

Physik I Ergänzung - 14. Vorlesung 17.02.2006

Notiztitel

14.02.2006

- Inhalt:
- Wdh Thermodynamik
 - Virialentwicklung
 - Spezielle Prozesse:
 - allgemein
 - für ideales Gas
 - Carnot - Prozess
 - Wirkungsgrad
 - freie Expansion
 - Ausblick: Entropie

Thermodynamik: Wdh + Fortführung

0. Hauptsatz: **Thermisches Gleichgewicht** ist eine transitive Relation ($A \sim B$ und $B \sim C \Rightarrow A \sim C$)

$A \sim B$: gleiche **Temperatur**

Benutze Ausdehnung einer Flüssigkeit oder von Gasen als Referenz sowie Fixpunkte \rightarrow Temperaturskala

Genauer: $T = (273,16\text{K}) \left(\lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{p_3} \right)$ HR 19-6
 \uparrow absolute Temperatur \uparrow Gasdruck bei Tripelpunkt von H_2O

Wärme ist die zwischen einem System und seiner Umgebung aufgrund eines Temperaturunterschieds ausgetauschte Energie (bzw. z.B. elektrisch erzeugt).

Von Gas (oder Flüssigkeit etc.) geleistete **Arbeit**:

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

Befund: $Q - W$ ist für Zustandsänderungen wegunabhängig, muss also einer Zustandsgröße, der **inneren Energie**, entsprechen:

$$\begin{aligned} \text{1. Hauptsatz: } \Delta E_{\text{int}} &= Q - W \\ dE &= \delta Q - \delta W \end{aligned}$$

Spezielle Prozesse:

- **isochor - konst. Volumen:** $\Delta V = 0 \Rightarrow W = 0 \Rightarrow \Delta E = Q$ ^{I.H.S}
- **isobar - konst. Druck:** $W = p \Delta V$
- **adiabatisch - kein Wärmeaustausch:** $Q = 0 \Rightarrow \Delta E = -W$ ^{I.H.S}
- **freie Expansion (irreversibel!):** $Q = 0, W = 0 \Rightarrow \Delta E = 0$ ^{I.H.S}

Frage: Wodurch sind $p(V, T)$, $E(V, T)$ festgelegt?

Mikroskopisch für klassisches Gas (hier einatomig)

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N v(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|)$$

[↖] Paarpotential, endliche Reichweite

Gleichverteilungssatz $\xrightarrow{n = \frac{N}{V} \rightarrow 0}$ $\sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{2m}$ universell $\rightarrow \frac{3}{2} N k_B T$

Virialentwicklung für klassisches Gas:

$$\frac{p}{k_B T} = \tilde{n} [1 + \tilde{n} B(T) + \tilde{n}^2 B_2(T) + \dots]; \quad \tilde{n} = \frac{N}{V}$$

Grenzfall verdünnter Gase (nicht zu kleines T):
Standard: \checkmark

Ideales Gas: $pV = N k_B T = \tilde{n} RT$; $E = \frac{f}{2} N k_B T$

molare spezifische Wärme bei konst. Volumen: $\int Q = n C_v dT$

für ideales Gas: $C_v = \frac{f}{2} R$; $C_p = (\frac{f}{2} + 1) R$

Spezielle Prozesse für ideale Gase:

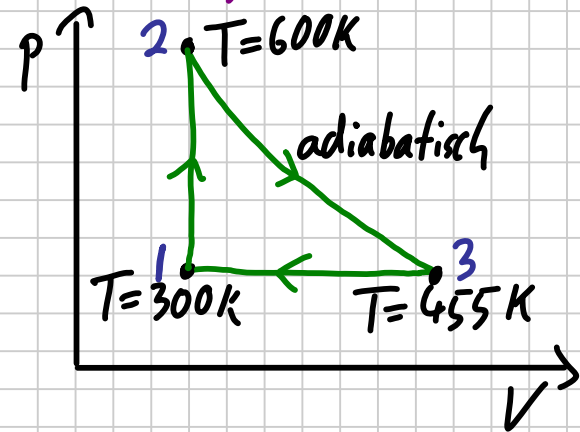
HR Tab. 20-4

immer: $\Delta E = \frac{f}{2} n R \Delta T$

- **isochor:** $Q = \Delta E = \frac{f}{2} n R \Delta T; W = 0$
- **isobar:** $Q = (\frac{f}{2} + 1) n R \Delta T; W = n R \Delta T$
- **adiabatisch:** $Q = 0; W = -\Delta E = -\frac{f}{2} n R \Delta T$
- **freie Expansion:** $Q = W = \Delta E = 0; \Delta T = 0$
- **isotherm - konst. Temperatur:** $\Delta E = 0$

$$Q = -W = \int_{V_i}^{V_f} p(V) dV = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

