



## Thermodynamik I – Übung 5

Folien von Dominic Landolf, angepasst durch Pascal

# Ablauf

- Recap: Spezifische Wärmekapazitäten
- Offene Systeme
- Enthalpie
- Massenstrom-Bilanz
- 1. Hauptsatz für offene Systeme
- Halboffene Systeme
- 1. Hauptsatz für halboffene Systeme

## Recap: Spezifische Wärmekapazitäten

- Die spezifische Wärmekapazität  $c_v$  wird benutzt, wenn Wärme bei **konstantem Volumen** dem System zugeführt wird

$$du = c_v dT$$



$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) \cdot dT$$

Für **ideale Gase** auch bei **nicht konstantem Volumen** anwendbar

- Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  wird benutzt, wenn Wärme bei **konstantem Druck** dem System zugeführt wird

$$dh = c_p dT$$



$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) \cdot dT$$

Für **ideale Gase** auch bei **nicht konstantem Druck** anwendbar

- Weiter gilt für **ideale Gase**:  $R = c_p(T^*) - c_v(T^*)$  für alle  $T^*$  (aus Tab.) wobei:  $R \stackrel{3}{=} \bar{R}/M$

# Offene Systeme

- **Offene Systeme:**  
Neben Austausch von Wärme und Arbeit fließen auch **Massenströme** über die Systemgrenzen
- Viele für die Thermodynamik wichtige technische Komponenten sind offene Systeme (Düse, Diffusor, Turbine, Kompressor, Pumpe, Wärmetauscher etc.)
- Da die Massenströme Energie transportieren, müssen die damit verbundenen **Energieströme** in die Betrachtung der Energiebilanz (1. Hauptsatz) miteinbezogen werden

# Enthalpie

- Energie von geschlossenem System:  $U$ ,  $KE$ ,  $PE$
- Für offene Systeme neue Energieform, da Prinzip von  $U$  nicht mehr ausreicht.

- **Die Enthalpie** ist definiert durch:

$$H = U + p \cdot V$$

- Enthalpie ist eine **Zustandsgrösse** und hat als Energieform die Einheit **Joule**
- Der Term  $p \cdot V$  ist die Arbeit verrichtet gegen die Wirkung des konstanten Aussendrucks  $p$  um das Volumen  $V$  aufzuspannen

# Massenstrom-Bilanz

- Masse bleibt in einem System erhalten, sie wird weder vernichtet noch erzeugt
- Da es in offenen Systemen Massenströme gibt, können wir eine Massenstrom-Bilanz (Massenerhaltung) schreiben:  $[\dot{m}] = \text{kg/s}$

Zeitliche Änderung des Masseninhaltes eines Systems	=	Summe der eintretenden Massenströme	-	Summe der austretenden Massenströme
-----------------------------------------------------------	---	-------------------------------------------	---	-------------------------------------------

$$\frac{dM_s}{dt} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{i,\text{ein}} - \sum_{j=1}^k \dot{m}_{j,\text{aus}}$$

- Für einen stationären Prozess bleibt der Masseninhalt eines Systems konstant und es gilt demzufolge:  $\frac{dM_s}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$

# 1. Hauptsatz für offene Systeme I

- Auch für offene Systeme stellt der 1. Hauptsatz eine Energiebilanz (resp. Energieerhaltung) dar
- Dabei müssen nun auch die Energieströme aufgrund der ein- und austretenden Masse berücksichtigt werden, welche folgende Energieformen mit sich tragen:
  - Kinetische Energie
  - Potentielle Energie
  - Enthalpie

# 1. Hauptsatz für offene Systeme II

- In Worten lautet die Energiebilanz nun:

$$\left| \begin{array}{c} \text{Energiezunahme im} \\ \text{System während} \\ \text{Zeitintervall } \Delta(t) \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{Energiezunahme} \\ \text{durch Wärme oder} \\ \text{Arbeit} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{Energie der} \\ \text{eintretenden Masse} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{Energie der} \\ \text{austretenden Masse} \end{array} \right|$$

wie im geschlossenen System

- 1. Hauptsatz für offene Systeme:

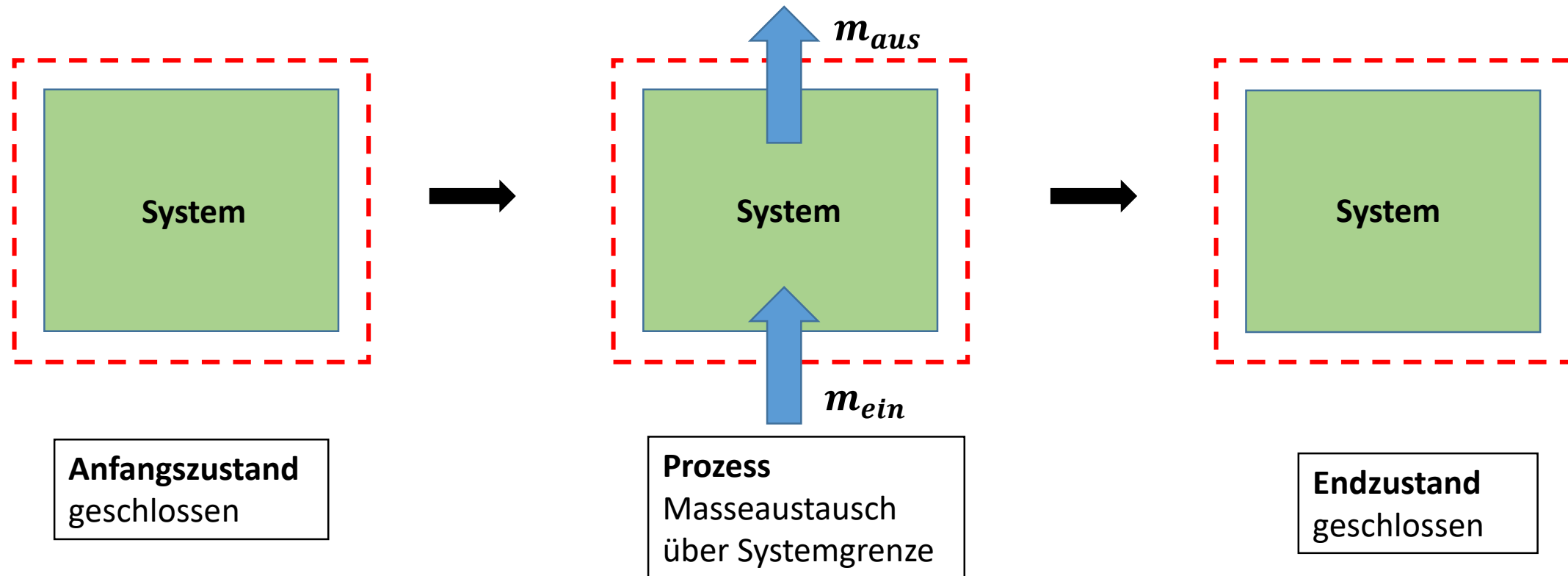
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_S + \sum_{i=1}^n \dot{m}_{i,e} \cdot \left( h_{i,e} + \frac{v_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e} \right) - \sum_{j=1}^k \dot{m}_{j,a} \cdot \left( h_{j,a} + \frac{v_{j,a}^2}{2} + g \cdot z_{j,a} \right)$$

- Dies ist eine **Leistungsbilanz** mit Einheit **Watt**



# Halboffene Systeme

- Halboffene Systeme sind ein Zwischending aus geschlossenen und offenen Systemen
- Halboffene Systeme verhalten sich im Anfangs- und Endzustand wie geschlossene Systeme. Anfangs- und Endzustand sind jedoch mit einem Prozess verbunden, bei welchem Masse ausgetauscht wird.



# 1. Hauptsatz für halboffene Systeme

- Der 1. Hauptsatz für halboffene Systeme lautet:

$$\Delta E = Q - W + \sum_{i=1}^n \Delta m_{i,e} \cdot \left( h_{i,e} + \frac{v_{i,e}^2}{2} + g \cdot z_{i,e} \right) - \sum_{j=1}^k \Delta m_{j,a} \cdot \left( h_{j,a} + \frac{v_{j,a}^2}{2} + g \cdot z_{j,a} \right)$$

- Die Gleichung ist eine **Energiebilanz** und hat die Einheit **Joule**

# Massenstrom vs. Volumenstrom

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{A \cdot w}{v} = \frac{\dot{V}}{v}$$

A: Fläche

w: Geschwindigkeit des Stromes

v: spezifisches Volumen

$\dot{V}$ : Volumenstrom