

Klausur zur Vorlesung Wärme- und Stoffübertragung

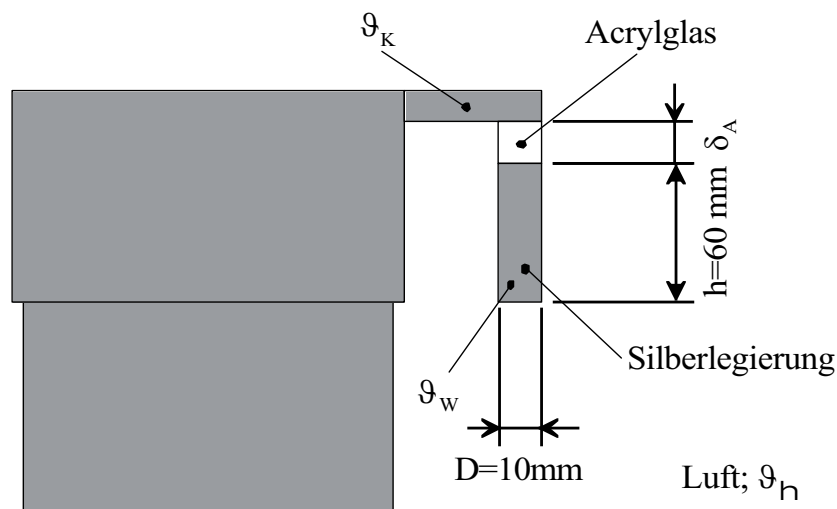
Für alle Aufgaben gilt: Der Rechengang muss erkennbar sein! Interpolationsvorschriften sind anzugeben. Quadratische Gleichungen sind analytisch zu lösen. Hilfsmittel sind zugelassen, die Bearbeitungszeit beträgt 120 Minuten. Nicht in den Aufgabenstellungen angegebene Stoffdaten sowie die Nußelt-Beziehungen sind dem Anhang des Skriptums zur Vorlesung zu entnehmen.

Falls Ersatzergebnisse angegeben sind, müssen diese auf jeden Fall verwendet werden.

Aufgabe 1: *Kaffeetasse*

15 von 50 Punkten

Der zylindrische, senkrecht angeordnete Griff (Durchmesser $D = 10 \text{ mm}$, Höhe $h = 60 \text{ mm}$) eines Kaffeebechers (Silberlegierung mit einem sehr großen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten) soll mit einem zylindrischen Abstandsstück aus Acrylglas ($D = 10 \text{ mm}$; $\lambda_A = 0,18 \frac{\text{W}}{\text{K m}}$) isoliert werden. Dieses wird an der Stirnfläche des Griffs angebracht (vgl. Skizze).



Berechnen Sie die erforderliche Länge δ_A dieses Abstandsstücks unter folgenden Annahmen:

1. Es ist nur axiale Wärmeleitung in dem Abstandsstück zu berücksichtigen; es erfolgt also keine Wärmeabgabe an der Oberfläche dieses Abstandsstücks.

2. Die Temperaturdifferenz zwischen der Kaffeetasse und dem Griff beträgt $\vartheta_K - \vartheta_W = 50 \text{ K}$.
3. Aufgrund der großen Wärmeleitfähigkeit hat der Griff überall eine einheitliche Temperatur von $\vartheta_W = 35^\circ\text{C}$ (stationärer Zustand).
4. Es erfolgen ein konvektiver Wärmeübergang von der Zylinderoberfläche des Griffs an die Umgebungsluft mit $\vartheta_\infty = 25^\circ\text{C}$ (ideales Gas) und ein Strahlungswärmeaustausch mit den Raumwänden (Temperatur $\vartheta_R = 25^\circ\text{C}$, Emissionsgrad $\varepsilon_R = 1$). Der Griff hat den Emissionsgrad $\varepsilon_W = 0,03$.
5. Die untere Stirnfläche des Griffs trägt nicht zur Wärmeübertragung bei.

