

Thermodynamik Formelsammlung

Helmut Hartmann

27. Juni 2012

HOCHSCHULE AMBERG WEIDEN

Fakultät Maschinenbau / Umwelttechnik

Studiengang Umwelttechnik

aus der Vorlesung “THERMODYNAMIK“
von Prof. Dr.-Ing. Univ. Marco Taschek

Gesetzt in L^AT_EX
CC BY-NC-SA 3.0 Helmut Hartmann

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeines

Grundlegende Formeln

$$c_p = c_v + R_i$$

$$c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R_i$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

$$\Delta h = c_p \Delta T$$

$$h = u + pv$$

$$\dot{V} = Ac$$

$$\dot{m} = \dot{V} \rho = \dot{V} \frac{p}{R_i T}$$

$$\rho = \frac{p}{R_i T} = \frac{1}{v}$$

$$c_{m|T_1}^{T_2} = \frac{c_{m|T_0}^{T_2}(T_2 - T_0) - c_{m|T_0}^{T_1}(T_1 - T_0)}{T_2 - T_1}$$

$$U_{\text{Kreis}} = \pi 2r$$

$$A_{\text{Kreis}} = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$V_{\text{Zyl.}} = h A_{\text{Kreis}}$$

$$\Delta V = V \gamma \Delta T$$

$$\Delta L = L \frac{\gamma}{3} \Delta T$$

$$\gamma = \frac{1}{v} \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)$$

Avogadro

$$pv = R_i T$$

$$pV = m R_i T \quad \text{mit} \quad m = nM$$

$$pV = n M R_i T$$

$$\frac{pV}{nT} = R_i M$$

$$R_i = \frac{R_m}{M}$$

$$pv_m = R_m T$$

$$pV = m R_i T = n R_m T$$

Real Gas

$$pV = m R_i T \lambda$$

$$\lambda \rightarrow \text{Tabellenwert}$$

Wichtige Werte bei Normbedingungen

$$c_{v,\text{Luft}} = 0,717 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$c_{p,\text{Luft}} = 1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$M_{\text{Luft}} = 28,8 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$n_{\text{Luft}} = 34,7 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

$$R_{i,\text{Luft}} = 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$c_{\text{Eis}} = 2,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$c_{\text{Wasser}} = 4,20 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\Delta h_{\text{Schmelz}} = 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta h_{\text{Kondens.}} = 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Konstanten

$$v_m = 22,414 \frac{\text{dm}^3}{\text{mol}}$$

$$n = 6,022 * 10^{23} \text{ Teilchen}$$

$$R_m = 8,3143 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$$

Normbedingungen sind 273,15 K und 1013,25 mbar

Wärme(energie)strom \dot{Q} in W = $\frac{J}{s}$

$$\dot{Q} = kA(T_A - T_B)$$

A = Berührfläche in m^2

k = Wärmedurchgangskoeffizient in $\frac{W}{m^2K}$

übertragene Wärme(energie) in J = Ws

$$Q_{12} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$$

Leistung P (Arbeitsstrom) in $\frac{J}{s} = W$

$$P = \frac{dW}{dt} (= \dot{W})$$

$$\dot{W}_{t,12} = \frac{\dot{m}}{\rho}(p_2 - p_1)$$

$$P = W_{t,12}n$$

Arbeit W_{12} in J = Ws = Nm

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt = \int_1^2 \vec{F} d\vec{x} = \vec{F} d\vec{x}$$

Hubarbeit

$$W_H = F_G \Delta h = mg \Delta h$$

Wellenleistung P_W

$$P_W = M2\pi n = M\omega = \vec{F} \vec{v} = \vec{F} \times \vec{v}$$

M = Drehmoment ($M = Fl$) in Nm

$$P_W = \dot{m}|w_{t12}| = \dot{m}|h_2 - h_1|$$

n = Drehzahl in $\frac{1}{s}$

Elektrische Leistung in W = VA

$$P = UI$$

Elektrische Arbeit

$$W_{el,12} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el} dt$$

Ohm'sches Gesetz

$$U = RI$$

Nutzarbeit $W_{N,12}$

$$W_{N,12} = - \int_1^2 (p - p_N) dV \Rightarrow W_{N,12} = - \int_1^2 p dV$$

Grundgleichung der Kalorik

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

$$\Rightarrow Q_{12} = mc(T_2 - T_1)$$

für flüssige und feste Stoffe, bei Gasen mit c_v oder c_p

$$\Delta U = \Delta Q = mc_v \Delta T$$

\Rightarrow **NUR** bei isochorer Zustandsänderung im geschlossenen System

$$\Delta H = \Delta Q = mc_p \Delta T$$

\Rightarrow **NUR** bei isobarer Zustandsänderung im offenen System

Spezifischer Energiegehalt

$$e = \frac{E}{m}$$

Energiestrom-Bilanzgleichung

$$\frac{dE_{Sys}}{dt} = Q + W + (me)_{ein} - (me)_{aus}$$

2 System

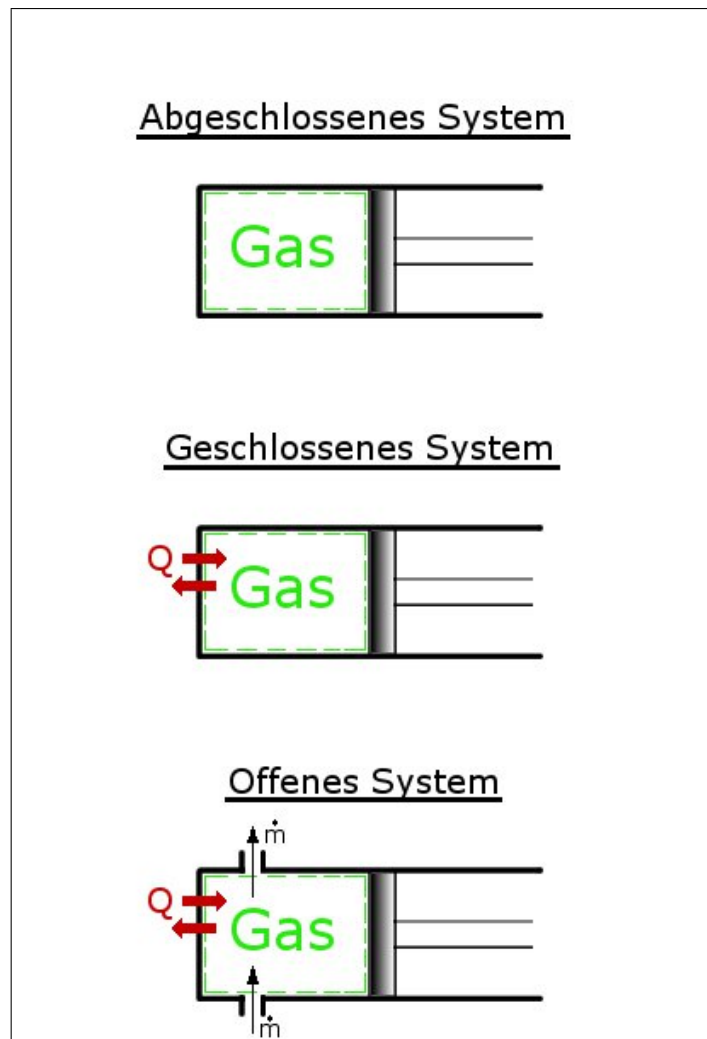


Abb. 1: Systemübersicht

1. HS Geschlossenes System

$$q_{12} + w_{v12} = u_2 - u_1$$

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$$

$$w_{v12} = - \int p dv$$

1. HS Offenes System

$$q_{12} + w_{t12} = h_2 - h_1$$

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

$$w_{t12} = \int v dp$$

$$P = \dot{m}|\Delta h| = \dot{m}|w_{t12}|$$

2. HS Geschlossenes System

$$\int T ds - \int p dv = u_2 - u_1$$

2. HS Offenes System

$$\int T ds + \int v dp = h_2 - h_1$$

System:

Menge an Materie oder betrachteter Raumausschnitt. Er besteht aus Systeminhalt, Systemgrenze und Umgebung.

Nach Systeminhalt unterscheidet man zwischen

- homogenes System:
mit gleichförmiger, chemischer Zusammensetzung (Komponente) und physikalischen Eigenschaften (Phase).
- heterogenes System:
2 oder mehr Phasen, eine oder mehrere Komponenten.
- abgeschlossenes (isoliertes) System:
($dm = 0, dE = 0$) (adiabat)
keine Wechselwirkung mit der Umgebung (undurchlässig für Energie und Masse).
- geschlossenes System:
($dm = 0, dE \neq 0$) (diabat)
durchlässig für Energie, nicht für Masse (Systemgrenze verschiebbar).
- offenes System:
($dm \neq 0, dE \neq 0$)
durchlässig für Energie und Masse (Systemgrenze verschiebbar, Systemgrenze fest = Kontrollvolumen).
- adiabates System (wärmedicht):
durchlässig für Masse und alle Energieformen außer Wärme (Systemgrenze verschiebbar)
- diabates System (wärmedurchlässig):
quasi real.

