

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: *Wärmeleitung*

10 von 50 Punkten

Ein Strömungskanal der Länge $L = 2,0 \text{ m}$ besteht aus einem inneren Rohrstück A und einem äußeren dicht aufgesetzten keramischen Schutzzyylinder B .

Abmessungen und Stoffeigenschaften:

| | |
|---------------------|--|
| Rohrstück A | Stahl: homogener Werkstoff |
| Durchmesser | $d_{A,i} = 4 \text{ cm}; d_{A,a} = 5 \text{ cm}$ |
| Wärmeleitfähigkeit | $\lambda_A = 50 \frac{\text{W}}{\text{K m}}$ |
| Schutzzyylinder B | Keramik: homogener Werkstoff |
| Durchmesser | $d_{B,i} = 5 \text{ cm}; d_{B,a} = 7 \text{ cm}$ |
| Wärmeleitfähigkeit | $\lambda_B = 1 \frac{\text{W}}{\text{K m}}$ |

Berechnen Sie:

- den Wärmeleitwiderstand $R_{\lambda,radial}$ in radialer Richtung und
- den Wärmeleitwiderstand $R_{\lambda,axial}$ in axialer Richtung!

Nachfolgend wird nur die radiale Wärmeleitung betrachtet.

Im stationären Betriebszustand sind in dem betrachteten kurzen Abschnitt des Strömungskanals ($L = 2,0 \text{ m}$) die Temperaturen an der Innenseite und an der Außenseite konstant: $\vartheta_{A,i} = 800^\circ\text{C}$; $\vartheta_{B,a} = 120^\circ\text{C}$.

- Welcher Wärmestrom \dot{Q}_{radial} fließt durch die Wand? Verwenden Sie $R_{\lambda,radial} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ K/W}$.
- Wie groß ist die Temperatur $\vartheta_{A,a} = \vartheta_{B,i}$ an der Grenzfläche zwischen den beiden Hohlzylindern (Kein Kontaktwiderstand durch Zwischenräume)? Verwenden Sie $\dot{Q}_{radial} = 25000 \text{ W}$.

- e) Skizzieren Sie den Temperaturverlauf $\vartheta(r)$ in radialer Richtung. Welcher mathematische Funktionstyp beschreibt den Verlauf in den einzelnen Schichten?

Aufgabe 2: *Stofftransportprobleme*

13 von 50 Punkten

1. Charakterisieren Sie für die nachfolgend aufgeführten Stofftransportprobleme die Stofftransportart, ggf. die Strömungsform sowie die Geometrie und beantworten Sie die zusätzlich gestellten Fragen.

- a) Eis (zugefrorene Oberfläche eines Sees) sublimiert an einem kalten, sehr windigen Wintertag. Bekannt sind der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 20 \frac{W}{m^2K}$ sowie folgende Stoffeigenschaften von Eis und Luft:

| | | |
|-------|-------------------------|----------------------------------|
| Stoff | $\rho / \frac{kg}{m^3}$ | c bzw. $c_p / \frac{kJ}{kg K}$ |
|-------|-------------------------|----------------------------------|

| | | |
|-----|-------|------|
| Eis | 917,0 | 2,04 |
|-----|-------|------|

| | | |
|------|-------|-------|
| Luft | 1,377 | 1,007 |
|------|-------|-------|

- a1) Berechnen Sie den Stoffübergangskoeffizienten β .
a2) Wäre eine Korrektur $\beta \rightarrow \beta_{einseitig}$ erforderlich? Begründung!
- b) Eine ruhende Flüssigkeit (Stoff A) steht in Stoffaustausch mit einem ruhenden gasförmigen Gemisch bestehend aus den Komponenten A und B mit den Molmassen $M_A = M_B = 17,5 \frac{g}{mol}$. Berechnen Sie den konvektiven Stoffübergangskoeffizienten β .
- c) In einem kugelförmigen Druckbehälter aus Chrom-Nickel-Stahl ist ein wasserstoffhaltiges Gas unter hohem Druck gespeichert. Nach 1 *Jahr* Standzeit ist der Partialdruck des Wasserstoffes messbar gesunken, ohne dass eine Leckage festgestellt werden kann. Geben Sie die Ursache an!
- d) In einem Trockenkeller soll aufgehängte, nasse Wäsche bei geschlossenen Fenstern und Türen trocknen. Warum wäre ein Öffnen und damit verbunden ein Durchzug sinnvoller?

