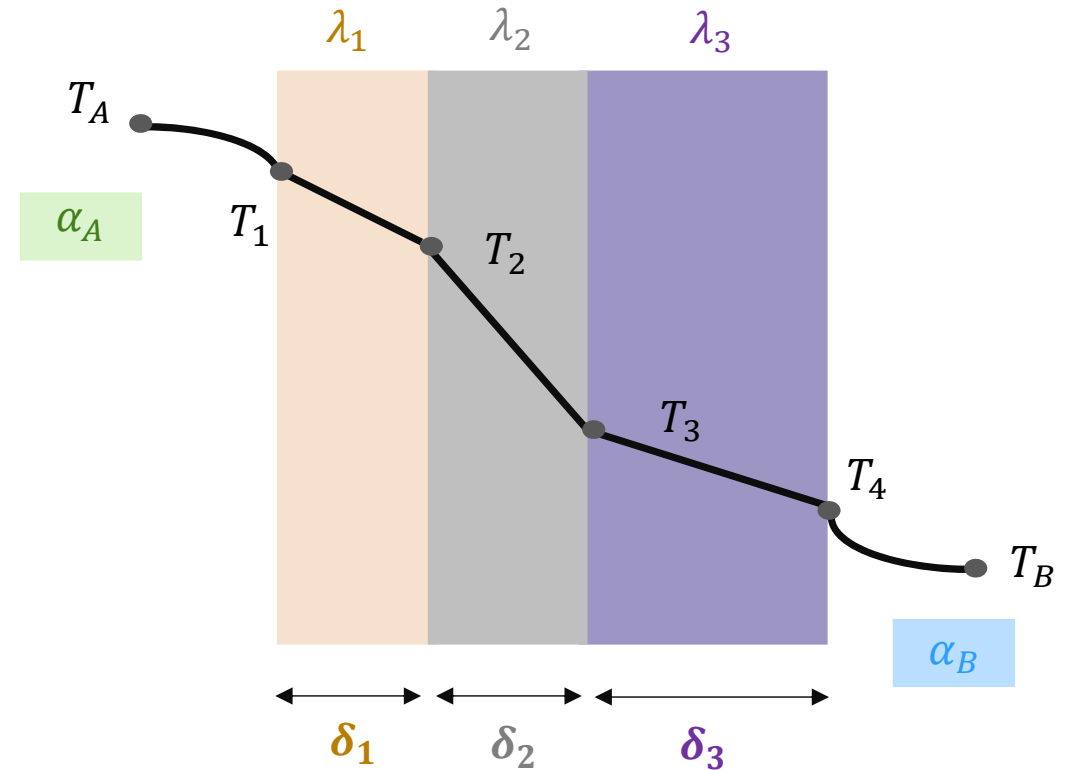
Wärmewiderstand in einer mehrschichtigen, ebenen Wand mit Konvektion

Konvektion an der Oberfläche

- Innenseite: $\dot{Q}_{K_A} = \frac{T_A - T_1}{\frac{1}{\alpha_A A}}$
- Außenseite: $\dot{Q}_{K_B} = \frac{T_4 - T_B}{\frac{1}{\alpha_B A}}$

Wärmeleitung in der Wand

- Erste Wandschicht: $\dot{Q}_{L_1} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A}}$
- Zweite Wandschicht: $\dot{Q}_{L_2} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2 A}}$
- Dritte Wandschicht: $\dot{Q}_{L_3} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\delta_3}{\lambda_3 A}}$



$$\dot{Q}_{K_A} = \dot{Q}_{L_1} = \dot{Q}_{L_2} = \dot{Q}_{L_3} = \dot{Q}_{K_B}$$

$$\dot{Q} = \frac{\text{Temperaturunterschied}}{\text{Wärmewiderstand}}$$

Wärmewiderstand in einer mehrschichtigen, ebenen Wand mit Konvektion

Wärmeübergangswiderstände:

$$W_{K_A} = \frac{1}{\alpha_A A}$$

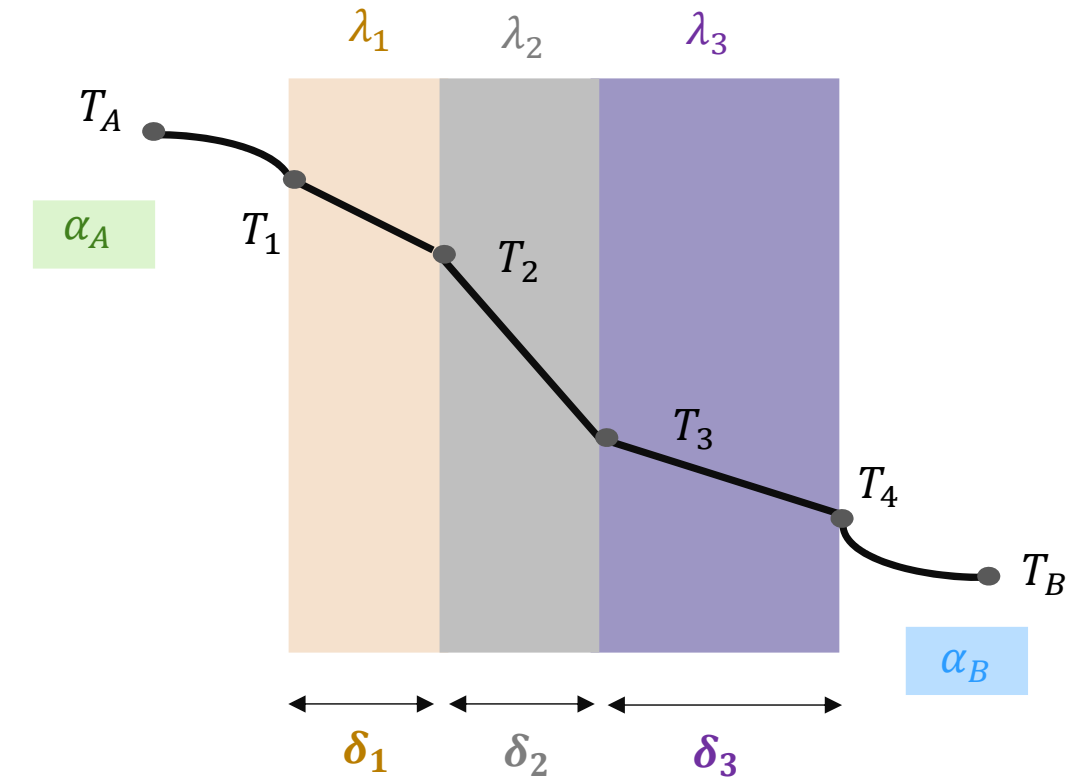
$$W_{K_B} = \frac{1}{\alpha_B A}$$

Wärmeleitungswiderstände:

$$W_{L_1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1 A}$$

$$W_{L_2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2 A}$$

$$W_{L_3} = \frac{\delta_3}{\lambda_3 A}$$



$$\dot{Q} = \frac{T_A - T_B}{W_{K_A} + W_{L_1} + W_{L_2} + W_{L_3} + W_{K_B}}$$

Wärmestrom in einer mehrschichtigen, ebenen Wand mit Konvektion

$$\dot{Q} = \frac{T_A - T_B}{W_{K_A} + \underbrace{W_{L_1} + W_{L_2} + W_{L_3}} + W_{K_B}}$$