3 Zustand

Der Zustand eines Systems wird bestimmt durch die physikalischen Eigenschaften, die Zustandsgrößen

3.1 Zustandsgrößen

- thermische Zustandsgrößen:
Druck, Temperatur, Volumen
- mechanische Zustandsgrößen:
z.B. Geschwindigkeit, Lage
- äußere Zustandsgrößen:
Lagebeschreibung des Systems
- innere Zustandsgrößen:
Systembeschreibung
- intensive Zustandsgrößen:
unabhängig von der Systemgröße (z.B. Druck, Temperatur)(nicht additiv)
- extensive Zustandsgrößen:
abhängig von der Systemgröße (z.B. Volumen)(additiv)
- spezifische Zustandsgrößen:
bezogen auf die Masse (m) und damit unabhängig von der Systemgröße

3.2 Prozess

Summe der äußeren Einwirkungen die zu einer Zustandsänderung führen

3.3 Prozessgröße

Tritt bei Zustandsänderung auf und ist wegabhängig (z.B. Wärme Q , Arbeit W)

4 Zustandsänderungen

4.1 Übersicht der Zustandsänderungen

4.1.1 Isochore

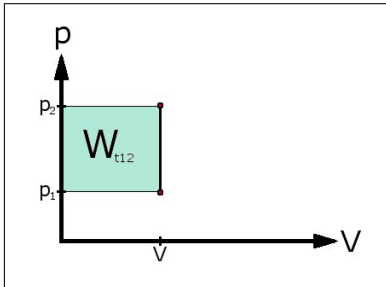


Abb. 2: Arbeitsdiagramm

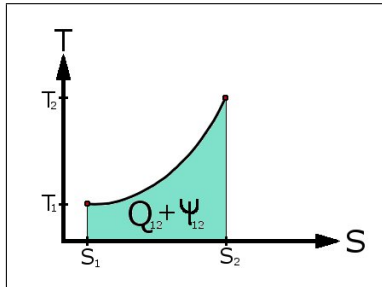


Abb. 3: Wärmediagramm

$$s_2 - s_1 = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$q_{12} = T_M \Delta s$$

$$q_{12} + \psi_{12} = c_v(T_2 - T_1)$$

4.1.2 Isobare

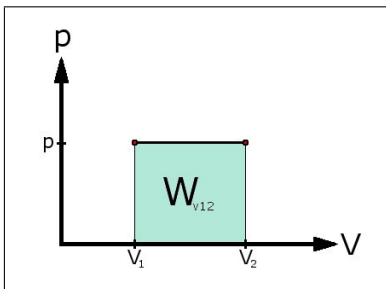


Abb. 4: Arbeitsdiagramm

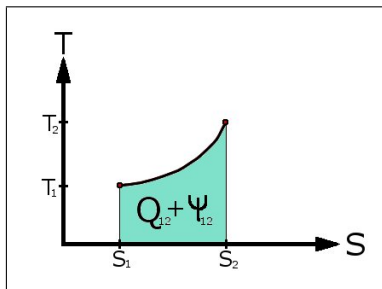


Abb. 5: Wärmediagramm

$$s_2 - s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$q_{12} + \psi_{12} = c_p(T_2 - T_1) = u_2 - u_1$$

4.1.3 Isotherme

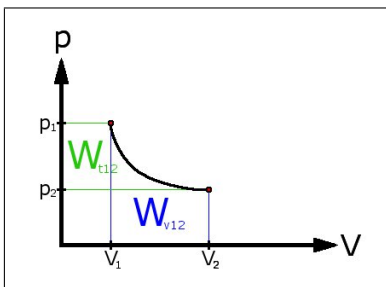


Abb. 6: Arbeitsdiagramm

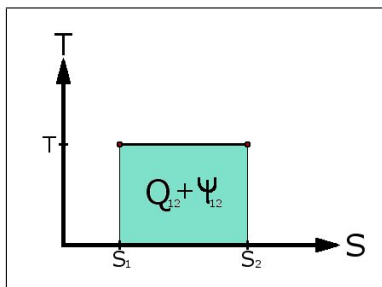


Abb. 7: Wärmediagramm

$$s_2 - s_1 = R_i \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$q_{12} + \psi_{12} = -w_{v12} = -w_{i12}$$

$$w_{v12} = w_{t12} + \psi_{12}$$

$$w_{i12} = w_{t12} + \psi_{12}$$

4.1.4 Isentrope

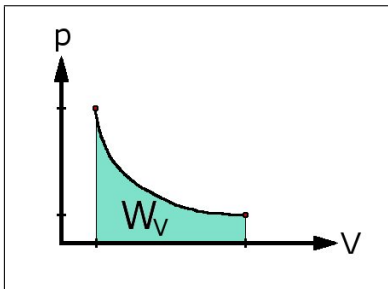
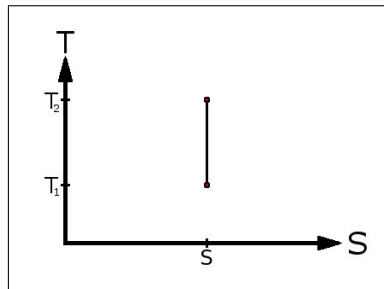


Abb. 8: Arbeitsdiagramm



$$s_2 - s_1 = 0$$

Abb. 9: Wärmediagramm

4.1.5 Isenthalpe

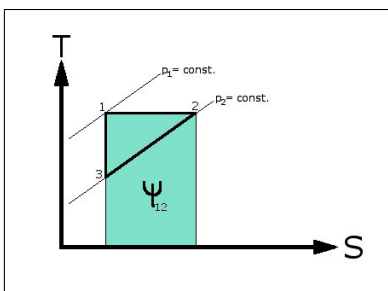


Abb. 10: Wärmediagramm

① → ② Isenthalpe Drosselung

② → ③ Isentrope Expansion

③ → ① Dissipation der kinetischen Energie bei $p = \text{const.}$

$n = \text{const.}$

$$q_{12} + \psi_{12} = \frac{n-\kappa}{n-1} c_p (T_2 - T_1)$$

4.2 Isobare Zustandsänderung

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

$$p = \text{const.}$$

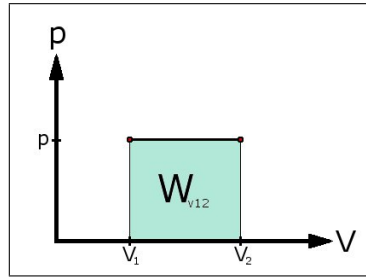


Abb. 11: Isobare Zustandsänderung

Geschlossenes System (reversible ZÄ)

$$w_{v12} = - \int p dv = -p(v_2 - v_1)$$

$$q_{12} + w_{v12} = u_2 - u_1$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 - w_{v12}$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 - [-p(v_2 - v_1)]$$

$$q_{12} = (u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1)$$

$$q_{12} = h_2 - h_1$$

$$q_{12} = c_p(T_2 - T_1)$$

Offenes System

$$w_{t12} = \int v dp = 0$$

$$q_{12} + w_{t12} = h_2 - h_1$$

$$q_{12} = h_2 - h_1$$

$$q_{12} = c_p(T_2 - T_1)$$

4.3 Isochore Zustandsänderung

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

$$v = \text{const.}$$

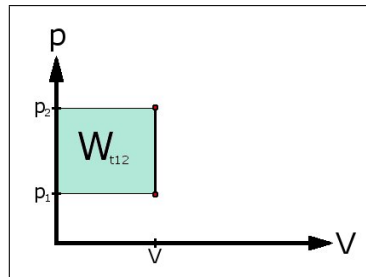


Abb. 12: Isochore Zustandsänderung

Geschlossenes System (reversible ZÄ)

$$w_{v12} = - \int v dp = 0$$

$$q_{12} + w_{v12} = u_2 - u_1$$

$$q_{12} = c_v(T_2 - T_1)$$

Offenes System

$$w_{t12} = \int v dp = v(p_2 - p_1) = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

$$q_{12} + w_{t12} = h_2 - h_1$$

$$q_{12} = h_2 - h_1 - w_{t12}$$

$$q_{12} = (u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) - v(p_2 - p_1)$$

$$q_{12} = u_2 - u_1$$

$$q_{12} = c_v(T_2 - T_1)$$

4.4 Isotherme Zustandsänderung

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

$$T = \text{const.}$$

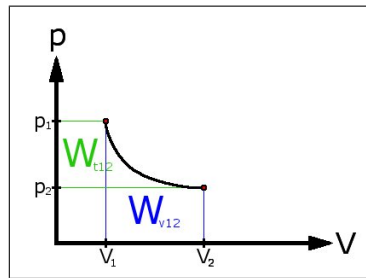


Abb. 13: Isotherme Zustandsänderung

Geschlossenes System (reversible ZÄ)

$$q_{12} + w_{v12} = \underbrace{u_2 - u_1}_{c_v(T_2 - T_1) = 0}$$

$$q_{12} = -w_{v12}$$

$$q_{12} = \int p dv$$

$$q_{12} = \int_1^2 \frac{R_i T}{v} dv$$

$$q_{12} = R_i T \int_1^2 \frac{1}{v} dv$$

$$q_{12} = R_i T [\ln(v)]_1^2$$

$$q_{12} = R_i T \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$w_{v12} = -R_i T \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$w_{v12} = -R_i T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

$$s_2 - s_1 = R_i \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Offenes System

$$q_{12} = -w_{v12} = -w_{t12}$$

$$q_{12} + w_{t12} = \underbrace{h_2 - h_1}_{=0 \text{ weil } c_p(T_2 - T_1)}$$

$$q_{12} = -w_{t12}$$

$$w_{t12} = \int v dp$$

$$w_{t12} = \int_1^2 \frac{R_i T}{p} dp$$

$$w_{t12} = R_i T \int_1^2 \frac{1}{p} dp$$

$$w_{t12} = R_i T \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$w_{t12} = R_i T \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) = -R_i T \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$q_{12} = -R_i T \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

$$q_{12} = R_i T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

4.5 Isentrope Zustandsänderung

$$p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa = \text{const.}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

→ Adiabats reversibel

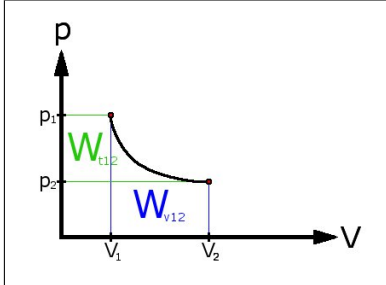


Abb. 14: Arbeitsdiagramm

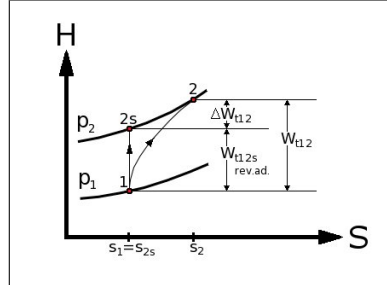


Abb. 15: Adiabats Verdicht.

