

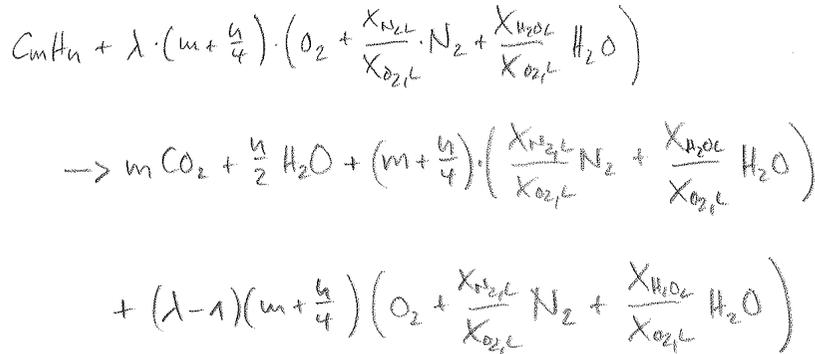
MUSTERLÖSUNG

Technische Universität München
 Lehrstuhl für Thermodynamik
 Prof. Dr.-Ing. T. Sattelmayer · Prof. W. Polifke, Ph.D.
Prüfung MW0136 Verbrennung



29.07.2013 SS 2013 Teil 1: Kurzfragenteil (5 Seiten) (30 min)

1. Schreiben Sie die Bruttoreaktionsgleichung eines allgemeinen Kohlenwasserstoffs $C_m H_n$ mit feuchter Luft ($X_{O_2,L} = 0.208 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$, $X_{N_2,L} = 0.782 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$, $X_{H_2O,L} = 0.01 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$) 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.

$$\bar{s}(p_i, T) = \sum_{i=1}^N \left\{ X_i \cdot \left[\bar{s}_i^\phi + \int_{T_0}^T \frac{\bar{c}_{p,i}}{T} dT - R \ln\left(\frac{X_i \cdot p}{p_0}\right) \right] \right\}$$

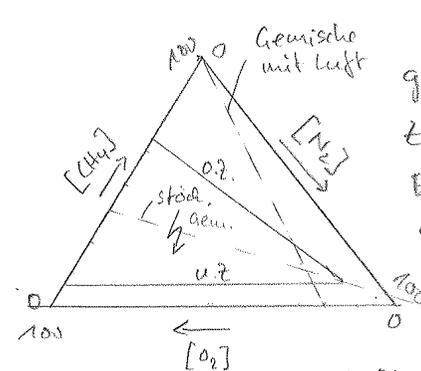
3. Schreiben Sie das thermodynamische Gleichgewicht $K_p(T)$ für die Reaktion $H_2O \rightleftharpoons OH + H$ und geben Sie die Gleichung für $\Delta G^0(T)$ an. Schreiben Sie mindestens einen Teilterm vollständig aus.

$$K_p(T) = \exp\left(-\frac{\Delta G^0}{RT}\right) = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{2-1} \cdot \frac{X_{OH} \cdot X_H}{X_{H_2O}}$$

$$\Delta G^0(T) = \tilde{g}_{OH}^\phi(T) + \tilde{g}_H^\phi(T) - \left\{ \tilde{h}_{H_2O}(T) - T \tilde{s}_{H_2O}^\phi(T) \right\}$$

$$\tilde{h}_{H_2O}(T) = \tilde{h}_{H_2O}^\phi + \int_{T_0}^T \bar{c}_{p,H_2O} dT ; \tilde{s}_{H_2O}^\phi(T) = \tilde{s}_{H_2O}^\phi + \int_{T_0}^T \frac{\bar{c}_{p,H_2O}}{T} dT$$

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.



