



# Thermodynamik I - Übung 6

Nicolas Lanzetti

# Heutige Themen

- Zusammenfassung letzter Woche;
- Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik;
- Halboffene Systeme;
- Reversible und irreversible Prozesse;
- Carnot Prozess;
- Die Entropie.

# Zusammenfassung letzter Woche

- Massenbilanz:

$$\frac{d}{dt} M = \sum_i \dot{m}_{i,e} - \sum_i \dot{m}_{i,a}. \quad (1)$$

- Energiebilanz:

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

- Wichtig:

- Enthalpie!
  - Watt!

## Zusammenfassung letzter Woche

- Massenbilanz:

$$m_2 = m_1 + \Delta m_e - \Delta m_a. \quad (3)$$

- Energiebilanz:

$$\begin{aligned} \Delta E = Q - W_s + \sum_i m_{i,e} \cdot \left( h_{i,e} + \frac{w_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e} \right) \\ - \sum_i m_{i,a} \cdot \left( h_{i,a} + \frac{w_{i,a}^2}{2} + g \cdot z_{i,a} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

- Bemerkungen:

- Systemmasse nicht konstant;
- Konsante Ein- und Ausschubbedingungen.

# Der zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Der zweite Hauptsatz hilft uns Aussagen zu treffen über:

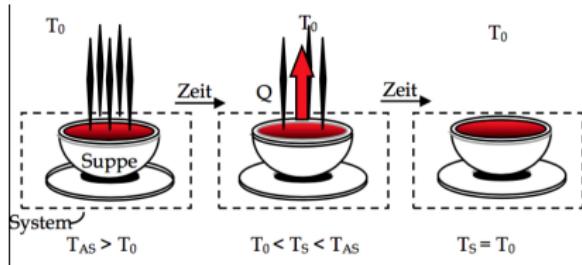
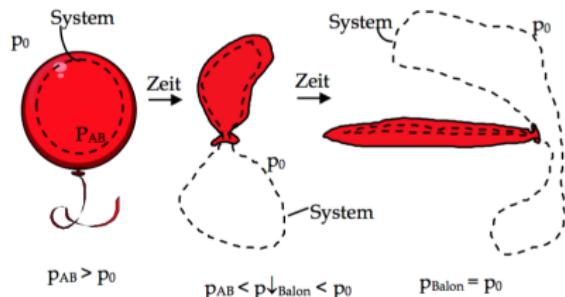
- Die Richtung eines Prozesses;
- Der Energieanteil, der in Arbeit umgewandelt werden kann.

Erster Haupsatz war grundsätzlich:

- Massenbilanz;
- Energiebilanz.

# Richtung von Prozessen

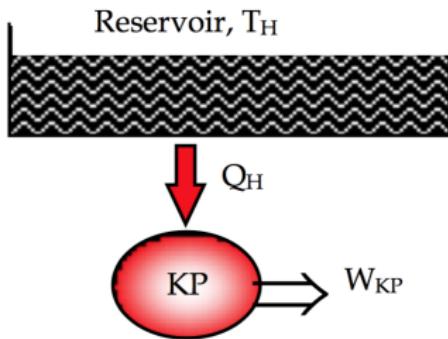
Prozesse laufen spontan nur in einer bestimmten Richtung ab.



# Formulierungen des zweiten Hauptsatz

## Kelvin-Plank Formulierung:

*Es ist unmöglich eine Maschine zu bauen, welche in einem thermischen Kreisprozess kontinuierlich Arbeit an die Umgebung abgibt und dabei nur in Kontakt mit einem einzigen Wärmereservoir steht, aus welchem diese Wärme bezieht.*



## Formulierungen des zweiten Hauptsatz

### Clausius Formulierung:

*Wärme kann nicht von selbst von einem Körper mit tieferer Temperatur auf einen Körper mit höherer Temperatur übertragen werden.*

**Kurz:** Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden.

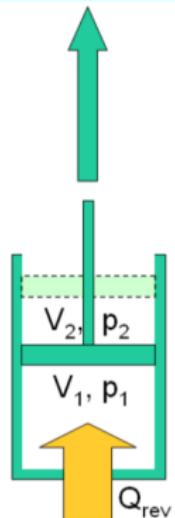
# Reversible und irreversible

- Reversibel = umkehrbar;
- Ein Prozess ist reversibel, falls der Ausgangszustand im System und allen Teilen der Umgebung wiederhergestellt werden kann, ohne dass eine Veränderung zurückbleibt.
- **Aber** alle reale Prozesse sind irreversibel (Reibung, spontane chemische Reaktion, . . . ).
- Irreversibilitäten verursachen Verluste.