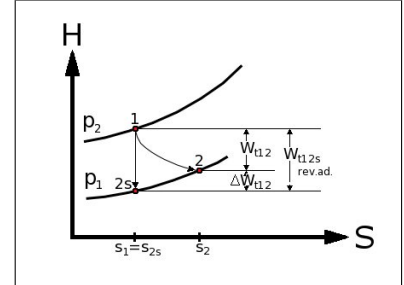


Abb. 16: Adiabats Expansion

Geschlossenes System (reversible ZÄ)

$$w_{t12} = \kappa w_{v12}$$

$$q_{12} = 0$$

$$q_{12} + w_{v12} = u_2 - u_1$$

$$w_{v12} = c_v(T_2 - T_1)$$

$$du = -pdv$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \text{ bzw. } T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1}$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa$$

$$p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}$$

Offenes System

$$w_{v12} = \underbrace{c_v}_{\frac{R_i}{\kappa-1}}(T_2 - T_1) = \frac{R_i}{\kappa-1}(T_2 - T_1)$$

$$w_{t12} = \underbrace{c_p}_{\frac{\kappa R_i}{\kappa-1}}(T_2 - T_1) = \frac{\kappa R_i}{\kappa-1}(T_2 - T_1)$$

$$w_{v12} = \frac{R_i T_1}{\kappa-1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$w_{t12} = \frac{\kappa R_i T_1}{\kappa-1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$w_{v12} = \frac{R_i T_1}{\kappa-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right)$$

$$w_{t12} = \frac{\kappa R_i T_1}{\kappa-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right)$$

$$w_{v12} = \frac{R_i T_1}{\kappa-1} \left(\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} - 1\right)$$

$$w_{t12} = \frac{\kappa R_i T_1}{\kappa-1} \left(\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} - 1\right)$$

$$w_{t12} \text{ Polytrop} = \frac{n R_i}{n-1} (T_2 - T_1)$$

$$w_{v12} \text{ Polytrop} = \frac{R_i}{n-1} (T_2 - T_1)$$

$$w_{t12} = \frac{n R_i T_1}{n-1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$w_{v12} = \frac{R_i T_1}{n-1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$w_{t12} = \frac{n R_i T_1}{n-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$$

$$w_{v12} = \frac{R_i T_1}{n-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$$

$$w_{t12} = n w_{v12}$$

Dissipationsenergie:

$$q_{12} + \psi_{12} = \frac{n-\kappa}{n-1} c_v (T_2 - T_1)$$

4.6 Polytrope, reversible ZÄ

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = \text{const.}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Geschlossenes System

$$u_2 - u_1 = q_{12} + w_{v12}$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 - w_{v12}$$

$$q_{12} = c_v(T_2 - T_1) - \left(\frac{R_i}{n-1}\right)(T_2 - T_1)$$

$$q_{12} = \left(c_v - \frac{R_i}{n-1}\right)(T_2 - T_1)$$

$$q_{12} = \frac{n-\kappa}{n-1} c_v (T_2 - T_1) \quad q_{12} = \left(\frac{n-\kappa}{\kappa-1}\right) w_{v12}$$

$$w_{v12} = \frac{R_i}{n-1} (T_2 - T_1)$$

Offenes System

$$h_2 - h_1 = q_{12} + w_{t12}$$

$$q_{12} = h_2 - h_1 - w_{t12}$$

$$q_{12} = c_p(T_2 - T_1) - \frac{nR_i}{n-1}(T_2 - T_1)$$

$$q_{12} = \left(c_p - \frac{nR_i}{n-1}\right)(T_2 - T_1)$$

$$w_{t12} = \frac{nR_i}{n-1} (T_2 - T_1)$$

Nachweis Zusammenhang c_p zu c_v

$$c_p = c_v + R_i$$

$$c_p - \frac{nR_i}{n-1} = c_v + R_i - \frac{nR_i}{n-1}$$

$$c_p - \frac{nR_i}{n-1} = c_v + \frac{R_i(n-1)}{(n-1)} - \frac{nR_i}{n-1}$$

$$c_p - \frac{nR_i}{n-1} = c_v + \frac{nR_i - R_i - nR_i}{n-1}$$

$$c_p - \frac{nR_i}{n-1} = c_v - \frac{R_i}{n-1}$$

Berechnung des Polytropenexponenten n

$$n = \frac{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) - \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}{\ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}{\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}$$

Polytropenexponent n

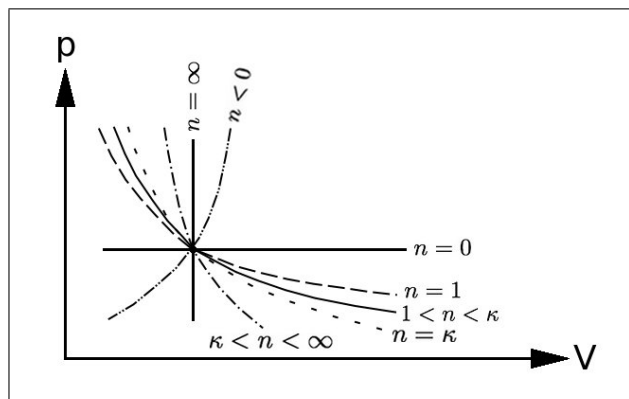


Abb. 17: Polytrope Zustandsänderung

- $n \sim \kappa$ → adiabat, isentrop, perfekt isoliert
- $n > \kappa$ → Arbeit und Wärme wird zugeführt
- $n = 1$ → isotherm
- $n \rightarrow \infty$ → isochor
- $n \rightarrow 0$ → isobar

5 Entropie

$$s_2 - s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_i \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R_i \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) + c_p \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Entropieerzeugung

Entropie entsteht durch Dissipation ψ

$$s_{i12} = \int_1^2 \frac{d\psi_{12}}{T} \quad \text{mit } T = \text{const.}$$

$$s_{i12} = \frac{\psi_{12}}{T} \quad \text{oder pro Zeit}$$

$$\dot{s}_{i12} = \frac{\dot{\psi}_{12}}{T}$$

Entropiestrom

$$\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

$$\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \dot{m} \left[c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_i \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \right]$$

$$\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \dot{m} c_v \frac{\kappa - n}{n - 1} \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)$$

Entropietransport

$$s_{q12} = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} \quad \text{mit } T = \text{const.}$$

$$s_{q12} = \frac{q_{12}}{T} \quad \text{mit } T = \text{mittlere Temperatur, bei der } Q \text{ übertragen wird}$$

5.1 Wasserwirbelbremse

$$\dot{\psi} = \frac{\text{Dissipationsenergie}}{\text{Zeit}}$$

$$\Delta S = 0 \quad (\text{im inneren System})$$

$$\left. \begin{array}{l} T = \text{const.} \\ p = \text{const.} \\ V = \text{const.} \end{array} \right\} \text{Keine Zustandsänderung, da keine Änderung der Prozessgrößen}$$

1. HS geschlossenes System

$$Q_{12} + \cancel{\psi_{12}} + \psi_{12} \cancel{\Delta U}$$

$$Q_{12} = -\psi_{12} \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_{12} = \dot{\psi}_{12}$$

Entropieerzeugung

$$S_{12} = \int \frac{d\psi_{12}}{T} \quad \text{mit } T = \text{const.}$$

$$s_{i12} = \frac{\psi_{12}}{T} \quad \text{oder pro Zeit } \dot{S}_{12} = \frac{\dot{\psi}_{12}}{T}$$

