Musterlösung zur Klausur Strömungslehre

1. Aufgabe (8 Punkte)

a) Durch den erhöhten Druck im rechten Luftballon ist auch die Dichte der Luft dort höher als in der Umgebung. Deshalb wirkt auch nach Abzug der Auftriebskraft immer noch eine Kraft $\Delta\rho g V$ in Richtung der Erdschwere auf den rechten Arm der Waage.

b) Eine Rauchlinie ist die konsekutive Verbindungslinie aller Partikel, die einen festgelegten Punkt im Raum passiert haben.

c) KGG für den unbeladenen Fall:
$G_1 = \rho A_G h_1 g$
KGG für den beladenen Fall:
$G_1 + m_{max} g = \rho A_G h_2 g$
aus beiden Gleichungen erhält man:
$\Rightarrow \quad m_{max} = \rho A_G h_2 - \rho A_G h_1 \quad (1)$

Wobei A_G die Gefäßgrundfläche, h_1 die Eintauchtiefe des Gefäßes für den unbeladenen Fall und h_2 für den beladenen Fall ist.

Das vom Wasser eingenommene Volumen bleibt konstant:
$AH - A_G h_1 = A(H + \Delta H) - A_G h_2$
$\Rightarrow \quad A_G h_2 - A_G h_1 = A\Delta H \quad (2)$

Aus (1) und (2) erhält man:
$\Rightarrow \quad m_{max} = \rho A \Delta H$

2. Aufgabe (13 Punkte)

a) Hubweg gegeben: $\xi = \xi_0 \sin \omega t$; daraus folgt für a): $v = \mathrm{d}\xi/\mathrm{d}t$
Instationärer Bernoulli von der linken Wasseroberfläche 1 bis zum Kolbenboden K:

$$
\begin{aligned}
p_a + \rho g H_1 &= p_K + \frac{\rho}{2}\left(\mathrm{d}\xi/\mathrm{d}t\right)^2 + \rho \int_1^K \frac{\partial v}{\partial t}\mathrm{d}s \\
p_K &= p_a + \rho g H_1 - \frac{\rho}{2}\left(\xi_0 \omega \cos \omega t\right)^2 - \rho \frac{\mathrm{d}^2\xi}{\mathrm{d}t^2}\int_{Einlauf}^K \mathrm{d}s \\
p_K &= p_a + \rho g H_1 - \frac{\rho}{2}\xi_0^2 \omega^2 \cos^2 \omega t + \rho \xi_0 \omega^2 \sin \omega t \cdot L
\end{aligned}
$$

Für den minimalen Druck gilt $\sin \omega t = -1$ und $\cos \omega t = 0$, da $\omega t = 3\pi/2$; außerdem gilt $p_K = p_D$ für $\omega = \omega_{max}$:

$$
\begin{aligned}
& p_K - p_a - \rho g H_1 = -\rho L \xi_0 \omega^2 \\
\Rightarrow \quad & \omega^2 = \frac{p_a + \rho g H_1 - p_D}{\rho L \xi_0} \\
\Rightarrow \quad & \omega = 15,33 \frac{1}{\mathrm{s}}
\end{aligned}
$$

b) Hubweg gegeben: $\xi = \xi_0 \sin \omega t$; aber für b): $v = -\mathrm{d}\xi/\mathrm{d}t$
Instationärer Bernoulli vom Kolbenboden K bis zum Rohrleitungsaustritt 2 in der Tiefe H_2 unter der rechten Wasseroberfläche:

$$
\begin{aligned}
p_K + \frac{\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t}\right)^2 &= p_2 + \frac{\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \rho \int_K^2 \frac{\partial v}{\partial t}\mathrm{d}s \\
p_K &= p_a + \rho g H_2 - \rho \frac{\mathrm{d}^2\xi}{\mathrm{d}t^2}\int_K^2 \mathrm{d}s \quad \text{mit} \quad p_2 = p_a + \rho g H_2 \\
p_K &= p_a + \rho g H_2 + \rho L \xi_0 \omega^2 \sin \omega t
\end{aligned}
$$