An und innerhalb der Zündgrenzen selbsterhaltende Flamme. Zündgrenze charakterisiert durch Erreichen eines Zündtemperatur T_z als Bilanz von Reaktionsenthalpie und Wärmekapazität, bei der Radikalbildung selbsterhaltend.

u.z.: Mangel an Bost. limitiert Wärmeabfuhr. Da $\bar{c}_{p,N_2} \approx \bar{c}_{p,O_2}$ keine Abhängigkeit von $[O_2]$

o.z.: Mangel an O_2 limitiert Wärmeabfuhr \rightarrow lin. Abh. mit $[O_2]$

5. Welches Verhältnis bestimmt beim $D^2 - t$ Modell der Verdampfung die Verdampfungszeit? Zur Optimierung der Vorverdampfungsstrecke soll eine neue Öldüse einen Spray mit 10 % kleinerem Sauter-Durchmesser erzeugen. Was erwarten Sie für die axiale Lage der Dampfkonzentration bei sonst gleichen Verhältnissen?

$$Bq = \frac{c_p (T_{oo} - T_s)}{shv} ; k \sim \ln(1 + Bq)$$

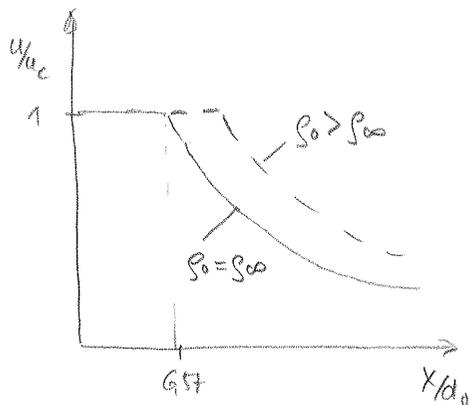
$$\frac{D^2}{D_0^2} = 1 - k \cdot t ; \frac{t_1}{t_0} \sim \frac{D_{01}^2}{D_{00}^2} = 0,9^2$$

mit $u = \text{const} \Rightarrow x = u \cdot t \Rightarrow x_{D_1} < x_{D_0}$

Die gleiche Dampfkonzentration wird in Strömungsrichtung früher erreicht.

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?

$$\frac{u_c}{u_0} = 6,57 \frac{\text{delt}}{x} ; \text{delt} = d_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_\infty}}$$



Parameter ist

$$\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_\infty}}$$

7. Welche Kennzahl charakterisiert die Wechselwirkung zwischen Reaktion und Turbulenz? Geben Sie eine Abschätzung der Kennzahl für turbulente Vormischflammen an und erläutern Sie die asymptotischen Regimes.

$$Da_T = \frac{L_t}{u'} \cdot \frac{Sc^2}{a}$$

turb. Längemaß L_t
turb. Geschwindigkeitsmaß u'

lev. Brenngeschw. Sc
therm. Diffusivität a

$Da_T \gg 1$ Turbulenz dominiert

$Da_T \ll 1$ Chemie dominiert

8. Schreiben Sie einen Arrhenius Ansatz für die Vorwärtsreaktion $A + B \rightarrow \text{Prod}$ und erläutern Sie die Terme im Kontext des Stoßmodells.

$$\omega_A = \underbrace{A_0 T^b}_{A} \cdot \underbrace{[A][B] \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)}_B$$

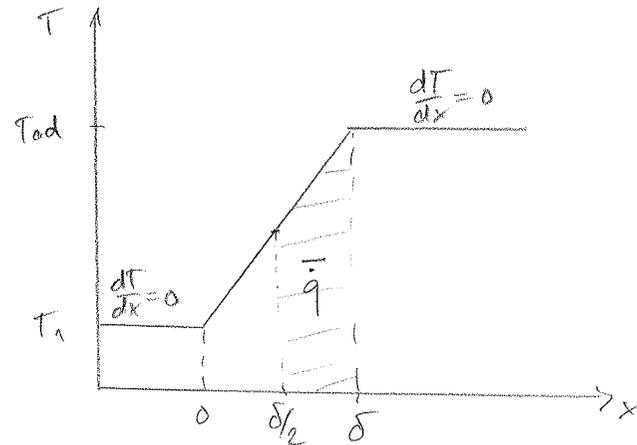
A: Maximale Stoßfrequenz

B: Wahrscheinlichkeit, dass aus Stoß Reaktion erfolgt. Vergleich von Aktivierungsenergie E_A zu kin. Energie der Teilchen RT

$$T \rightarrow \infty ; \exp(\cdot) \rightarrow 1$$

$$T \rightarrow 0 ; \exp(\cdot) \rightarrow 0$$

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?