Stoffeigenschaften der Luft bei $\vartheta_{\text{mittel}} = \frac{1}{2}(\vartheta_W + \vartheta_\infty) = 30^\circ\text{C}$:

Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 0,02676 \frac{\text{W}}{\text{K m}}$
kinematische Viskosität	$\nu = 16,025 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Temperaturleitfähigkeit	$a = 23,15 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

- a) Wie groß ist der Wärmeübergangskoeffizient an der Oberfläche des Griffs?
- b) Wie groß ist der vom Griff an die Umgebungsluft durch Konvektion \dot{Q}_α und an die Raumwände durch Strahlung \dot{Q}_σ (Einfluss der Tasse nicht berücksichtigen!) insgesamt abgegebene Wärmestrom \dot{Q} ? Benutzen Sie den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha = 7 \frac{\text{W}}{\text{K m}^2}$.
- c) Formulieren Sie den Ersten Hauptsatz für den Griff.
- d) Welche Länge δ_A muss das Acrylglasstück haben? Rechnen Sie mit einem insgesamt an der Oberfläche des Griffs abgegebenen Wärmestrom $\dot{Q} = 0,15 \text{ W}$.

Aufgabe 2: *Wärmeübertragung in einem Druckwasserreaktor* 15 von 50 Punkten

Die zylindrischen Brennelemente (Außendurchmesser einschließlich Hüllrohr $D_B = 35 \text{ mm}$, Länge $L = 2,20 \text{ m}$) eines Druckwasserreaktors haben im stationären Betriebszustand die konstante Wandtemperatur $\vartheta_B = 310^\circ\text{C}$. Um diese Brennelemente strömt in dazu konzentrischen Rohren (Innendurchmesser $D_W = 55 \text{ mm}$) Wasser, das im Zustand $\vartheta_{W1} = 250^\circ\text{C}$, $p_{W1} = 150 \text{ bar}$ in den Rohrspalt eintritt und diesen isobar mit der Geschwindigkeit $w = 1,2 \text{ m/s}$ durchströmt. Diese Rohre haben auf der Außenseite eine adiabate Systemgrenze, so dass der gesamte von den Brennelementen abgegebene Wärmestrom auf das Wasser übertragen wird.

Stoffeigenschaften von Wasser im Strömungszustand mit $\vartheta_{W,\text{mittel}} = 260^\circ\text{C}$, $p = 150 \text{ bar}$:

Dichte	$\rho = 796 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
spezifische Wärmekapazität	$c = 4,838 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 0,618 \frac{\text{W}}{\text{K m}}$
dynamische Viskosität	$\eta = 10,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}$

- Wie groß ist der Wärmeübergangskoeffizient α für die konvektive Wärmeübertragung zwischen der Hüllrohrwand der Brennelemente und dem Wasser?
- Welche Temperatur ϑ_{W2} hat das Wasser beim Austritt aus den Strömungskanälen? Benutzen Sie für die konvektive Wärmeübertragung nach a) den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha = 9500 \frac{\text{W}}{\text{K m}^2}$!
- Wieviele Brennelemente sind erforderlich, wenn der Versuchsreaktor eine thermische Leistung von $\dot{Q} = 50 \text{ MW}$ abgibt? Benutzen Sie für die Austrittstemperatur des Wassers den Wert $\vartheta_{W2} = 270^\circ\text{C}$.

Aufgabe 3: *Entfeuchtung der Luft in einem Schwimmbad*

14 von 50 Punkten

In einem Hotelschwimmbad mit Panoramaverglasung kondensiert an den inneren Fensterscheiben der Wasserdampf aus, so dass diese sehr häufig beschlagen sind und keinen Durchblick mehr bieten. Diesem Mangel soll durch den Einbau einer Klimaanlage abgeholfen werden. Dazu muss der im Entfeuchter der Anlage abzuführende Massenstrom \dot{m}_W , der an der Oberfläche des Schwimmbeckens verdunstet, für den folgenden Auslegungszustand bestimmt werden:

Das Wasser im Schwimmbecken (Wasseroberfläche $A_W = 40 \text{ m}^2$) hat eine Temperatur $\vartheta_W = 24^\circ\text{C}$, die Lufttemperatur beträgt $\vartheta_L = 26^\circ\text{C}$. Die Innenseite der Fensterscheiben soll bis zu einer Oberflächentemperatur von $\vartheta_F = 10^\circ\text{C}$ beschlagfrei bleiben, d.h. $p_w = p_s(10^\circ\text{C}) = 29,82 \text{ mbar}$.