$p_K = p_{max}$ wird offensichtlich bei $\sin \omega t = 1$ erlangt:

$$
\begin{aligned}
p_{max} &= p_a + \rho g H_2 + \rho L \xi_0 \omega^2 \\
p_{max} &= 2,7 \cdot 10^5 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}
\end{aligned}
$$

c) Der minimale Druck wird bei einem Phasenwinkel von $\omega t = \frac{3}{2}\pi$ erreicht. Für $\omega t = \frac{3}{2}\pi$ ist die Geschwindigkeit jedoch genau gleich null (s. a)). Da die Reibung proportional zur Geschwindigkeit ist, haben die Reibungsverluste zwar einen Einfluß auf die Druckverteilung, jedoch ohne den minimalen Druck zu ändern.

3. Aufgabe (14 Punkte)

a) $Fr < 1$

b) Bernoulli:

$\rho g z + \rho g y + \frac{\rho}{2} v^2 = const$

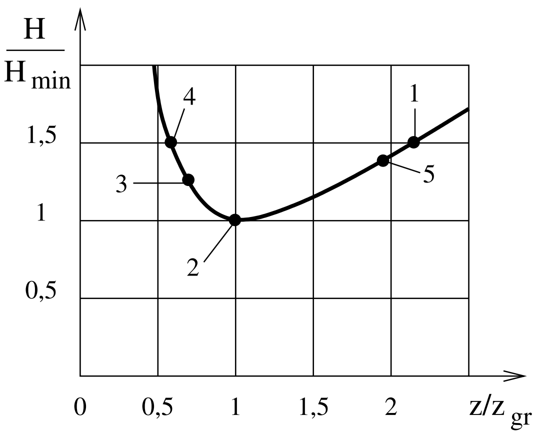
$\Rightarrow \quad z + \frac{v^2}{2g} + y = const$ mit $H = z + \frac{v^2}{2g}$ und $v = \frac{q}{z}$

$\Rightarrow \quad H = z + \frac{q^2}{2gz^2}$

H_{min} : $\frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad \Rightarrow \quad z_{gr} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$

$\Rightarrow \quad H_{min} = z_{gr} + \frac{q^2}{2gz_{gr}^2} = \frac{3}{2}\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$

c) Skizze:



d) Konti:

$v_4 z_4 b = v_V z_V b_V \quad \Rightarrow \quad v_V = v_4 \frac{1}{2 \cdot 0{,}644}$

Bernoulli von 4 bis zur Verengung V:

$\rho g z_4 + \frac{\rho}{2} v_4^2 = \rho g z_V + \frac{\rho}{2} v_V^2$

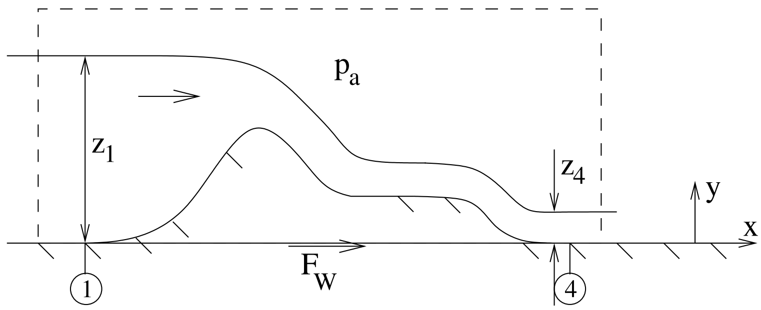
$\Rightarrow \quad (v_4^2 - v_V^2) = 2gz_4 \quad \Rightarrow \quad v_4^2 = \frac{2gz_4}{1 - \frac{1}{4 \cdot 0{,}644^2}}$