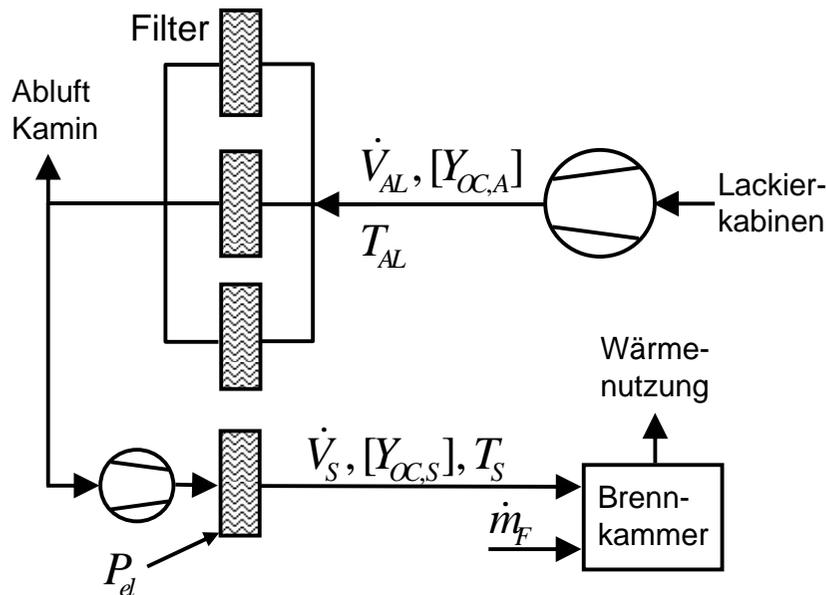
Lin. T-Profil mit Knicken und $\frac{dT}{dx} = 0$ rechts und links der Flamme. Dadurch Integration der 1-d Enthalpiebilanz analytisch leicht möglich.

Zweitteilung der Flammzone

$0 - \delta/2$: keine Reaktion, durch ggw von WL und Konvektion.

$0 - \delta$: keine Wärmeleitung da $\left. \frac{dT}{dx} \right|_0 = 0$
ggw von Konvektion und Reaktion

\Rightarrow 2 Gleichungen für s_L : lam. Brenngeschw.
 δ : lam. Flammendicke



In einer Lackiererei fällt ein großer Volumenstrom \dot{V}_{AL} von Lösungsmittel-belasteter Abluft mit einer Beladung von $[Y_{OC,A}]$ bei einer Temperatur von T_{AL} an, der gereinigt werden muss. Die organische Beladung ist ein Gemisch aus Benzol ($X_{C_6H_6}$), n-Hexan ($X_{C_6H_{14}}$) und Xylol ($X_{C_8H_{10}}$).

Ein neuartiges Adsorptions- und Desorptionsverfahren mit N elektrisch beheizbaren Aktivkohlefiltern scheidet die Lösungsmittelfracht bei der Ablufttemperatur $T_{AL} = 298K$ an N-1 parallel geschalteten Aktivkohlefiltern ab. Während dessen wird jeweils ein Filter elektrisch beheizt und von einem wesentlich geringeren Spülluftmassenstrom \dot{V}_S durchströmt. Der Spülluftstrom erwärmt sich auf T_S und hat dann eine bis zu 50-fach höhere Beladung $[Y_{OC,S}]$. Die beladene Spülluft wird schließlich in einer Brennkammer verbrannt. Um den Bedarf an Zusatzbrennstoff \dot{m}_F in der Brennkammer gering zu halten, wird das Spülgasgemisch bis in die Nähe der mageren Verbrennungsgrenze (Zündgrenze) angereichert.

- Bestimmen Sie unter Verwendung der Angaben die mittleren Größen der organischen Beladung: die Molmasse M_{OC} , den molaren unteren Heizwert $\tilde{H}_{u,OC}$ sowie die stöchiometrischen Kenngrößen molarer stöchiometrischer Luftbedarf l_{min} und molare stöchiometrische Abgasmenge v_{min} .

