Institut für Thermodynamik
Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr. Jürgen Köhler

17. März 2015

# Klausur zur Vorlesung

# Wärme- und Stoffübertragung

Für alle Aufgaben gilt: Der Rechen- und Gedankengang muss erkennbar sein!
Interpolationsvorschriften und Stützstellen sind anzugeben.
Hilfsmittel sind zugelassen, Verwenden Sie, sofern benötigt, die Gröberdiagramme aus dem Skript. Die Bearbeitungszeit beträgt 90 Minuten.
Falls Ersatzergebnisse angegeben sind, müssen diese auf jeden Fall verwendet werden.

## **Aufgabe 1:** *Abkühlung von Stahl in einem Wasserbad* — 11 von 50 Punkten

Ein Stahlbarren wird in ein Wasserbad eingetaucht, so dass er vollkommen von Wasser umgeben ist. Das Wasserbad hat die konstante Temperatur von $t_W = 100°C$.

Folgende Werte sind bekannt:

| $\lambda_{Stahl}$ | $c_{p,Stahl}$ | $\rho_{Stahl}$ | $\lambda_{Wasser}$ | $\rho_{Wasser}$ |
|---|---|---|---|---|
| $20\,\frac{W}{K\,m}$ | $0{,}47\,\frac{J}{g\,K}$ | $7900\,\frac{kg}{m^3}$ | $0{,}68\,\frac{W}{K\,m}$ | $960\,\frac{kg}{m^3}$ |

a) Welche Form des Siedens tritt bei einem Stahlbarren mit 480°C Oberflächentemperatur auf? Welche Form träte auf, wenn der Stahlbarren eine Oberflächentemperatur von nur noch 102°C hätte.

Eine Stahlplatte mit großer Abmessung in x- und y-Richtung im Verhältnis zu ihrer Dicke $d = 20\,cm$, die zum Zeitpunkt $t_0$ überall die einheitliche Temperatur von $480°C$ aufweist, wird in das Wasserbad getaucht (Mittlerer Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 4500\frac{W}{m^2K}$).

b) Wie lange dauert es, bis sich ein Punkt, der $2\,cm$ von der Plattenmitte entfernt liegt, auf eine Temperatur von $180°C$ abgekühlt hat?

c) Wie lange dauert es, bis sich ein Punkt, der $1\,cm$ von der Oberfläche entfernt liegt, auf eine Temperatur von $478°C$ abgekühlt hat?

**Lösung:**

a)

| | | |
|---|---|---|
| $T_W =$ | 600 °C | 102 °C |
| $T_{sat} =$ | 100 °C | 100 °C |
| $\Delta T =$ | 500 °C | 2 °C |
| Siedeform: | Filmverdampfung | Freie Konvektion |

b) Es handelt sich um eine eindimensionale instationäre Wärmeleitung in einer ebenen Platte endlicher Dicke.

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_{Stahl}} = \frac{4500\,\frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0{,}1\,m}{20\,\frac{W}{K \cdot m}} = 22{,}5 \qquad \frac{1}{Bi} = 0{,}04444$$

$$a = \frac{\lambda_{Stahl}}{c_{p,Stahl} \cdot \rho_{Stahl}} = \frac{20\,\frac{W}{K \cdot m}}{470\,\frac{J}{kg \cdot K} \cdot 7900\,\frac{kg}{m^3}} = 5{,}38648 \cdot 10^{-6}\,\frac{m^2}{s}$$

$$\zeta = \frac{x}{L} = \frac{0{,}02\,m}{0{,}1\,m} = 0{,}2$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_c - T_\infty} = 0{,}95 \quad \text{(abgelesen)}$$

$$T_c = \frac{T - T_\infty}{0{,}95} + T_\infty = \frac{453{,}15\,K - 373{,}15\,K}{0{,}95} + 373{,}15\,K = 457{,}3605\,K$$

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \frac{457{,}3605\,K - 373{,}15\,K}{753{,}15\,K - 373{,}15\,K} = 0{,}2216$$

$$Fo = 1 \quad \text{(abgelesen)}$$

$$t = \frac{Fo \cdot L^2}{a} = \frac{1 \cdot (0{,}1\,m)^2}{5{,}38648 \cdot 10^{-6}\,\frac{m^2}{s}} = 1856{,}5\,s$$

c) Das Problem kann als halbunendlicher Körper angesehen werden.