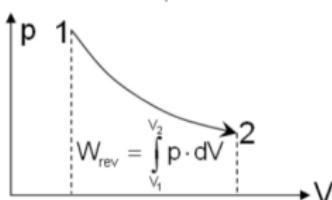
# Beispiel: Expansion

Reversible Expansion

$$W_{\text{rev}} = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$$

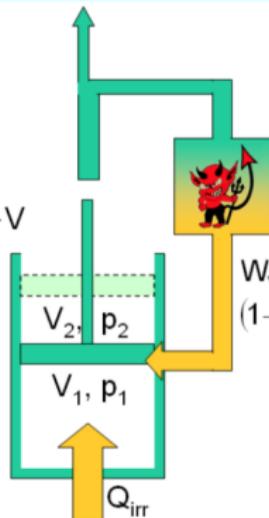


$$|W_{\text{rev}}| > |W_{\text{irr}}|$$



Irreversible Expansion

$$W_{\text{irr}} = \eta_i \cdot W_{\text{rev}} = \eta_i \cdot \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$$



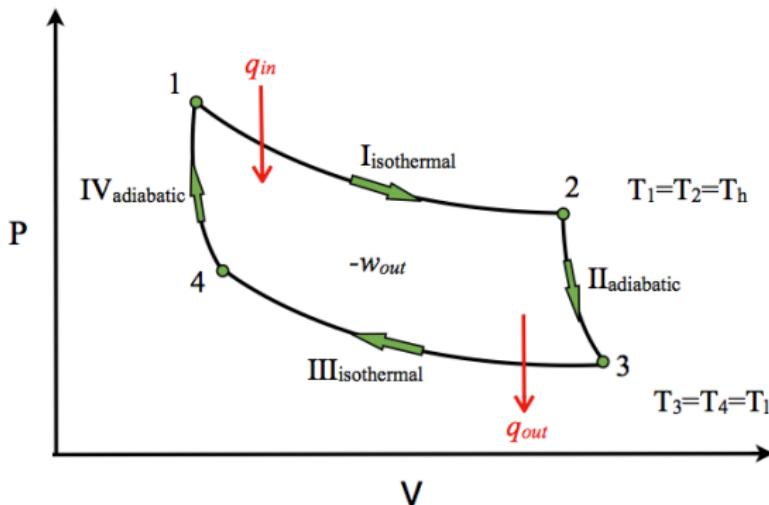
$\Delta U, W_{\text{rev}}$  identisch

$$|Q_{\text{rev}}| > |Q_{\text{irr}}|$$

# Der Kreisprozess nach Carnot

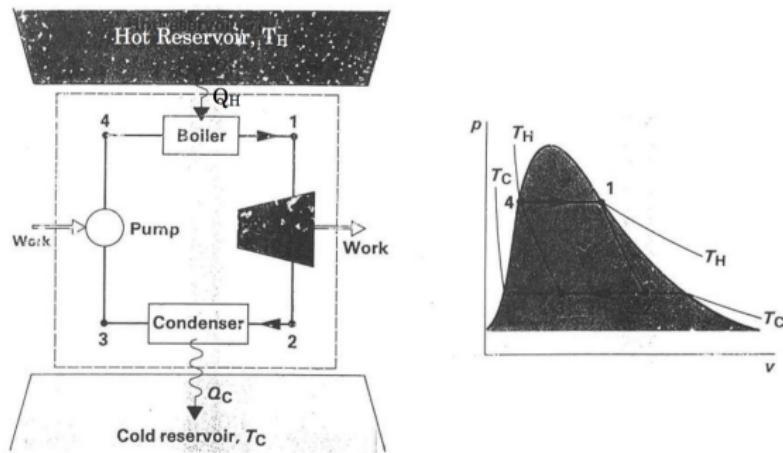
- Mit dem 2. Hauptsatz haben wir gesehen, dass Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden (Formulierung von Kelvin-Plank).
- Die Frage ist also:  
Welcher Anteil kann maximal in Wärme umgewandelt werden?
- Antwort:  
Betachte den Carnotprozess.

# Der Kreisprozess nach Carnot



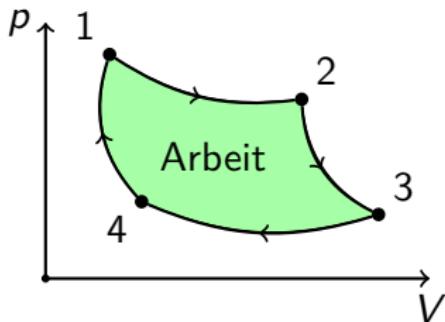
Der Carnot Prozess ist ein idealisierter reversibler Prozess, der zwischen die Temperaturen  $T_H$  und  $T_C$  arbeitet.

# Der Kreisprozess nach Carnot



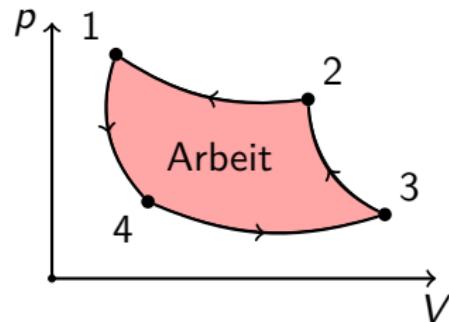
Der Carnot Prozess ist ein idealisierter reversibler Prozess, der zwischen die Temperaturen  $T_H$  und  $T_C$  arbeitet.