$\Rightarrow \quad \frac{v_4^2}{gz_4} = 5,04 \quad \Rightarrow \quad Fr_4 = \frac{v_4}{\sqrt{gz_4}} = 2,24$

e) Mit $y_2 = y_{gr}$, d.h. $H_2/H_{min} = 1$, erhält man auf der Linie $H/H_{min} = 1,5$ aus dem Diagramm für den strömenden Zustand $z_1/z_{gr} = 2,16$ und für den schießenden Zustand $z_4/z_{gr} = 0,583$

$\Rightarrow \quad z_1/z_4 = 3,7$

f) Impulserhaltungssatz (Bilanzhülle):



$$-\rho v_1^2 z_1 b - b\int_0^{z_1} p_1(z)\mathrm{d}z + \rho v_4^2 z_4 b + b\int_0^{z_4} p_4(z)\mathrm{d}z + p_a b(z_1 - z_4) + F_W = 0$$

mit $\quad p_1(z) = p_a + \rho g(z_1 - z) \quad$ und $\quad p_4(z) = p_a + \rho g(z_4 - z)$

$$\Rightarrow \quad F_W = \rho v_1^2 z_1 b - \rho v_4^2 z_4 b + b\rho g\frac{z_1^2}{2} - b\rho g\frac{z_4^2}{2}$$

$$\Rightarrow \quad F_W = \rho b v_4^2\left(\frac{z_4^2}{z_1^2}z_1 - z_4\right) + \rho g b\left(\frac{z_1^2}{2} - \frac{z_4^2}{2}\right) \quad \text{mit} \quad v_1 = v_4\frac{z_4}{z_1} \quad \text{Konti}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{F_W}{\rho g b} = \frac{v_4^2}{g z_4}z_4^2\left(\frac{z_4}{z_1} - 1\right) + z_4^2\left(\frac{z_1^2}{2z_4^2} - \frac{1}{2}\right)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{F_W}{\rho g b} = z_4^2(Fr)^2\left(\frac{z_4}{z_1} - 1\right) + \frac{z_4^2}{2}\left(\frac{z_1^2}{z_4^2} - 1\right)$$

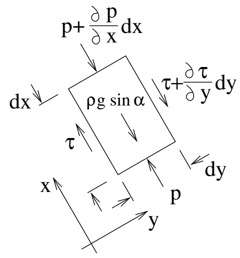
$$\Rightarrow \quad z_4^2 = \frac{F_W}{\rho g b}\left((Fr)^2\left(\frac{z_4}{z_1} - 1\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{z_1^2}{z_4^2} - 1\right)\right)^{-1}$$

$$\Rightarrow \quad z_4 = 0,58\mathrm{m}$$

4. Aufgabe (12 Punkte)

a) Nein.

b) Kräftegleichgewicht in x-Richtung (am Volumenelement):



$$p\mathrm{d}y - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x}\mathrm{d}x\right)\mathrm{d}y + \tau\mathrm{d}x - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y}\mathrm{d}y\right)\mathrm{d}x - \rho_F g \sin\alpha \mathrm{d}x\mathrm{d}y = 0$$

$$\Rightarrow \quad -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial y} - \rho_F g \sin\alpha = 0$$

mit $\dfrac{\partial p}{\partial x} = 0$ und $\tau = -\eta_F \dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$

$$\Rightarrow \quad \frac{\partial \tau}{\partial y} = -\rho_F g \sin\alpha \quad \Rightarrow \quad \tau = -\rho_F g y \sin\alpha + c_1$$

mit RB1 $\tau(d) = \tau_d$: $\quad \tau_d = -\rho_F g d \sin\alpha + c_1 \quad \Rightarrow \quad c_1 = \frac{1}{2}\rho_F g d \sin\alpha$

$$\Rightarrow \quad \tau = -\rho_F g (y - \frac{1}{2}d)\sin\alpha$$

$$\Rightarrow \quad \mathrm{d}u = \frac{\rho_F g \sin\alpha}{\eta_F}(y - \frac{1}{2}d)\mathrm{d}y$$

$$\Rightarrow \quad u = \frac{\rho_F g \sin\alpha}{\eta_F}\left(\frac{y^2}{2} - \frac{yd}{2}\right) + c_2$$

mit RB2 $u(0) = u_W$: $\quad c_2 = u_W$

$$\Rightarrow \quad u = \frac{\rho_F g d^2 \sin\alpha}{2\eta_F}\left(\left(\frac{y}{d}\right)^2 - \frac{y}{d}\right) + u_W$$

