



# 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;
- $Q = 0$ : Adiabat;
- $S_2 - S_1 = 0$ : Isentrop;
- Kreisprozesse:  $S_2 - S_1 = 0$ .

Adiabat + 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

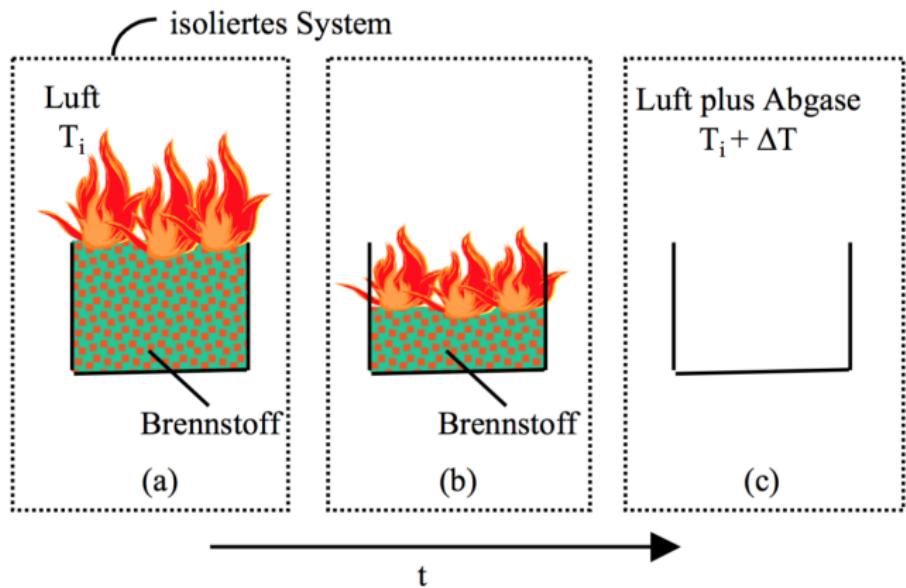
Erinnerung:

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:

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

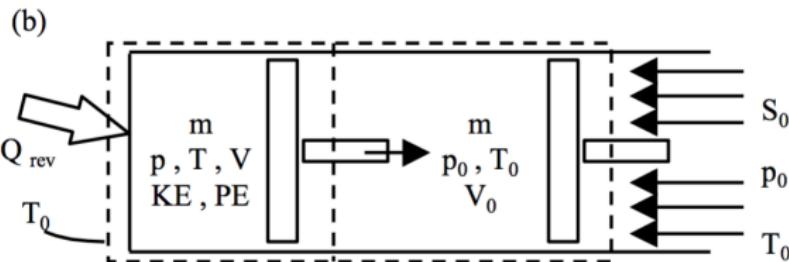
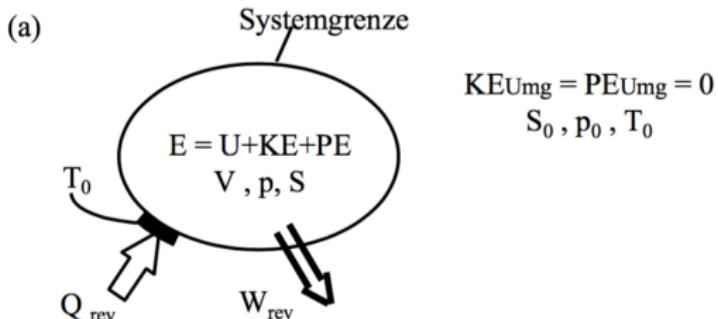
oder massenspezifisch

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

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

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

Es gilt:

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

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?