HR Aufg. 20-61 (S. 596): Einatomiges ideales Gas



$$1 \rightarrow 2: Q = \Delta E = \frac{3}{2} R (600K - 300K), W = 0$$

$$2 \rightarrow 3: Q = 0, \Delta E = -W = \frac{3}{2} R (455K - 600K)$$

$$3 \rightarrow 1: Q = \frac{5}{2} R (300K - 455K);$$

$$\Delta E = \frac{3}{2} R (300K - 455K);$$

$$W = R (300K - 455K);$$

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1: \Delta E = 0, Q = R \left(\frac{3}{2} 300K - \frac{5}{2} 155K \right) = R \cdot 62.5K$$

$$W = R \left(\frac{3}{2} 145K - 155K \right) = R \cdot 62.5K$$

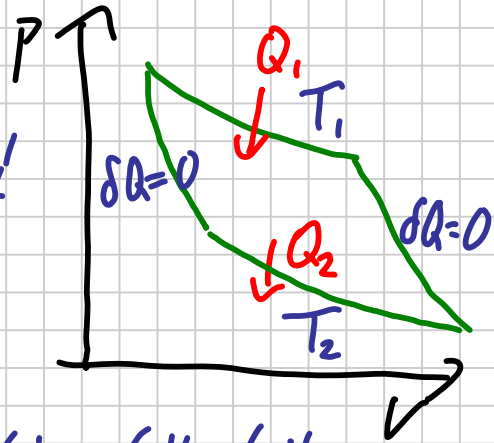
$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{geleistete Arbeit}}{\text{aufgenommene Wärme}} = \frac{R \cdot 62.5K}{R \cdot 450K} \approx 0.14$$

Kontrolle: $\frac{V_2}{V_1} \stackrel{3 \rightarrow 1}{=} \frac{455K}{300K} \approx 1.52; \frac{V_2}{V_1} \stackrel{2 \rightarrow 3}{=} \left(\frac{600K}{455K} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \approx 1.32^{\frac{3}{2}} \approx 1.51 \text{ ok.}$

$$\gamma = \frac{5}{3}$$

Im betrachteten Prozess wurde Wärme bei verschiedenen Temperaturen $300\text{K} \leq T \leq 600\text{K}$ aufgenommen und bei Temperaturen $300\text{K} \leq T \leq 455\text{K}$ abgegeben: ∞ viele Reservoirs nötig! Einfacher:

Carnot-Prozess: Wärmeaufnahme nur von Reservoir 1 mit Temperatur T_1 , Wärmeabgabe nur an Reservoir 2 mit Temperatur T_2 , d.h. nur Adiabaten und Isothermen.



Wirkungsgrad als Wärmekraftmaschine (Herleitung später):

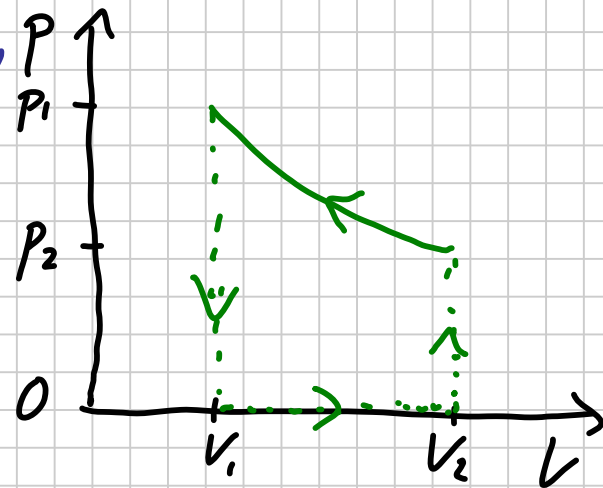
$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} < 1$$

Es ist nicht möglich, Wärme vollständig in Arbeit zu verwandeln!

Umgekehrt: freie Expansion und isotherme Kompression

$$W = Q = - \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$

$$\stackrel{\text{ideal}}{=} -nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$



Vollständige Verwandlung von Arbeit in Wärme bei fester Temperatur - irreversibel!

Entropie hat zugenommen: $dS = \frac{\delta Q_{\text{reversibel}}}{T}$