$$\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0} = \frac{751{,}15\,K - 753{,}15\,K}{373{,}15\,K - 753{,}15\,K} = 0{,}005263$$

Interpolation zwischen $erfc(1{,}9) = 0{,}00721$ und $erfc(1{,}9) = 0{,}004678$ ergibt $erfc(1{,}9769) = 0{,}005263$ bzw. $x = 1{,}9769$.

$$t = \left(\frac{l}{x}\right)^2 \cdot \frac{1}{4 \cdot a} = \left(\frac{0{,}01\,m}{1{,}9769}\right)^2 \cdot \frac{1}{4 \cdot 5{,}38648 \cdot 10^{-6}\,\frac{m^2}{s}} = 1{,}1876\,s$$

**Aufgabe 2:** *Beheizte Silberkugel* 15 von 50 Punkten

Eine Kugel mit einer Oberfläche von $A = 201\,cm^2$ hängt an einem dünnen Draht in ruhender Luft in einem großen geschlossenen Raum. Durch den Draht wird die Kugel mit elektrischem Strom versorgt, so dass die Kugel von innen beheizt werden kann. Die Leistungsaufnahme der Heizung beträgt $\dot{W}_{el} = 15\,W$.

Die Kugel ist aus Silber und soll aufgrund der guten thermischen Leitfähigkeit von Silber stets eine einheitliche Temperatur haben. Der Emissionskoeffizient der angerauten Kugeloberfläche beträgt $\varepsilon = 0{,}25$.

Beim Einschalten der Heizung hat die Kugel die gleiche Temperatur wie die umgebende Luft $t_1 = t_U = 20°C$. Nach einer langen Zeit stellt sich eine Temperatur der Kugel von $t_2 = 100°C$ ein.

a) Wie groß ist der Wärmeübertragungskoeffizient an der Oberfläche der Kugel nach langer Zeit?

b) Welche einheitliche Temperatur haben die Wände des Raums?

c) Wie lange dauert es nach dem Einschalten der Heizung, bis die Kugel eine Temperatur von 25°C hat? (Hinweis: Verwenden Sie den unter a) berechneten Wärmeübergangskoeffizienten. Gehen Sie dabei davon aus, dass die Kugel inklusive der Heizung vollständig aus Silber besteht und vernachlässigen Sie hier die Wärmeübertragung durch Strahlung).

**Lösung:**

a)

$$D = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{0{,}0201\,m^2}{\pi}} = 0{,}07999\,m$$

$$Pr = 0{,}7$$

$$Gr = \frac{\beta \cdot (T_2 - T_1) \cdot g \cdot D^3}{\nu^2} = \frac{(373{,}15\,K - 293{,}15\,K) \cdot 9{,}81\,\frac{m}{s^2} \cdot (0{,}07999\,m)^3}{293{,}15\,K \cdot (1{,}9258 \cdot 10^{-5}\,\frac{m^2}{s})^2}$$

$$Gr = 3694239{,}3399$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = 3694239{,}3399 \cdot 0{,}7 = 2585967{,}5380$$

$$Nu = 2 + 0{,}56 \cdot \sqrt[4]{Ra \cdot \left(\frac{Pr}{Pr + 0{,}846}\right)}$$

$$Nu = 2 + 0{,}56 \cdot \sqrt[4]{2585967{,}5380 \cdot \left(\frac{0{,}7}{0{,}7 + 0{,}846}\right)} = 20{,}4211$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} = \frac{20{,}4211 \cdot 0{,}02858\,\frac{W}{m \cdot K}}{0{,}07999\,m} = 7{,}2971\,\frac{W}{m^2 \cdot K}$$

b)

$$\dot{Q}_{konv} = \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_1) = 7{,}2971\,\frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0{,}0201\,m^2 \cdot (373{,}15\,K - 293{,}15\,K) = 11{,}7337\,W$$

$$\dot{Q}_{Str} = \dot{W}_{el} - \dot{Q}_{konv} = 3{,}2663\,W$$

$$T_{Wand} = \sqrt[4]{T_2^4 - \frac{\dot{Q}_{Str}}{A \cdot \varepsilon \cdot \sigma}} = \sqrt[4]{(373{,}15\,K)^4 - \frac{3{,}2663\,W}{0{,}0201\,m^2 \cdot 0{,}25 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-6}\,\frac{W}{m^2 \cdot K^4}}}$$

$$T_{Wand} = 298{,}3582\,K = 25{,}2082\,°C$$

c) Allgemein gilt:

$$\dot{W}_{el} = \dot{Q}_{WL} + \dot{Q}_{Kon} = m \cdot c_p \cdot \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + \alpha \cdot A \cdot (T - T_u)$$

