

HOCHSCHULE
University
of
Applied Sciences
ZITTAU/GÖRLITZ

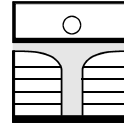
Formelsammlung

Technische Thermodynamik II

Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar

FB Maschinenwesen

Technische Thermodynamik



Formelsammlung

Technische Thermodynamik II

| | Seite |
|---|-------|
| Kreisprozesse | 20/1 |
| CARNOT-Prozeß | |
| Gasturbinen - JOULE-Prozeß | |
| Dampfturbinen - CLAUDIUS-RANKINE-Prozeß | |
| Kältemaschinen und Wärmepumpen - CLAUDIUS-RANKINE-Linksprozeß | |
| Gemische | 21/1 |
| Ideale Gasgemische | |
| Feuchte Luft | 22/1 |

Kreisprozesse (stationär $\dot{m} = \text{const}$)

Kreisprozessarbeitsleistung

$$P_{KP} := P_{tzu} + P_{tab}$$

$$P_{KP} = -\dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab}$$

Mittlere Temperatur bei Wärmezufuhr:

$$T_{qzu}^m = \frac{q_{zu}}{\Delta s_{qzu}}$$

$$q_{zu} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{m}}$$

Δs_{qzu} – spezif. Entropiedifferenz bei Wärmezufuhr

Mittlere Temperatur bei Wärmeabfuhr:

$$T_{qab}^m = \frac{q_{ab}}{\Delta s_{qab}}$$

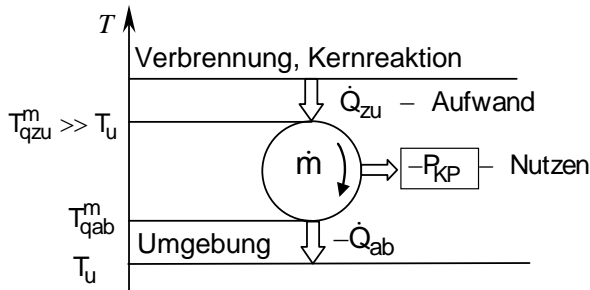
$$q_{ab} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{m}}$$

Δs_{qab} – spezif. Entropiedifferenz bei Wärmeabfuhr

Rechtsprozesse

Wärmekraftmaschine - WKM und Verbrennungskraftmaschine - VKM

→ Gewinnung von Arbeit



Thermischer Wirkungsgrad η_{th} des Kreisprozesses

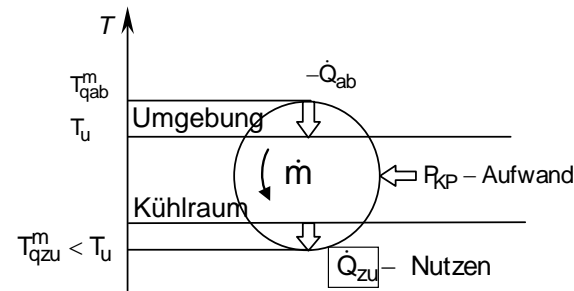
$$\eta_{th} := \frac{-P_{KP}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{-\dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu}} \quad \eta_{th} < 1$$

$$\eta_{th, C, analog} = \frac{T_{qzu}^m - T_{qab}^m}{T_{qzu}^m}; \quad \nu_{th} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th, C, analog}} \leq 1$$

Linksprozesse

Kältemaschine - KM

→ Aufnahme von Wärme \dot{Q}_{zu} unterhalb T_U



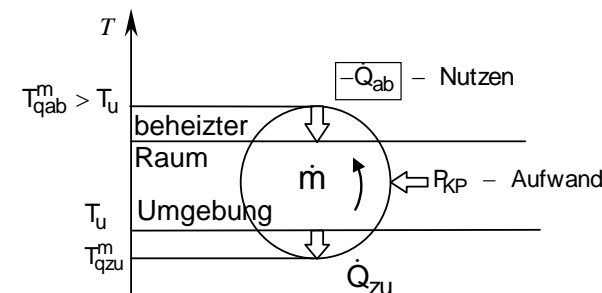
Leistungszahl ϵ_{KM} des Kreisprozesses

$$\epsilon_{KM} := \frac{\dot{Q}_{zu}}{P_{KP}} = \frac{-\dot{Q}_{zu}}{\dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{ab}} \quad \epsilon_{KM} \geq 1$$

$$\epsilon_{KM, C, analog} = \frac{T_{qzu}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m}; \quad \nu_{KM} = \frac{\epsilon_{KM}}{\epsilon_{KM, C, analog}} \leq 1$$