2. Erläutern Sie den Unterschied zwischen einer Verdampfung und einer Verdunstung.

Aufgabe 3: *Verdampfung von Wasser in einem Dampferzeuger* 12 von 50 Punkten

In die als Rohrbündel angeordneten Siederohre eines Abhitzekessels tritt der Massenstrom $\dot{m}_W = 2000 \text{ kg/h}$ siedenden Wassers beim Druck $p = 6 \text{ bar}$ ein und verlässt sie nach der isobaren Verdampfung im Zustand des gesättigten Dampfes. Die Wärmezufuhr an die Rohre erfolgt nur durch konvektive Wärmeübertragung von heißen Abgasen A , die mit der mittleren Temperatur $\vartheta_A = 600^\circ\text{C}$ zur Verfügung stehen: Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_A = 80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Die Anlage befindet sich im stationären Betriebszustand.

Abmessungen und Stoffeigenschaften der Siederohre:

| | |
|--------------------|--|
| Länge | $L = 2,00 \text{ m}$ |
| Innendurchmesser | $d_i = 0,04 \text{ m}$ |
| Außendurchmesser | $d_a = 0,05 \text{ m}$ |
| Wärmeleitfähigkeit | $\lambda_S = 52,0 \frac{\text{W}}{\text{K m}}$ |

Eigenschaften des Wassers im Phasengleichgewicht:

$$p = 6 \text{ bar}; \quad \vartheta_s = 158,84^\circ\text{C}; \quad h' = 670,1 \text{ kJ/kg}; \quad h'' = 2755,2 \text{ kJ/kg}$$

1. Berechnung unter Vernachlässigung des Wärmeübergangswiderstandes auf der Wasserseite der Siederohre (verdampfendes Wasser):
 - a) Welche mittlere Wärmestromdichte \dot{q}_1 (bezogen auf die Innenfläche der Siederohre) ist bei der konvektiven Wärmeübertragung zu erwarten?
 - b) Wieviele parallele Siederohre muss das Rohrbündel haben, damit der geforderte Massenstrom \dot{m}_W des Wassers verdampft wird? Verwenden Sie $\dot{q}_1 = 44000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.
2. Berücksichtigung der konvektiven Wärmeübertragung bei der Blasenverdampfung in den Siederohren:

Für die Blasenverdampfung gilt näherungsweise

$$\frac{\alpha_B}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} = 1,95 \cdot \left(\frac{\dot{q}}{\text{W/m}^2} \right)^{0,72} \cdot \left(\frac{p}{\text{bar}} \right)^{0,24},$$

wobei nach b) $\dot{q} = \dot{q}_1 = 44000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ verwendet werden soll.

- c) Wie groß ist die Temperaturdifferenz ($\vartheta_i - \vartheta_s$) zwischen der inneren Heizfläche der Rohre und der Siedetemperatur des Wassers?
- d) Wie groß ist die Wärmestromdichte \dot{q}_2 (bezogen auf die Innenfläche der Siederohre) unter Berücksichtigung des Wärmeübergangswiderstandes auf der Wasserseite? Verwenden Sie aus Teil 1 nach a) $\left(\frac{1}{k A} \right)_1 = 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{K}}{\text{W}}$ und aus Teil 2 nach c) $\alpha_B = 6500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

Aufgabe 4: Wärmeabgabe eines zylindrischen Kupferkabels

15 von 50 Punkten

Ein isoliertes, zylindrisches Kupferkabel ($d = 6 \text{ cm}$) verläuft als elektrische Leitung waagrecht durch einen geschlossenen Raum. Es steht im Wärmeaustausch mit der umgebenden ruhenden Luft (Konvektion) und mit den umgebenden Raumwänden (Strahlung).

