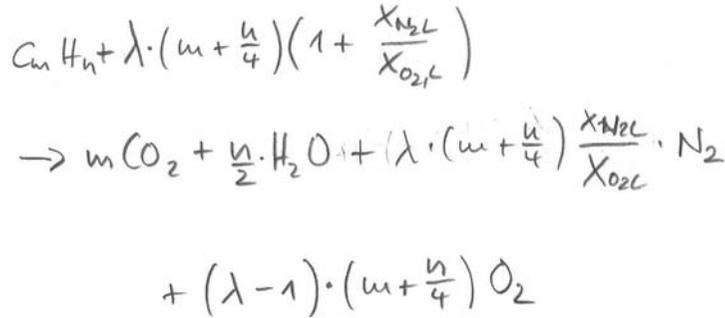


Musterlösung



1. Schreiben Sie die Bruttoreaktionsgleichung eines allgemeinen Kohlenwasserstoffs $C_m H_n$ mit Luft ($X_{O_2,L} = 0.21 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}, X_{N_2,L} = 0.79 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$) für magere Bedingungen.



2. Wie berechnet man die spezifische Entropie von Gasgemischen? Verwenden Sie die molare Darstellung und schreiben Sie alle Einzelterm des einzelnen Stoffes aus.

$$\tilde{s}(T, p) = \sum_{i=1}^N \tilde{s}_i(T, p_i) \quad ; \quad p_i = X_i \cdot p$$

$$\tilde{s}_i(T, p_i) = \tilde{s}_i^\ominus + \int_{T_0}^T \tilde{c}_{p,i}(T) \frac{dT}{T} - R \ln\left(\frac{p_i}{p_0}\right)$$

Musterlösung

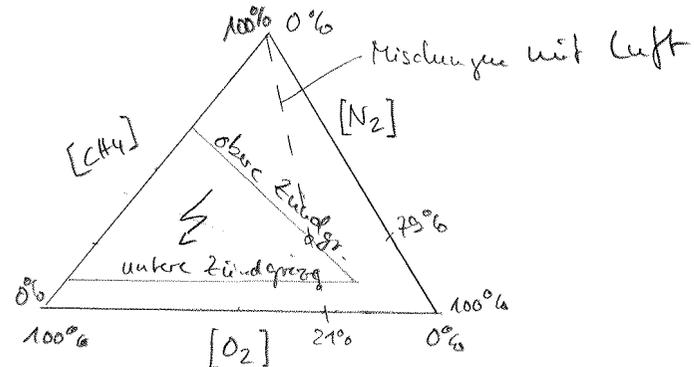
3. Schreiben Sie das thermodynamische Gleichgewicht $K_p(T)$ für die Reaktion $CO + H_2 O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ und geben Sie die Gleichung für $\Delta G^0(T)$ an.

$$K_p(T) = \exp\left[-\frac{\Delta G^0(T)}{RT}\right] = \frac{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}}{p_{CO} \cdot p_{H_2O}} \stackrel{!}{=} \frac{X_{CO_2} \cdot X_{H_2}}{X_{CO} \cdot X_{H_2O}}$$

(äquivalent)

$$\Delta G^0(T) = \underbrace{\tilde{h}_{CO_2}(T) - T \left(\tilde{s}_{CO_2}^\ominus + \int_{T_0}^T \tilde{c}_{p,CO_2} \frac{dT}{T} \right)}_{= \tilde{g}_{CO_2}^\ominus(T)} + \tilde{g}_{H_2}^\ominus(T) - \tilde{g}_{CO}^\ominus(T) - \tilde{g}_{H_2O}^\ominus(T)$$

4. Skizzieren Sie das Zündgrenzen Dreiecksdiagramm für CH_4 , O_2 , N_2 Gemische mit der Lage der Zündgrenzen. Erklären Sie die Zusammenhänge in Stichworten.