Entropietransport

$$S_{Q12} = -\frac{\dot{\psi}_{12}}{T}$$

Kühlwassermassentrom

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_w \Delta T_w}$$

Änderung der spez. Entropie des Kühlwassers

$$\dot{S}_{Q12} = \dot{S}_2 - \dot{S}_1$$

$$\dot{s}_2 - \dot{s}_1 = \frac{\dot{S}_{Q12}}{\dot{m}}$$

5.2 Wärmepumpe

5.2.1 wie Tauchsieder

$$\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{W} + \dot{Q}$$

$$\dot{m}c_p(T_2 - T_1) = \dot{Q} = P_{el}$$

$$\dot{m} = \frac{P_{el}}{c_p(T_2 - T_1)}$$

5.2.2 generell

Energiebilanz 1.HS

$$|\dot{Q}_2| = |\dot{Q}_1| + |\dot{A}|$$

$$|\dot{Q}_2| = \dot{m}_{\max}c_p(T_E - T_A)$$

\dot{Q}_1 unbekannt \rightarrow 1.HS reicht nicht
 \hookrightarrow 2.HS

$$\Delta S_{WP} = 0$$

$$|\dot{S}_1| = |\dot{S}_2| \text{ weil reversibel}$$

$$d\dot{S} = \frac{d\dot{Q}}{T} \rightarrow \int d\dot{S} = \int \frac{d\dot{Q}}{T}$$

mit $T_1 = const.$ und $d\dot{Q} = const.$

$$\rightarrow \dot{S}_1 = \frac{\dot{Q}_1}{T_1} \text{ bzw. } \dot{Q}_1 = \dot{S}_1 T_1$$

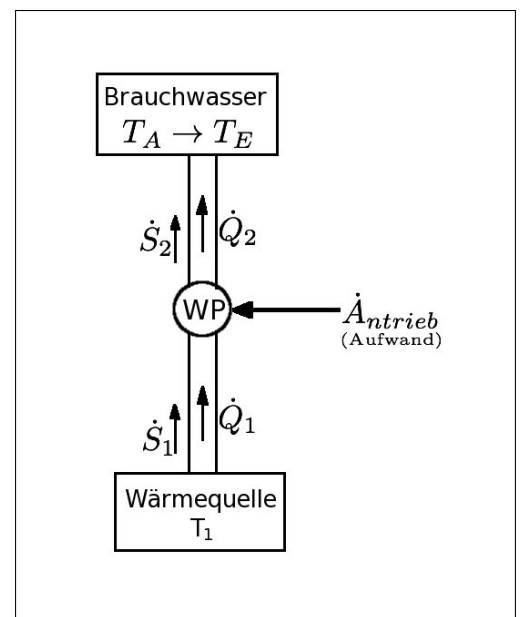


Abb. 18: Wärmepumpe

$$d\dot{Q}_2 = \dot{m}_{\max}c_p dT$$

$$\dot{S}_2 = \int \frac{\dot{m}_{\max}c_p dT}{T} = \dot{m}_{\max}c_p \int \frac{dT}{T} = \dot{m}_{\max}c_p \ln\left(\frac{T_E}{T_A}\right)$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{S}_2 T_1 = \underbrace{\dot{m}_{\max}c_p \ln\left(\frac{T_E}{T_A}\right)}_{\dot{S}_1 = \dot{S}_2} T_1$$

$$\text{in } |\dot{Q}_2| = |\dot{Q}_1| + |\dot{A}| :$$

$$\dot{m}_{\max}c_p(T_E - T_A) = \dot{A} + T_1 \dot{m}_{\max}c_p \ln\left(\frac{T_E}{T_A}\right)$$

$$\dot{m}_{\max} = \frac{\dot{A}}{c_p(T_E - T_A) - T_1 c_p \ln\left(\frac{T_E}{T_A}\right)}$$

6 Phasenübergang Wasserdampf

6.1 Zustandsgrößen von Wasser → Heißdampf

Realgasgleichung:	$pv = R_i T \lambda$
Dampfgehalt:	$x = \frac{m_{\text{Dampf}}}{m_{\text{Dampf}} + m_{\text{Wasser}}}$
Größen auf der Siedelinie:	v', t', u', h', s'
Werte auf der Taulinie:	v'', t'', u'', h'', s''

6.2 Dampfgebiet

Im Nassdampfgebiet sind die Isobaren = Isothermen Hier reicht die Angabe von p und T nicht!
 → zusätzlich ist x erforderlich!

Dampfgehalt:	$x = \frac{\text{Dampfmasse}}{\text{Gesamtmasse}}$	
Volumen:	$v = v' + x(v'' - v')$	
Enthalpie:	$h = h' + x(h'' - h')$	mit $h'' - h' = r$
innere Energie:	$u = u' + x(u'' - u')$	
Entropie:	$s = s' + x(s'' - s')$	
Interpolation:	$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{(x_1 - x_0)}(x - x_0)$	$h'_{25\text{bar}} = h'_{20\text{bar}} + \frac{h'_{30\text{bar}} - h'_{20\text{bar}}}{p_{30\text{bar}} - p_{20\text{bar}}}(p_{25\text{bar}} - p_{20\text{bar}})$

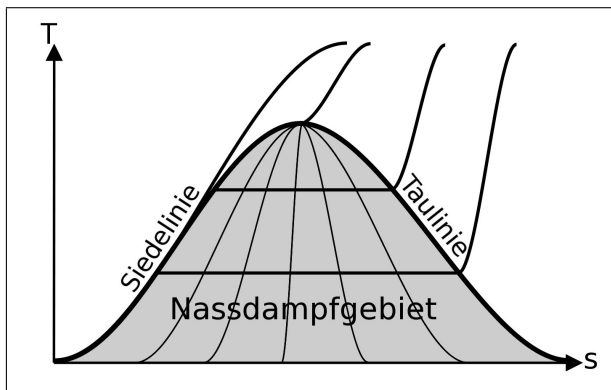


Abb. 19: Nassdampfgebiet Wasser

$$q_{12} + \psi_{12} = c_p(T_2 - T_1) = h_2 - h_1$$

$$\dot{Q} = q_{12}\dot{m}$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = v\dot{m}$$

für $p \ll p_k$ gilt: $\ln p = -\frac{r}{R_i} \frac{1}{T} + c$
--

→ $p = Kc^{(-\frac{r}{R_i} \frac{1}{T})}$

Beispielaufgabe

In Einem geschlossenen Behälter von 3 m^3 Inhalt befindet sich Dampf von 10 bar , $x = 1,0$ (trocken, gesättigt). Nach längerer Zeit hat der Gefäßinhalt 110°C erreicht.

Wie hoch sind a) Druck und b) Dampfgehalt x jetzt im Behälter?

a) Druck

1. Interpolation mit $f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1)-f(x_0)}{x_1-x_0}(x - x_0)$

$$p_0(109,32^\circ\text{C}) = 1,4\text{bar} \quad \text{aus DT}$$

$$p_1(111,37^\circ\text{C}) = 1,5\text{bar} \quad \text{aus DT}$$

$$p_2 = p(110^\circ\text{C}) = 1,4\text{bar} + \frac{1,5\text{bar}-1,4\text{bar}}{111,37^\circ\text{C}-109,32^\circ\text{C}}(110^\circ\text{C} - 109,32^\circ\text{C})$$

$$\underline{p_2 = 1,43\text{bar}}$$

b) Dampfgehalt

$$v_{\text{Nassdampf}110^\circ\text{C}} = v''_{10\text{bar}} = 0,1944 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{aus DT}$$

$$v''_{10\text{bar}} = v'_{110^\circ\text{C}} + x(v''_{110^\circ\text{C}} - v'_{110^\circ\text{C}})$$

$$x = \frac{v''_{10\text{bar}} - v'_{110^\circ\text{C}}}{v''_{110^\circ\text{C}} - v'_{110^\circ\text{C}}} \quad \text{da } v'_{110^\circ\text{C}} \ll v''_{110^\circ\text{C}} \Rightarrow v'_{110^\circ\text{C}} = 0$$

$$x \frac{v''_{10\text{bar}}}{v''_{110^\circ\text{C}}} \quad \text{mit } v''_{110^\circ\text{C}} = v''_{1,43\text{bar}}$$

$$\rightarrow x = \frac{v''_{10\text{bar}}}{v''_{1,43\text{bar}}}$$

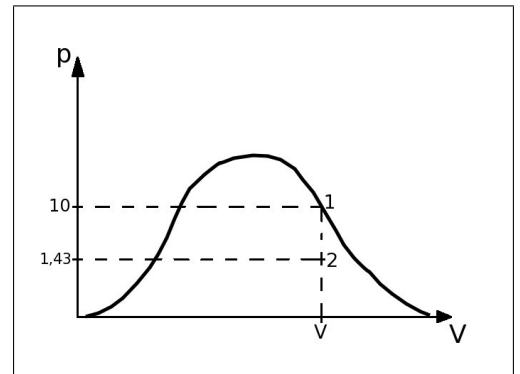


Abb. 20: Nassdampfgebiet Wasser

$$v''(1,4\text{bar}) = 1,235 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{aus DT}$$

$$v''(1,5\text{bar}) = 1,159 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{aus DT}$$

$$v''(1,43\text{bar}) = 1,159 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} + \frac{1,235 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 1,159 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{1,5\text{bar} - 1,4\text{bar}}(1,43\text{bar} - 1,4\text{bar})$$

$$v''(1,43\text{bar}) = 1,1818 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow x = \frac{v''_{10\text{bar}}}{v''_{1,43\text{bar}}} = \frac{0,1944 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{1,1818 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = \underline{\underline{16,4\%}}$$

6.3 Isentroper Verdichterwirkungsgrad

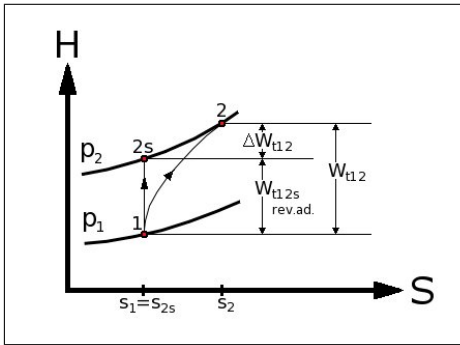


Abb. 21: Adiabate Verdicht.