Wärmepumpe - WP

→ Abgabe von Wärme $-\dot{Q}_{ab}$ oberhalb T_U

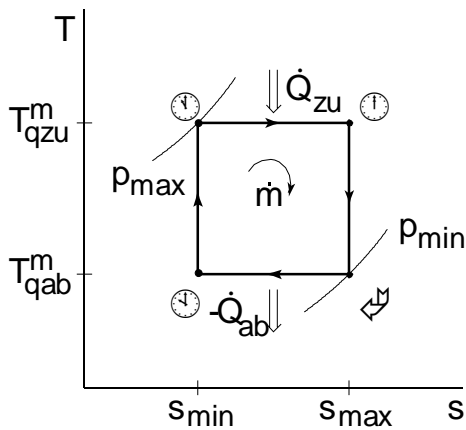


Leistungszahl ϵ_{WP} des Kreisprozesses

$$\epsilon_{WP} := \frac{-\dot{Q}_{ab}}{P_{KP}} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{ab}} \quad \epsilon_{WP} > 1$$

$$\epsilon_{WP, C, analog} = \frac{T_{qab}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m}; \quad \nu_{WP} = \frac{\epsilon_{WP}}{\epsilon_{WP, C, analog}} \leq 1$$

CARNOT-Prozeß - theoretischer Vergleichsprozess

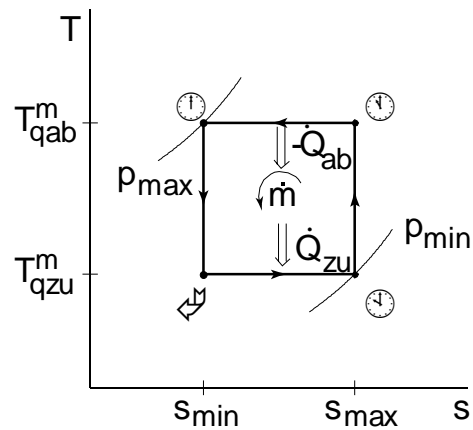
CARNOT - Rechtsprozeß

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot T_{qzu}^m \cdot (s_{max} - s_{min})$$

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m} \cdot T_{qab}^m \cdot (s_{min} - s_{max})$$

$$P_{KP} = -\dot{m} \cdot (T_{qzu}^m - T_{qab}^m) \cdot (s_{max} - s_{min})$$

$$\eta_{th}^C = \frac{T_{qzu}^m - T_{qab}^m}{T_{qzu}^m}$$

CARNOT - Linksprozeß

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot T_{qzu}^m \cdot (s_{max} - s_{min})$$

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m} \cdot T_{qab}^m \cdot (s_{min} - s_{max})$$

$$P_{KP} = \dot{m} \cdot (T_{qab}^m - T_{qzu}^m) \cdot (s_{max} - s_{min})$$

Kältemaschine
KM

$$\varepsilon_{KM}^C = \frac{T_{qzu}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m}$$

Wärmepumpe
WP

$$\varepsilon_{WP}^C = \frac{T_{qab}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m}$$

CARNOT - Rechtsprozeß mit idealem Gas:

$$\text{mit: } \tau = \frac{T_{qzu}^m}{T_{qab}^m}, \quad \pi = \frac{p_{max}}{p_{min}}$$

$$\dot{Q}_{zu} = -\dot{m} \cdot R \cdot T_{qzu}^m \cdot \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \tau - \ln \pi \right)$$

