Thermodynamik I - Übung 5

Nicolas Lanzetti

Heutige Themen

- Zusammenfassung letzter Woche;
- Enthalpie;
- Erster Hauptsatz für offene Systeme;
- Halboffene Systeme.

Zusammenfassung letzter Woche

- Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen:

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\,\mathrm{d}T \tag{1}$$

- Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck:

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\,\mathrm{d}T \tag{2}$$

- Für ideale Gase sind die Bedingungen konstantes Volumen/konstanter Druck nicht notwending.
- Für perfekte Gase sind c_v und c_p konstant und gilt

$$c_p = R + c_v. \tag{3}$$

Die Enthalpie

- Die Enthalpie ist definiert als

$$H = U + p \cdot V, \qquad h = u + p \cdot v. \tag{4}$$

- "Die Enthalpie ist an sich kein physikalisches Konzept, sondern dient vor allem als Rechenerleitung".
- U entspricht der inneren Energie.
- $p \cdot V$ bedeutet diejenige Arbeit, die nötig ist, um das Volumen V des Systems gegen die Wirkung des konstanten Aussendruckes p aufzuspannen.
- Enthalpie ist eine Zustandsgrösse (wie u, v, p, ...).
- Für die Bestimmung der Enthalpie: Tabellen analog zu u.

Die Enthalpie bei idealen Gasen

- Die Enthalpie (analog zu der inneren Energie) ist nur eine Funktion der Temperatur;
- Es gilt:

$$h = u + p \cdot v = u + R \cdot T. \tag{5}$$

- Spezifische Wärmekapazität:

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) \, \mathrm{d}T. \tag{6}$$

Erster Hauptsatz für offene Systeme

- Bei geschlossenen Systemen gilt

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W. \tag{7}$$

- Jetzt: Masse über die Systemgrenzen: offen!
- Bilanzen:
  - Massenbilanz;
  - Energiebilanz.
- Meiste thermodynamische System sind offen:
  - Turbinen;
  - Kompressoren;
  - Düsen;
  - ... (siehe Kapitel 5.4 im Skript)

Massenbilanz

$$\text{Massenbilanz} = \text{Massenerhaltung}$$

Massenerhalung liefert:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} M = \sum_i \dot{m}_{i,e} - \sum_i \dot{m}_{i,a}, \tag{8}$$

d.h.

$$\text{Änderung der Masse} = \text{Eintretende Masse} - \text{Austretende Masse.}$$

Oft: Stationärer Betrib: $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\cdot) = 0$:

$$\sum_i \dot{m}_{i,e} = \sum_i \dot{m}_{i,a}. \tag{9}$$

Energiebilanz

$$\text{Energiebilanz} = \text{Energieerhaltung}$$

Energieerhaltung liefert (Massenstrome tragen Energie mit!):

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}E = \dot{Q} - \dot{W}_s + \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot \left(h_{i,e} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e}\right) - \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot \left(h_{i,a} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a}\right) \tag{10}$$

Achtung: Die Einheit ist Watt: $\mathrm{W} = \mathrm{J/s}$.

Warum benutzt man die Enthalpie?

- Zwei Typen von Arbeit:
  - Gewünschte Arbeit: $\dot{W}_s$.
  - Arbeit zum Einschieben und Ausschieben der Massenströme:

$$\dot{W}_a = p \cdot A \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = p \cdot A \cdot w = p \cdot \dot{V} = p_a \cdot \dot{m}_a \cdot v_a.$$

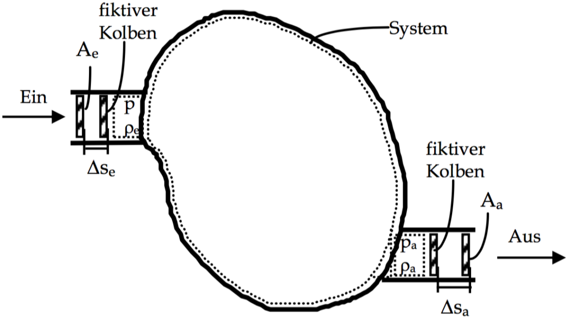
$$\dot{W}_e = -p \cdot A \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = -p \cdot A \cdot w = -p \cdot \dot{V} = -p_e \cdot \dot{m}_e \cdot v_e.$$

  Das System leistet auch diese Arbeit!