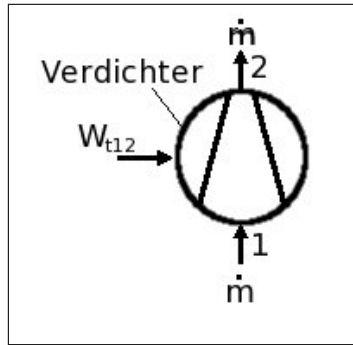


Abb. 22: Verdichter

$$q_{12} = 0$$

$$w_{t12} = h_2 - h_1$$

$$(w_{t12})_{\text{rev.ad.}} = h_{2s} - h_1$$

$$\equiv (w_{t12s})_{\text{rev.ad.}}$$

$$w_{t12} = \frac{(w_{t12s})_{\text{rev.ad.}}}{\eta_{sV}} = \frac{(h_{2s} - h_1)}{\eta_{sV}}$$

Arbeitsmehraufwand:

$$\Delta w_{t12} = w_{t12} - (w_{t12s})_{\text{rev.ad.}}$$

Isentroper Verdichtungswirkungsgrad:

$$\eta_{sV} \equiv \frac{(w_{t12s})_{\text{rev.ad.}}}{w_{t12}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \leq 1$$

6.4 Isentroper Turbinenwirkungsgrad

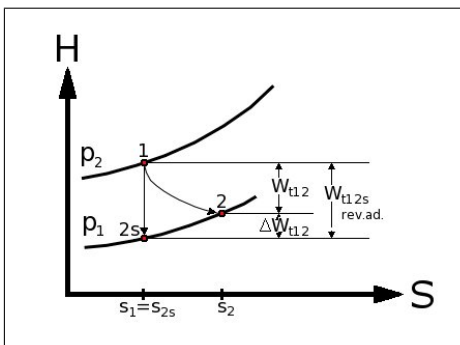


Abb. 23: Adiabate Expansion

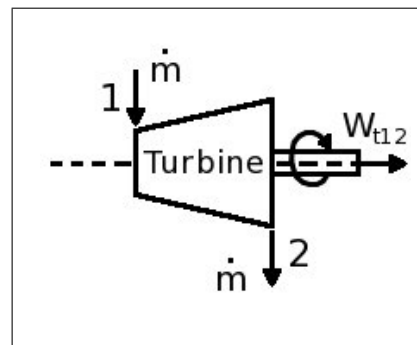


Abb. 24: Turbine

$$w_{t12} = \eta_{sT} (W_{t12s})_{\text{rev.ad.}}$$

$$w_{t12} = \eta_{sT} (h_{2s} - h_1)$$

Arbeitsverlust:

$$\Delta w_{t12} = |(w_{t12s})_{\text{rev.ad.}}| - |w_{t12}|$$

Isentroper Turbinenwirkungsgrad:

$$\eta_{sT} \equiv \frac{w_{t12}}{(w_{t12s})_{\text{rev.ad.}}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \leq 1$$

7 Kreisprozesse

7.1 Allgemeines

7.1.1 Wirkungsgrad der Energieumwandlung

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{|w_N|}{|\sum q_{zu}|} = \frac{w_N}{q_{zu}}$$

$$\eta = 1 - \left| \frac{\sum Q_{ab}}{\sum q_{zu}} \right|$$

7.1.2 Verdichtungsverhältnis

$$\eta = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_{\text{Hub}} - V_{\text{Komp}}}{V_{\text{Komp}}}$$

7.1.3 Für reversible Kreisprozesse mit reversiblen Zustandsänderungen

$$\sum w_t = \sum w_N = \sum w_{zu}$$

$$\sum Q + \sum W = 0$$

7.1.4 Leistungskennzahlen

Wärmepumpe: $\varepsilon \geq 1$

$$\varepsilon_W = \frac{Q_{ab}}{W_{\text{KP}}} = \frac{|W_{23}|}{w_{t12}}$$

$$\varepsilon_W = \frac{|h_3 - h_2|}{h_2 - h_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Kältemaschine: $\varepsilon \leq 1$

$$\varepsilon_K = \frac{q_{zu}}{W_{\text{KP}}} = \frac{Q_{41}}{w_{t12}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

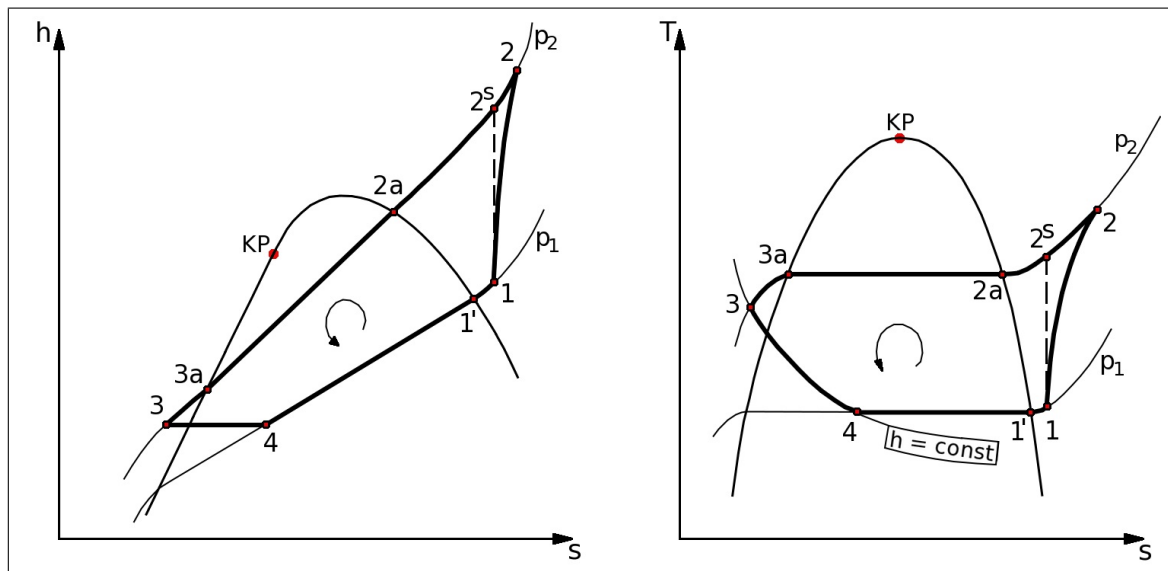


Abb. 25: Kältemaschine

7.2 Carnot-Kreisprozess

7.2.1 Rechtslufiger Carnot-Kreisprozess

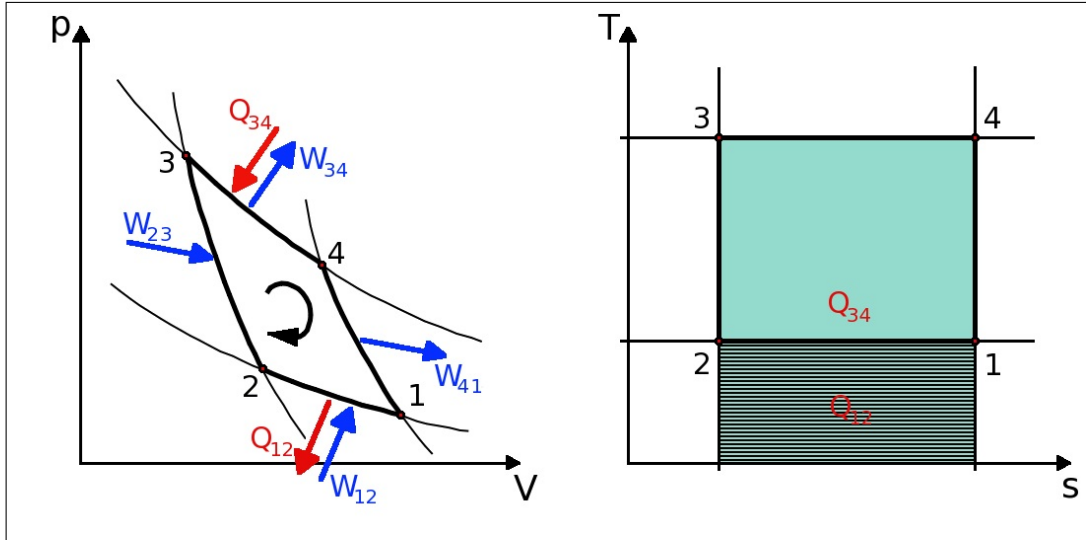


Abb. 26: rechtslufiger Carnot-Kreisprozess

① → ② Isotherme Kompression

$$T_1 = T_2$$

$$w_{12} = R_i T_1 \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

$$q_{12} = -R_i T_1 \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

② → ③ Isentrope Kompression

$$T_2 = T_1 \text{ auf } T_3$$

 $Q_{23} = 0$ (adiabat)

$$w_{23} = c_v(T_3 - T_1)$$

③ → ④ Isotherme Expansion

$$T_4 = T_3$$

$$w_{34} = -R_i T_3 \frac{v_4}{v_3}$$

$$q_{34} = R_i T_3 \frac{v_4}{v_3}$$

④ → ① Isentrope Expansion

$$T_4 = T_3 \text{ auf } T_1 = T_2$$

 $Q_{41} = 0$ (adiabat)

$$W_{41} = c_v(T_3 - T_1)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{|w_{\text{Nutz}}|}{q_{\text{zu}}} = \frac{T_3 - T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{\text{ab}}}{T_{\text{zu}}}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} > \eta_{\text{Otto}}$$