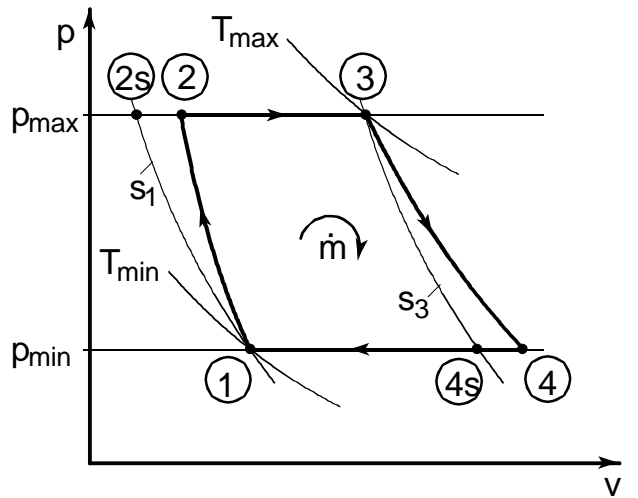
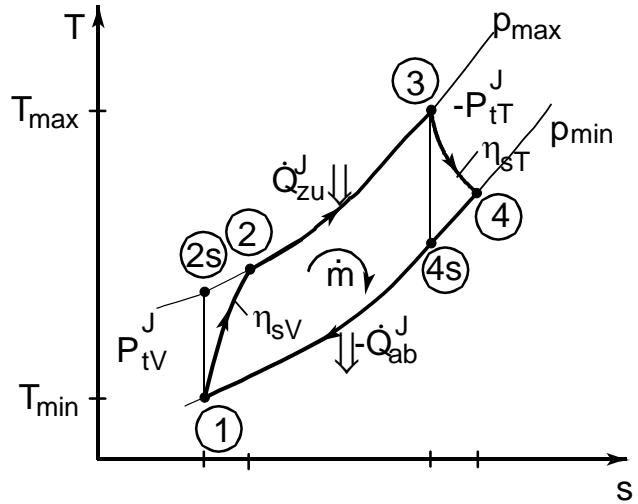
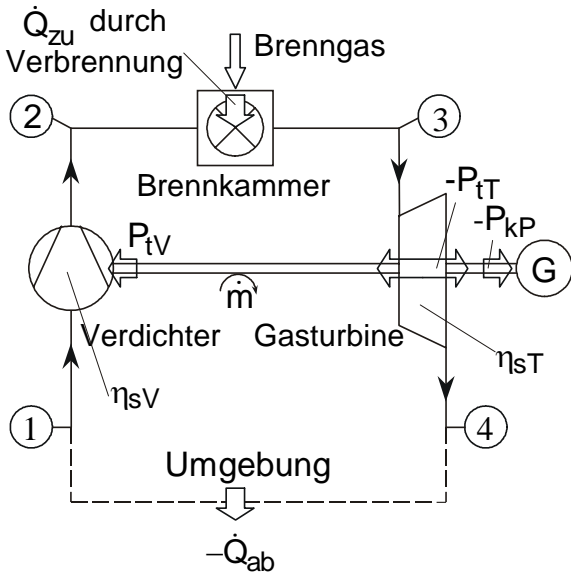
$$\dot{Q}_{ab} = -\dot{m} \cdot R \cdot T_{qab}^m \cdot \left(\ln \pi - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \tau \right)$$

$$P_{KP} = \dot{m} \cdot R \cdot T_{qab}^m (\tau - 1) \cdot \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \tau - \ln \pi \right)$$

$$\text{DimensionbseKP- Arbeit: } \omega_{KP} = \frac{P_{KP}}{\dot{m} \cdot R \cdot T_{qab}^m}$$

$$\omega_{KP}^C = (1 - \tau) \cdot \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \ln \tau - \ln \pi \right)$$

Gasturbinen - JOULE – Rechtsprozeß (stationär)



| |
|--|
| $\dot{Q}_{zu}^J = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2)$ $\dot{Q}_{ab}^J = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$ $P_{KP}^J = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1 - h_3 + h_4)$ |
| $\eta_{th}^J = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$ |

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{\eta_{sV}} \cdot (h_{2s} - h_1)$$

$$h_4 = h_3 + \eta_{sT} \cdot (h_{4s} - h_3)$$

| |
|---|
| $P_{tT}^J = \dot{m} (h_4 - h_3)$ $P_{tV}^J = \dot{m} (h_2 - h_1)$ |
|---|

Reversibler Gasturbinen-JOULE-Rechtsprozeß:

- reversible Verdichtung $\eta_{sV} = 1 \rightarrow \textcircled{2} = \textcircled{2s}$

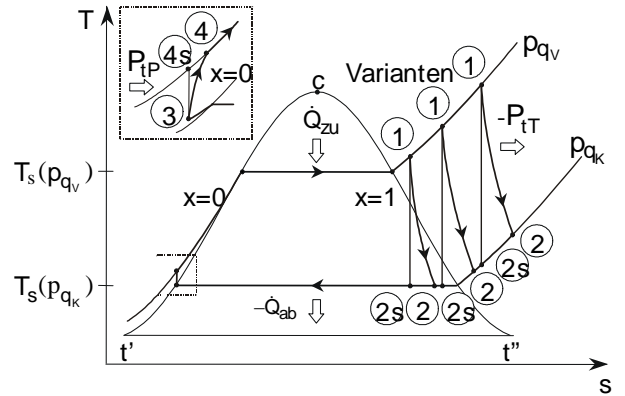
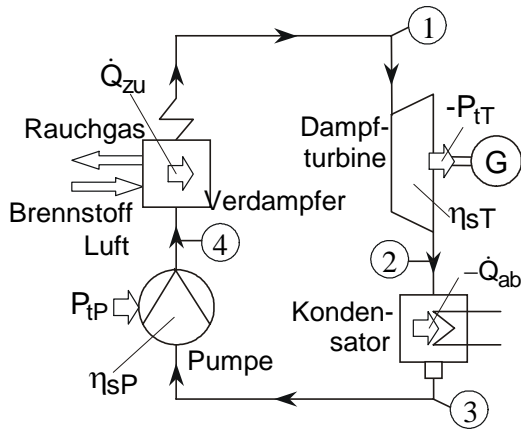
- reversible Turbinenentspannung $\eta_{sT} = 1 \rightarrow \textcircled{4} = \textcircled{4s}$