(Notfallwerte: $M_{OC} = 100 \frac{kg}{kmol}$, $\tilde{H}_{u,OC} = 3991 \frac{kJ}{mol}$, $l_{min} = 47,81 \frac{kmol_L}{kmol_{OC}}$, $v_{min} = 50,37 \frac{kmol_{AG}}{kmol_{OC}}$)

- Der Normvolumenstrom der Abluft beträgt $\dot{V}_{N,AL} = 54000 \frac{m^3_N}{h}$ und die Beladung (Massenkonzentration) ist $[Y_{OC,A}] = 1g/m^3_N$. Der Anreicherungsfaktor

beträgt $F_S = [Y_{OC,S}]/[Y_{OC,A}] = 40$. Berechnen Sie die Beladung der Spülluft $[Y_{OC,S}]$, den Molenbruch der Lösungsmittel $X_{OC,S}$ und den Normvolumenstrom der Spülluft $\dot{V}_{N,S}$.

(Notfallwerte: $[Y_{OC,S}] = 40 \frac{g}{m^3_N}$, $X_{OC,S} = 0,008964 \frac{kmol}{kmol}$, $\dot{V}_{N,S} = 1350 \frac{m^3_N}{h}$)

- Nach Le Chatelier ergibt sich bei Standardbedingungen für das Gemisch der organischen Bestandteile mit Luft die untere Zündgrenze $X_{uZ} = 0,011 \frac{kmol}{kmol}$. Berechnen Sie die Luftzahl λ_{uZ} des Gemischs an der unteren Zündgrenze. Stellen die adiabate Enthalpiebilanz für die untere Zündgrenze des Gemischs bei Standardbedingungen auf. Berechnen Sie die adiabate Flammentemperatur an der unteren Zündgrenze $T_{Z,N}$ unter Verwendung der unten gegebenen mittleren Wärmekapazitäten.

(Notfallwerte: $T_{Z,N} = 1560K$)

- Die Temperatur des Spülgases beträgt $T_S = 473K$. Bestimmen Sie aus der adiabaten Enthalpiebilanz unter Verwendung der in 3. bestimmten, adiabaten Flammentemperatur an der Zündgrenze $T_{Z,N}$ und der unten gegebenen Wärmekapazitäten die Luftzahl der unteren Zündgrenze λ_{uZ}^* bei T_S und den dazu gehörigen Molenbruch $X_{OC,S}^*$. Entscheiden Sie durch Vergleich mit dem vorhandenen $X_{OC,S}$ ob der Anreicherungsfaktor vertretbar ist.

Angaben

Lösungsmitteldampf

$$X_{C_6H_6} = 0,1 \frac{kmol_{C_6H_6}}{kmol_{OC}} \quad X_{C_6H_{14}} = 0,16 \frac{kmol_{C_6H_{14}}}{kmol_{OC}} \quad X_{C_8H_{10}} = 0,74 \frac{kmol_{C_8H_{10}}}{kmol_{OC}}$$

$$\tilde{H}_{u,C_6H_6} = 3853 \frac{kJ}{mol} \quad \tilde{H}_{u,C_6H_{14}} = 3120 \frac{kJ}{mol} \quad \tilde{H}_{u,C_8H_{10}} = 4198 \frac{kJ}{mol}$$

$$M_{C_6H_6} = 78 \frac{kg}{kmol} \quad M_{C_6H_{14}} = 86 \frac{kg}{kmol} \quad M_{C_8H_{10}} = 106 \frac{kg}{kmol}$$

