



Thermodynamik II - Übung 2

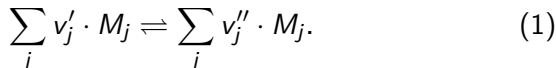
Nicolas Lanzetti

Heutige Themen

- Zusammenfassung letzter Woche;
- Adiabate Flammtemperatur;
- Oberer und unterer Heizwert;
- Abgasrückführung.

Zusammenfassung letzter Woche

- Allgemeine Schreibweise einer chemischen Reaktion:



- Stöchiometrische Koeffizienten:
 - für die Edukte (Reaktanden):

$$v_j' \neq 0, \quad v_j'' = 0. \quad (2)$$

- für die Produkte:

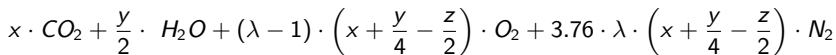
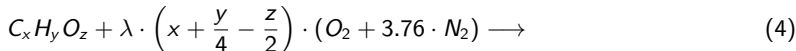
$$v_j' = 0, \quad v_j'' \neq 0. \quad (3)$$

- **Wichtig:** Im Allgemeinen laufen chemische Reaktionen gleichzeitig in beiden Richtungen ab!

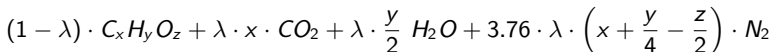
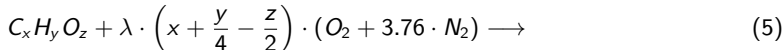
Zusammenfassung letzter Woche

Verbrennung von $C_x H_y O_z$ an Luft:

- $\lambda \geq 1$:



- $\lambda \leq 1$:



Zusammenfassung letzter Woche

- Der Luftüberschussfaktor ist definiert als

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{\text{Luft}}/\dot{m}_{\text{Brennstoff}}}{(\dot{m}_{\text{Luft}}/\dot{m}_{\text{Brennstoff}})_{\text{stöch}}} = \frac{\dot{n}_{\text{Luft}}/\dot{n}_{\text{Brennstoff}}}{(\dot{n}_{\text{Luft}}/\dot{n}_{\text{Brennstoff}})_{\text{stöch}}}. \quad (6)$$

- Qualitativ:

$$\lambda = \frac{\text{was wir (aus der Aufgabenstellung) haben}}{\text{was gemäss Stoffbilanz notwendig ist}}. \quad (7)$$

- Man kann drei Fälle unterscheiden:
 - $\lambda < 1$: Fetttes Gemisch (zu wenig Luft);
 - $\lambda = 1$: Stochiometrisches Gemisch;
 - $\lambda > 1$: Mageres Gemisch (zu viel Luft).

Zusammenfassung letzter Woche

1. Hauptsatz für offene Systeme lautet:

$$\Delta \dot{H}|_{E \rightarrow P} = \dot{Q} - \dot{W}_s. \quad (8)$$

mit

$$h(T, p) = h_f^0(T_{\text{ref}}, p_{\text{ref}}) + (h(T, p) - h(T_{\text{ref}}, p_{\text{ref}})). \quad (9)$$

Bei idealen Gasen:

$$h(T) = h_f^0(T_{\text{ref}}) + (h(T) - h(T_{\text{ref}})). \quad (10)$$

Zur Erinnerung: Vorzeichen:

- $W > 0$: Vom System geleistete Arbeit;
- $W < 0$: Am System geleistete Arbeit;
- $Q > 0$: Zum System zugeführte Wärme;
- $Q < 0$: Vom System abgegebene Wärme.

Zusammenfassung letzter Woche

Die Reaktionswärme ist definiert als:

$$Q_R|_T = -\Delta H_R|_T \quad (11)$$

mit

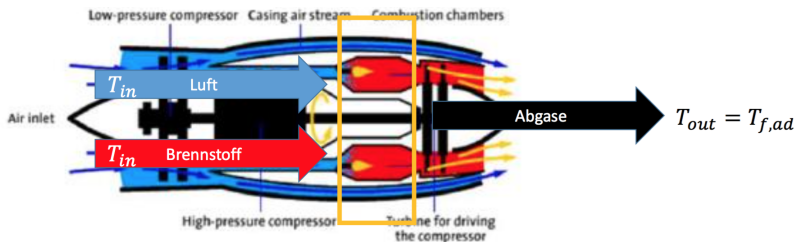
- $T = T_{\text{ref}}$:

$$\Delta H_R|_{T_{\text{ref}}} = \sum (v'' - v') \cdot h_f^0 \quad (12)$$

- $T \neq T_{\text{ref}}$:

$$\begin{aligned} \Delta H_R|_T &= \Delta H_R|_{T_{\text{ref}}} + \Delta H_{\text{th}} \\ &= \Delta H_R|_{T_{\text{ref}}} + \sum (v'' - v') \cdot (h(T) - h(T_{\text{ref}})) \end{aligned} \quad (13)$$

Adiabate Flammtemperatur



- Die Temperatur die erreicht werden könnte wenn man einen Reaktor hat, der adiabat arbeitet und keine Arbeit leistet.
- Indikator für den Wirkungsgrad eines Prozesses.
- Mass für die thermische Belastung einer Anlage.

