

Thermodynamik I Zusammenfassung

Michael Van Huffel, Dino Colombo

This summary has been written based on the Lecture of Thermodynamik I by Prof. Dimos Poulikakos (Autumn 20) and the summary of Peter Breurer. There is no guarantee for completeness and/or correctness regarding the content of this summary. Use it at your own discretion

Konzepte und Definitionen

Konstanten:

- Avogadro-Zahl $N_A = 6.022 \cdot 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$
- Boltzmannkonstante $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
- Gaskonstante $\bar{R} = R_0 = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} = N_A \cdot k_B$
- Normalfallbeschleunigung $g_0 = 9.81 \text{ ms}^{-2}$
- Normtemperatur $T_0 = 298 \text{ K} \cong 25^\circ\text{C}$
- Tripelpunkt Wasser $T_c = 273.16 \text{ K} = 0.01^\circ\text{C}$

Einheiten:

- Molmasse $M : [\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}]$ $N = \frac{m}{M} \cdot N_A = n \cdot N_A$
- Druck $p : [\frac{\text{N}}{\text{m}^2}] = [\text{Pa}]$ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- Spezifisches Volumen $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} [\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}]$
- Innere Energie $U : [\text{kJ}]$ $u : [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$ $\bar{u} : [\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}]$
- Enthalpie $H : [\text{kJ}]$ $h : [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$ $\bar{h} : [\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}]$
- Entropie $S : [\frac{\text{kJ}}{\text{K}}]$ $s : [\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}]$ $\bar{s} : [\frac{\text{kJ}}{\text{kmolK}}]$
- Gaskonst. $R : [\frac{\text{J}}{\text{kgK}}] = \frac{\bar{R} \cdot 1000}{M}$ $R : [\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}] = \frac{\bar{R}}{M}$
- Kraft $F : [\text{N}] = [\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}]$
- Energie $E : [\text{J}] = [\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}]$
- Exergie $Ex : [\text{J}] = [\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}]$
- Leistung $P : [\text{W}] = [\frac{\text{J}}{\text{s}}] = [\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}]$
- Arbeit $W : [\text{Nm}] = [\text{J}]$

Vorzeichenkonvention:

$W > 0$ vom System geleistet (**ab**geführte Arbeit)

$W < 0$ am System geleistet (**zu**geführte Arbeit)

$Q > 0$ dem System **zu**geführte Wärme

$Q < 0$ vom System **ab**gegebene Wärme

SI Präfixe:

P	Peta-	10^{15}	k	Kilo-	10^3	m	Milli-	10^{-3}
T	Tera-	10^{12}	h	Hekto-	10^2	μ	Mikro-	10^{-6}
G	Giga-	10^9	d	Dezi-	10^{-1}	n	Nano-	10^{-9}
M	Mega-	10^6	c	Zenti-	10^{-2}	p	Pico-	10^{-12}

Allgemeine Begriffe:

- Zustandsgrössen:** absolute Grössen wie Druck, Temperatur, Volumen, Masse, Stoffmenge (thermisch) und innere Energie, Entropie (ΔS , **Beachte: S_{erz} ist keine Zustandgrösse**), Enthalpie (kalorisch)
- Prozessgrössen:** Wärme, Arbeit; wegababhängig
- Intensive Grössen:** keine Wertänderung bei gedachter Teilung des (homogenen) Systems; Druck, Temperatur, extensive Grössen als spezifische Grössen angeben
- Extensive Grössen:** abhängig von Stoffmenge; Masse, Volumen, Energie
- Spezifische Grössen:** $x = X/m$

- Molare Grössen:** extensive Zustandsgrössen in intensive umgewandelt:

$$\bar{u} : U = n \cdot \bar{u} = \frac{m}{MM} \cdot \bar{u}, u = \frac{\bar{u}}{MM}$$

Bezieht sich auf N_A Moleküle.
Bsp: Molares Volumen $\bar{v} = MM/\rho \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} \right]$

- Prozess:** Veränderung eines thermodyn. Zustandes durch eindeutig bestimmten Vorgang
- Ideales Gas:** kein Nassdampfgebiet
- Perfektes Gas:** ideal, einatomig

Thermodynamisches System:

- Massenstrom-System
 - geschlossen**es System: kein Massenaustausch (Anzahl Moleküle im System konstant)
 - offenes** System: Massenströme fliessen über Systemgrenze
- Wärmestromsystem
 - adiabates** Systeme: kein Wärmeaustausch über Systemgrenze ($Q = 0 \iff$ isoliert)
 - diathermes** Systeme: nicht isoliert
- physikalisch-chemisches System
 - homogenes** System: physikalische und chemische Zusammensetzung überall gleich
 - heterogenes** System: Bsp. Mineralien

Beachte: ein chemisch homogenes System kann auch zwei Phasen beinhalten (z.B. das System $[H_2O_{(l)} \text{ und } H_2O_{(g)}]$ ist chemisch homogen aber physikalisch heterogen)

Nullter Hauptsatz: Wenn sich zwei Systeme mit einem dritten im Gleichgewicht befinden, sind sie auch untereinander im thermischen GGW. Aus $T_1 = T_2$ und $T_2 = T_3$ folgt $T_1 = T_3$.

Quasistatische Näherung: Homogenität der Zustandsgrössen (keine Gradienten im System) zu allen Zeiten.

Elemente der kinetischen Gastheorie

- Thermische Energie:** Bewegung aller Moleküle (Translation, Rotation, Oszillation) ergibt eine endliche Menge $E_K = E_{th}$.

$$E_{th} = \sum_{i=1}^N \frac{m_M}{2} \cdot w_i^2, \overline{E_{th}} = \frac{E_{th}}{N} = \frac{m_M}{2} \cdot \overline{w_i^2}$$
$$e_{th} = \frac{E_{th}}{N \cdot m_M} = \frac{\overline{w_i^2}}{2}$$

- Wärme Q :** über Systemgrenze transportierte thermische Energie

- Absolute Temperatur:** thermischen Energie dividiert durch die Anzahl Freiheitsgrade f

$$E_{th} = N \cdot \frac{f}{2} k_b T, \overline{E_{th}} = \frac{f}{2} k_b T, e_{th} = \frac{f}{2} \frac{k_b T}{m_M}$$

(k_b beschreibt Umrechnung der Temperatur als Energie in Joule nach Kelvin)

- Druck:** Kraftwirkung der Moleküle bezogen auf eine Flächeneinheit

$$p_0 = \frac{1}{3} \cdot m \cdot n \cdot w_0^2, p = n \cdot k_b \cdot T, p \propto T, n$$

Innere Energie bei perfekten Gasen:

$$\Delta U = \Delta E_{th}, u = \frac{3}{2} RT$$

Innere Energie bei idealen Gasen:

$$\Delta U = \Delta E_{th}, u = \frac{f}{2} RT$$

Daraus folgt: $c_v = \frac{f}{2} R$ und $c_p = (\frac{f}{2} + 1) R$
 $c_p - c_v = R$ gilt weiterhin für alle Gase.