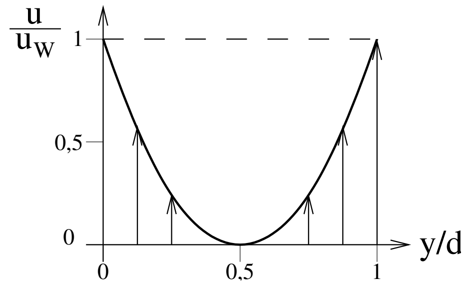
c) Die minimale Geschwindigkeit u liegt bei

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} = 0 \quad \Rightarrow \quad y = \frac{1}{2}d$$

$$u(\frac{d}{2}) = \frac{\rho_F g d^2 \sin\alpha}{2\eta_F}(\frac{1}{4} - \frac{1}{2}) + u_W \geq 0$$

$$u_{W,min} = \frac{\rho_F g d^2 \sin\alpha}{8\eta_F}$$

d) Skizze:



e) Es existieren z.B. Kugelblasen mit innerer Zirkulation (oder elliptische Blasen oder Schirmblasen). Diese Blasenarten werden unterschieden, da sie veränderten Gesetzen für den jeweiligen Widerstandsbeiwert folgen.

5. Aufgabe (10 Punkte)

a) Die Prandtl Zahl ist dann von Bedeutung, wenn die Wärmeübertragung in einer Strömung eine Rolle spielt.

b) 5 Einflußgrößen $(\Delta p, D, \omega, \rho, \dot{Q})$, 3 Grunddimensionen (kg, m, s) $\Rightarrow$ 2 Kennzahlen
Wähle D, ρ und ω als sich wiederholendes Variablenset.

$$K_1 = \Delta p D^\alpha \omega^\beta \rho^\gamma$$
$$1 = \left(\frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}\right) (\text{m})^\alpha \left(\text{s}^{-1}\right)^\beta \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)^\gamma$$
$$\text{kg} \quad : \quad 0 = 1 + \gamma \quad \Rightarrow \quad \gamma = -1$$
$$\text{s} \quad : \quad 0 = -2 - \beta \quad \Rightarrow \quad \beta = -2$$
$$\text{m} \quad : \quad 0 = -1 + \alpha - 3\gamma \quad \Rightarrow \quad \alpha = -2$$
$$\Rightarrow \quad K_1 = \frac{\Delta p}{D^2 \rho \omega^2} \quad \Rightarrow \quad K_1 = \frac{\Delta p}{\rho v^2} = Eu \quad \text{mit} \quad v = D\omega$$

$$K_2 = \dot{Q} D^\alpha \omega^\beta \rho^\gamma$$
$$1 = \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) (\text{m})^\alpha \left(\text{s}^{-1}\right)^\beta \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)^\gamma$$
$$\text{kg} \quad : \quad 0 = \gamma$$
$$\text{s} \quad : \quad 0 = -1 - \beta \quad \Rightarrow \quad \beta = -1$$
$$\text{m} \quad : \quad 0 = 3 + \alpha - 3\gamma \quad \Rightarrow \quad \alpha = -3$$
$$\Rightarrow \quad K_2 = \frac{\dot{Q}}{D^3 \omega} \quad \Rightarrow \quad K_2 = \frac{\bar{u}}{D\omega} = \frac{1}{Sr} \quad \text{mit} \quad \bar{u} = \frac{\dot{Q}}{D^2}, \quad f = \omega$$

c) Die Kennzahlen (Re, M) des Modells müssen gleich den Kennzahlen des Flugzeugs sein.