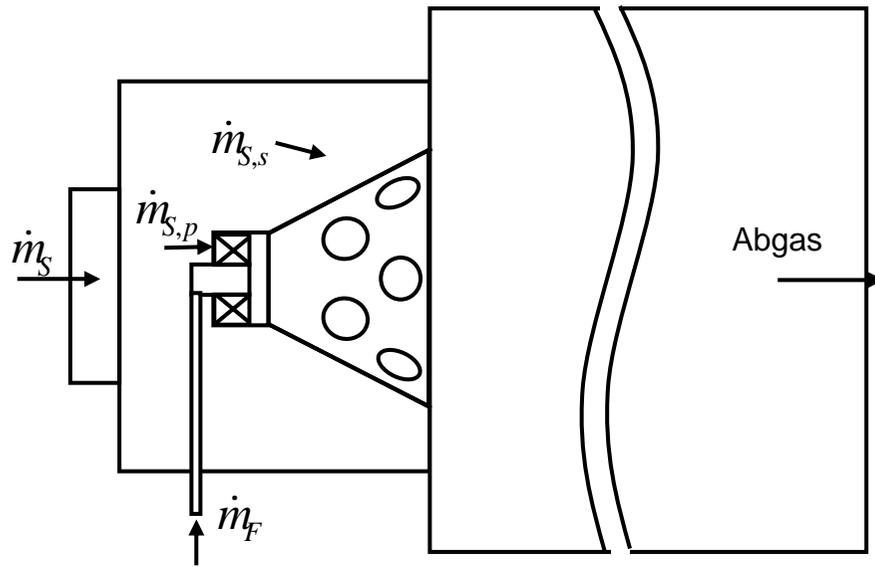
Sonstiges

$$X_{O_2,L} = 0,21 \frac{kmol}{kmol} \quad X_{N_2,L} = 0,79 \frac{kmol}{kmol} \quad M_L = 28,84 \frac{kg}{kmol}$$

$$V_N = 22,41 \frac{m^3_N}{kmol} \quad p_{ref} = p_N = 1013mbar \quad T_{ref} = 298K$$

Integrale mittlere Wärmekapazitäten: $\bar{c}_{p,i}|_{T_0}^T = \frac{1}{T-T_0} \int_{T_0}^T c_{p,i} dT$

Zustand /Wärmekapazität	$\bar{c}_{p,v_{min}}$	$\bar{c}_{p,L}$	$\bar{c}_{p,OC}$	Einheit
$T_S = 473K$		29,4	146,7	$\frac{kJ}{kmol K}$
$T_{Z,N} = 1560K$	35,8	32,3		$\frac{kJ}{kmol K}$



Die Skizze zeigt einen vereinfachten meridionalen Schnitt durch die Brennkammer. Von links tritt über die Rohrleitung der Spülgasmassenstrom \dot{m}_S in das Brennerplenum ein. Von dort strömt ein Teil als Primärmassenstrom $\dot{m}_{S,p}$ durch das Drallregister des Drallbrenners. Über dessen zentrale Lanze wird der Zusatzbrennstoffstrom \dot{m}_F am Austritt des Drallregisters in den Primärmassenstrom eingemischt und bildet dort die heiße Stützflamme, die der Sekundärmassenstrom $\dot{m}_{S,s}$ in Form von Strahlen ansaugt, die von den Löchern am Umfang des Mischkegels ausgehen. Ziel der nachfolgenden Berechnungen ist es, die Spülluftaufteilung und die Querschnitte zu gegebenem Brennerdruckverlust zu dimensionieren.

- 5 Berechnen Sie den Volumenstrom \dot{V}_S , die Dichte ρ_S und den Massenstrom \dot{m}_S des Spülluft-Gemisches unter der Annahme $p = p_N = 1013\text{mbar}$, $T_N = 273\text{K}$ und $T_S = 473\text{K}$. Es gilt das ideale Gasgesetz mit $R_u = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol}\cdot\text{K}}$. Der vorgegebene Totaldruckverlust über den Brenner im Betrieb beträgt $\Delta p_{t,B} = 30\text{mbar}$. Der Durchflussbeiwert des Brenners beträgt $c_{D,B} = 0,85$, der der Löcher sei $c_{D,L} = 0,8$. Damit die Primärflamme bei $\lambda_p = 1,7$ brennt, muss das Verhältnis $R_{sp} = \dot{m}_{S,s}/\dot{m}_{S,p} = 6,5$ eingestellt werden. Berechnen Sie den Bezugsquerschnitt des Brenners A_B und den Bezugsquerschnitt der Löchern A_L mit der Durchflussgleichung für kleine Machzahlen.