Einatomig	$f = 3$	Transl. in 3 Rtg. [Ne]
Zweiatomig	$f = 5$	Transl. und Rot. [O ₂]
Dreiatomig	$f = 5$	Transl. und Rot. [CO ₂]
Dreiatomig	$f = 12$	ab 1800K Oszillation

Innere Energie bei realen Gasen:

Wärme-, Bindungs- und elektrische Energie

$$\Delta U = \Delta E_{th} + \Delta E_p$$

Enthalpie bei perfekten Gasen:

$$h = u + pv = \frac{5}{2} RT$$

Enthalpie bei idealen Gasen:

$$h = u + pv = u + RT = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) RT$$

Für ideale Gase gilt $u = u(T)$, $h = h(T)$

Enthalpie bei realen Gasen:

Siehe Tabellen

1. Hauptsatz

Energie im System $E = E_k + E_p + U$ konstant

$$\Delta E = \underbrace{\Delta E_k + \Delta E_p}_{\text{oft vernachlässigbar}} + \Delta U = Q - W$$

(7)

Beachte die Vorzeichen:

- $Q > 0 \Rightarrow$ Dem System zugeführte Waerme.
- $Q < 0$: Dem System abgeführte Waerme.
- $W > 0$: Vom System geleistete Arbeit.
- $W < 0$: Am System geleistete Arbeit.

1. HS als Leistungsbilanz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}, \quad \frac{dU}{dt} = mc \frac{dT}{dt}$$
$$U(T_2) - U(T_1) = m \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT$$

Kreisprozesse:

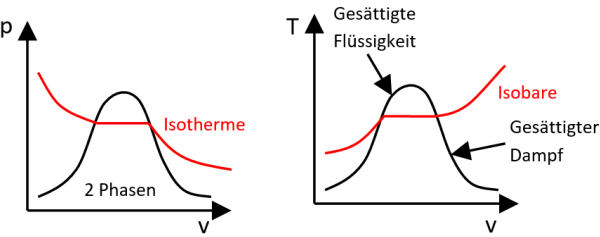
$$\Delta E = \Delta U = 0 \implies Q_{\text{KP}} = W_{\text{KP}}$$

(Zustandsgrößen nach Kreisprozess unverändert)

$W > 0$ falls rechtslaufend

$W < 0$ falls linkslaufend

Die pV Beziehung:



- Triple-Linie: alle 3 Aggregatzustände zugleich
- Nassdampfgebiet: Wasser und Dampf zugleich

Dampfmassenanteil:

Prozentualer Anteil Dampf im Nassdampfgebiet:

$$x = \frac{v_x - v_f}{v_g - v_f} = \frac{u_x - u_f}{u_g - u_f} = \frac{m_x - m_f}{m_g - m_f}$$

(8)

$$\implies v_x(x, T) = v_f(T) + x \cdot (v_g(T) - v_f(T))$$

Lineare Interpolation:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Ideale Gasgleichung:

$$pv = RT, \quad pV = mRT, \quad pV = n\bar{R}T, \quad p = \rho RT$$

(9)

$$\rho = \frac{1}{v}, \quad R = \frac{\bar{R}}{MM}, \quad c_p - c_v = R$$

Polytrope Zustandsänderungen

Ideale Gase:

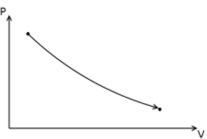
n : Polytropenkoeffizient

$$pV^n = \text{konst.} \leftrightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}$$

(10)

$|W| \uparrow$ je $\downarrow n$ (weniger steil)

Isothermer Prozess ($n = 1$):



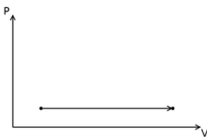
$$T = \text{konst.} \implies pV = \text{konst.}$$
$$\Delta U = 0 \implies Q_{12} = W_{12}$$

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV = p_1 V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = p_1 V_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$
$$= mRT_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mRT_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

(11)

Isenthalp = isotherm (ideales Gas)

Isobarer Prozess ($n = 0$):

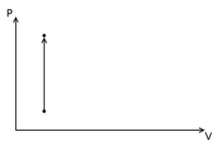


$$p = \text{konst.} \implies \frac{T}{V} = \text{konst.} \implies \frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2}$$

$$\Delta Q = \Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$
$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$
$$W_{12} = p_1(V_2 - V_1) = mp_1(v_2 - v_1) = mR(T_2 - T_1)$$

(12)

Isochorer Prozess ($n = \infty$):

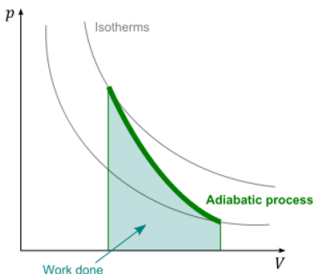


$$V = \text{konst.} \implies \frac{T}{p} = \text{konst.} \implies \frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_2}$$

$$W_{12} = 0$$
$$\Delta U = Q_{12} = m(u_2 - u_1)$$
$$Q_{12} = mc_v(T_2 - T_1)$$

(13)

Isentroper Prozess ($n = \kappa$):