Zündgrenzen werden vom Erreichen der Zündtemperatur dominiert. Entscheidend ist das Verhältnis von Reaktionsenthalpie umsatz zur Wärmekapazität. Da die spez. Wärmekapazität von O_2 u. N_2 fast gleich, ist die untere Zündgrenze fast unabhängig vom O_2 Gehalt. Au der o.Z. limitiert O_2 die Wärmefreisetzung \Rightarrow linearer Zusammenhang mit $[O_2]$.

Musterlösung

5. Welches Verhältnis bestimmt beim $D^2 - t$ Modell der Tropfenverbrennung die Abbrandgeschwindigkeit? Bei einer Betriebsumstellung wird die neue Öldüse einen Spray mit 20 % größerem Sauter-Durchmesser erzeugen. Was erwarten Sie für die Flammenlänge bei sonst gleichen Verhältnissen?

$$B_{qc} = \frac{H_f / \rho_{air} + c_p (T_{\infty} - T_s)}{\Delta h_v} \quad ; \quad \text{Spalding Transferzahl}$$

In der Regel dominiert das Verhältnis

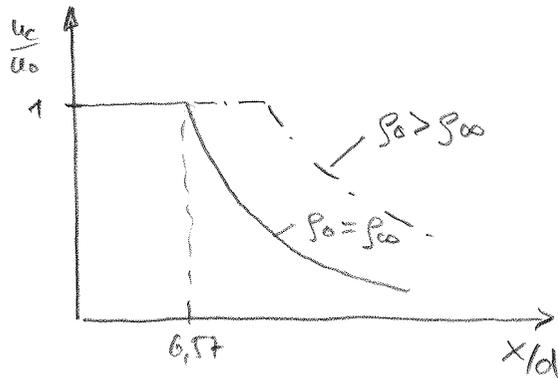
$$\frac{H_f / \rho_{air}}{\Delta h_v}$$

$$t_v \sim D_0^2 \Rightarrow \frac{t_{v2}}{t_{v1}} = \left(\frac{D_{02}}{D_{01}} \right)^2 = 1,2^2$$

mit $L_f \sim \bar{u} \cdot t_v \Rightarrow L_{f2} \approx 1,44 \cdot L_{f1}$

6. Geben Sie das Geschwindigkeitsgesetz $u_c/u_0 = f(x/d)$ der Axialgeschwindigkeit auf der Achse eines runden, turbulenten Freistrahles an, der in eine Umgebung gleicher Dichte strömt. Skizzieren Sie qualitativ den Verlauf dieses Strahles und den Verlauf der sich ergibt, wenn die Umgebungsdichte geringer als die des Strahlmediums ist. Welcher Parameter ist maßgebend für den Geschwindigkeitsverlauf?

$$\frac{u_c}{u_0} = \frac{6,57}{x/d_{eff}} \quad ; \quad d_{eff} = d_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\infty}}}$$