(Notfallwerte: $\rho_S = 0,759 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\dot{m}_S = 0,493 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$, $A_L = 7,92 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$)

- 6 Gegeben sind die Werte der laminaren Brenngeschwindigkeit des Gemischs aus Erdgas und organischer Beladung bei T_S : $s_l = 0,217 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, der kinematischen Viskosität $\nu = 3,47 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ und der Prandtlzahl $\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = 0,7$. Berechnen Sie die mittlere Geschwindigkeit \bar{u}_L in den Lochquerschnitten. Aus der Theorie des Freistrahls können die Schwankungsgeschwindigkeit am Ende des Kernbereichs mit $u'_L = 0,2 \cdot \bar{u}_L$ und das turbulente Längenmaß $l_{t,L} = 0,7 \cdot d_L$ abgeschätzt werden. Welcher Lochdurchmesser und welche Anzahl sind zu wählen, damit sich am Ende des Kernbereichs die turbulente Damköhlerzahl $\text{Da}_t \approx 1$ ergibt?

MUSTERLÖSUNG TEIL 2 SS 2013

1.
$$M_{oc} = \sum_{i=1}^N X_i \cdot m_i ; \quad i = C_6H_6, C_6H_{14}, C_8H_{10}$$

$$= 0,1 \cdot 78 + 0,16 \cdot 86 + 0,74 \cdot 106 = 100 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$\tilde{H}_{u,oc} = \sum_{i=1}^N X_i \tilde{H}_{u,i} ; \quad i = C_6H_6 \dots$$

$$= 0,1 \cdot 3853 + 0,16 \cdot 3120 + 0,74 \cdot 4198$$

$$= 3991 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\bar{m}_C = \sum_{i=1}^N X_i \cdot m_{C,i} = 0,1 \cdot 6 + 0,16 \cdot 6 + 0,74 \cdot 8 = 7,48 \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_{oc}}$$

$$\bar{n}_H = \sum_{i=1}^N X_i \cdot n_{H,i} = 0,1 \cdot 6 + 0,16 \cdot 14 + 0,74 \cdot 10$$

$$= 10,24 \frac{\text{kmol}_H}{\text{kmol}_{oc}}$$

$$L_{min} = \left(\bar{m}_C + \frac{\bar{n}_H}{4} \right) \cdot \left(1 + \frac{X_{N_2L}}{X_{O_2L}} \right) = 47,81 \frac{\text{kmol}_{L,ST}}{\text{kmol}_{oc}}$$

$$V_{min} = \bar{m}_C + \frac{\bar{n}_H}{2} + X_{N_2L} \cdot L_{min} = 50,37 \frac{\text{kmol}_{O_2,ST}}{\text{kmol}_{oc}}$$

2.
$$[Y_{O_2,S}] = F_S \cdot [Y_{O_2,A}] = 40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X_{O_2,S} = [Y_{O_2,S}] \cdot \frac{V_N}{R T_{OC}} = 8,964 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kmol}_{oc}}{\text{kmol}_{tot}}$$

$$\dot{V}_{N_2,S} = \frac{\dot{V}_{N_2,L}}{F_S} = 1350 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

(1/4)

3.
$$X_{u_2,oc} = \frac{1}{1 + \lambda_{u_2,oc} \cdot L_{min}}$$

$$\lambda_{u_2,oc} = \left(\frac{1}{X_{u_2,oc}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{L_{min}} = 1,88$$

$$\tilde{H}_{u,oc} = \left[\bar{c}_{p,min} \cdot V_{min} + (\lambda_{u_2,oc} - 1) L_{min} \cdot \bar{c}_{p,L} \right]^{T_{Z,N}} (T_{Z,N} - T_0)$$

$$T_{Z,N} = T_0 + \frac{\tilde{H}_{u,oc}}{\bar{c}_{p,min} \cdot V_{min} + (\lambda_{u_2,oc} - 1) L_{min} \cdot \bar{c}_{p,L}^{T_{Z,N}}}$$

$$= 298 + \frac{3991000}{35,8 \cdot 50,37 + (0,88) \cdot 47,81 \cdot 32,3} = 1560 \text{ K}$$