# Erinnerung: Kreisprozesse



Wärmekraftmaschine:

$$W_{KP} > 0, \quad Q_{KP} > 0.$$



Wärmepumpe/Kältemaschine:

$$W_{KP} < 0, \quad Q_{KP} < 0.$$

# Der thermische Wirkungsgrad (bei Wärmekraft.)

Der thermische Wirkungsgrad ist definiert als

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{KP}}}{Q_{\text{zu}}} = \frac{W_{\text{KP}}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_H}{Q_C}. \quad (5)$$

Bei dem Carnot Prozess gilt:

$$\frac{Q_H}{Q_C} = \frac{T_H}{T_C}. \quad (6)$$

Der thermische Wirkungsgrad eines Carnot Prozesses ist somit:

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T_H}{T_C} = \frac{T_H - T_C}{T_H}. \quad (7)$$

# Die Leistungsziffer (bei Wärmepumpen/Wärmekalt.)

- Zuerst:
  - Was ist eine Wärmepumpe?
  - Was ist eine Wärmekraftmaschine?
- **Kältemaschine:**

Nutzen ist dem kalten Reservoir abgefuhrt Warme (z.B. Kühlschrank).
- **Wärmepumpe:**

Nutzen ist dem warmen Reservoir zugefuhrte Wärme (z.B. Heizung).

# Die Leistungsziffer (bei Wärmepumpen/Kälte.)

Der Leistungsziffer ist definiert als:

- Wärmepumpe:

$$\varepsilon_{WP} = \frac{Q_H}{W_{KP}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \quad (8)$$

Carnot:

$$\varepsilon_{WP} = \frac{T_H}{T_H - T_C}. \quad (9)$$

- Wärmekaltmaschine:

$$\varepsilon_{KM} = \frac{Q_C}{W_{KP}} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} \quad (10)$$

Carnot:

$$\varepsilon_{KM} = \frac{T_C}{T_H - T_C}. \quad (11)$$

## Bemerkungen zu dem Carnot Prozess

- Es ist unmöglich, Wärme vollständig in Arbeit umzuwandeln.
- Alle reversible Maschinen, die zwischen  $T_H$  und  $T_C$  arbeiten haben denselben Wirkungsgrad. Das ist der theoretische maximale Wirkungsgrad.
- Der Carnot Prozess sagt also, wie viel Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann.
- Irreversibilitäten verursachen **immer** eine Verkleinerung des Wirkungsgrades.

# Die Entropie

- Einfache Einführung für die heutige Übung: Die Theorie kommt nächste Woche in der Vorlesung.
- Die Entropie ist ein Mass dafür, wie viel der potentiellen Arbeitsmöglichkeit einer Energiemenge schon verloren ist.
- Die Entropie ist also mit den Irreversibilitäten verbunden:  
Reserviblen Prozesse verursachen keine Änderung der Entropie.

# Die Entropie

- Die Entropie ist eine Zustandsgrösse.
- Die Entropie wird

$S$

genannt und hat Einheit:

$$\left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} \right].$$

- Analog zu  $u$  und  $h$  kann man auch die massenspezifische Entropie und die molenspezifische Entropie.
- Bestimmung der Entropie: Analog zu der inneren Energie und der Enthalpie (Tabellen).
- Für ideale Gase ist ein bisschen anders: Mehr in den nächsten Wochen.

# Die Entropie

Entropie kann nicht vernichtet werden. In jedem realen Prozess wird Entropie erzeugt. Wenn keine Entropie erzeugt wird, wäre unser Prozess reversibel.

Entropieerzeugung für geschlossene Systeme:

$$S_{\text{erz}} = S_2 - S_1 - \sum \frac{Q}{T_G}. \quad (12)$$

Es gilt:

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

# Die Entropie

Es gilt:

$$S_{\text{erz}} = S_2 - S_1 - \sum \frac{Q}{T_G} \geq 0. \quad (13)$$

Aus dieser Gleichung folgt auch, dass

Adiabat + Reversibel  $\Rightarrow$  Isentrop.

**Ziel:**  $S_{\text{erz}}$  so klein wie möglich, weil reversible Prozesse einen höheren Wirkungsgrad haben.

# Die Entropie bei idealen Gasen

- Polytrope Zustandsänderung:

$$p \cdot V^n = \text{konst.} \quad (14)$$

- Bei isentropen Prozessen gilt:

$$n = \kappa = \frac{c_p}{c_v}, \quad (15)$$

$\kappa$  wird auch Isentropenkoeffizient genannt.

- Es gilt (nur bei idealen Gasen):

Isentrop  $\Rightarrow$  Adiabat + Reversibel.

# Fragen?