Adiabate Flammtemperatur

Aus dem 1. Hauptsatz folgt

$$\Delta H = Q - W = 0, \quad Q = 0, W = 0. \quad (14)$$

Daraus folgt

$$\Delta H = H_P - H_E = 0. \quad (15)$$

$$\underbrace{\sum v'' \cdot (h_f^0(T_{\text{ref}}) + h(T_{f,\text{ad}}) - h(T_{\text{ref}}))}_{H_P} - \underbrace{\sum v' \cdot (h_f^0(T_{\text{ref}}) + h(T_E) - h(T_{\text{ref}}))}_{H_E} = 0$$

und somit

$$\underbrace{-\sum (v'' - v') \cdot h_f^0(T_{\text{ref}})}_{\text{Chemische freigesetzte Energie} = Q_R} = \underbrace{\sum v'' \cdot (h(T_{f,\text{ad}}) - h(T_{\text{ref}})) - \sum v' \cdot (h(T_E) - h(T_{\text{ref}}))}_{\text{Thermische Energie}}$$

Adiabate Flammtemperatur

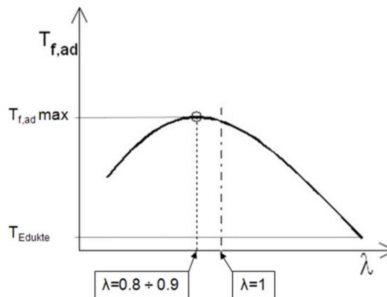
Das Finden der adiabaten Flammtemperatur ist ein iteratives Vorgehen:

- Erste Schätzung gemäss

$$T_{f,ad} - T_E = 1900 \text{ K} \dots 2300 \text{ K} \quad \text{bei } \lambda \approx 1.$$

- Schätzung in die Energiegleichung einsetzen;
- Zwei Szenarien:
 - $\Delta H_{th} > Q_R = -\Delta H_R$: eine kleinere adiabate Flammtemperatur muss gewählt werden;
 - $\Delta H_{th} < Q_R = -\Delta H_R$: eine grössere adiabate Flammtemperatur muss gewählt werden.
- Iterieren und schlussendlich interpolieren.

Adiabate Flammtemperatur



- $\lambda < 1$: Weniger freigesetzte Wärme.
- $\lambda > 1$: Zu viel Luft zu erwärmen.
- **Wichtig:** Die Kurve ist **nicht** symmetrisch!

Adiabate Flammtemperatur

Zwei Faustregeln:

$$\lambda_{\max} = 0.8 \dots 0.9 \quad (16)$$

$$T_{f,ad} - T_E = 1900 \text{ K} \dots 2300 \text{ K} \quad \text{bei } \lambda \approx 1. \quad (17)$$

Diese Faustregeln können bei den Schätzungen hilfreich sein. Die gelten für fast alle Brennstoffe.

Unterer und Oberer Heizwert

$$H_{u,o} = Q_R = -\Delta H_R \quad (18)$$

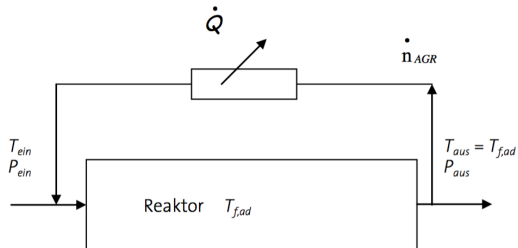
- unterer Heizwert H_u : Verbrennungsprodukt Wasser gasförmig;
- oberer Heizwert H_o : Verbrennungsprodukt Wasser flüssig.

Es gilt:

$$H_o > H_u, \quad (19)$$

da man bei dem oberen Heizwert auch die Verdampfungsenthalpie zur Verfügung hat.

Abgasrückführung - Aufgabe 2



- Ohne Rückführung: Wie immer.

Abgasrückführung - Aufgabe 2

- Mit Rückführung:

– $\lambda \geq 1$:

$$\begin{aligned}
 & C_x H_y + \lambda \cdot \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot (O_2 + 3.76 \cdot N_2) + \\
 & + n_x \cdot \left[x \cdot CO_2 + \frac{y}{2} \cdot H_2O + (\lambda - 1) \cdot \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot O_2 + 3.76 \cdot \lambda \cdot \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot N_2 \right] \rightarrow \\
 & (1 + n_x) \cdot \left[x \cdot CO_2 + \frac{y}{2} \cdot H_2O + (\lambda - 1) \cdot \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot O_2 + 3.76 \cdot \lambda \cdot \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot N_2 \right]
 \end{aligned}$$

– $\lambda < 1$:

$$\begin{aligned}
 & C_x H_y + \lambda \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot (O_2 + 3.76 N_2) + \\
 & + n_x \cdot \left[(1 - \lambda) \cdot C_x H_y + \lambda \cdot x \cdot CO_2 + \frac{\lambda \cdot y}{2} \cdot H_2O + 3.76 \cdot \lambda \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot N_2 \right] \rightarrow \\
 & (1 + n_x) \cdot \left[(1 - \lambda) \cdot C_x H_y + \lambda \cdot x \cdot CO_2 + \frac{\lambda \cdot y}{2} \cdot H_2O + 3.76 \cdot \lambda \cdot \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot N_2 \right]
 \end{aligned}$$

Fragen?