Die Geschwindigkeit im Windkanal beträgt bei $M = 0,7$:
$u = M \cdot c = 0,7 \cdot \sqrt{\gamma RT} = 228\text{m/s}$

Die dynamische Viskosität im Windkanal beträgt bei $M = 0,7$:
$\eta = (T/T_0)^{0,72} \cdot 18,22 \cdot 10^{-6}\text{kg/sm} = 17,03 \cdot 10^{-6}\text{kg/sm}$

Bei einer vorgegebenen Reynolds Zahl ergibt sich die charakteristische Länge l zu:
$Re = \frac{\rho u l}{\eta} \quad \Rightarrow \quad l = \frac{\eta Re}{\rho u} = 1,58\text{m}$

d) Eine mögliche Maßnahme ist die Verringerung der Temperatur, wodurch die Reynolds Zahl bei konstanter Länge l ansteigt bzw. bei konstanter Reynolds Zahl die Länge l kleiner wird.

6. Aufgabe

a) $F(z) = \frac{a}{2}\cdot z^2 + \frac{a}{2}\left(\frac{R_0}{z}\right)$

$$z = r\cdot e^{i\varphi}$$

$$\Rightarrow F(z) = \frac{a}{2}\cdot r^2\cdot e^{i2\varphi} + \frac{a}{2}\cdot\frac{R_0^4}{r^2}\cdot e^{-i\cdot 2\cdot\varphi}$$

(aus Hinweis): $e^{i2\varphi} = \cos(2\varphi) + i\cdot\sin(2\varphi)$; $e^{-i2\varphi} = \cos(-2\varphi) + i\cdot\sin(-2\varphi) = \cos(2\varphi) - i\cdot\sin(2\varphi)$ 1

$$\Rightarrow \phi(r,\varphi) = R_0^2\cdot\frac{a}{2}\cdot\cos(2\varphi)\cdot\left[\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{R_0}{r}\right)^2\right] \quad 1$$

$$\psi(r,\varphi) = R_0^2\cdot\frac{a}{2}\cdot\sin(2\varphi)\cdot\left[\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 - \left(\frac{R_0}{r}\right)^2\right] \quad 1$$

b) $v_r(r,\varphi) = \frac{\partial\phi}{\partial r} = R_0^2\cdot\frac{a}{2}\cdot\cos(2\varphi)\cdot\left[\frac{2r}{R_0^2} - \frac{2\cdot R_0^2}{r^3}\right]$

$$= a\cdot\cos(2\varphi)\cdot\left[r - \frac{R_0^4}{r^3}\right] \quad 1$$

$v_\varphi(r,\varphi) = \frac{1}{r}\frac{\partial\phi}{\partial\varphi} = -\frac{2\cdot R_0^2}{r}\cdot\frac{a}{2}\cdot\sin(2\varphi)\cdot\left[\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{R_0}{r}\right)^2\right]$

$$= -a\cdot\sin(2\varphi)\cdot\left[r + \frac{R_0^4}{r^3}\right] \quad 1$$

c) 1) Zylinderoberfläche: $0 \leq \varphi \leq \pi$; $r = R_0$

$\Rightarrow v_r(R_0,\varphi) = 0$

$v_\varphi(R_0,\varphi) = -2\cdot a\cdot R_0\cdot\sin(2\varphi)$ 1

2) $x = 0$; $y \to +\infty$ $\triangleq$ $\varphi = \frac{\pi}{2}$ und $r \to \infty$

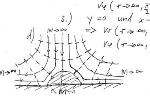
$\Rightarrow v_r\left(r\to\infty, \frac{\pi}{2}\right) \to -\infty$

$v_\varphi\left(r\to\infty, \frac{\pi}{2}\right) = 0$ · (Symmetrie) 1

3.) $y = 0$ und $x \to \pm\infty$ $\triangleq$ $\varphi = 0, \pi$ und $r \to \infty$