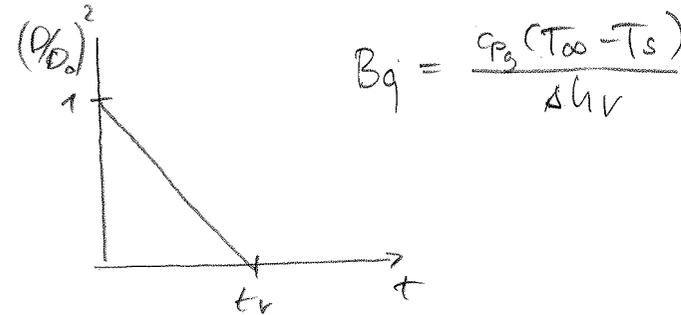


Musterlösung

7. Was ist das Kennzeichen der turbulenten Diffusionsstrahlflamme? Wovon hängt die Flammenlänge ab?

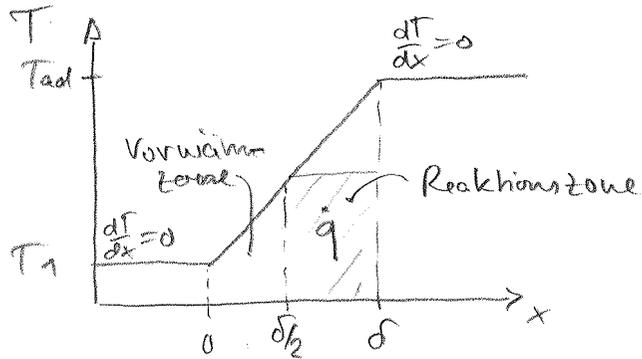
Kennzeichen ist die für einen festen Brennstoff vom Düsendurchmesser unabhängige Flammenlänge. Dies ergibt sich aus der Dominanz des turbulenten Mischungsritzes. Die Flammenlänge hängt vom Düsendurchmesser und vom Luftbedarf des Brennstoffs ab.

8. Skizzieren Sie den Verlauf des $D^2 - t$ Tropfenverdampfungsmodells. Welches Verhältnis ist für die Verdampfung charakteristisch?



Musterlösung

9. Skizzieren Sie den Temperaturverlauf einer 1-d laminaren Vormischflammenfront unter Verwendung der Theorie von Spalding. Welchen Trick wendet Spalding an? Welche Bereiche können Sie unterscheiden? Welche Bedingungen gelten dort? Welche Parameter können Sie anhand dieses Ansatzes bestimmen?



Trick: Waagrechte Tangenten und lineares T-Profil

Bereiche: Vorwärmzone: Gleichgewicht von Konvektion und Diffusion, Reaktions-term ist Null.

Reaktionszone: Konvektion, Diffusion- und Reaktions-term nicht Null.

=> 2 linear unabhängige Gleichungen

=> 2 Parameter: S_e , δ

laminare Brenngeschwindigkeit S_e
+ " Flammendicke δ



Prüfung MW0136 Verbrennung

17.02.2012 WS 11/12 Teil 2: Berechnungsteil (60 min)

Name: _____, Matrikelnummer: _____

Allgemeine Hinweise zur Bearbeitung

Bitte schreiben Sie Ihren **Namen und die Matrikelnummer** auf das Deckblatt und auf jedes Blatt Ihrer Ausarbeitung.

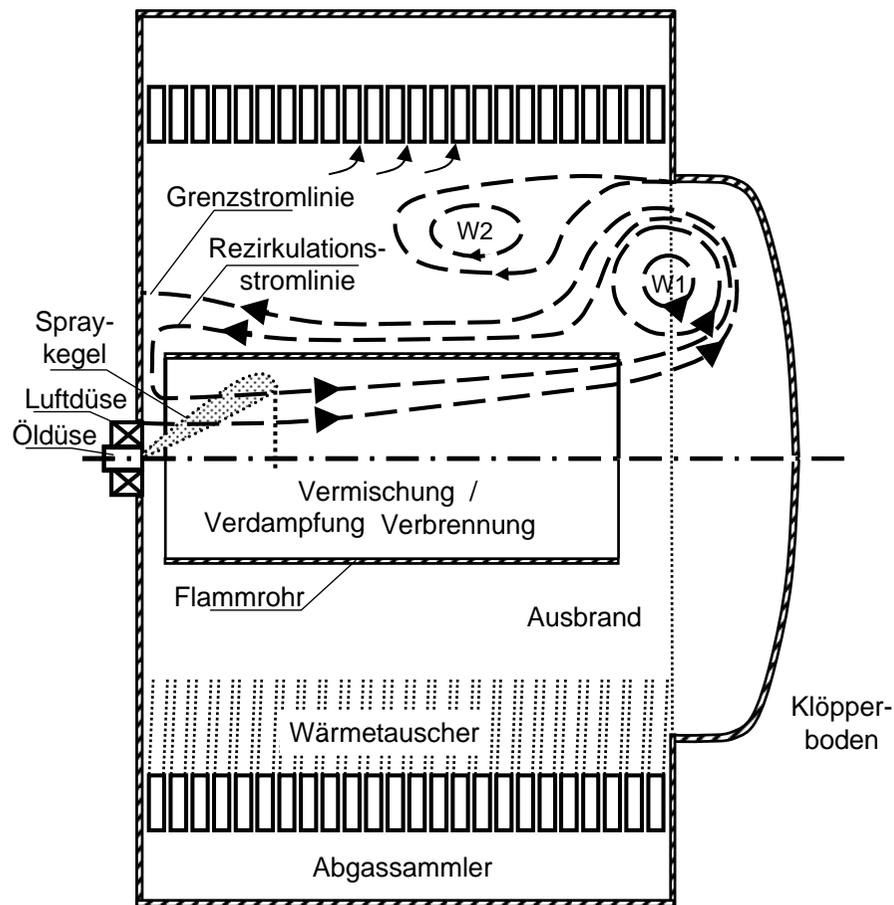
Formulieren Sie bei der Bearbeitung aller Teilaufgaben in dieser Prüfung zunächst **unbedingt Ihren Ansatz in allgemeiner Form** unter Verwendung der vorgegebenen Formelzeichen, bevor Sie Zahlenwertgleichungen ausführen, da der allgemeine Ansatz den wesentlichen Teil der Bewertungspunkte ergibt. **Reine Zahlenwertgleichungen ergeben allein nicht die volle erreichbare Punktzahl.** Bitte bedenken Sie, wie schnell man sich verrechnet.