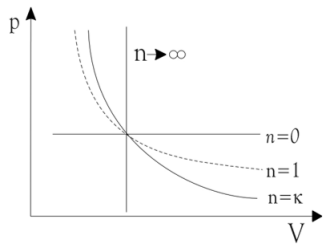


Isentrop \Leftarrow adiabat und reversibel

$$n = \kappa = \frac{c_p}{c_v}, \quad c_p = c_v + R$$
$$Q_{12} = 0 \implies \Delta U = -W_{12}$$
$$W_{12} = m(u_1 - u_2) = mc_v(T_1 - T_2)$$
$$= \frac{p_1 V_1^\kappa}{1 - \kappa} (V_2^{1-\kappa} - V_1^{1-\kappa})$$
$$= \frac{p_1 V_1}{1 - \kappa} \left(\frac{p_1^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}}{p_2^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}} - 1 \right)$$
$$S = \text{konst.} \implies pV^\kappa = \text{konst.}$$
$$TV^{\kappa-1} = \text{konst.}, \quad p^{1-\kappa} T^\kappa = \text{konst.}$$
$$c_v = \frac{\bar{R}}{\kappa - 1}, \quad c_p = \frac{\bar{R} \cdot \kappa}{\kappa - 1}$$
$$w_{12} = c_v(T_1 - T_2) = \frac{1}{\kappa - 1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

(14)

Allgemeiner Prozess ($n \neq 1$):



$$\begin{aligned} pV^n &= \text{konst.} \\ T^n p^{1-n} &= \text{konst.}, \quad T v^{n-1} = \text{konst.} \\ W_{12} &= \frac{mR}{1-n} (T_2 - T_1) = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n} \\ &= \frac{p_1 V_1^n}{1-n} (V_2^{1-n} - V_1^{1-n}) \end{aligned} \tag{15}$$

Reale Gase:

- $m = \frac{V}{v}$
- Allgemein: $\Delta U = m(u_2 - u_1) = m(c_{v2}T_2 - c_{v1}T_1)$
- Isotherm: $\Delta U = Q - W \iff W = Q - \Delta U$
- Isobar: $W_{12} = p_1(V_2 - V_1) = mp_1(v_2 - v_1)$
- Isochor: $W_{12} = 0$
- Isentrop/adiabat: $\Delta S = 0$

Thermodynamische Zustandsdaten

- **Enthalpie:** (Wärmefunktion)

$$H = U + pV, \tag{16}$$

und, $h = \frac{h}{M}u + pv$, wobei pV der benötigten Arbeit entspricht, um das Volumen V des Systems gegen die Wirkung des Aussendrucks p aufzuspannen.

- **Verdampfungsenthalpie:** $h_{fg} = h_g - h_f$ nötige Energie, um ein Fluid unter konst. Druck und Temperatur gasförmig zu machen

- **Wärmemenge:**

$$\Delta Q = mc\Delta T \tag{17}$$

(Grundgleichung der Kalorik, $c \rightarrow$ Tab A-19).

- **Spezifische Wärmekapazität c**
nötige Energie, um 1 kg um 1 K zu erwärmen

- **isochore Wärmekapazität:** c_v (Tab A-20)
Wärmezufuhr bei konstantem Volumen
 $u = u(T, v) \rightarrow du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$
 $\implies du = c_v dT$ wenn $dv = 0$, $c_v : \left[\frac{kJ}{kgK}\right]$

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) \cdot dT \approx c_v \left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right) \Delta T \tag{18}$$

- **isobare Wärmekapazität:** c_p (Tab A-20)
(Wärmezufuhr bei konstantem Druck)
 $h = h(T, p) \rightarrow du = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp$
 $\implies dh = c_p dT$ wenn $dp = 0$, $c_p : \left[\frac{kJ}{kgK}\right]$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT = c_p(T_2 - T_1) \tag{19}$$

- **Inkompressible Medien:**
Spezifisches Volumen haengt nur schwach vo Druck ab.
 $v(T, p) \approx v_f(T)$, $u(T, p) \approx u_f(T)$, $h(T, p) \approx h_f(T)$. Ab ein bestimmtes Sättigungsdruck nicht mehr inkompressibel (Wasser ist bis 25 bar inkompressibel) $c_p = c_v = c = \text{konst.}$

$$\begin{aligned} \Delta u &= u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1) \\ \Delta h &= h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1) \end{aligned}$$

- **Perfekte Gase:**
Wärmekapazitäten nur wenig ändern: $c_p = \text{konst.}$, $c_v = \text{konst.}$

$$\begin{aligned} \Delta u &= u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \\ \Delta h &= h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

- Allgemein: $c_p = c_v + R$, $\kappa(T) = \frac{c_p(T)}{c_v(T)}$, wobei κ = Isentropen-koeffizient

Beispiel: Endtemperatur

Gegeben seien 2 Stoffe: $m_{1/2}, c_{1/2}, T_{1/2}$. $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0 \implies$

$$\begin{aligned} m_1 c_1 (T_x - T_1) &= m_2 c_2 (T_2 - T_x) \\ T_x &= \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2} \end{aligned}$$

1. HS für offene Systeme

Massenstrom über Systemgrenze und damit verbundenen Energieströme werden in die Energiebilanz mit einbezogen.

$$\text{Stationärer Betrieb: } \sum \dot{m}_{\text{in}} = \sum \dot{m}_{\text{out}}, \quad \frac{d(\cdot)}{dt} = 0$$

Massenstrombilanz:

$$\frac{dM_s}{dt} = \sum \dot{m}_{\text{in}} - \sum \dot{m}_{\text{out}}$$

Energiestrombilanz:

Energiezunahme abhängig von Wärme und Arbeit sowie den Energien ein- und austretender Massen.
Arbeit in zwei Komponenten unterteilt:

- gewünschte Arbeit W_s (ungebunden) (nicht mit Massenstrom verbunden)
- Einschiebeleistung \dot{W}_{in} und Ausschiebeleistung \dot{W}_{out} des bewegten Fluids (an Masse gebunden)

$$\begin{aligned} \frac{dE_s}{dt} &= \dot{Q} - \dot{W}_s + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{w_i^2}{2} + gz_i\right) \\ &\quad - \sum \dot{m}_o \left(h_o + \frac{w_o^2}{2} + gz_o\right) \end{aligned}$$

- Stationär, 1 Massenstrom \rightarrow

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \dot{m}(h_o - h_i + \frac{1}{2}(w_o^2 - w_i^2) + g(z_o - z_i))$$

- Isoliert $\implies \dot{Q} = 0$
- Keine Arbeit verrichtet $\implies \dot{W}_s = 0$
- $T = \text{const} \implies h_o = h_i$
- Wenn $\dot{Q} \neq 0 \implies$ Entropiebilanz

- Nützliche Beziehungen

$$\begin{aligned} m = \frac{V}{v} &\implies \dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} = \rho \dot{V} = \rho A w = \frac{A w}{v} \\ \text{Ideale Gase: } \dot{m} &= \frac{p \dot{V}}{RT} = \frac{p A w}{RT} = \frac{A w}{v} \left[\frac{kg}{sec}\right] \end{aligned}$$

1. HS für halboffenes System:

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = Q - W + (m_2 - m_1)(h_{\text{Tank}} + \Delta E_p + \Delta E_K)$$

- Halboffenes System: Verbindung mit variablem System (z.B. Ballon)
- Zustandsgrößen von Tank/Reservoir unverändert

Düse:

- Verengung in einer Strömung
- Enthalpie des Fluids zu E_K (Beschleunigung); U konst.