7.2.2 Linksläufiger Carnot-Kreisprozess

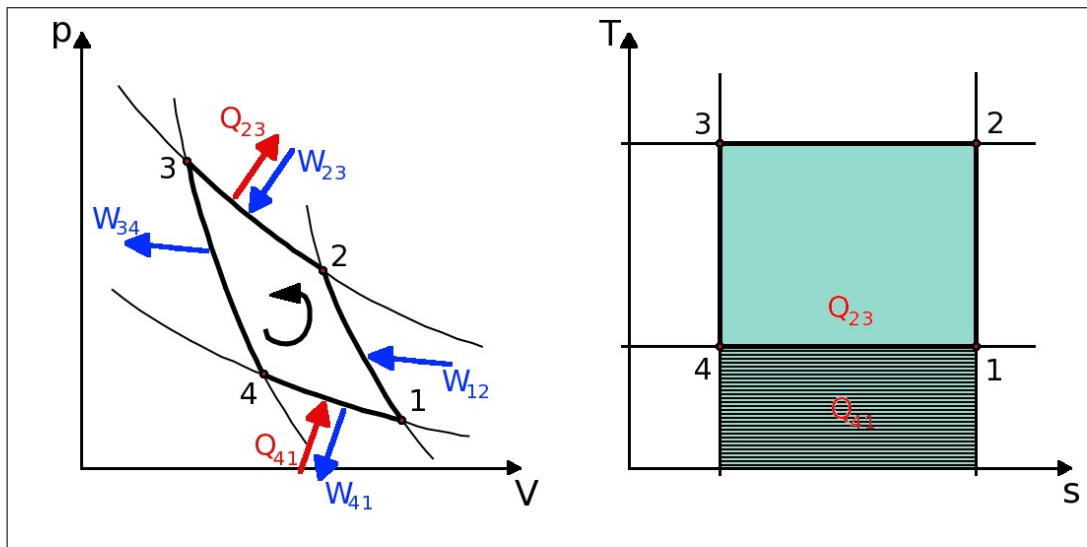


Abb. 27: linksläufiger Carnot-Kreisprozess

① → ② Isentrope Kompression
 $Q_{12} = 0$ (adiabat)

$$T_1 = T_4 \text{ auf } T_2$$

$$w_{12} = c_v(T_2 - T_1)$$

② → ③ Isotherme Kompression

$$T_2 = T_3$$

$$w_{23} = R_i T_2 \ln\left(\frac{v_2}{v_3}\right)$$

$$q_{23} = -R_i T_2 \ln\left(\frac{v_2}{v_3}\right)$$

③ → ④ Isentrope Expansion
 $Q_{34} = 0$ (adiabat)

$$T_3 = T_2 \text{ auf } T_4 = T_1$$

$$W_{34} = c_v(T_4 - T_3)$$

④ → ① Isotherme Expansion

$$T_4 = T_1$$

$$w_{41} = -R_i T_4 \frac{v_1}{v_4}$$

$$q_{41} = R_i T_4 \frac{v_1}{v_4}$$

7.3 Stirling-Kreisprozess

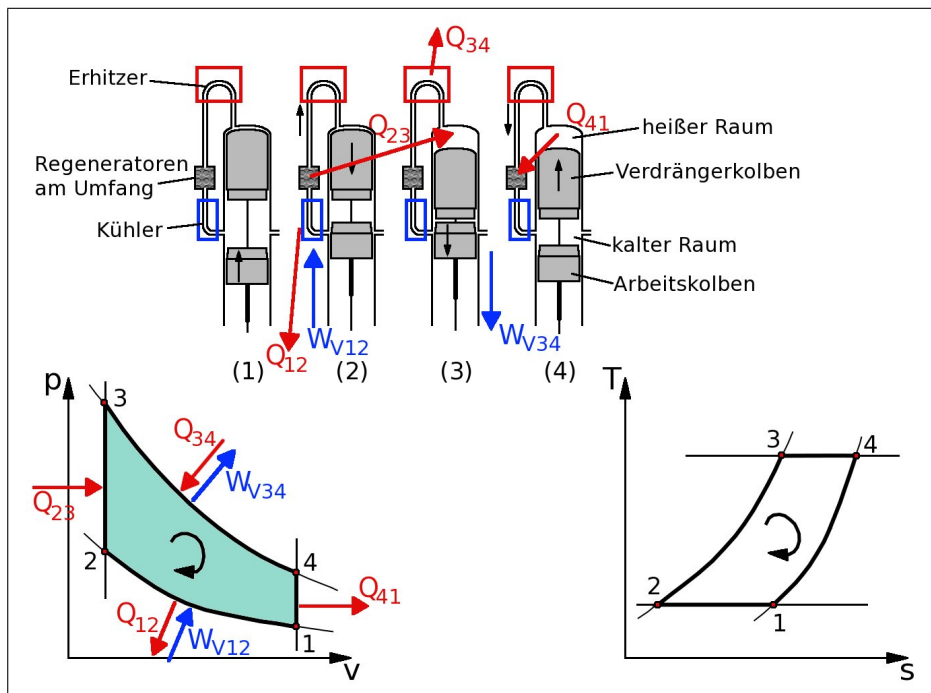


Abb. 28: Stirling-Kreisprozess

- | | |
|--|--|
| ① → ② Isotherme Verdicht., Wärmeabfuhr | $q_{12} = R_i T_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ |
| ② → ③ Isochore Wärmezufuhr | $q_{23} = c_v(T_3 - T_2)$ |
| ③ → ④ Isotherme Expansion, Wärmezufuhr | $q_{34} = R_i T_3 \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right)$ |
| ④ → ① Isochore Wärmeabfuhr | $q_{41} = c_v(T_1 - T_4) = -q_{23}$ |

Nutzarbeit:

$$w_N = R_i T_3 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \left(1 - \frac{T_1}{T_3}\right)$$

$$|w_N| = R_i (T_3 - T_1) \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

$q_{zu} = q_{34}$

$Q_{ab} = q_{12}$

Wirkungsgrad: $\eta_{\text{Stirling}} = \eta_{\text{Carnot}}$

$$\eta_{\text{Stirling}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{T_{\text{ab}}}{T_{\text{zu}}}$$

$$\eta_{\text{Stirling}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{R_i (T_3 - T_1) \ln(\varepsilon)}{R_i T_3 \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right)}$$

Verdichtungsverhältnis:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

Leistungszahl: ($\neq \eta$)

$$\varepsilon_u = \frac{q_{34}}{w} = \frac{T_3}{T_1 - T_3}$$

$P = \frac{n}{60} w_N \rightarrow w_N = -\sum Q$
--

7.4 Clausius-Rankine-Kreisprozess

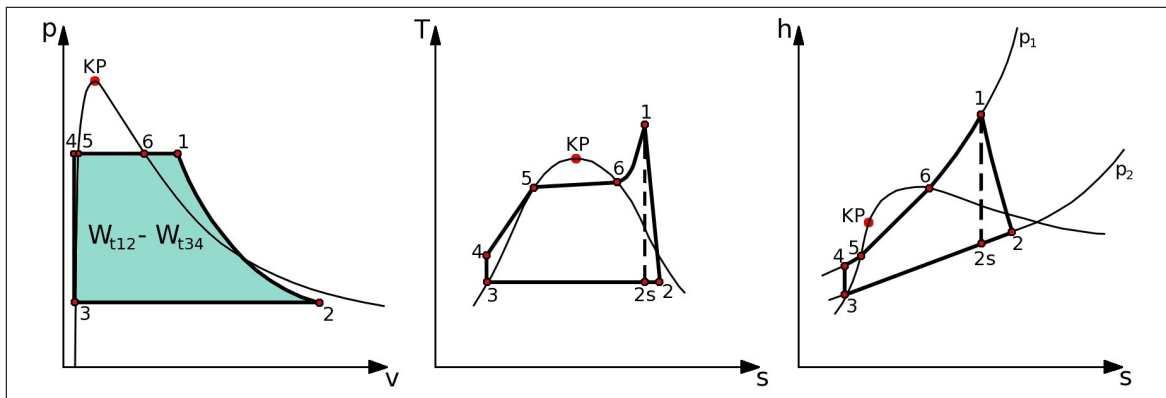


Abb. 29: Clausius-Rankine-Prozess

- ① → ② Isentrope Expansion des Heissdampfes ins Nassdampfgebiet
- ② → ③ Isobare Wärmeabfuhr bzw. Kondensation des Nassdampfes zu 100% Flüssigkeit
- ③ → ④ Isentrope Druckerhöhung des Speisewassers durch die Speisewasserpumpe
- ④ → ⑤ Isobare Wärmezufuhr im DE, aufheizen des Speisewassers auf Siedetemperatur
- ⑤ → ⑥ Isobare Wärmezufuhr im DE, Verdampfen des Wassers zu Sattdampf
- ⑥ → ① Isobare Wärmezufuhr im DE, Überhitzen des Sattdampfes zu Heissdampf

Maßnahmen zur Erhöhung des Thermischen Wirkungsgrades:

- Erhöhung des Frischdampfzustandes
- Absenken des Kondensatordrucks
- Zwischenüberhitzung
- Regenerative Speisewasservorwärmung

Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{Clausius}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4}$$

Vereinfacht, da gilt: $W_{\text{SP}} \ll W_{\text{Turbine}}$

$$\eta_{\text{Clausius}} = 1 - \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_4}$$

Mittlere Temperatur der Wärmezufuhr:

$$T_M = \frac{q_{41}}{s_1 - s_4}$$

$$w_{t34} = v_3(p_4 - p_3)$$

7.5 Otto-Kreisprozess

→ idealer Gleichraum-Prozess

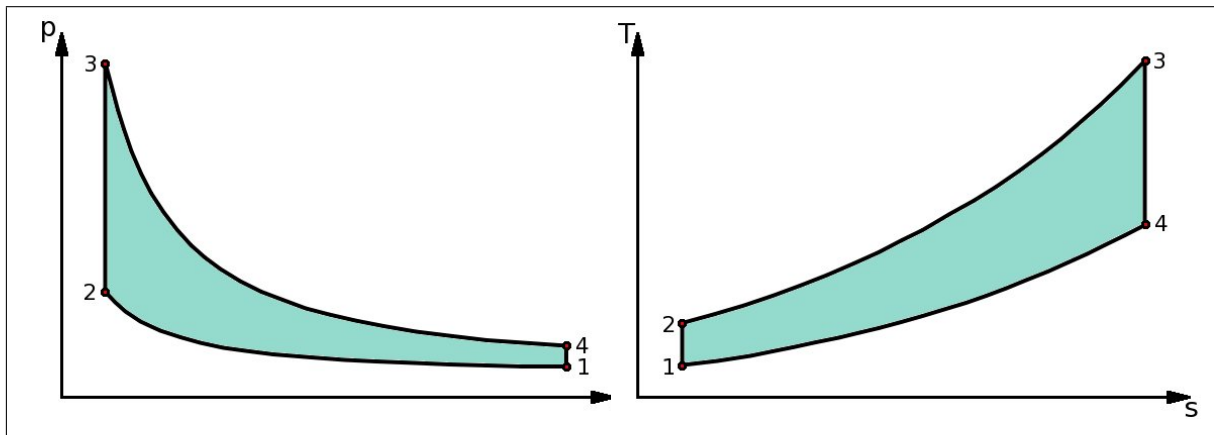


Abb. 30: Ottoprozess

①→② Isentrope Verdichtung	$q_{12} = 0, w_{t12}$
②→③ Isochore Wärmezufuhr	$q_{zu,23}$
③→④ Isentrope Expansion	$q_{34} = 0, w_{t34}$
④→① Isochore Wärmeabfuhr	$q_{ab,41}$

Verdichtungsverhältnis:Wirkungsgrad:Nutzarbeit:Leistung:Zylinderfüllung in kg:Hubvolumen:Drehzahl $[n]$ in $\frac{1}{s}$:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

$$w_N = \underbrace{w_{v12}}_{>0} + \underbrace{w_{v34}}_{<0} < 0 \rightarrow \text{Kraftmaschine}$$

$$w_N = -(\underbrace{q_{23}}_{>0} + \underbrace{q_{41}}_{<0}) < 0 \Rightarrow w_N = -\sum q$$

$$|W_{\text{KP}}| = mc_{V,m}((T_1 - T_2) + (T_3 - T_4))$$

$$w_N m_Z = w_N$$

$$P = |w_N| m_Z \frac{n}{2}$$

$$m_Z = V_h \rho_1 = \frac{V_h}{v_1} = V_h \frac{p_1}{R_i T_1}$$

$$V_h = V_2 - V_1$$

$$4 \text{ Takt} \rightarrow \frac{n}{2}$$

$$2 \text{ Takt} \rightarrow \frac{n}{1}$$

für alle Kreisprozesse gilt: $P = |w_N| \dot{m}$

7.6 Diesel-Kreisprozess

→ idealer Gleichdruck-Prozess

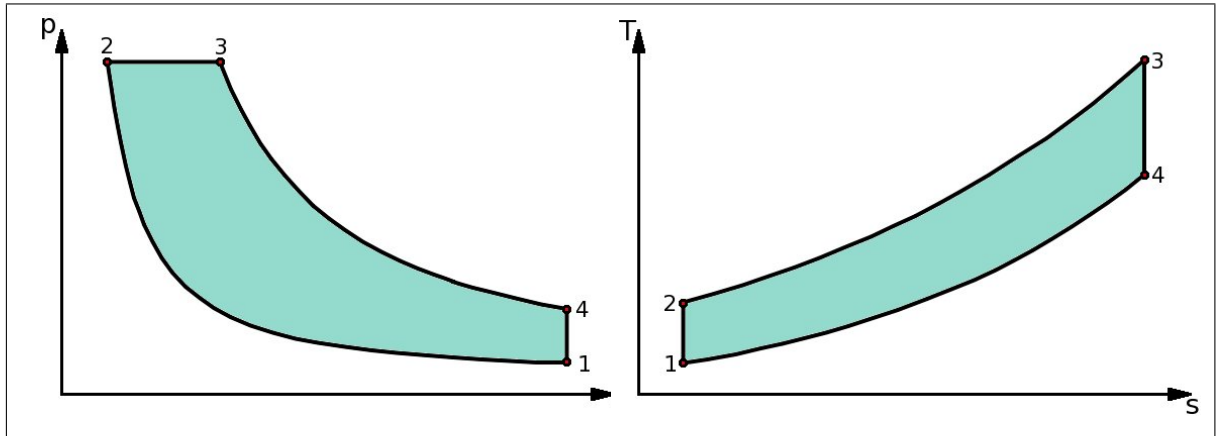


Abb. 31: Dieselprozess

①→② Isentrope Verdichtung	$q_{12} = 0, w_{t12}$	$\varepsilon^\kappa = \frac{p_2}{p_1}$	$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$
②→③ Isobare Wärmezufuhr	$q_{zu,23}$	$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$	
③→④ Isentrope Expansion	$q_{34} = 0, w_{t34}$	$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa$	
④→① Isochore Wärmeabfuhr	$q_{ab,41}$	$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa$	$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1}$

Nutzarbeit:

$$w_N = -\sum q$$

$$w_N = -\frac{R_i}{\kappa-1}(\kappa(T_3 - T_2) + (T_1 - T_4))$$

$$|W_{KP}| = mc_{vm}((T_1 - \kappa T_2) + (\kappa T_3 - T_4))$$

Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{|w_N|}{q_{zu}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{1}{\kappa} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\varphi^{\kappa-1}}{\kappa(\varphi-1)}$$

$$P = |w_N| \dot{m} = |w_N| V_h \frac{p_1}{R_i T_1} \frac{n}{2} = |w_N| V_h \frac{1}{v_1} \frac{n}{2}$$

← bei 4-Takt Kreisprozessen

7.7 Seiliger-Kreisprozess

→ idealer Gleichraum-Gleichdruck-Prozess

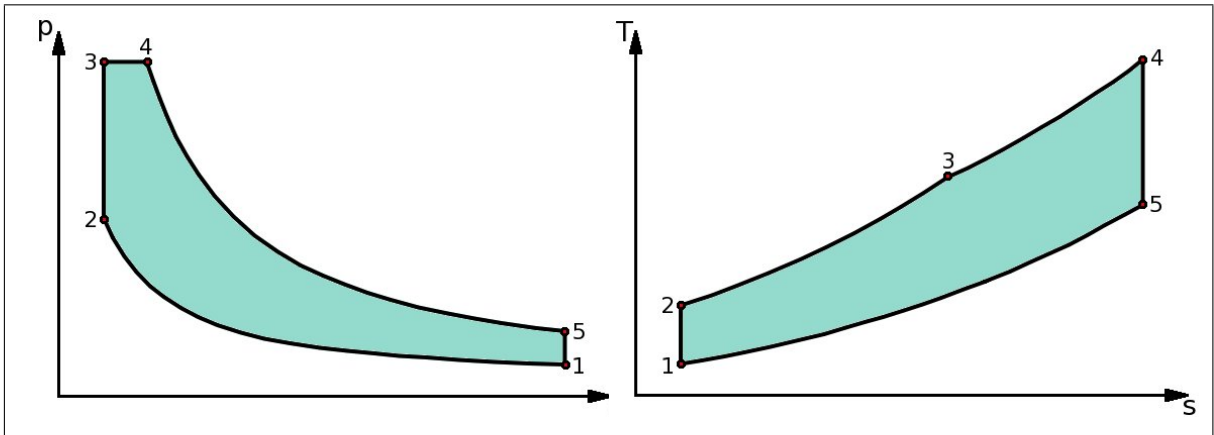


Abb. 32: Seiliger Prozess

①→② Isentrope Verdichtung	$q_{12} = 0, w_{t12}$
②→③ Isochore Wärmezufuhr	$q_{zu,23}$
③→④ Isobare Wärmezufuhr	$q_{zu,34}$
④→⑤ Isentrope Expansion	$q_{45} = 0, w_{t34}$
⑤→① Isochore Wärmeabfuhr	$q_{ab,51}$

zugeführte Wärmeenergie:

$$q_{zu} = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

Nutzarbeit:

$$w_N = - \sum q$$

$$w_t = \eta q_{zu}$$

$$w_t = \Delta e_a \rightarrow \text{Exergiedifferenz}$$

Leistung:

$$p = \dot{m} w_t$$

Massenstrom:

$$\dot{m} = \rho V_h \frac{n}{4} \text{ mit } \rho = \frac{1}{v} \text{ beim 4-Takter}$$

$$\dot{m} = \rho V_h \frac{n}{2} \text{ beim 2-Takter}$$

Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{|w_N|}{q_{zu}}$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_{ab}}{q_{zu}}$$

$$\eta_{th} = \frac{q_{23} + q_{34} + q_{51}}{q_{23} + q_{34}} = 1 + \frac{q_{51}}{q_{23} + q_{34}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{(T_3 - T_2) + \kappa(T_4 - T_3)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\kappa} \frac{T_3}{T_2} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1 + \kappa \frac{T_3}{T_2} \left(\frac{T_4}{T_3} - 1\right)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\pi \varphi^{\kappa} - 1}{\pi - 1 + \kappa \pi (\pi - 1)}$$