- Zusammengefasst:

$$\dot{W}_{\text{tot}} = \dot{W}_s + \sum_i p_{a,i} \cdot \dot{m}_{a,i} \cdot v_{a,i} - \sum_i p_{e,i} \cdot \dot{m}_{e,i} \cdot v_{e,i}.$$

Warum benutzt man die Enthalpie?



Warum benutzt man die Enthalpie?

Aus der Energieerhaltung folgt

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}E = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot \left(u_{i,e} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e} \right) - \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot \left(u_{i,a} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a} \right).$$

Einsetzen von W liefert

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}E = \dot{Q} - \left(\dot{W}_s + \sum_i p_{a,i} \cdot \dot{m}_{a,i} \cdot v_{a,i} - \sum_i p_{e,i} \cdot \dot{m}_{e,i} \cdot v_{e,i} \right)$$
$$+ \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot \left(u_{i,e} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e} \right) - \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot \left(u_{i,a} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a} \right).$$

Warum benutzt man die Enthalpie?

Aus

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}E = \dot{Q} - \left(\dot{W}_s + \sum_i p_{a,i} \cdot \dot{m}_{a,i} \cdot v_{a,i} - \sum_i p_{e,i} \cdot \dot{m}_{e,i} \cdot v_{e,i}\right)$$
$$+ \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot \left(u_{i,e} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e}\right) - \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot \left(u_{i,a} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a}\right)$$

folgt

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}E = \dot{Q} - \dot{W}_s + \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot \left(\underbrace{u_{i,e} + p_{e,i} \cdot v_{e,i}}_{h_{i,e}} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e}\right)$$
$$- \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot \left(\underbrace{u_{i,a} + p_{a,i} \cdot v_{a,i}}_{h_{i,a}} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a}\right).$$

Erster Hauptsatz für offene Systeme

- Massenbilanz:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}M = \sum_i \dot{m}_{i,e} - \sum_i \dot{m}_{i,a}. \tag{11}$$

- Energiebilanz:

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}E = \dot{Q} - \dot{W}_s &+ \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot \left(h_{i,e} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e}\right) \\ &- \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot \left(h_{i,a} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a}\right).\end{aligned} \tag{12}$$

- Wichtig:
  - Enthalpie!
  - Watt!

Stationärer Betrieb

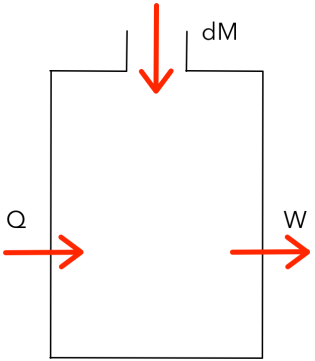
- Bei stationärem Betrieb sind alle zeitlichen Ableitungen Null:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\cdot) = 0. \tag{13}$$

- Grundidee: "Eine Turbine arbeitet stationär falls ich einmal pro Minute sie fotografiere und immer dasselbe Bild erhalte".
- Instationär also z.B. beim Einschalten der Turbine.
- Für stationäre Prozesse sind die Bilanzierungen viel einfacher.

Halboffene Systeme

Grundidee: Man hat ein System im Zustand 1, man führt Masse zu/ab, um den Zustand 2 zu erreichen.



Halboffene Systeme

- Massenbilanz:

$$m_2 = m_1 + \Delta m_e - \Delta m_a. \tag{14}$$

- Energiebilanz:

$$\begin{aligned}\Delta E = Q - W_s &+ \sum_i m_{i,e} \cdot \left(h_{i,e} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e} \right) \\ &- \sum_i m_{i,a} \cdot \left(h_{i,a} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a} \right).\end{aligned} \tag{15}$$

- Bemerkungen:
  - Systemmasse nicht konstant;
  - Konsante Ein- und Ausschubbedinungen.

Fragen?