Da Sie im Schnitt 8,5Min pro Teilaufgabe haben, können Sie ohne Schwierigkeiten eine gut leserliche Darbietung Ihrer Lösung verfassen. Sie helfen damit nicht nur dem Korrektor bei der Würdigung Ihrer Leistung, sondern auch sich selbst, weil Sie ggf. leichter Fehler erkennen.

Wenn Sie im Verlauf Ihrer Überlegungen verschiedene Ansätze hingeschrieben haben, müssen Sie die nach Ihrer Meinung falschen Ansätze klar erkennbar streichen, da sonst alles als Fehler gewertet werden muss, auch wenn der richtige Ansatz dabei wäre.

Verwenden Sie **auf keinen Fall grüne und rote Stifte** weil diese den Korrektoren vorbehalten sind. Verwenden Sie einen dokumentenechten Stift.

Legen Sie bereits bearbeitete Blätter in den Mantelbogen, damit Sie nicht vergessen, sie abzugeben.



Die Abbildung zeigt die Skizze des Meridionalschnitts durch einen modernen Brennwertkessel für Heizöl. In der oberen Hälfte sollen die Strömungsvorgänge anhand von gestrichelten Stromlinien verdeutlicht werden, während die untere Hälfte Komponenten und Zonen des Geräts zeigt. Um schadstoffarme Verbrennung zu erreichen, arbeiten diese Verbrennungssysteme mit Vorverdampfung des flüssigen Brennstoffs, mit teilvorgemischter Verbrennung und mit starker Abgasrezirkulation. Diese Kessel sind in guter Näherung axisymmetrisch aufgebaut. Auf der Symmetrieachse ist links die Ölzerstäuberdüse angeordnet, durch die das Heizöl in das Flammrohr eingedüst wird. Die Öldüse ist umgeben von einer Luftdüse, durch die die Verbrennungsluft mit leichtem Drall einströmt. Die Öldüse bildet, wie es in der oberen Hälfte der Skizze angedeutet ist, ein hohlkegelförmiges Spray, das den Luftstrahl nach außen durchdringt und dabei in den Bereich des heißen, rezirkulierten Abgases gelangt, wo es verdampft. Der verdampfte Brennstoff mischt sich durch Turbulenz mit dem rezirkulierten Abgas und der Verbrennungsluft und verbrennt weitgehend bis zum Austritt aus dem Flammrohr. Um nun genügend Ver-

weilzeit für den Ausbrand des Kohlenmonoxids zu haben, bevor das heiße Gas durch den Wärmetauscher tritt, wird die Strömung der Verbrennungsgase durch den Klörperboden umgelenkt. Es bilden sich dabei zwei Ringwirbel W1 und W2, durch die die Strömung zunächst zur Außenseite des Flammrohres gelenkt wird. Schließlich strömen die ausgebrannten Abgase radial nach außen durch die Schlitze des mantelförmigen Wärmetauschers in den Abgassammler, von wo sie in den Kamin geleitet werden. Die speziell markierte Grenzstromlinie grenzt dabei den Bereich des Hauptstroms von der Abgasrezirkulation ab, die durch eine Rezirkulationsstromlinie angedeutet wird. Quer zu den Stromlinien findet durch Turbulenz ein Austausch von Impuls, Stoff und Enthalpie statt.