Temperatur des Kabels (äußere Mantelfläche): $\vartheta_W = 40^\circ\text{C}$

Temperatur der Raumluft: $\vartheta_L = 20^\circ\text{C}$

Temperatur der Raumwände: $\vartheta_R = 15^\circ\text{C}$

Nachfolgend ist die Wärmeabgabe des stromdurchflossenen Kabels durch Konvektion und Strahlung zu berechnen und miteinander zu vergleichen.

1. Wärmeübertragung durch Konvektion

- a) Wie groß ist der Wärmeübergangskoeffizient α_K infolge der Konvektion?
- b) Welchen Wärmestrom \dot{Q}_K gibt das Kabel je m Länge durch Konvektion an die umgebende Luft ab?

2. Wärmeübertragung durch Strahlung

Das Kabel (System 1) wird von den Raumwänden (System 2) vollkommen umschlossen, wobei hinsichtlich der Flächen $A_2 \gg A_1$ gilt. Die Mantelfläche des Kabels soll als grauer Strahler mit dem Emissionskoeffizienten $\varepsilon = 0,80$ angesehen werden.

- c) Wie groß sind die Sichtfaktoren F_{11} , F_{12} , F_{21} und F_{22} ? Begründen Sie Ihre Angaben!
- d) Welcher Wärmestrom \dot{Q}_{Str} wird zwischen dem Kabel und den Raumwänden je m Länge durch Strahlung ausgetauscht?
- e) Wie groß ist der Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient α_{Str} , wenn man ihn in Anlehnung an die konvektive Wärmeübertragung durch die folgende Beziehung definiert?

$$\dot{Q}_{Str} = \alpha_{Str} \cdot A \cdot (\vartheta_W - \vartheta_L)$$

3. Vergleich von Konvektion und Strahlung

Geben Sie die prozentuale Aufteilung des insgesamt übertragenen Wärmestroms auf die Wärmetransportarten an!

Numerische Ergebnisse WuSt F2004

Aufgabe 1: *Wärmeleitung*

- a) $R_{\lambda,radial} = 2,7131 \cdot 10^{-2} \text{ K/W}$
- b) $R_{\lambda,axial} = 53,7232 \text{ K/W}$
- c) Wärmestrom $\dot{Q}_{radial} = 25185,2 \text{ W}$
- d) Temperatur $\vartheta_{A,a} = \vartheta_{B,i} = 789,4^\circ\text{C}$ an der Grenzfläche zwischen den beiden Hohlzylindern

Aufgabe 2: *Stofftransportprobleme*

- 1. a) Stoffübergangskoeffizient $\beta = 0,0144 \text{ m/s}$
- b) konvektiver Stoffübergangskoeffizienten $\beta = 0$
- c) Diffusion

Aufgabe 3: *Verdampfung von Wasser in einem Dampferzeuger*

- a) mittlere Wärmestromdichte $\dot{q}_1 = 43740,6 \text{ W/m}^2$
- b) Rohrbündel muss 105 Siederohre haben.
- c) Temperaturdifferenz $(\vartheta_i - \vartheta_s) = 6,66 \text{ K}$
- d) Wärmestromdichte $\dot{q}_2 = 43222 \text{ W/m}^2$

Aufgabe 4: *Wärmeabgabe eines zylindrischen Kupferkabels*

- 1. Wärmeübertragung durch Konvektion
 - a) Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_K = 4,9312 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$
 - b) Wärmestrom $\dot{Q}_K/L = 18,59 \text{ W/m}$
- 2. Wärmeübertragung durch Strahlung
 - c) Sichtfaktoren $F_{11} = 0$, $F_{12} = 1$, $F_{21} = \frac{A_1}{A_2}$ und $F_{22} = 1 - \frac{A_1}{A_2}$
 - d) Wärmestrom $\dot{Q}_{Str}/L = 23,276 \text{ W/m}$
 - e) Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{Str} = 6,174 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$
- 3. Konvektion 44,4 %, Strahlung 55,6 %