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\varphi = \frac{v_4}{v_3}$$

$$\pi = \frac{p_3}{p_2}$$

Theoretischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_H - T_T}{T_H}$$

7.8 Joule-Kreisprozess

→ Idealer Gasturbinen-Prozess

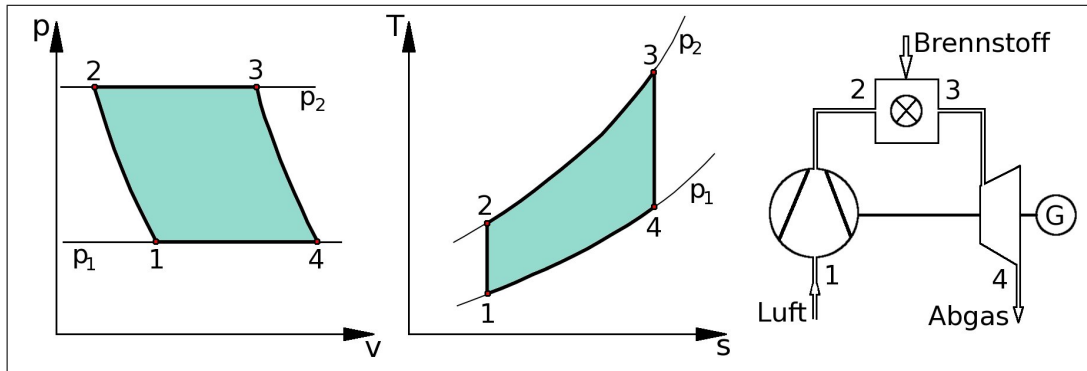


Abb. 33: Idealer Gasturbinen-Prozess

①→②: Isentrope Verdichtung	$q_{12} = 0, w_{t12}$	$\varepsilon^\kappa = \frac{p_2}{p_1}$	$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$
②→③: Isobare Wärmezufuhr	$q_{zu,23}$	$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$	
③→④: Isentrope Expansion	$q_{34} = 0, w_{t34}$	$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa$	
④→①: Isobare Wärmeabfuhr	$q_{ab,41}$	$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa$	$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1}$

Druckverhältnis:

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$$

Nutzarbeit:

$$w_N = - \sum q$$

Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{Gasturbine}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\eta_{\text{Gasturbine}} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

Allgemein gilt:

$$\eta = \frac{w_N}{q_{zu}}$$

$$w_N = - \sum q$$

7.9 Pumpenarbeit

$$w_t = \frac{\Delta p}{\rho} = \Delta p v$$

7.10 Triebwerk

1. HS offenes System

$$Q_{12} + w_{t12} + \psi_{12} = H_2 - H_1 + \Delta E_{\text{kin}} + \Delta E_{\text{pot}}$$

$$\dot{Q}_{zu} = h_u \dot{m}_{\text{Kerosin}}$$

Schubkraft

$$F_S = \dot{m}(w_{ab} - w_{zu}) = \dot{m}(v_{ab} - v_{zu})$$

8 Dampftafel

p/bar	$t_s/^\circ\text{C}$	$v' / \frac{1}{\text{kg}}$	$v'' / \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$h' / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$h'' / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$r / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$s' / \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$s'' / \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
0,01	6,98	1,0001	129,2	29,35	2513,4	2484,0	0,1061	8,9734
0,02	17,51	1,0012	67,02	73,45	2532,7	2459,3	0,2607	8,7214
0,03	24,10	1,0026	45,68	100,97	2544,7	2443,8	0,3543	8,5754
0,04	28,98	1,0040	34,81	121,36	2553,6	2432,3	0,4223	8,4725
0,05	32,90	1,0052	28,20	137,71	2560,7	2423,0	0,4761	8,3930
0,06	36,19	1,0064	23,75	151,42	2566,7	2415,2	0,5206	8,3283
0,07	39,03	1,0074	20,54	163,28	2571,8	2408,5	0,5588	8,2737
0,08	41,54	1,0084	18,11	173,76	2576,3	2402,5	0,5922	8,2266
0,09	43,79	1,0094	16,21	183,16	2580,3	2397,1	0,6220	8,1851
0,1	45,84	1,0102	14,68	191,71	2583,9	2392,2	0,6489	8,1480
0,2	60,09	1,0173	7,652	251,28	2608,9	2357,6	0,8316	7,9060
0,4	75,89	1,0266	3,994	317,46	2635,7	2318,3	1,0255	7,6667
0,6	85,95	1,0334	2,732	359,73	2652,2	2292,5	1,1449	7,5280
0,8	93,51	1,0389	2,087	391,53	2664,3	2272,7	1,2324	7,4300
1,0	99,63	1,0436	1,694	417,33	2673,8	2256,5	1,3022	7,3544
1,1	102,32	1,0457	1,549	428,66	2678,0	2249,3	1,3324	7,3222
1,2	104,81	1,0477	1,428	439,18	2681,8	2242,6	1,3603	7,2928
1,3	107,13	1,0496	1,325	449,01	2685,3	2236,3	1,3862	7,2558
1,4	109,32	1,0514	1,235	458,24	2688,6	2230,3	1,4104	7,2409
1,5	111,37	1,0532	1,159	466,95	2691,6	2224,7	1,4331	7,2177
2,0	120,23	1,0610	0,8852	504,52	2704,6	2200,1	1,5295	7,1212
3,0	133,54	1,0737	0,6054	561,2	2723,2	2161,9	1,6711	6,9859
4,0	143,63	1,0841	0,4621	604,4	2736,5	2132,1	1,7757	6,8902
6,0	158,84	1,1011	0,3155	670,1	2755,2	2085,1	1,9300	6,7555
8,0	170,41	1,1152	0,2403	720,6	2768,0	2048,5	2,0447	6,6594
10	179,88	1,1276	0,1944	762,2	2777,5	2015,3	2,1370	6,5843
15	198,28	1,1541	0,1318	844,1	2792,5	1948,4	2,3131	6,4448
20	212,37	1,1769	0,0996	908,0	2800,6	1892,6	2,4453	6,3422
30	233,84	1,2166	0,0667	1007,7	2805,5	1797,9	2,6438	6,1890
40	250,33	1,2523	0,0497	1086,7	2802,4	1715,7	2,7949	6,0714
50	263,92	1,2859	0,0394	1153,8	2794,6	1640,8	2,9190	5,9735
60	275,56	1,3186	0,0324	1213,1	2783,9	1570,8	3,0257	5,8880
70	285,80	1,3510	0,0273	1266,7	2771,1	1504,3	3,1203	5,8113
80	294,98	1,3837	0,0235	1316,4	2756,9	1440,4	3,2059	5,7412
90	303,31	1,417	0,0205	1362,9	2741,6	1378,5	3,2847	5,6762

p/bar	$t_s/^\circ\text{C}$	$v' / \frac{1}{\text{kg}}$	$v'' / \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$h' / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$h'' / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$r / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$s' / \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$s'' / \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
100	310,96	1,451	0,0180	1407,0	2725,6	1318,2	3,3582	5,6155
110	318,04	1,487	0,0160	1449,3	2708,7	1258,9	3,4277	5,5584
120	324,64	1,525	0,0143	1490,2	2687,2	1196,3	3,4941	5,4971
130	330,81	1,566	0,0128	1530,2	2663,5	1132,3	3,5580	5,4353
140	336,63	1,610	0,0115	1569,6	2637,7	1066,7	3,6203	5,3726
150	324,12	1,658	0,0103	1608,9	2610,5	999,7	3,6818	5,3104
160	347,32	1,173	0,0093	1648,5	2581,2	929,9	3,7433	5,2471
180	356,96	1,850	0,0075	1732,9	2511,4	778,5	3,8707	5,1062
200	365,71	2,06	0,0059	1826,7	2416,0	589,3	4,0151	4,9375
210	369,79	2,22	0,0050	1889,9	2344,9	454,9	4,1073	4,8148
220	373,70	2,73	0,00367	2016	2168	152	4,303	4,5910

Der Kritische Punkt:

- $p_K = 221,20\text{bar}$
- $T_K = 374,25^\circ\text{C}$
- $v_K = 0,00317 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
- $h_K = 2095 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $s_K = 4,4430 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

Lineare-Interpolation: $f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0)$

$$h'_{25\text{bar}} = h'_{20\text{bar}} + \frac{h'_{30\text{bar}} - h'_{20\text{bar}}}{p_{30\text{bar}} - p_{20\text{bar}}} (p_{25\text{bar}} - p_{20\text{bar}})$$