Für die Wärmeübertragung an der Oberfläche des randvoll gefüllten Schwimmbeckens gilt für die Nußelt-Zahl die Beziehung

$$Nu = C_1 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} .$$

Im vorliegenden Fall ist der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Luft und Wasseroberfläche zu $\alpha = 5 \frac{\text{W}}{\text{K m}^2}$ bestimmt worden.

Stoffeigenschaften des Wassers:

spezifische Gaskonstante

$$R_i = 461,52 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Dampfdruck

$$\text{bei } \vartheta = 24^\circ\text{C}: p_s = 29,82 \text{ mbar}$$

$$\text{bei } \vartheta = 10^\circ\text{C}: p_s = 12,28 \text{ mbar}$$

Verdampfungsenthalpie

$$\text{bei } \vartheta = 24^\circ\text{C}: \Delta h_V = 2444 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Diffusionskoeffizient Wasserdampf/Luft

$$D = 24,80 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Stoffeigenschaften der Luft:

kinematische Viskosität

$$\nu_L = 15,92 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Prandtl-Zahl

$$Pr_L = 0,715$$

Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_L = 26,13 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{K m}}$$

Der Gesamtdruck in der Schwimmhalle beträgt $p = 1 \text{ bar}$.

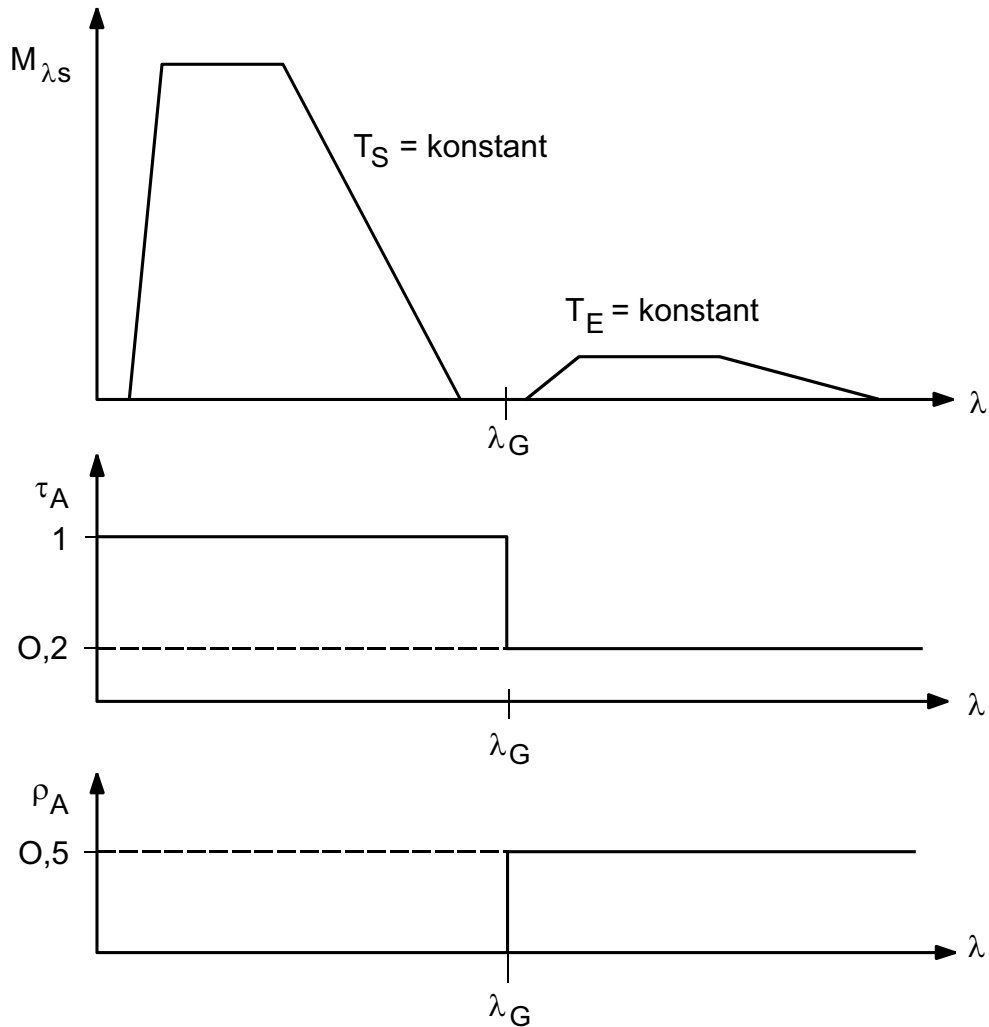
- Wie groß ist der Stoffübergangskoeffizient $\beta_{\text{einseitig}}$ für die Verdunstung des Wassers an der Beckenoberfläche?
- Welcher Massenstrom \dot{m}_W des Wassers verdunstet an der Wasseroberfläche? Benutzen Sie den Stoffübergangskoeffizienten $\beta_{\text{einseitig}} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$!
- Welcher Wärmestrom \dot{Q}_L wird konvektiv von der Luft auf die Wasseroberfläche übertragen?
- Welcher Wärmestrom \dot{Q}_{ges} muss im stationären Betriebszustand von der Schwimmbadheizung an das Wasser abgegeben werden, um dort die Wassertemperatur auf den konstanten Wert $\vartheta_W = 24^\circ\text{C}$ zu halten?