4.
$$\left[\bar{c}_{p,oc} + \lambda_{oc}^* L_{min} \bar{c}_{p,L}^{T_S} \right] (T_S - T_0) + \tilde{H}_{u,oc}$$

$$= \left\{ \bar{c}_{p,min} \cdot V_{min} + \bar{c}_{p,L}^{T_Z} \cdot (\lambda_{oc}^* - 1) \cdot L_{min} \right\} (T_{Z,N} - T_0)$$

$$\lambda_{oc}^* = \frac{\bar{c}_{p,oc} (T_S - T_0) + \tilde{H}_u - (\bar{c}_{p,min} \cdot V_{min} + \bar{c}_{p,L}^{T_Z} L_{min}) (T_Z - T_0)}{\bar{c}_{p,L}^{T_Z} L_{min} (T_Z - T_0) - \bar{c}_{p,L}^{T_S} L_{min} (T_S - T_0)}$$

$$= \frac{146,7(473 - 298) + 3991000 - (35,8 \cdot 50,37 + 32,3 \cdot 47,81)(1262)}{32,3 \cdot 47,81 \cdot (1262) - 29,4 \cdot 47,81 \cdot (175)}$$

$$= 2,17$$

$$X_{O_2,S}^* = \frac{1}{1 + \lambda_{oc}^* L_{min}} = 9,55 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kmol}_{oc}}{\text{kmol}_{tot}}$$

$X_{O_2,S}^* > X_{O_2,S} \Rightarrow$ Anreicherung ok! (2/4)

MUSTER SS 2013

5.

$$\dot{V}_s = \dot{V}_{NFS} \cdot \frac{T_s}{T_N} \cdot \frac{P_N}{P_s} = 2339 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,65 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_s = X_{O_2,s} \cdot \dot{m}_{O_2} + (1 - X_{O_2,s}) \cdot \dot{m}_L = 29,48 \frac{\text{kg}}{\text{hour}}$$

$$\rho_s = \frac{P_N \cdot \dot{m}_s}{Q \cdot T_s} = 0,759 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\dot{m}_s = \dot{V}_s \cdot \rho_s = 0,4933 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{s,S} = C_{DL} \cdot A_L \cdot \sqrt{2 \rho_s \cdot \Delta P_{tB}}$$

$$\dot{m}_{s,P} = C_{DB} \cdot A_B \cdot \sqrt{2 \rho_s \cdot \Delta P_{tB}}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_{s,P} + \dot{m}_{s,S} = \dot{m}_{s,S} \left(1 + \frac{1}{6,5}\right)$$

$$\dot{m}_s = \left(1 + \frac{1}{6,5}\right) \cdot C_{DL} \cdot A_L \cdot \sqrt{2 \rho_s \cdot \Delta P_{tB}}$$

$$A_L = \frac{\dot{m}_s}{C_{DL} \cdot \left(1 + \frac{1}{6,5}\right) \sqrt{2 \rho_s \cdot \Delta P_{tB}}} = 7,92 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$$

$$A_B = A_L \cdot \frac{C_{DL}}{C_{DB} \cdot 6,5} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$$

3/4

MUSTER SS 2013

6.

$$\bar{u}_L = \frac{\dot{m}_s \cdot 6,5}{(1 + 6,5) C_{DL} \cdot A_L \cdot \rho_s} = 88,91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$u'_L = 0,2 \cdot \bar{u}_L = 17,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad ; \quad l_t = 0,7 \cdot d_L$$

$$Da_t = \frac{l_t}{u'} \cdot \frac{Se^2}{\nu} \cdot Pr = 1$$

$$Da_t = \frac{0,7 \cdot d_L}{0,2 \cdot \bar{u}_L} \cdot \frac{Se^2}{\nu} \cdot Pr = 1$$

$$\Rightarrow d_L = \frac{u' \cdot \nu}{0,7 \cdot Se^2 \cdot Pr} = 0,0268 \text{m}$$

$$N_L = \frac{A_L \cdot 4}{\pi \cdot d_L^2} = 14,04 \approx 14$$

4/4