Nach $\mathrm{d}T$ und $\mathrm{d}t$ trennen:

$$\left(\dot{W}_{el} - \alpha \cdot A \cdot (T - T_u)\right) \mathrm{d}t = m \cdot c_p \cdot \mathrm{d}T$$

Nach d$t$ auflösen:

$$\mathrm{d}t = \frac{m \cdot c_p}{\alpha \cdot A} \cdot \frac{1}{\frac{\dot{W}_{el}}{\alpha \cdot A} + T_u - T} \cdot \mathrm{d}T$$

Beide Seiten integrieren mit $\int_t^{t_0}$ bzw. $\int_{T_u}^{T}$

$$\Big[\ t\ \Big]_{t_0}^{t} = \frac{m \cdot c_p}{\alpha \cdot A} \cdot \left[ - \ln\left( \frac{\dot{W}_{el}}{\alpha \cdot A} + T_u - T \right) \right]_{T_U}^{T}$$

Umstellen und Werte einsetzen:

$$\begin{aligned}
t &= -\frac{m \cdot c_p}{\alpha \cdot A} \cdot \left( \ln\left( \frac{\dot{W}_{el}}{\alpha \cdot A} + T_u - T \right) - \ln\left( \frac{\dot{W}_{el}}{\alpha \cdot A} \right) \right) \\
&= -\frac{m \cdot c_p}{\alpha \cdot A} \cdot \ln\left( \frac{\frac{\dot{W}_{el}}{\alpha \cdot A} + T_u - T}{\frac{\dot{W}_{el}}{\alpha \cdot A}} \right) \\
&= -\frac{m \cdot c_p}{\alpha \cdot A} \cdot \ln\left( 1 - \frac{\alpha \cdot A}{\dot{W}_{el}} \cdot (T - T_u) \right) \\
&= -\frac{2{,}8136\, kg \cdot 235\, \frac{J}{kg \cdot K}}{7{,}2971\, \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0{,}0201\, m^2} \cdot \ln\left( 1 - \frac{7{,}2971\, \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0{,}0201\, m^2}{15\, W} \cdot (298{,}15\, K - 293{,}15\, K) \right) \\
&= -4507{,}9466\, s \cdot \ln(0{,}9511) \\
&= 225{,}966\, s
\end{aligned}$$

**Aufgabe 3:** *Kohlenstoffdioxid in einer Cola-Flasche aus PET* 15 von 50 Punkten

Eine Colaflasche aus PET soll vereinfacht als Zylinder mit dem Außendurchmesser $d_a = 5{,}3\,cm$ und einer Wandstärke von 270 Mikrometern betrachtet werden. Das Innenvolumen der Flasche beträgt $V_i = 0{,}51\,l$. Für Versuchszwecke wird die Flasche nicht mit Cola, sondern ausschließlich mit Kohlenstoffdioxid gefüllt. Der Druck in der Flasche beträgt $p_i = 3\,bar$. Der Umgebungsdruck beträgt $p_u = 1\,bar$. In der Umgebungsluft hat $CO_2$ einen Anteil von 400 ppm, auf eine Million Moleküle kommen also 400 $CO_2$-Moleküle. Gehen Sie davon aus, dass die Gesamt- bzw. Partialdrücke der Gasphase identisch sind mit denen im PET unmittelbar an der Oberfläche. Die Temperatur von Flasche und Umgebung beträgt $t = 25°C$.

Bekannt sind der Diffusionskoeffizient von $CO_2$ in PET $D_{CO_2,PET} = 2{,}1 * 10^{-13}\,\frac{m^2}{s}$, der Diffusionskoeffizient von $CO_2$ in Metallfolie $D_{CO_2,M} = 9{,}4 * 10^{-15}\,\frac{m^2}{s}$ und die Molmassen $M_{CO_2} = 44{,}1\,\frac{g}{mol}$ und $M_{Luft} = 28{,}96\,\frac{g}{mol}$.

a) Ist der Verlauf der $CO_2$-Konzentration im Zylindermantel linear?

b) Wieviel Gramm $CO_2$ diffundieren in einer Stunde durch den Zylindermantel in die Umgebung?