- 1 Das Heizöl wird durch einen fiktiven Kohlenwasserstoff $C_{15}H_{28}$ angenähert. Bestimmen Sie die Molmasse des Brennstoffes M_F sowie dessen massenbezogene Kenngrößen: den stöchiometrischen Luftbedarf l_{min} und die stöchiometrische Abgasmenge v_{min} .

(Notfallwerte: $M_F = 210 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, $l_{min} = 14,0 \frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_F}$, $v_{min} = 15,0 \frac{\text{kg}_A}{\text{kg}_F}$)

- 2 Der Kessel hat eine Feuerleistung von $P_{th} = 22 \text{ kW}$. Berechnen Sie den Brennstoffmassenstrom \dot{m}_F und den erforderlichen Luftmassenstrom \dot{m}_L bei der gewünschten Luftzahl $\lambda = 1,1$.

(Notfallwerte: $\dot{m}_F = 0,51 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$, $\dot{m}_L = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$)

- 3 Berechnen Sie die Massenbrüche der Abgaskomponenten bei Annahme vollständiger Verbrennung. Berechnen Sie daraus die Molmasse M_A des Abgases.

(Notfallwerte: $y_{CO_2} = 0,19 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_A}$, $y_{H_2O} = 0,07 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_A}$, $y_{O_2} = 0,02 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_A}$, $y_{N_2} = 0,72 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_A}$, $M_A = 28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$)

- 4 Formulieren Sie unter Annahme vollständiger Verbrennung die adiabate Enthalpiebilanz für die Luft, das flüssige Heizöl, den Rezirkulationsstrom und das Abgas unter Verwendung des unteren Heizwertes H_u , der Verdampfungsenthalpie Δh_{vF} sowie der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten $\bar{c}_{p,i}|_{T_0}^T$. Wie groß muss der Rezirkulationsmassenstrom \dot{m}_R sein, damit die adiabate Abgastemperatur $T_A = 1840 \text{ K}$ beträgt, wenn die Lufttemperatur $T_L = 293 \text{ K}$, die Öltemperatur $T_F = 323 \text{ K}$, die Temperatur des rezirkulierten Abgases $T_R = 973 \text{ K}$ betragen?

(Notfallwert: $\dot{m}_R = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$)

1/5

2.1 $C_{15}H_{28} = C_m H_n$

$$m_F = m \cdot M_C + n M_H = 208 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$C_m H_n + (m + \frac{n}{4}) (1 + \frac{X_{N_2,L}}{X_{O_2,L}}) \rightarrow \dots$$

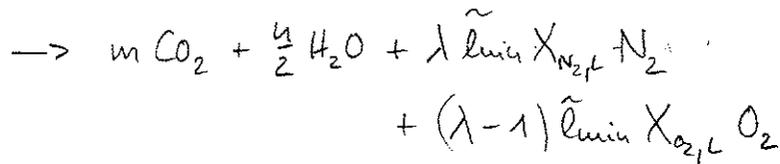
$$l_{\text{min}} = (m + \frac{n}{4}) (1 + \frac{X_{N_2,L}}{X_{O_2,L}}) \cdot \frac{M_L}{M_F} = 14,523 \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg F}}$$

$$v_{\text{min}} = l_{\text{min}} + 1 = 15,523 \frac{\text{kg AG}}{\text{kg F}}$$

2.2 $P_{H_2} = \dot{m}_F \cdot H_u \Rightarrow \dot{m}_F = 5,12 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

$$\dot{m}_L = \lambda \cdot l_{\text{min}} \cdot \dot{m}_F = 8,18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