- Stationär, isoliert, $\dot{W}_s = 0 \rightarrow$
$$h_i + \frac{1}{2}w_i^2 = h_a + \frac{1}{2}w_a^2$$
$$w_2 > w_1, p_2 < p_1, h_2 < h_1$$

- Isentroper Düsenwirkungsgrad**
$$\eta_{D,s} = \frac{w_2^2}{w_{2,\max}^2} \stackrel{\text{adiabat}}{=} \frac{h_2 - h_1}{h_{2,s} - h_1}$$

Diffusor:

- Erweiterung in einer Strömung (Düsenvorgang umgek.)
- Verlangsamung des Fluids

$$w_2 < w_1, p_2 > p_1, h_2 > h_1$$

Drossel/Ventil:

- Fluid in Drosselement entspannt (Bsp. Ventil) (Kompressionswärmepumpen und -Kältemaschinen)
- Adiabat, Isenthalp

$$h_1 = h_2, p_2 < p_1, W_{12} = 0, Q_{12} = 0$$

Pumpe:

- Erzeugung Massenstrom (bei möglichst geringem Druckanstieg) durch Arbeitsaufwand
- Isentrop, inkompressibel $\rightarrow h_{2,s} - h_1 = v\Delta p \approx v_1(p_2 - p_1)$
Stationär $\rightarrow \dot{W}_S - \dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_{\text{in}} - h_{\text{out}})$, wobei $\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_i}$, mit $\dot{V}[\frac{m^3}{s}]$.
- Beachte:** mit Wirkungsgrad und $\dot{Q} = 0$
$$\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}} = h_1 - h_2 = \frac{h_1 - h_{2,s}}{\eta_s}$$

Kompressor/Verdichter:

- Druckerhöhung des Fluids durch Arbeitsaufwand
- Isentroper Verdichterwirkungsgrad**
Vergleich der minimal aufzuwendenden Arbeit (isentrop, $\dot{Q} = 0$) mit realer Arbeit. $s_{2,s} = s_1$.
$$\eta_{V,s} = \frac{\frac{\dot{W}_{min}}{\dot{m}}}{\frac{\dot{W}_{effektive}}{\dot{m}}} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1}$$
$$\dot{W}_{12} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2)$$

Wärmetauscher/Verdampfer/Kondensator:

- Wärme mittels Durchströmung aufgenommen ($\dot{Q} > 0$) oder abgegeben ($\dot{Q} < 0$)
- Stationär (Systemgrenze: ein Massenstrom), **iff $\dot{W} = 0 \rightarrow$**
$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}})$$
- Beachte:**
$$Q_{WT} = \eta \cdot Q_{max}$$
- Stationär, $\dot{Q} = 0$ (Bsp. Gegenstrom-Wärmetauscher; Systemgrenze: beide Massenströme) \rightarrow
$$0 = \dot{m}_1(h_{\text{out},1} - h_{\text{in},1}) + \dot{m}_3(h_{\text{out},2} - h_{\text{in},2})$$

Turbine:

- Gas von hohem Druckniveau auf tiefes ($\dot{W} > 0$)
- $\dot{E} = 0, E_P = 0 \rightarrow$
$$\dot{W}_S = \dot{Q} + \dot{m}_{in} \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) - \dot{m}_{out} \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} \right)$$
- Beachte:** mit Wirkungsgrad $\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}} = \eta \cdot (\dots)$ (Enthalpie tabelliert, 2. Zustand evtl. im Zweiphasengebiet)
- Isentroper Turbinenwirkungsgrad**
$$\eta_{T,s} = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{rev}} \stackrel{\text{adiabat}}{=} \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}$$

2. HS der Thermodynamik

Wärme fließt nicht spontan von einem kalten zu einem wärmeren Reservoir (Clausius). Ein Kreisprozess kann zugeführte Wärme nicht zu 100% in Wärme umwandeln (laut Kelvin-Planck gibt es immer Abwärme).

(Ir-)Reversible Prozesse:

- Reversibel: umkehrbar; Anfangszustand im System und der Umgebung kann wiederhergestellt werden (dafür nötige Arbeit ohne Verlust gespeichert); abgeführte Temperatur muss somit bei gleicher Temperatur gespeichert werden.
- Irreversibel: unumkehrbar; irreversible Teilprozesse enthalten (Bsp. Wärmeübertragung, Reibung)

Expansion ($W > 0$):

$$\begin{aligned} |W_{rev}| &> |W_{irr}| \\ \Delta U_{rev} &= \Delta U_{irr} \\ |Q_{rev}| &> |Q_{irr}| \end{aligned} \tag{20}$$

Adiabat $\rightarrow |Q_{rev}| > |Q_{irr}| = 0$

Kompression ($W < 0$):

$$\begin{aligned} |W_{rev}| &< |W_{irr}| \\ \Delta U_{rev} &= \Delta U_{irr} \\ |Q_{rev}| &< |Q_{irr}| \end{aligned} \tag{21}$$

Carnot Kreisprozess

Idealisierter, reversibler Kreisprozess um die theoretisch max. umsetzbare Wärmemenge in Arbeit zu definieren.