Um die Diffusion zu reduzieren und so die Qualität der Cola auch nach langer Lagerung noch zu gewährleisten, wird eine neue Flasche entwickelt, deren Innenmaße identisch mit denen der vorherigen Flasche sind, deren Wand aber aus zwei Schichten besteht: 270 Mikrometer PET und zusätzlich außen eine 150 Mikrometer dicke Metallfolie.

c) Wieviel Gramm $CO_2$ diffundieren nun pro Stunde durch den Zylindermantel?

d) Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf der $CO_2$-Konzentration in der Wand der neuen Flasche!

e) Wie groß ist die $CO_2$-Konzentration an der Grenze zwischen PET und Metallfolie?

**Lösung:**

a) Nein, im Zylindermantel nimmt die Diffusionsfläche mit zunehmendem Radius zu. Bei einem konstanten Diffusionsmassenstrom über die Zylinderwand bedeutet dies eine logarithmisch abnehmende $CO_2$-Konzentration mit zunehmendem Radius.

b)

$$d_i = d_a - 2 \cdot d_w = 0{,}053\,m - 2 \cdot 0{,}00027\,m = 0{,}05246\,m$$

$$h_i = \frac{V_i}{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2} = \frac{5{,}1 \cdot 10^{-4}\,m^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (0{,}05246\,m)^2} = 0{,}2360\,m$$

$$A_i = \pi \cdot d_i \cdot h_i = \pi \cdot 0{,}05246\,m \cdot 0{,}2360\,m = 0{,}0389\,m^2$$

$$p_{CO_2,a} = \tfrac{400}{1000000} \cdot p_a = 0{,}0004 \cdot 1 \cdot 10^5\,Pa = 40\,Pa$$

$$R_{PET} = \frac{\ln(\frac{d_a}{d_i})}{2 \cdot \pi \cdot D_{CO_2,PET} \cdot h_i} = \frac{\ln(\frac{0{,}053\,m}{0{,}05246\,m})}{2 \cdot \pi \cdot 2{,}1 \cdot 10^{-13}\,\frac{m^2}{s} \cdot 0{,}2360\,m} = 3{,}2894 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3}$$

$$\dot{n}_{CO_2} = \frac{p_i - p_{CO_2,a}}{R_{PET} \cdot R \cdot T} = \frac{3 \cdot 10^5\,Pa - 40\,Pa}{3{,}2894 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3} \cdot 8{,}3143\,\frac{J}{mol \cdot K} \cdot 298{,}15\,K}$$

$$\dot{n}_{CO_2} = 3{,}6786 \cdot 10^{-9}\,\frac{mol}{s}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{n}_{CO_2} \cdot M_{CO_2} \cdot 3600\frac{s}{h} = 3{,}6786 \cdot 10^{-9}\,\frac{mol}{s} \cdot 0{,}0441\frac{kg}{mol} \cdot 3600\frac{s}{h} = 5{,}8402 \cdot 10^{-7}\,\frac{kg}{h}$$

c)

$$d_{a,MF} = d_{a,PET} + 2 \cdot d_{MF} = 0{,}053\,m + 2 \cdot 150\,\mu m = 0{,}05303\,m$$

$$R_{MF} = \frac{\ln(\frac{d_{a,MF}}{d_{a,PET}})}{2 \cdot \pi \cdot D_{CO_2,MF} \cdot h_i} = \frac{\ln(\frac{0{,}05303\,m}{0{,}053\,m})}{2 \cdot \pi \cdot 9{,}4 \cdot 10^{-15}\,\frac{m^2}{s} \cdot 0{,}2360\,m} = 4{,}0606 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3}$$

$$R_{ges} = R_{PET} + R_{MF} = 3{,}2894 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3} + 4{,}0606 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3} = 7{,}3500 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3}$$