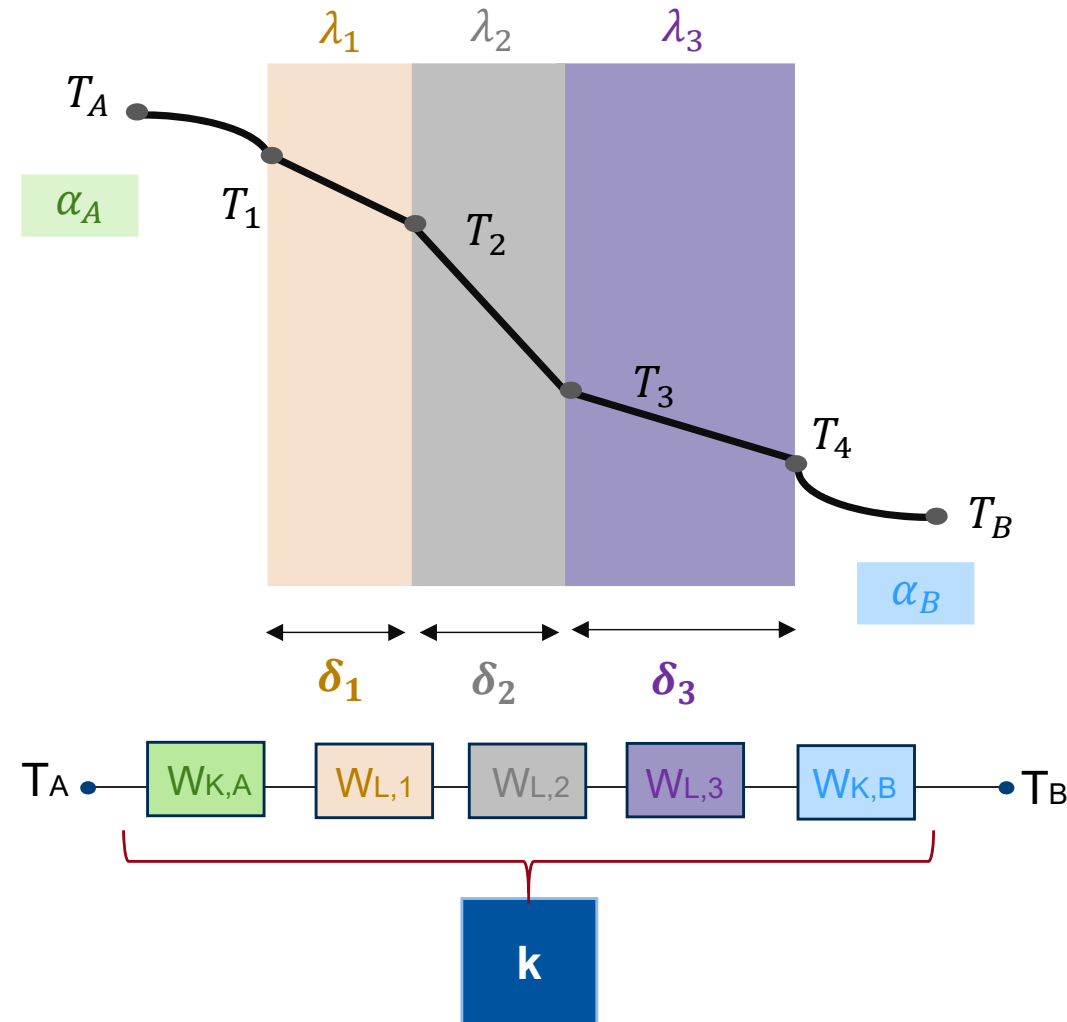
Wärmestrom in mehrschichtiger ebener Wand

$$\dot{Q}_i = \frac{A}{\frac{1}{\alpha_A} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_B}} (T_A - T_B)$$

Wärmedurchgangskoeffizient (k)

$$k = \frac{1}{\sum w} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_A} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_B}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$\dot{Q}_i = k A (T_A - T_B)$$