- 1 \rightarrow 2: Isotherm Kompr. ($W_{12} < 0, Q_K < 0$ bei T_K) $\rightarrow \Delta U = 0$
 $\Delta Q_K = W_{12} = \int_1^2 p dV = RT_K \ln(\frac{v_2}{v_1}) > 0$
- 2 \rightarrow 3: Adiabate Kompr. ($W_{23} < 0, S = \text{konst.}$) $\rightarrow \Delta Q = 0$
 $0 = W_{23} = -\Delta U = c_v \cdot (T_K - T_H)$
- 3 \rightarrow 4: Isotherm Exp. ($W_{34} > 0, Q_H > 0$ bei T_H) $\rightarrow \Delta U = 0$
 $\Delta Q_H = W_{34} = \int_3^4 p dV = RT_H \ln(\frac{v_4}{v_3}) > 0$
- 4 \rightarrow 1: Adiabate Exp. ($W_{41} > 0, S = \text{konst.}$) $\rightarrow \Delta Q = 0$
 $0 = W_{41} = -\Delta U = c_v \cdot (T_H - T_K) = -W_{23}$

Nettoarbeit:

$$W_{KP} = W_{12} + W_{34} = R(T_H \ln(\frac{v_2}{v_1}) - T_K \ln(\frac{v_3}{v_4})) = q_{zu} - q_{ab} \tag{22}$$

Wirkungsgrad:

$$\eta_{KP} = \frac{W_{KP}}{q_{zu}} = 1 - \frac{T_K \ln(\frac{v_3}{v_4})}{T_H \ln(\frac{v_2}{v_1})} \tag{23}$$

Andere Eigenschaften:

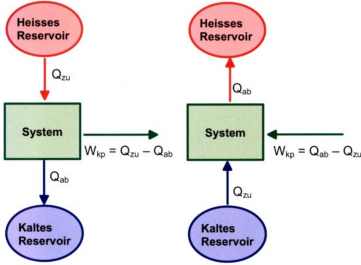
- $U_1 = U_2$ & $U_3 = U_4$
- $\frac{Q_{12}}{Q_{34}} = \frac{T_K}{T_H}$

Kraftmaschine:

- Carnotprozess im UZS (Nettoarbeit > 0)
- Wärme aus T_H und Abwärme an T_K
- $W_{KP} = |Q_{zu}| - |Q_{ab}|$ (Uhrzeigersinn)

- 1 → 2: $W_{12} = p_1 V_1 \cdot \ln(V_2/V_1) = Q_{34}$
- 2 → 3: $W_{23} = m(u_2 - u_3), Q_{23} = 0$
- 3 → 4: $W_{34} = p_3 V_3 \cdot \ln(V_4/V_3) = Q_{34}$
- 4 → 1: $W_{41} = m(u_4 - u_1), Q_{41} = 0$

Kältemaschine/Wärmepumpe:



- Carnotprozess im Gegen-UMS (Nettoarbeit < 0)
- Wärme aus T_K an T_H
- $-W_{KP} = Q_{zu} - Q_{ab}$
 - 1 → 2: $W_{12} = m(u_1 - u_2), Q_{12} = 0$
 - 2 → 3: $W_{23} = p_2 V_2 \cdot \ln(V_3/V_2) = Q_{23}$
 - 3 → 4: $W_{34} = m(u_3 - u_4), Q_{34} = 0$
 - 4 → 1: $W_{41} = p_4 V_4 \cdot \ln(V_1/V_4) = Q_{41}$

Wobei Zustand 1 = Zustand 3 (Bild),
2 = 2 (Bild), 3 = 1 (Bild), 4 = 4 (Bild)

Kältemaschine:
Nutzen ist aus T_K zugeführte Wärme: KP in gegenurzeigersinn (RHR, Nettarbeit < 0)

- Leistungszahl: (Nutzwärme ÷ Arbeitsaufwand (Arbeitsleistung))
$$\epsilon_K = \frac{Q_{zu}}{W_{KP}} = \frac{Q_K}{-W_{netto}} = \frac{Q_K}{|Q_H| - |Q_K|} = \frac{Q_{zu}}{|Q_{ab}| - |Q_{zu}|} \quad (24)$$
- Reversibel → $\epsilon_K = \epsilon_{K,max} = \frac{T_K}{T_H - T_K}$

Wärmepumpe:
Nutzen ist nach T_H abgeführte Wärme

- Leistungszahl
$$\epsilon_W = \frac{Q_{zu}}{W_{KP}} = \frac{Q_H}{-W_{netto}} = \frac{Q_H}{|Q_H| - |Q_K|} = \frac{Q_{ab}}{|Q_{ab}| - |Q_{zu}|} \quad (25)$$
- Reversibel → $\epsilon_W = \epsilon_{W,max} = 1 + \frac{T_K}{T_H - T_K} = 1 + \epsilon_K$

Theorem: Kompressionsrate

Die Kompressionsrate ist: $r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_{ra}}{v_{rb}}$ (aus die Tabellen).

- Ausgehend von der Gleichung der Entropieänderung für ein ideales Gas:
$$s_2(T_2, p_2) - s_1(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$
- Isentropen Fall: $s_2 - s_1 = 0 \rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{s^0(T_2) - s^0(T_1)}}{e^{s^0(T_1) - s^0(T_2)}} = \frac{e^{s^0(T_2) - s^0(T_1)}}{e^{s^0(T_1) - s^0(T_2)}}$
- Definition als relativer druck: $p_r(T) = C_1 e^{s^0(T)/R}$
- Damit gilt für isentrope Prozesse bei Luft als idealem Gas $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}$ und $\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}$

Beispiel: Leistung eine laufendes kreisprozess

$$P = \dot{W}_{net} = \frac{\text{Umdrehungen(Drehzahl)}}{sec} \cdot \frac{\text{Zyklus}}{\text{Umdrehungen}} \cdot W_{net,proZyklus} \cdot a.$$
Aufmerksam: es könnte sei dass nicht alle Zyklen leisten Arbeit ($a = \frac{\text{Zyklus}W \neq 0}{\text{Zyklus}t_{tot}}$). Es: $a = 4$ fuer 4 Takt Motor.