2.3



$$\Rightarrow Y_{\text{CO}_2} = \frac{m \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_F}}{v_{\text{min}} + (\lambda - 1) l_{\text{min}}} \left[\frac{\frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol F}} \cdot \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg CO}_2} \cdot \frac{\text{kmol F}}{\text{kg F}}}{\frac{\text{kg AG}}{\text{kg F}}} \right]$$

$$\leq N = 16,98 \frac{\text{kg AG}}{\text{kg F}}$$

$$= 0,187 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg AG}}$$

2/5

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\frac{n}{2} \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_F}}{N} = 0,0714 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg AG}}$$

$$Y_{\text{O}_2} = \frac{(\lambda - 1) \cdot l_{\text{min}} \cdot \frac{M_{\text{O}_2}}{M_L} \cdot X_{\text{O}_2,L}}{N} = 0,02 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg AG}}$$

$$Y_{\text{N}_2} = 1 - Y_{\text{CO}_2} - Y_{\text{H}_2\text{O}} - Y_{\text{O}_2} = 0,7216 \frac{\text{kg N}_2}{\text{kg AG}}$$

$$M_A = \frac{1}{\frac{Y_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{Y_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{Y_{\text{O}_2}}{M_{\text{O}_2}} + \frac{Y_{\text{N}_2}}{M_{\text{N}_2}}} = 28,89 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

2.4

$$\dot{m}_L \bar{c}_{pL} (T_L - T_0) + \dot{m}_F [\bar{c}_{pF} (T_F - T_0) + H_u - \Delta h_{\text{VF}}] + \dot{m}_R \bar{c}_{pR} (T_R - T_0) - (\dot{m}_L + \dot{m}_F + \dot{m}_R) \bar{c}_{pA} (T_A - T_0) = 0$$

$$\bar{c}_{pR} = Y_{\text{CO}_2} \bar{c}_{p\text{CO}_2} \Big|_{T_0}^{T_R} + Y_{\text{H}_2\text{O}} \bar{c}_{p\text{H}_2\text{O}} \Big|_{T_0}^{T_R} + Y_{\text{O}_2} \bar{c}_{p\text{O}_2} \Big|_{T_0}^{T_R} + Y_{\text{N}_2} \bar{c}_{p\text{N}_2} \Big|_{T_0}^{T_R}$$

$$= 0,187 \cdot 1,07 + 0,0714 \cdot 2,06 + 0,02 \cdot 1,0 + 0,7216 \cdot 1,15$$

$$= 1,197 \approx 1,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Verbrennung Teil 2 Musterlösung WS 11/12

$$\bar{c}_{PA} = Y_{CO_2} \bar{c}_{PCO_2} \Big|_{T_0}^{T_A} + Y_{H_2O} \bar{c}_{PH_2O} \Big|_{T_0}^{T_A} + Y_{O_2} \bar{c}_{PO_2} \Big|_{T_0}^{T_A} + Y_{N_2} \bar{c}_{PN_2} \Big|_{T_0}^{T_A} \quad (3/5)$$

$$= 0,187 \cdot 1,2 + 0,0714 \cdot 2,57 + 0,02 \cdot 1,08 + 0,7216 \cdot 1,17$$

$$= 1,274 \approx 1,27 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$T_L \stackrel{!}{=} T_0 \Rightarrow \dot{m}_L \cdot c_{PL} (T_L - T_0) = 0$$

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{m}_F \left[\bar{c}_{PF} (T_F - T_0) + h_u - \Delta h_{VF} \right] - (\dot{m}_L + \dot{m}_F) \bar{c}_{PA} (T_A - T_0)}{\bar{c}_{PA} (T_A - T_0) - \bar{c}_{PR} (T_R - T_0)}$$

$$\textcircled{1} = 0,512 \cdot 10^{-3} \cdot [2,18 \cdot (323 - 293) + 43000 - 242]$$

$$= 21,9256 \frac{kJ}{s}$$

$$\textcircled{2} = (8,18 \cdot 10^{-3} + 0,512 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,27 \cdot (1840 - 293)$$

$$= 17,1 \frac{kJ}{s}$$

$$\textcircled{3} = 1148,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{m}_R = \frac{\textcircled{1} - \textcircled{2}}{\textcircled{3}} = 4,2 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