$\Rightarrow v_r(r\to\infty, (0;\pi)) \to +\infty$

$v_\varphi(r\to\infty, (0;\pi)) = 0$ (Symmetrie) 1

d) 

—— Strom Linien

- - - Äquipotentiallinien 1

7. Aufgabe (13 Punkte)

a)

$$\tau_W = \eta \frac{\mathrm{d}\bar{u}}{\mathrm{d}y} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{d}\bar{u} = \frac{\tau_W}{\eta}\mathrm{d}y$$

$$\Rightarrow \quad \bar{u} = \frac{\tau_W}{\nu\rho}y + c \quad \text{mit RB } \bar{u}(0) = 0: \quad c = 0$$

$$\Rightarrow \quad \bar{u} = \frac{1}{\nu}\frac{\tau_W}{\rho}y \quad \text{mit} \quad u^{*2} = \frac{\tau_W}{\rho}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\bar{u}}{u^*} = \frac{yu^*}{\nu}$$

b)

$$\frac{\mathrm{d}\delta_2}{\mathrm{d}x} + \frac{1}{U}\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}(2\delta_2 + \delta_1) - \frac{\tau_W}{\rho U^2} = 0$$

$$\text{mit} \quad \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x} = 0 \quad \text{(ebene Platte)} \quad \text{und} \quad \frac{\mathrm{d}\delta_2}{\mathrm{d}x} = \frac{7\mathrm{d}\delta}{72\mathrm{d}x} \quad \text{(Hinweis)}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}x} = \frac{72}{7}\frac{\tau_W}{\rho U^2}$$

$$\text{mit} \quad c_f = \frac{\tau_W}{\rho U^2/2} = 0,045\left(\frac{\nu}{u_\infty \delta(x)}\right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{und} \quad U = u_\infty \quad \text{(ebene Platte)}$$

$$\Rightarrow \quad \delta^{\frac{1}{4}}\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}x} = 0,2314\left(\frac{\nu}{u_\infty}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\int_0^{\delta(x)} \tilde{\delta}^{\frac{1}{4}}\mathrm{d}\tilde{\delta} = 0,2314\left(\frac{\nu}{u_\infty}\right)^{\frac{1}{4}}\int_0^x \mathrm{d}\tilde{x}$$

$$\Rightarrow \quad \delta(x) = 0,3707\left(\frac{\nu}{u_\infty}x^4\right)^{\frac{1}{5}} \Rightarrow \quad \delta(x) = \frac{0,3707x}{\sqrt[5]{Re_x}}$$

$$\Rightarrow \quad \delta(L) = 0,1476\text{m}$$

c)

$$c_W = \frac{F_W}{LB\rho u_\infty^2/2} = \frac{1}{L}\int_0^L c_f \mathrm{d}x$$

$$\Rightarrow \quad F_W = \frac{B\rho u_\infty^2}{2}\int_0^L c_f \mathrm{d}x$$

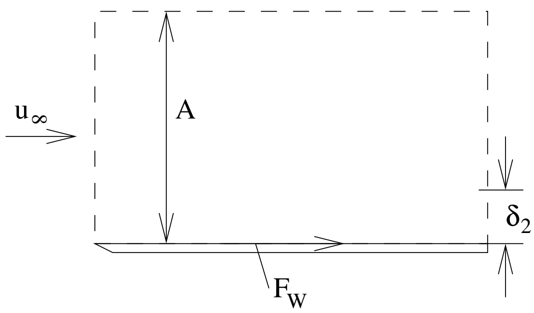
$$\Rightarrow \quad F_W = B\rho u_\infty^2 \cdot 0,0225\int_0^L \left(\frac{\nu}{u_\infty}\frac{\sqrt[5]{Re_x}}{0,3707x}\right)^{\frac{1}{4}}\mathrm{d}x$$