Thermische Wirkungsgrade

Verhältnis zwischen Nutzen und Energieaufwand

$$\eta_{th} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{W_{Nutz}}{Q_{zu}} = \frac{\dot{W}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (26)$$

Kreisprozesse:

$$\eta_{th} = \frac{(\sum)Q_{zu} - (\sum)Q_{ab}}{(\sum)Q_{zu}} = 1 - \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{Q_K}{Q_H} \quad (27)$$

Carnot-Wirkungsgrad:

- Höchstmögliche Umwandlungsgrad von Q in W
 $\eta_{Carnot} \rightarrow 1$ für $T_H \rightarrow \infty, T_K \rightarrow 0$
- Thermische Wirkungsgrad eines irreversiblen KP immer geringer als derjenige eines reversiblen
- 2. HS: ein Teil von Q_{zu} muss zwingend an das kalte Reservoir abgegeben werden $\Rightarrow \eta_{Carnot} < 1$

$$\frac{Q_K}{Q_H} = \frac{T_K}{T_H} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_K}{T_H} \quad (28)$$

Isentrope Prozesse:

- Zustandsdreieck (aus zwei folgt die dritte Eigenschaft)



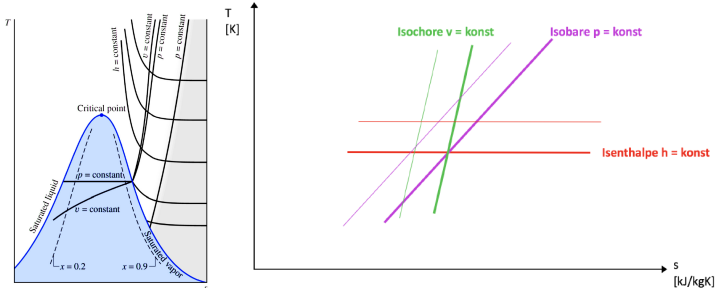
Entropie

Ein Prozess kann nur Entropie zunahme fahren wenn irreversibilitäten während der prozess erscheinen: **FALSCH**:
 $\Delta S < 0$ aber $S_{erz} > 0$

Entropie Aenderung: $\Delta S = m(s_2 - s_1)$

- Entropie S : Mass für Unordnung/Irreversibilität
- Prozess spontan immer in Richtung \uparrow Entropie ablaufen
- Isentrop: $dS = 0$ (adiabat und reversibel)

T-S Diagramm:

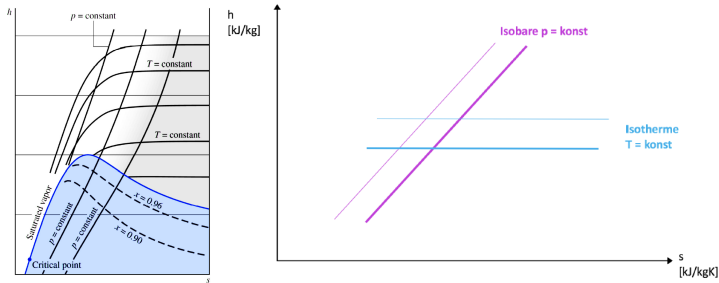


Wenn $\Delta S \nearrow$ dann Steigung $\rightarrow 0$
Adiabat: $S = const.$ **Wichtig:** Steigung isochore > isobare.

Theorem: Weitere Beziehungen

- 1. T-dS-Gleichung:
$$dU = TdS - pdV = dU(S, V)$$
- formales Differential:
$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV$$
- aus Koeffizientenvergleich:
$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V, p = -\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S$$
- 2. T-dS-Gleichung:
$$dH = TdS + Vdp = dH(S, p)$$
- formales Differential:
$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p dS + \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S dp$$
- aus Koeffizientenvergleich:
$$T = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p, V = \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S$$

H-S (Mollier) Diagramm:



TdS Gleichungen:

$\Delta Q > 0$ (Wärmezufuhr) $dS > 0$ (Entropie (sys) nimmt zu)
 $\Delta Q < 0$ (Wärmeabfuhr) $dS < 0$ (Entropie (sys) nimmt ab)
 $\Delta Q = 0$ (Adiabates System) $dS = 0$ (Entropie (sys) konstant)
Zusammenfassung der Beziehungen der verschiedenen thermodynamischen Grössen.

$$\begin{aligned} T \cdot ds &= du + p \cdot dv \\ T \cdot ds &= dh - v \cdot dp \end{aligned} \quad (29)$$

- Verdampfung/Kondensation:**
($p = \text{konst.}, T = \text{konst.}$) $\implies T \cdot ds = dh$
- Inkompressible Stoffe:**
 $v, c = \text{konst.} \implies ds = dU = \int c \cdot \frac{1}{T} dT = c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
- Ideale Gase:**
 $du = c_v(T) dT, pv = RT \implies ds = c_v(T) \cdot \frac{dT}{T} + R \cdot \frac{dv}{v}$
 $ds = c_p(T) \cdot \frac{dT}{T} + R \cdot \frac{dp}{p}$

$$Q = \int mTds \leftrightarrow mT(\tilde{s}_2 - \tilde{s}_1), \frac{S}{m} = \tilde{s}$$

Clausius Ungleichung:

$$\oint \frac{\delta Q}{T_G} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C} \leq 0 \stackrel{\text{reversibel}}{=} \Delta S_{\text{zu}} - \Delta S_{\text{ab}} = 0$$

(Umlaufintegral über Kreisprozess)

$$S_2 - S_1 \geq \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{T_j} \leftrightarrow S_{\text{erz}} = S_2 - S_1 - \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{T_j} \geq 0 \quad (30)$$

Entropieänderung - Ideale Gase:

- Luft (TAB A-22)

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (31)$$

Merke: bei isothermen Prozessen ist $\Delta s^0 = 0$

- Andere Gase (TAB A-23ff)

$$\bar{s}(T_2, p_2) - \bar{s}(T_1, p_1) = \bar{s}^0(T_2) - \bar{s}^0(T_1) - \bar{R} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (32)$$

$$c = \text{konst.} \implies s^0(T, p) = c_p(T) \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right):$$

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= c_p \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \\ s_2 - s_1 &= c_v \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \end{aligned}$$

Isentrope Prozesse - Ideale Gase:

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{c_p}{c_v} \\ c_p &= c_v + R \implies c_p = R \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \\ c_v &= R \cdot \frac{1}{\kappa - 1} \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{1 - \kappa} \\ \eta_{rev} &= \frac{h_2 - h_1}{h_{2,s} - h_1} \end{aligned} \quad (33)$$

Entropiebilanz für geschlossene Systeme:

ΔS ist eine Zustandgrösse,
 $S_{\text{erz}} = S_{\text{produziert}}$ ist **keine** Zustandgrösse.

$$\begin{aligned} S_{\text{erz}} &= \Delta S - \sum \frac{Q}{T_G} \\ \dot{S}_{\text{erz}} &= \dot{S} - \sum \frac{\dot{Q}}{T_G} = \dot{m} \cdot \Delta s - \sum \frac{\dot{Q}}{T_G} \end{aligned} \quad (34)$$

(T_G ist Temperatur an Grenze der Wärmeübertragung)