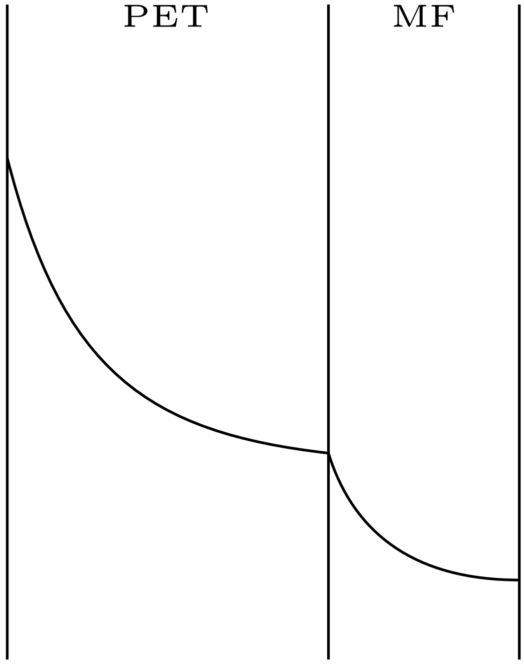
$$\dot{n}_{CO_2,mitMF} = \frac{p_i - p_{CO_2,a}}{R_{ges} \cdot R \cdot T} = \frac{3 \cdot 10^5\,Pa - 40\,Pa}{7{,}3500 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3} \cdot 8{,}3143\,\frac{J}{mol \cdot K} \cdot 298{,}15\,K}$$

$$\dot{n}_{CO_2,mitMF} = 1{,}6463 \cdot 10^{-9}\,\frac{mol}{s}$$

$$\dot{m}_{CO_2,mitMF} = \dot{n}_{CO_2,mitMF} \cdot M_{CO_2} \cdot 3600\frac{s}{h} = 1{,}6463 \cdot 10^{-9}\,\frac{mol}{s} \cdot 0{,}0441\frac{kg}{mol} \cdot 3600\frac{s}{h}$$

$$\dot{m}_{CO_2,mitMF} = 2{,}6137 \cdot 10^{-7}\,\frac{kg}{h}$$

d)




e)

$$c_i = \frac{p_i}{R \cdot T} = \frac{3 \cdot 10^5\,Pa}{8{,}3143\,\frac{J}{mol \cdot K} \cdot 298{,}15\,K} = 121{,}0254\,\frac{mol}{m^3}$$

$$c_a = \frac{p_{CO_2,a}}{R \cdot T} = \frac{40\,Pa}{8{,}3143\,\frac{J}{mol \cdot K} \cdot 298{,}15\,K} = 0{,}0161\,\frac{mol}{m^3}$$

$$\Delta c = \dot{n}_{CO_2,mitMF} \cdot R_{PET} = 1{,}6463 \cdot 10^{-9}\,\frac{mol}{s} \cdot 3{,}2894 \cdot 10^{10}\,\frac{s}{m^3} = 54{,}1542\,\frac{mol}{m^3}$$

$$c_{PET,MF} = c_i - \Delta c = 121{,}0254\,\frac{mol}{m^3} - 54{,}1542\,\frac{mol}{m^3} = 66{,}8712\,\frac{mol}{m^3}$$

**Aufgabe 4:** *Strahlung* 6 von 50 Punkten

Eine Steinkugel hat einen Durchmesser $D_K = 10\,cm$ und befindet sich im Inneren eines evakuierten, hohlen Würfels mit einer Seitenlänge von $l_W = 25\,cm$, der opak ist und einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 20\%$ hat. Die Oberfläche der Kugel hat einen Emissionskoeffizienten $\varepsilon = 0{,}7$ und zu Beginn eine räumlich konstante Temperatur von $t_K = 200°C$. Der Würfel hat eine räumlich und zeitlich konstante Temperatur von $t_W = 0°C$.

a) Wie groß sind die vier für das Problem relevanten Sichtfaktoren $F_{W,W}$,$F_{W,K}$,$F_{K,W}$,$F_{K,K}$?

b) Wie groß ist der Strahlungswärmestrom, der zu Beginn der Betrachtung von der Kugel auf den Würfel übertragen wird?

c) Dauert das Abkühlen der Kugel von 200°C auf 198°C länger oder kürzer als das Abkühlen von 100°C auf 99°C? (Gehen Sie hier davon aus, die Kugel in beiden Fällen eine räumlich konstante Temperatur hat.)