| |
|---|
| $\eta_{th,rev}^J = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \pi^{-\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)}$ |
|---|

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_{max}}{p_{min}}, \quad \tau = \frac{T_3}{T_1} = \frac{T_{max}}{T_{min}}$$

Dimensionslose Kreisprozeßarbeit
$$\omega_{rev}^J = \frac{-P_{KP}^J}{\dot{m} \cdot R \cdot T_{min}} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \left(\tau - \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right) \cdot \left(1 - \pi^{-\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)} \right)$$

Dampfturbinenanlagen - CLAUSIUS-RANKINE-Rechtsprozeß (stationär)



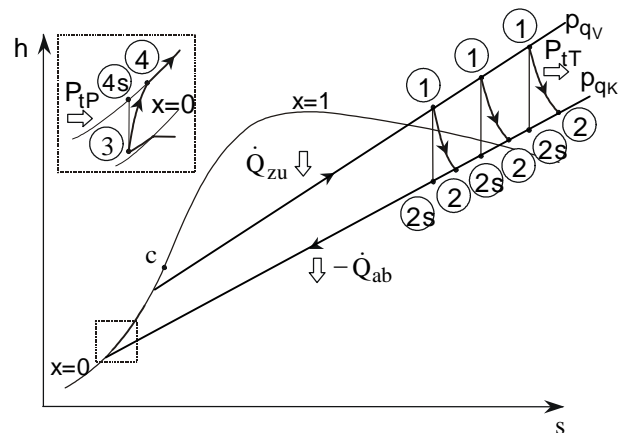
$$\dot{Q}_{zu}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$h_4 = h_3 + \frac{1}{\eta_{sP}} (h_{4s} - h_3),$$

$$h_{4s} = f(p_v, s_3)$$

$$\dot{Q}_{ab}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2)$$

$$h_2 = h_1 + \eta_{sT} (h_{2s} - h_1)$$



Für Ermittlung von $h_{2s} \Rightarrow$ Unterscheidung

| |
|---|
| $s_1 \leq s''(p_K) \Rightarrow (2s) \text{ im Nassdampfgebiet}$ |
| $h_{2s} = h'(p_K) + x_{2s} [h''(p_K) - h'(p_K)]$ |
| <p>mit $x_{2s} = \frac{s_1 - s'(p_K)}{s''(p_K) - s'(p_K)}$</p> |

| |
|---|
| $s_1 > s''(p_K) \Rightarrow (2s) \text{ im überh. Dampfgebiet}$ |
| $h_{2s} = f(p_K, s_1) \text{ Interpolation}$ |

$$P_{KP}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1 + h_4 - h_3)$$

$$P_{tT}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad , \quad P_{tP}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3)$$

Näherung für ideale Flüssigkeit:

$$P_{tP}^{CR} = \frac{1}{\eta_{sP}} \dot{m} \cdot v_3 \cdot (p_v - p_k)$$

$$\eta_{th}^{CR} = 1 + \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_4}$$