Wärmeübertragung mit und ohne Einfluss des konvektiven Wärmewiderstands

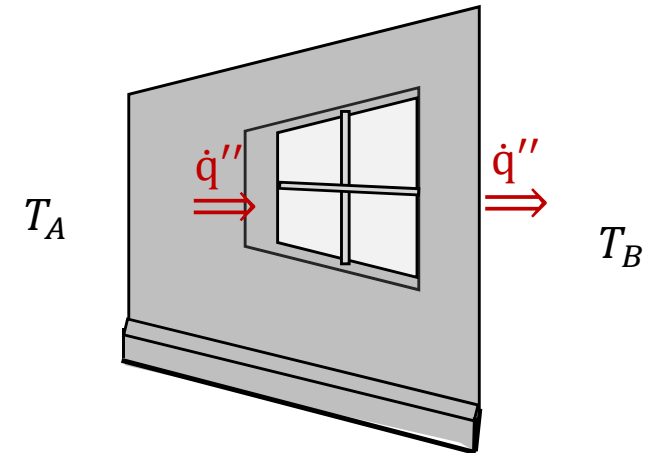
Beispiel: Fenster

Vergleich des Wärmeverlustes mit und ohne konvektivem Wärmewiderstand

Wärmeverlust ohne konvektivem Widerstand

$$w_L = \frac{\delta_G}{\lambda_G} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,8 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,005$$

$$\dot{q}'' = -\frac{T_B - T_A}{w_L} = -\frac{-20^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{0,005} = 8.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$



Wärmeverlust inklusive konvektivem Widerstand

$$\dot{q}'' = ? \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Innentemperatur:

$$T_A = 20^\circ\text{C}$$

Außentemperatur:

$$T_B = -20^\circ\text{C}$$

Glasdicke:

$$\delta_G = 4 \text{ mm}$$

Wärmeleitfähigkeit von Glas:

$$\lambda_G = 0,8 \text{ W/mK}$$

Wärmedurchgangskoeffizient:

$$\alpha_A, \alpha_B = ? \text{ W/m}^2\text{K}$$

Wärmeübertragung mit und ohne Einfluss des konvektiven Wärmewiderstands

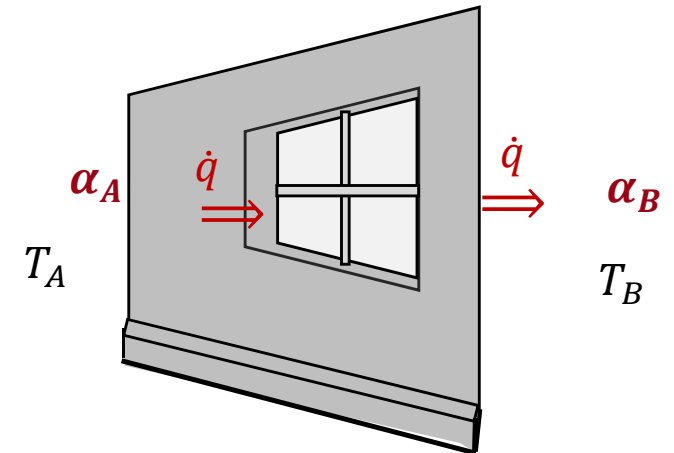
Beispiel: Fenster

Vergleich des Wärmeverlustes mit und ohne konvektivem Wärmewiderstand

Wärmeverlust ohne konvektivem Widerstand

$$w_L = \frac{\delta_G}{\lambda_G} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,8 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,005 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$\dot{q}'' = -\frac{T_B - T_A}{w_L} = -\frac{-20^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{0,005} = 8.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$



Wärmeverlust inklusive konvektivem Widerstand

$$w_{ges.} = w_{K,A} + w_L + w_{K,B} = \frac{1}{\alpha_A} + \frac{\delta_G}{\lambda_G} + \frac{1}{\alpha_B}$$
$$= \frac{1}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} + \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,8 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{1}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} = 0,205 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$\dot{q}'' = \frac{T_A - T_B}{w_{ges.}} = -\frac{-20^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{0,205} \approx 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Innentemperatur:

$$T_A = 20^\circ\text{C}$$

Außentemperatur:

$$T_B = -20^\circ\text{C}$$

Glasdicke:

$$\delta_G = 4 \text{ mm}$$

Wärmeleitfähigkeit von Glas:

$$\lambda_G = 0,8 \text{ W/mK}$$

Wärmedurchgangskoeffizient:

$$\alpha_A, \alpha_B = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Verständnisfragen

Was ist Konvektion und wie lässt sich diese empirisch beschreiben?

Welche Krümmung weist das Temperaturprofil auf der Fluidseite aufgrund von Konvektion auf?

Welchen Einfluss hat die zusätzliche Berücksichtigung der Konvektion auf den Gesamtwärmeübergang?