



Thermodynamik I - Übung 9

Nicolas Lanzetti

Heutige Themen

- Zusammenfassung letzter Woche;
- Die Exergie;
- Die Anergie;
- Die Exergieänderung.

Zusammenfassung letzter Woche

Erzeugte Entropie für geschlossene Systeme:

$$S_{\text{erz}} = S_2 - S_1 - \sum_i \frac{Q_i}{T_{G,i}} \quad (1)$$

mit T_G Temperatur am Systemgrenze.

Es gilt:

- $S_{\text{erz}} = 0$: Reversibel;
- $Q = 0$: Adiabatisch;
- $S_2 - S_1 = 0$: Isentrop;
- Kreisprozesse: $S_2 - S_1 = 0$.

Adiabatisch + Reversibel \Rightarrow Isentrop.

Zusammenfassung letzter Woche

Erzeugte Entropie für offene Systeme:

$$\dot{S}_{\text{erz}} = \frac{d}{dt}S - \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_{G,i}} + \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot s_{i,a} - \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot s_{i,e} \quad (2)$$

mit T_G Temperatur am Systemgrenze.

Es gilt:

- $\dot{S}_{\text{erz}} = 0$: Reversibel;
- $\dot{Q} = 0$: Adiabat;
- $\frac{d}{dt}S = 0$: Stationär;

Spezialfall: Stationär mit einem Massenstrom:

$$\dot{S}_{\text{erz}} = - \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_{G,i}} + \dot{m} \cdot (s_a - s_e). \quad (3)$$

Die Exergie und die Entropie

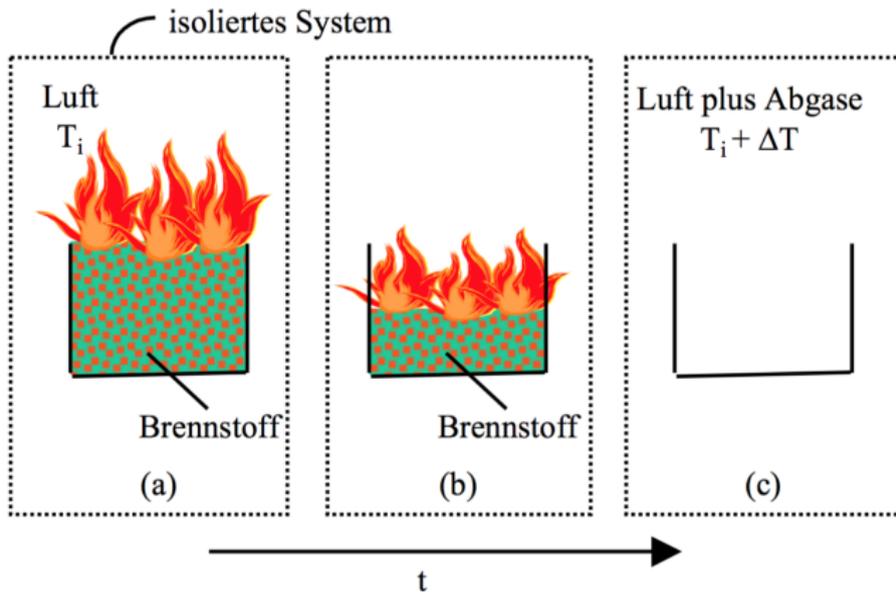
Erinnerung:

Entropie = Mass für die verlorenen Arbeitsmöglichkeiten einer thermischen Energiemenge

Neu:

Exergie = eine qualitative Bewertung der Energie = für Arbeit nutzbarer Teil der vorhandenen Energie

Die Exergie



Definition der Exergie

Als Exergie bezeichnen wir den Anteil des Energieinhaltes eines Systems, der maximal in Arbeit umgewandelt werden könnte, **bis zum vollständigen Ausgleich mit der Umgebung.**

Bemerkungen:

- Was heisst maximal? Ideale Bedingungen: Reversibler Prozess.
- Die Exergie ist abhängig von der Umgebung. Für eine Exergieanalyse müssen wir die Umgebungsbedingungen kennen.

Die Anergie

Der Energieanteil, der nach Erreichen des Gleichgewichtes mit der Umgebung nicht in Arbeit umgewandelt werden kann, bezeichnen wir als Anergie.

Es gilt also:

$$\text{Energie} = \text{Energie} + \text{Anergie}.$$

Beispiele

- See: Viel Energie, aber nicht nutzbar \Rightarrow Energie = Anergie
- Ideale Batterie: Nutzbare Energie \Rightarrow Energie = Exergie

Exergie für geschlossene Systeme

Den Exergieinhalt eines geschlossenen Systems ist:

$$E_x = W_{\text{nutz,rev}} = U - U_0 + p_0 \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (S - S_0) + KE + PE \quad (4)$$