Hinweis: Boden und Wände des Schwimmbades sind adiabat. Strahlungseinflüsse spielen ebenfalls keine Rolle!

Aufgabe 4: Treibhauseffekt

6 von 50 Punkten

Bekannt sind in grober Näherung die hemisphärischen spektralen spezifischen Ausstrahlungen M_{λ_s} der schwarzen Körper Sonne ($T_S = 5780 \text{ K}$) und Erde ($T_E = 300 \text{ K}$) sowie das Strahlungsverhalten der Atmosphäre mit dem Transmissionsgrad τ_A und dem Reflexionsgrad ρ_A in den unten gegebenen schematischen Darstellungen.



- Welcher Anteil der Sonnenstrahlung wird durch die Atmosphäre zur Erde hin durchgelassen und welcher Anteil wird in der Atmosphäre absorbiert (Angaben in %)?
- Welche Anteile der Wärmestrahlung von der Erde werden von der Atmosphäre durchgelassen, reflektiert und absorbiert (Angabe in %)?
- Wie groß ist der Emissionskoeffizient der Atmosphäre im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung von der Erde?
- Erläutern Sie kurz (1 Punkt) anhand Ihrer Antworten zu a) und b) den Treibhauseffekt!

Numerische Ergebnisse
zur Klausur Wärme- & Stoffübertragung

Aufgabe 1: *Kaffeetasse* 15 von 50 Punkten

- a) $\alpha = 7,403 \frac{W}{Km^2}$
- b) $\dot{Q}_{ges} = 0,1355 W$
- d) $\delta_A = 4,71 mm$

Aufgabe 2: *Wärmeübertragung in einem Druckwasserreaktor* 15 von 50 Punkten

- a) $\alpha = 9435 \frac{W}{Km^2}$
- b) $\vartheta_{W2} = 267,8^\circ C$
- c) Anzahl der Brennelemente: 383

Aufgabe 3: *Entfeuchtung der Luft in einem Schwimmbad* 14 von 50 Punkten

- a) $\beta_{einseitig} = 4,677 \cdot 10^{-3} m/s$
- b) $\dot{m}_W = 2,462 \cdot 10^{-3} kg/s$
- c) $\dot{Q}_L = 400 W$
- d) $\dot{Q}_{ges} = 5618 W$

Aufgabe 4: *Zustandsgleichung* 6 von 50 Punkten

Lösung: Direkt ablesbar aus schematischen Darstellungen