**Lösung:**

a)

$$A_K = \pi \cdot D_K^2 = \pi \cdot (0{,}1\,m)^2 = 0{,}03142\,m^2$$

$$A_W = 6 \cdot l_W^2 = 6 \cdot (0{,}25\,m)^2 = 0{,}375\,m^2$$

$$F_{K,K} = 0$$

$$F_{K,W} = 1$$

$$F_{W,K} = \frac{A_K}{A_W} \cdot F_{K,W} = \frac{0{,}03142\,m^2}{0{,}375\,m^2} \cdot 1 = 0{,}08378$$

$$F_{W,W} = 1 - F_{W,K} = 1 - 0{,}08378 = 0{,}91622$$

b)

$$\dot{Q}_{Str,KW,0} = \frac{\sigma \cdot (T_K^4 - T_W^4)}{\dfrac{1-\varepsilon_K}{A_K \cdot \varepsilon_K} + \dfrac{1}{A_K \cdot F_{K,W}} + \dfrac{1-\varepsilon_W}{A_W \cdot \varepsilon_W}}$$

$$\dot{Q}_{Str,KW,0} = \frac{5{,}67 \cdot 10^{-6}\,\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot (473{,}15^4 - 273{,}15^4)\,K^4}{\dfrac{1-0{,}7}{0{,}03142\,m^2 \cdot 0{,}7} + \dfrac{1}{0{,}03142\,m^2 \cdot 1} + \dfrac{1-0{,}2}{0{,}375\,m^2 \cdot 0{,}2}} = 44{,}9962\,W$$

c) Berechnung wie in Aufgabenteil b)

$$\dot{Q}_{Str,KW}(T_{K,1} = 471{,}15\,K) = 44{,}1458\,W$$

$$\dot{Q}_{Str,KW}(T_{K,2} = 373{,}15\,K) = 13{,}9592\,W$$

Da im Fall 1 selbst zum Ende des Abkühlvorganges der Nettowärmestrom von der Kugel zur Wand noch mehr als doppelt so groß ist als im Fall 2 zu Beginn, muss die Abkühlung im Fall 1 um 2 K schneller erfolgen als im Fall 2 um 1 K.

**Aufgabe 5 für Klausur mit 4 LP:** 3 von 50 Punkten

Kurzfrage 1 (2 Punkte): Nennen Sie eine in der Vorlesung vorgestellte typische Geschwindigkeit und eine typische Länge, die zur Bestimmung der Reynoldszahl beim Blasensieden verwendet werden kann?

Kurzfrage 2: Die in der Vorlesung vorgestellten dimensionslosen Kennzahlen haben meist eine gut verständliche Bedeutung. Die Reynoldszahl beispielsweise beschreibt ein Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften. Was beschreibt die Nusseltzahl?

**Lösung:**

1.) Geschwindigkeit: scheinbare Geschwindigkeit der Flüssigkeit, die zur Heizplatte strömt. Länge: Abstand zwischen Säulen in denen Dampf durch Flüssigkeit aufsteigt

2.) Die Nußeltzahl ist der dimensionslose negative Temperaturgradient an der Wand.

**Aufgabe 5 für Klausur mit 5 LP:** 3 von 50 Punkten

Kurzfrage 1: Wie unterscheiden sich Theorie und reale Beobachtung der ebenen laminaren Poiseuille-Strömung in Bezug auf Ihre Stabilität?

Kurzfrage 2: Betrachtet wird eine Strömung entlang einer ebenen Platte: Wie verändern sich der lokale Wärmeübergangskoeffizient und die Wandschubspannung am Punkt des laminar/turbulent-Umschlags?

Kurzfrage 3: Wo und warum sind die turbulenten Schwankungsbewegungen kleiner: In der viskosen Unterschicht oder im vollturbulenten Bereich?

**Lösung:**

1.) Die ebene laminare Poiseuille-Strömung wird theoretisch zwar instabil, aber erst bei so starker Strömung, dass diese praktisch längst nicht mehr laminar geblieben, sondern auf offenbar andere Weise turbulent geworden ist.

2.) Der lokale Wärmeübergangskoeffizient und die Wandschubspannung nehmen am Umschlagspunkt deutlich zu.

3.) Aufgrund der Wandnähe sind die turbulenten Schwankungsbewegungen in der viskosen Unterschicht kleiner.