$$\Rightarrow \quad F_W = B\rho u_\infty^2 \cdot 0,0288\int_0^L \left(\frac{\nu}{u_\infty}\right)^{\frac{1}{5}}\frac{\mathrm{d}x}{x^{\frac{1}{5}}}$$

$$\Rightarrow \quad F_W = 0,036B\rho u_\infty^2\frac{L}{\sqrt[5]{Re_L}}$$

$$\Rightarrow \quad F_W = 28,7\text{N}$$

d) Impulserhaltungssatz um die Platte (Bilanzhülle):



$$-\rho u_\infty^2 A + \rho u_\infty^2 (A - \delta_2 B) + F_W = 0$$

$$\Rightarrow \quad \rho u_\infty^2 \delta_2 = \frac{F_W}{B}$$

$$\Rightarrow \quad \delta_2 = \frac{F_W}{B \rho u_\infty^2}$$

8. Aufgabe (12 Punkte)

a)

$$h_0 = h + \frac{u^2}{2} \quad \text{mit} \quad h = c_p T$$
$$\Rightarrow \quad c_p T_0 = c_p T + \frac{u^2}{2} \quad \text{mit} \quad c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \quad \text{(Hinweis)}$$
$$\Rightarrow \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(\gamma-1)u^2}{2\gamma R T} \quad \text{mit} \quad c^2 = \gamma R T$$
$$\Rightarrow \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(\gamma-1)}{2}\frac{u^2}{c^2}$$
$$\Rightarrow \quad \frac{T}{T_0} = \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2}M^2\right)^{-1}$$

b) Aus der Mach Zahl des schnelleren Flugzeugs $M_1 = \frac{u_1}{\sqrt{\gamma R T}} = 2,5$ bestimmt man den Machschen Winkel $\alpha_1 = \arcsin \frac{1}{M_1} = 23,6^o$
Aus der Strecke, die der Schall des schnelleren Flugzeugs rechtwinklig zur Flugrichtung zurücklegen muß, ergibt sich:
$(u_1 - u_B)\Delta t \tan\alpha_1 = b \quad \Rightarrow \quad \Delta t = \frac{b}{u_1 - u_B}\cot\alpha_1 = 0,916\text{s}$

c)

$$c_p T_1 + \frac{u_1^2}{2} = c_p T_2 + \frac{u_2^2}{2} = c_p T_0 \quad \text{(Energiegleichung)}$$
$$\Rightarrow \quad T_0 = T_1 + \frac{\gamma-1}{2\gamma R}u_1^2 = 647\text{K}$$
$$\Rightarrow \quad T_2 = T_1 + \frac{\gamma-1}{2\gamma R}(u_1^2 - u_2^2) \quad \text{(mit Hinweis)} \quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{10}{3} \quad \Rightarrow \quad u_2 = 255\text{m/s}$$
$$\Rightarrow \quad T_2 = 614\text{K}$$
$$\frac{p_2}{p_{02}} = \left(\frac{T_2}{T_0}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{(Isentropenbeziehung)}$$
$$\Rightarrow \quad p_2 = 7 \cdot 10^5\text{N/m}^2$$

d) Die Geschwindigkeiten müssen aufgespalten werden in eine Komponente normal und eine tangential zur Stoßfront.

$$u_{t1} = u_1 \cos\sigma_{d)} = 546\text{m/s}, \quad u_{n1} = u_1 \sin\sigma_{d)} = 651\text{m/s}$$
$$u_{t2} = u_{t1} = 546\text{m/s}, \quad \frac{u_{n1}}{u_{n2}} = 2,539 \quad \text{(mit Hinweis)} \quad \Rightarrow \quad u_{n2} = 256\text{m/s}$$
$$T_{2d)} = T_1 + \frac{\vec{v}_1^2 + \vec{v}_2^2}{2c_p} \quad \Rightarrow \quad T_{2d)} - T_1 = \frac{\gamma-1}{2\gamma R}(u_1^2 - (u_{n2}^2 + u_{t2}^2))$$
$$\Rightarrow \quad \Delta T = 179\text{K}$$