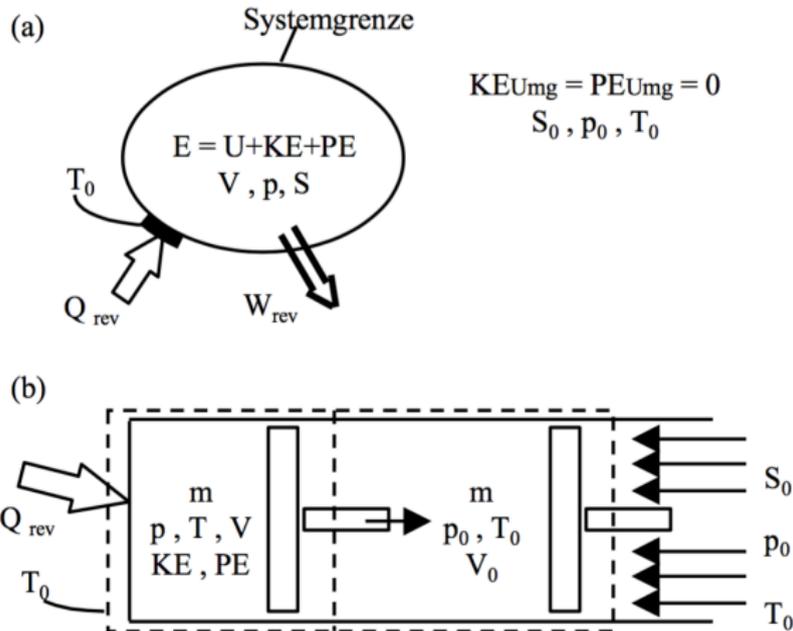
oder massenspezifisch

$$e_x = u - u_0 + p_0 \cdot (v - v_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + ke + pe. \quad (5)$$

Da U, p, V, T, S, KE, PE Zustandsgrößen sind, ist auch die Exergie eine Zustandsgrösse.

Exergieänderung für geschlossene Systeme

Woher kommt die Formel für die Exergie?



Exergie für geschlossene Systeme

Woher kommt die obige Formel für die Exergie?

$$E_0 - E = U_0 - U - KE - 0 - PE - 0 = Q_{\text{rev}} - W_{\text{rev}} \quad (6)$$

Aus $S_{\text{erz}} = 0$ (reversibel) oder aus $\delta Q_{\text{rev}} = T_0 \cdot dS$ folgt:

$$S_{\text{erz}} = S_0 - S - \frac{Q_{\text{rev}}}{T_0} = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{rev}} = T_0 \cdot (S_0 - S). \quad (7)$$

Die reversible Arbeit besteht aus

$$W_{\text{rev}} = W_{\text{nutz,rev}} + p_0 \cdot (V_0 - V) \quad (8)$$

somit folgt

$$U_0 - U - KE - PE = T_0 \cdot (S_0 - S) - W_{\text{nutz,rev}} - p_0 \cdot (V_0 - V) \quad (9)$$

$$E_{x1} = W_{\text{nutz,rev}} = U - U_0 + p_0 \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (S - S_0) + KE + PE. \quad (10)$$

Exergieänderung für geschlossene Systeme

Den Exergieinhalt eines geschlossenen Systems ist:

$$E_{x2} - E_{x1} = U_2 - U_1 + p_0 \cdot (V_2 - V_1) - T_0 \cdot (S_2 - S_1) + \Delta KE + \Delta PE \quad (11)$$

oder massenspezifisch

$$e_{x2} - e_{x1} = u_2 - u_1 + p_0 \cdot (v_2 - v_1) - T_0 \cdot (s_2 - s_1) + \Delta ke + \Delta pe. \quad (12)$$

Exergieverlust

- S_{erz} ist ein Mass für die Irreversibilität eines Systems.
- $E_{x,\text{verlust}}$ ist ein Mass für die verlorene Arbeit

Es gilt:

$$E_{x,\text{verlust}} = W_{\text{verloren}} = W_{\text{max}} - W = W_{\text{rev}} - W = T_0 \cdot S_{\text{erz}}, \quad (13)$$

d.h. der Exergieverlust ist mit der erzeugten Entropie (und die Umgebungsbedingungen) direkt verknüpft.

Exergiebilanz für geschlossene Systeme

$$E_{x2} - E_{x1} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \delta Q - (W - p_0 \cdot (V_2 - V_1)) - T_0 \cdot S_{\text{erz}}, \quad (14)$$

wobei:

- $E_{x2} - E_{x1}$: Exergieänderung im System;
- $\int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \delta Q$: Exergietransfer durch Wärme;
- $W - p_0 \cdot (V_2 - V_1)$: Exergietransfer durch Arbeit;
- $T_0 \cdot S_{\text{erz}}$: Exergieverlust;
- T_0, p_0 : Umgebungsbedingungen;
- T (oder T_G): Temperatur am Systemgrenze.

Herleitung: Kapitel 7.2 im Skript.

Exergiebilanz für geschlossene Systeme

Das zeitspezifische Exergiebilanz lautet:

$$\frac{d}{dt}E_x = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \cdot \dot{Q}_i - \left(\dot{W} - p_0 \cdot \frac{dV}{dt}\right) - T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}}. \quad (15)$$

Fragen?