2.5

$$\rho_L = \frac{p_{CO_2} \cdot M_L}{R \cdot T_L} = 1,2 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_A = \frac{p_{CO_2} \cdot M_A}{R \cdot T_A} = 0,19 \frac{kg}{m^3}$$

Verbrennung Teil 2 Musterlösung WS 11/12

$$\rho_R = \frac{p_{CO_2} \cdot M_A}{R \cdot T_R} = 0,362 \frac{kg}{m^3} \quad (4/5)$$

$$u_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L \cdot A_L} \quad ; \quad A_L = \frac{\pi}{4} (D_{La}^2 - d_{Li}^2) = 19 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$u_L = 35,9 \frac{m}{s} \quad ; \quad A_F = \frac{\pi}{4} d_F^2 = 5,03 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$u_R = \frac{\dot{m}_R}{\rho_R \cdot A_R} \quad ; \quad A_R = A_F - A_L = 4,84 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$u_R = 2,4 \frac{m}{s}$$

$$u_A = \frac{\dot{m}_L + \dot{m}_F + \dot{m}_R}{\rho_A \cdot A_F}$$

$$u_A = 13,5 \frac{m}{s}$$

2.6

$$\dot{m}_L \cdot u_L + \dot{m}_F \cdot u_F + \dot{m}_R \cdot u_R + p_E \cdot A_F - (\dot{m}_L + \dot{m}_F + \dot{m}_R) \cdot u_A - p_A \cdot A_F = 0$$

$$\Delta p_{EA} = p_E - p_A$$

$$= \frac{(\dot{m}_L + \dot{m}_F + \dot{m}_R) u_A - \dot{m}_L u_L - \dot{m}_F u_F - \dot{m}_R u_R}{A_F}$$

$$= \frac{0,174 - 0,294 - 0,0235 - 0,01}{5,03 \cdot 10^{-3}}$$

$$\Delta p_{EA} = -30,5 Pa$$

Verbrennung Teil 2 Musterlösung WS 11/12

$$P_{RE} = P_E + \frac{\rho_R}{2} u_R^2 \quad ; \quad P_{EA} = P_A + \frac{\rho_A}{2} u_A^2 \quad (5/5)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{REA} &= \Delta P_{EA} + \frac{\rho_R}{2} u_R^2 - \frac{\rho_A}{2} u_A^2 \\ &= -30,5 + 1,04 - 17,3 = -46,76 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Der Luftskahl wirkt als Strahlpumpe,
dadurch steigt der Totaldruck des Rezi-
gases.

2.7

$$P_{RB} = P_B + \frac{\rho_R}{2} u_B^2 \stackrel{=0}{=} P_B$$

$$P_{EA} = P_{RB} + \Delta P_{RAB} \quad ; \quad \Delta P_{RAB} = \frac{\rho_A}{2} u_A^2 \cdot \zeta_A$$

$$P_{RE} = P_{EA} + \Delta P_{REA}$$

$$P_{RE} = P_{RB} + \Delta P_{RAB} + \Delta P_{REA}$$

$$\Delta P_{REB} = P_{RE} - P_{RB} = \Delta P_{RAB} + \Delta P_{REA}$$

$$\Delta P_{REB} = 8,66 - 46,76 = -38,1 \text{ Pa}$$

$$P_{RB} = P_{RE} + \Delta P_{RBE} \Rightarrow \Delta P_{RBE} = -\Delta P_{REB}$$

$$\Delta P_{RBE} = \frac{\rho_R}{2} v_s^2 \cdot \zeta_s \Rightarrow \rho_R v_s^2 = \sqrt{\frac{2 \rho_R \Delta P_{RBE}}{\zeta_s}} = 4,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$L_s = \frac{\dot{m}_R}{\rho_R \cdot v_s \cdot \pi d_F} = 3,5 \text{ mm}$$