- Stationär $\rightarrow \Delta S = 0$
- Kreisprozess $\rightarrow \Delta S = 0$ aber i.A. $S_{\text{erz}} \neq 0$
- Reversibel $\rightarrow S_{\text{erz}} = 0$ [Keine Irreversibilitäten]
- Irreversibel $\rightarrow S_{\text{erz}} > 0, \Delta S > 0 \leftrightarrow S_{\text{irreversibel}} > S_{\text{reversibel}}$. **VERIFICARE**

Entropiebilanz für offene Systeme:

$$\underbrace{\dot{S}_{\text{erz}}}_1 = \underbrace{\dot{S}}_2 - \underbrace{\sum \frac{\dot{Q}}{T_G}}_3 + \underbrace{\sum \dot{m}_{\text{out}} s_{\text{out}}}_4 - \underbrace{\sum \dot{m}_{\text{in}} s_{\text{in}}}_5 \quad (35)$$

- Erzeugungsrate im System (intrinsisch)
- Zunahme Entropie des Systems
- Entropietransp. über Systemgrenze per Wärmetransfer
- Mit Masse austretender Entropiestrom
- Mit Masse eintretender Entropiestrom

- Stationär, 1 Massenstrom \rightarrow

$$\dot{S}_{\text{erz}} = - \sum \frac{\dot{Q}}{T_G} + \dot{m}(s_{\text{out}} - s_{\text{in}})$$

- Stationär, 1 Massenstrom, intern reversibel ($\dot{S}_{\text{erz}} = 0$) \rightarrow

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{\text{rev}}}{\dot{m}} &= T_G(s_{\text{out}} - s_{\text{in}}) \stackrel{\text{TdS}}{=} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) - \int_1^2 v \cdot dp \\ \frac{\dot{W}_{\text{rev}}}{\dot{m}} &= - \int_1^2 v \cdot dp - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} - g(z_2 - z_1) \end{aligned}$$

Berechnung von $\int v \cdot dp$ mit $p \cdot v^n = \text{konst.}$

$$\begin{aligned} -n = 1 \text{ (isotherm): } p_1 v_1 \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) &\stackrel{\text{id. Gas}}{=} RT_1 \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \\ -n \neq 1: \frac{n}{n-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) &\stackrel{\text{id. Gas}}{=} \frac{n}{n-1} R(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

Düse/Diffusor: mit $W_{\text{rev}} = 0$ folgt Bernoulli

$$\int_1^2 v \cdot dp + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} - g(z_2 - z_1) = 0$$

Isotherm:

$$\frac{\dot{W}_{\text{rev}}}{\dot{m}} = T(\Delta s) - (p_2 \frac{\dot{V}_2}{\dot{m}} - p_1 \frac{\dot{V}_1}{\dot{m}}) - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} - g(\Delta z)$$

Exergie

- Mass für vorhandene Arbeitsmöglichkeit der Energie
- Anteil des Energieinhaltes eines Systems, der maximal mittels eines reversiblen Prozesses in Arbeit umgewandelt werden kann (bis GGW mit Umgebung)
- Exergie eines isolierten Systems kann nur abnehmen.

Anergie: Energieanteil, der nach Erreichen des Gleichgewichtes mit der Umgebung im System zurückbleibt und nicht mehr in Arbeit umgewandelt werden kann.

Exergieverlust - Guoy-Stodola Theorem:

Die verlorene Arbeitsmöglichkeit ist die Differenz zwischen der maximal möglichen und der effektiv vorhandenen Arbeitsleistung. Die maximal verlorene Arbeit kann als Exergieverlust betrachtet werden.

$$E_{x,\text{rev}} - E_x = E_{x,v} = T_0 \cdot S_{\text{erz}} = W_{\text{Verlust}} = W_{\text{rev}} - W$$

Exergiebilanz für geschlossene Systeme:

$$\Delta E_x = \underbrace{\int \left(1 - \frac{T_0}{T_G}\right) \delta Q}_{E_{x,Q}} - \underbrace{(W - p_0 \Delta V)}_{E_{x,W}} - \underbrace{T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}}}_{E_{x,V}} \quad (36)$$

($E_{x,V}$ ist die exergie Verlust).
(T_0, p_0) ist Umgebungszustand (i.d.R. $p_0 = 1 \text{ bar}$)

- Stationär $\rightarrow \Delta E_x = 0$
- Reversibel $\rightarrow E_{x,V} = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}} = 0$
- Keine Arbeit $\rightarrow E_{x,W} = (W - p_0 \Delta v) = 0$
- Isobare $\rightarrow E_{x,W} = 0$
- Adiat $\rightarrow E_{x,Q} = 0$

$$\int \left(1 - \frac{T_0}{T_G}\right) \delta Q = Q_{12} - T_0 \cdot \Delta S$$

Exergie - geschlossenes System:

$$E_x = U - U_0 + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + E_K + E_P \quad (37)$$

Exergiedifferenz - geschlossenes System:

$$\Delta E_x = E_{x,2} - E_{x,1} = \Delta U + p_0 \Delta V - T_0 \Delta S + \Delta E_K + \Delta E_P \quad (38)$$

Exergieänderungsgeschwindigkeit:

$$\dot{E}_x = \sum \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) - \left(\dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt}\right) - T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}} \quad (39)$$

- Guoy-Stodola: $-\dot{E}_{x,\text{irr}} = E_{x,V} = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}}$
- Stationär, keine Arbeit (Wärmeübergang) \rightarrow

$$\dot{E}_{x,V} = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i = \dot{Q} \left(\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2}\right)$$

Exergiebilanz für offene Systeme:

$$\dot{E}_x = \sum \dot{m}_{\text{in}} \cdot e_{x,\text{str,in}} - \sum \dot{m}_{\text{out}} \cdot e_{x,\text{str,out}} - \left(\dot{W}_S - p_0 \frac{dV}{dt}\right) + \sum \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) - T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}} \quad (40)$$

- Reversibel $\rightarrow T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}} = 0$
- Stationär ($\dot{E}_x = 0$), 1 Massenstrom \rightarrow

$$\begin{aligned} \sum \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) - \dot{W}_S - T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}} \\ = \dot{m}(h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1) + \Delta E_K + \Delta E_P) \\ = \dot{E}_{x,\text{str,out}} - \dot{E}_{x,\text{str,in}} \end{aligned}$$

- Stationär, adiat, keine Leistung \rightarrow

$$\dot{E}_{x,V} = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}} = \sum_i \dot{m}_i (e_{x,\text{str,i,in}} - e_{x,\text{str,i,out}})$$