Zugeführter Wärmestrom im Verdampfer

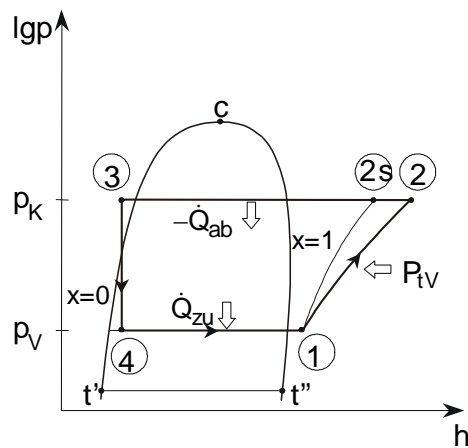
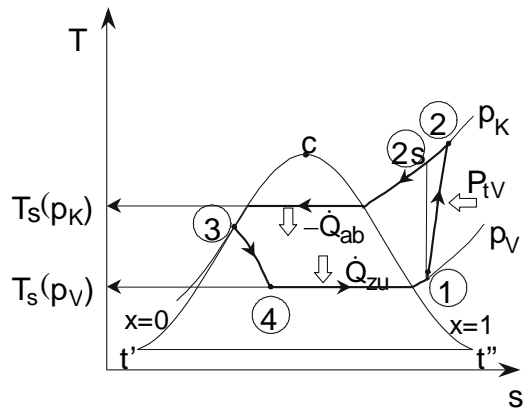
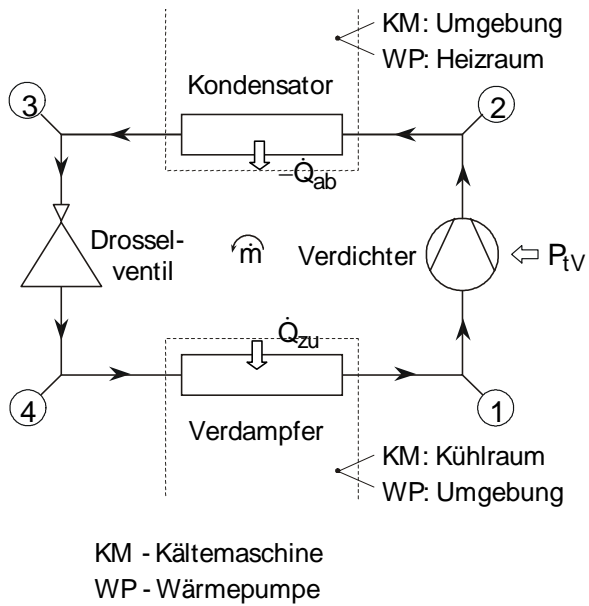
$$\dot{Q}_{zu}^{CR} = \eta_{DE} \cdot \dot{m}_B \cdot \Delta_H h_B$$

\dot{m}_B - Massestrom Brennstoff

$\Delta_H h_B$ - Heizwert des Brennstoffs

η_{DE} - Wirkungsgrad des Verdampfers

Kältemaschinen und Wärmepumpen - CLAUSIUS-RANKINE-Linksprozeß (stationär)



$$\dot{Q}_{zu}^L = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$h_4 = h_3$$

$$\dot{Q}_{ab}^L = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{\eta_{sV}} (h_{2s} - h_1) \quad , \quad h_{2s} = f(p_K, s_1)$$

$$P_{KP}^L = P_{tV} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

Kältemaschine

$$\epsilon_{KM}^L = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Kälteleistung

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$$

Wärmepumpe

$$\epsilon_{WP}^L = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Heizleistung

$$\dot{Q}_H = |\dot{Q}_{ab}| = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3)$$

Gemische

Masseanteil: $\xi_i := \frac{m_i}{m^*}$ $m^* = \sum_i m_i$ $\sum_i \xi_i = 1$

Molanteil: $\psi_i := \frac{n_i}{n^*}$ $n^* = \sum_i n_i$ $\sum_i \psi_i = 1$

Umrechnungen: $\psi_i = \frac{R_i}{R^*} \cdot \xi_i$ und $\xi_i = \frac{M_i}{M^*} \cdot \psi_i$

mit $\frac{R_i}{R^*} = \frac{M^*}{M_i}$

Molare Masse des Gemisches:

$$M^* = \sum_i (\psi_i \cdot M_i) \quad M^* = \frac{m^*}{n^*}$$

Spezifische Gaskonstante des Gemisches:

$$R^* = \sum_i (\xi_i \cdot R_i) \quad R^* = \frac{\bar{R}}{M^*}$$

Spezifische Gaskonstante des Gemischpartners i:

$$R_i = \frac{\bar{R}}{M_i}$$

Thermische Zustandsgrößen idealer Gasgemische

Gemisch:

$$p^* \cdot v^* = R^* \cdot T$$

$$p^* \cdot V^* = m^* \cdot R^* \cdot T$$

$$p^* \cdot V^* = n^* \cdot \bar{R} \cdot T$$

Gesamtdruck:

$$p^* = \sum_i p_i$$

p_i - Partialdruck des Gemischpartners i

mit
$$p_i = \frac{m_i \cdot R_i \cdot T}{V^*}$$

$$p_i = \psi_i \cdot p^*$$

Raumanteil:

$$r_i := \frac{V_i}{V^*} = \psi_i$$

V_i - Volumen des Gemischpartners i

mit
$$V_i = \frac{m_i \cdot R_i \cdot T}{p^*}$$

$$V_i = \psi_i \cdot V^*$$

Spez. Volumen
des Gemisches:

$$v^* = \sum_i (\xi_i \cdot v_i)$$

mit
$$v_i = \frac{R_i \cdot T}{p^*}$$

Dichte des Gemisches:

$$\rho^* = \frac{1}{\sum_i \left(\xi_i \cdot \frac{1}{\rho_i} \right)}$$

mit
$$\rho_i = \frac{p^*}{R_i \cdot T}$$

Energetische Zustandsgrößen idealer Gasgemische

Spezifische Wärmekapazitäten:

$$c_p^* = \sum_i (\xi_i \cdot c_{pi}) \quad \text{und} \quad c_v^* = c_p^* - R^*$$

c_{pi} □ Stoffwerte

Isentropenexponent:

$$\kappa^* = \frac{c_p^*}{c_p^* - R^*}$$

Spezifische Enthalpie:

$$h^* = \sum_i (\xi_i \cdot h_i)$$

$h_i = f(T)$ □ Stoffwerte

Näherung: $c_{pmi}^{ig} = \text{const}$

$$h^* = h_o^* + c_{pm}^* (T - T_o)$$

mit $h_o^* = \sum_i (\xi_i \cdot h_{oi}^{ig})$ und $c_{pm}^* = \sum_i (\xi_i \cdot c_{pmi}^{ig})$

Differenz für Zustandsänderung ① → ② bei $\xi_i = \text{const}$

$$h_2 - h_1 = \sum_i \left[\xi_i (h_{i2} - h_{i1}) \right]$$

Näherung: Mittelwerte $c_{pmi}^{ig} = \text{const}$

$$h_2 - h_1 = c_{pm}^* (T_2 - T_1)$$

$$c_{pm}^* = \sum_i (\xi_i \cdot c_{pmi}^{ig})$$

Spezifische Entropie:

$$\text{allg.: } s^* = \sum_i (\xi_i \cdot s_i) + \Delta s_{\text{irr}}^*$$

Irreversible Mischungsentropie:

$$\Delta s_{\text{irr}}^* = - \sum_i (\xi_i \cdot R_i \cdot \ln \psi_i) = -R^* \cdot \sum_i (\psi_i \cdot \ln \psi_i)$$

$$s^* = \sum_i (\xi_i \cdot s_{\text{Ti}}^{\text{ig}}) - R^* \cdot \ln \left(\frac{p^*}{p_0} \right) + \Delta s_{\text{irr}}^*$$

$$s_{\text{Ti}}^{\text{ig}} = f(T) \quad \square \text{ Stoffwerte}$$

Näherung: $c_{\text{pmi}}^{\text{ig}} = \text{const}$

$$s^* = s_0^* + c_{\text{pm}}^* \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - R^* \cdot \ln \left(\frac{p^*}{p_0} \right) + \Delta s_{\text{irr}}^*$$

$$\text{mit } s_0^* = \sum_i (\xi_i \cdot s_{0i}^{\text{ig}}) \text{ und } c_{\text{pm}}^* = \sum_i (\xi_i \cdot c_{\text{pmi}}^{\text{ig}})$$

Differenz für Zustandsänderung ① → ② bei $\xi_i = \text{const}$

$$s_2 - s_1 = \sum_i \left[\xi_i \cdot \left(s_{\text{Ti}}^{\text{ig}}(T_2) - s_{\text{Ti}}^{\text{ig}}(T_1) \right) - R^* \cdot \ln \left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right) \right]$$

$$s_{\text{Ti}}^{\text{ig}}(T_2), s_{\text{Ti}}^{\text{ig}}(T_1) \quad \square \text{ Stoffwerte}$$

Näherung: $c_{\text{pmi}}^{\text{ig}} = \text{const}$

$$s_2 - s_1 = c_{\text{pm}}^* \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R^* \cdot \ln \left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)$$

$$c_{\text{pm}}^* = \sum_i (\xi_i \cdot c_{\text{pmi}}^{\text{ig}})$$

Spezifische innere Energie:

$$u^* = h^* - p^* \cdot v^* = h^* - R^* \cdot T$$

Spezifische Exergie:

$$e^* = (h^* - h_u^*) - T_u (s^* - s_u^*)$$

Feuchte Luft Konstanten zur Berechnung

| | |
|---|---|
| Gesamtdruck für Berechnung atmosphärischer Bedingungen: | |
| $p \approx p_n = 101,325 \text{ kPa}$ | |
| Trockene Luft: $R_L = 0,28706 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, $c_{pL} = 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | |
| <u>Bezugszustand:</u> $T_0 = 273,15 \text{ K}$ | |
| $p_{oL} = 101,325 \text{ kPa}$ | |
| $h_{oL} = 0$, $s_{oL} = 0,16189 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | |
| Wasser: | $R_W = 0,46153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| Wasserdampf: | $c_{pD} = 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| Wasserflüssigkeit: | $c_{pF} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, $v_F = 0,0010018 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ |
| | $\frac{dv_F}{dT} = 2,0576 \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| Wassereis: | $c_{pE} = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, $v_E = 0,0010844 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ |
| <u>Bezugszustand:</u> Tripelzustand auf Siedelinie | |
| $T_0 = T_{tr} \approx 273,15 \text{ K}$ (exakt $T_{tr} = 273,16 \text{ K}$) | |
| $p_{oW} = p_{tr} \approx 0,6112 \text{ kPa}$ | |
| $h_{oW} = h'_{tr} \approx 0$, $s_{oW} = s'_{tr} = 0$ | |
| $v_{oF} = 0,00100 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ | |
| Verdampfungsenthalpie bei T_0 : | $\Delta h_{lv}^0 = 2501 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ |
| Verdampfungsentropie bei T_0 : | $\Delta s_{lv}^0 = 9,1555 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| Schmelzenthalpie bei T_0 : | $\Delta h_{sl}^0 = 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ |
| Schmelzentropie bei T_0 : | $\Delta s_{sl}^0 = 1,2594 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| Konstanten für Berechnung feuchter Rauchgase: | |
| Ersetzen \Rightarrow statt trockene Luft (L) \Rightarrow Rauchgasgemisch (G) mit Masseanteilen ξ_i : | |
| $R_L \equiv R_G = \sum_i (\xi_i \cdot R_i)$ $c_{pL} \equiv c_{pG} = \sum_i (\xi_i \cdot c_{pi})$ | |

Zusammensetzung der feuchten Luft

Masse der feuchten Luft: $m = m_L + m_W$,

$$R = \xi_L \cdot R_L + \xi_W \cdot R_W, \quad M = \psi_L \cdot M_L + \psi_W \cdot M_W$$

Wassergehalt
(Absolute Feuchte)

$$x_W := \frac{m_W}{m_L}$$

Masseanteile:

$$\xi_W = \frac{x_W}{1 + x_W}; \quad \xi_L = 1 - \xi_W$$

$$[x_W] = \frac{\text{kg (Wasser)}}{\text{kg (trockene Luft)}}$$

Molanteile:

$$\psi_W = \frac{R_W \cdot x_W}{R(1 + x_W)}; \quad \psi_L = 1 - \psi_W$$

Masse der trockenen Luft

$$m_L = \frac{m}{1 + x_W}$$

Feuchte Luft (FL)

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|--|
| ungesättigte FL (id. Gasmisch) | gesättigte FL (id. Gasmisch) | Flüssigkeitsnebel I $t \geq 0^\circ\text{C}$ (ideales Gemisch aus gesätt. FL u. id. Flüssigkeit) | Eisnebel $t \leq 0^\circ\text{C}$ (ideales Gemisch aus gesätt. FL u. id. Feststoff(Eis)) |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|--|

$x_W < x_{Ws}$
 $\varphi < 1$
 $p_D < p_{Ds}(t)$

$x_W = x_{Ws}$
 $\varphi = 1$
 $p_D = p_{Ds}(t)$

$x_W > x_{Ws}$

$x_W > x_{Ws}$

Ungesättigte feuchte Luft:

Gesamtdruck: $p = p_L + p_D$

Partialdrücke des Wasserdampfes und der tr. Luft

$$p_D = \frac{x_W}{\left(\frac{R_L}{R_W} + x_W\right)} \cdot p, \quad p_L = p - p_D$$

Relative Feuchte:

$$\varphi := \frac{p_D}{p_{Ds}} = \frac{m_W}{m_{Ws}} \quad \varphi = \frac{x_W}{\left(\frac{R_L}{R_W} + x_W\right)} \cdot \frac{p}{p_{Ds}(t)}$$

Gesättigte feuchte Luft:

$$p_D = p_{Ds}(t)$$

$$p_L = p - p_{Ds}(t)$$

$$\varphi = 1$$

Bei $t \geq 0^\circ\text{C}$ Sättigungsdruck des Wasserdampfes $p_{Ds}(t) = p_s(t) \square$ WDT

Bei $t < 0^\circ\text{C}$ Sublimationsdruck des Wasserdampfes $p_{Ds}(t) = p_{sub}(t) \square$ Stoffwerte