Exergie - offenes System:

$$\dot{E}_{x,\text{str}} = \dot{m} \cdot e_{x,\text{str}} = \dot{m} [(h - h_0) - T_0(s - s_0) + e_k + e_p] \quad (41)$$

Exergiedifferenz - offenes System:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{x,\text{str}} = \dot{E}_{x,\text{str},2} - \dot{E}_{x,\text{str},1} \\ = \dot{m} [(h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \Delta e_k + \Delta e_p] \end{aligned} \quad (42)$$

(Stationär)

Exergetische Wirkungsgrad:

- ϵ bewertet die quantitative Nutzung der Exergie (und damit die qualitative Nutzung der Energie)
- i.A. $(T_N - T_0) \uparrow, (T_Q - T_N) \downarrow$ führt zu $\epsilon \uparrow$
- $\epsilon \rightarrow \eta$ führt zu $E_{x,V} \rightarrow 0$
- $T_N \rightarrow T_Q$ führt zu $S_{\text{erz}} \rightarrow 0$ oder $T_0 \rightarrow 0$

$$\epsilon = \frac{\text{gen. Exergiestrom}}{\text{zugef. Exergiestrom}} \stackrel{\text{Wärmeströme}}{=} \frac{\dot{Q}_N \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_N}\right)}{\dot{Q}_Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right)} \quad (43)$$

Indizes: Q: Quelle, N: Nutz, 0: Umgebung

Beispiel: Exergetische Wirkungsgrad

- Offenes System mit Leistung

$$\epsilon = \frac{\dot{E}_{x,N}}{\dot{m}(e_{x,\text{str},1} - e_{x,\text{str},2})} = \frac{\dot{E}_{x,N}}{\dot{E}_{x,N} + T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}}}$$

- Nutzung der Abwärme $\dot{E}_{x,N} = \dot{Q}_A \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_A}\right) + \dot{W}_S$
- keine Nutzung der Abwärme $\dot{E}_{x,N} = \dot{W}_S$

- Turbine

$$\epsilon = \frac{\dot{W}_S}{\dot{m}(e_{x,\text{str},1} - e_{x,\text{str},2})} = \frac{\dot{W}_S}{\dot{W}_S + T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}}}$$

- Pumpe/Kompressor

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\dot{m}(e_{x,\text{str},1} - e_{x,\text{str},2})}{\dot{W}_{\text{invest}}} = \frac{\dot{W}_{\text{invest}} - E_{x,V}}{\dot{W}_{\text{invest}}} \\ &= \frac{-\dot{W}_S - T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}}}{-\dot{W}_S} \stackrel{Q_{\text{Verlust}}=0}{=} \frac{(h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)}{h_2 - h_1} \end{aligned}$$

- Wärmetauscher
 - ohne Vermischung

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_C(e_{x,\text{str},C,\text{out}} - e_{x,\text{str},C,\text{in}})}{\dot{m}_H(e_{x,\text{str},H,\text{in}} - e_{x,\text{str},H,\text{out}})}$$

- mit Vermischung

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_{C,i}(e_{x,\text{str},C,\text{out}} - e_{x,\text{str},C,\text{in}})}{\dot{m}_{H,i}(e_{x,\text{str},H,\text{in}} - e_{x,\text{str},H,\text{out}})}$$

Periodische Tabelle

1 IA																												18 VIIIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1	1.0079																	2	4.0025																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
H																		He																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Hydrogène																		Hélium																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
2 IIA																		13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
3	6.941		4	9.0122																	5	10.811		6	12.011		7	14.007		8	15.999		9	18.998		10	20.180																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Li			Be																		B		C		N		O		F		Ne																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Lithium			Beryllium																		Bore		Carbone		Azote		Oxygène		Fluor		Néon																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
11	22.990		12	24.305																	13	26.982		14	28.086		15	30.974		16	32.065		17	35.453		18	39.948																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Na			Mg			3 IIIA		4 IVB		5 VB		6 VIB		7 VIIB		8 VIIIB		9 VIIIB		10 VIIIB		11 IB		12 IIB		Aluminium		Silicium		Phosphore		Soufre		Chlore		Argon																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
19	39.098		20	40.078		21	44.956		22	47.867		23	50.942		24	51.996		25	54.938		26	55.845		27	58.933		28	58.693		29	63.546		30	65.39		31	69.723		32	72.64		33	74.922		34	78.96		35	79.904		36	83.8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
K			Ca			Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Potassium			Calcium			Scandium		Titane		Vanadium		Chrome		Manganèse		Fer		Cobalt		Nickel		Cuivre		Zinc		Gallium		Germanium		Arsenic		Sélénium		Brome		Krypton																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
37	85.468		38	87.62		39	88.906		40	91.224		41	92.906		42	95.94		43	96		44	101.07		45	102.91		46	106.42		47	107.87		48	112.41		49	114.82		50	118.71		51	121.76		52	127.6		53	126.9		54	131.29																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Rb			Sr			Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Rubidium			Strontium			Yttrium		Zirconium		Niobium		Molybdène		Technétium		Ruthénium		Rhodium		Palladium		Argent		Cadmium		Indium		Etain		Antimoine		Tellure		Iode		Xénon																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
55	132.91		56	137.33		57-71		72	178.49		73	180.95		74	183.84		75	186.21		76	190.23		77	192.22		78	195.08		79	196.97		80	200.59		81	204.38		82	207.2		83	208.98		84	209		85	210		86	222																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Cs			Ba			La-Lu		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Césium			Barium			Lanthanide		Halfnium		Tantale		Tungstène		Rhénium		Osmium		Iridium		Platine		Or		Mercure		Thallium		Plomb		Bismuth		Polonium		Astatine		Radon																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
87	223		88	226		89-103		104	261		105	262		106	266		107	264		108	277		109	268		110	281		111	280		112	285		113	284		114	289		115	288		116	293		117	292		118	294																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Fr			Ra			Ac-Lr		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg		Uub		Uut		Uuq		Uup		Uuh		Uus		Uuo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Francium			Radium			Actinide		Rutherfordium		Dubnium		Seaborgium		Bohrium		Hassium		Meitnerium		Darmstadtium		Roentgenium		Ununbium		Ununtrium		Ununquadium		Ununpentium		Ununhexium		Ununseptium		Ununoctium																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									