Wassergehalt der ungesätt. FL:

$$x_W = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{p_D}{(p - p_D)} = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{Ds}(t)}{(p - \varphi \cdot p_{Ds}(t))}$$

$$x_{Ws} = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{p_{Ds}}{p - p_{Ds}(t)}$$

Luftspezifisches Volumen $v_{1+x} := \frac{V}{m_L} \Rightarrow v = \frac{v_{1+x}}{1+x_W} \quad \rho = \frac{1+x_W}{v_{1+x}}$

Ungesätt. u. gesätt.
FL:

$$(x_W \leq x_{Ws})$$

$$v_{1+x} = \frac{T}{p} \cdot (R_L + x_W \cdot R_W) = \frac{R_L \cdot T}{p_L}$$

Flüssigkeitsnebel:
($x_W > x_{Ws}$), $t \geq 0^\circ\text{C}$

$$v_{1+x} = \frac{T}{p} \cdot (R_L + x_{Ws} \cdot R_W) + (x_W - x_{Ws}) \cdot v_F$$

Eisnebel:
($x_W > x_{Ws}$), $t < 0^\circ\text{C}$

$$v_{1+x} = \frac{T}{p} \cdot (R_L + x_{Ws} \cdot R_W) + (x_W - x_{Ws}) \cdot v_E$$

Luftspez. Enthalpie u. Entropie: $h_{1+x} := \frac{H}{m_L}$, $s_{1+x} := \frac{S}{m_L} \Rightarrow h = \frac{h_{1+x}}{1+x_W}$, $s = \frac{s_{1+x}}{1+x_W}$

Ungesätt. und gesätt. FL ($x_W \leq x_{Ws}$):

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \Delta t + x_W \cdot (\Delta h_{lv}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta t) \quad , \quad \Delta t \triangleq \left(\frac{t}{^\circ\text{C}} \right) \cdot \text{K}$$

$$s_{1+x} = s_{oL} + c_{pL} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_L \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oL}}\right) + x_W \cdot \left[\Delta s_{lv}^\circ + c_{pD} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_W \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oW}}\right) \right] + (1+x_W) \cdot \Delta s_{irr}$$

Irreversible Mischungsentropie:

$$\Delta s_{irr} = -\xi_L \cdot R_L \cdot \ln \psi_L - \xi_W \cdot R_W \cdot \ln \psi_W$$

Flüssigkeitsnebel ($x_W > x_{Ws}$, $t \geq 0^\circ\text{C}$):

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \Delta t + x_{Ws} \cdot (\Delta h_{lv}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta t) + (x_W - x_{Ws}) \cdot c_{pF} \cdot \Delta t \quad , \quad \Delta t \triangleq \left(\frac{t}{^\circ\text{C}} \right) \cdot \text{K}$$

$$s_{1+x} = s_{oL} + c_{pL} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_L \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oL}}\right) + x_{Ws} \cdot \left[\Delta s_{lv}^\circ + c_{pD} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_W \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oW}}\right) \right] + (x_W - x_{Ws}) \cdot \left[c_{pF} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - \frac{dv_F}{dT} \cdot (p - p_{oW}) \right] + (1+x_{Ws}) \cdot \Delta s_{irr}^S$$

Irreversible Mischungsentropie der gesättigten feuchten Luft:

$$\Delta s_{irr}^S = -\xi_L \cdot R_L \cdot \ln \psi_L - \xi_{Ws} \cdot R_W \cdot \ln \psi_{Ws}$$

Eisnebel ($x_W > x_{Ws}$, $t \leq 0^\circ\text{C}$):

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \Delta t + x_{Ws} \cdot (\Delta h_{IV}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta t) + (x_W - x_{Ws}) \cdot (-\Delta h_{sl}^\circ + c_{pE} \cdot \Delta t), \quad \Delta t \triangleq \left(\frac{t}{^\circ\text{C}} \right) \cdot \text{K}$$

$$s_{1+x} = s_{oL} + c_{pL} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) - R_L \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oL}}\right) + x_{Ws} \cdot \left[\Delta s_{IV}^\circ + c_{pD} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) - R_W \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oW}}\right) \right] + (x_W - x_{Ws}) \cdot \left[-\Delta s_{sl}^\circ + c_{pE} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \right] + (1 + x_{Ws}) \cdot \Delta s_{irr}^S$$

Irreversible Mischungsentropie der gesättigten feuchten Luft:

$$\Delta s_{irr}^S = -\xi_L \cdot R_L \cdot \ln \psi_L - \xi_{Ws} \cdot R_W \cdot \ln \psi_{Ws}$$

Taupunkttemperatur:

$$t_\tau = t_{Ds}(p_D) \quad \text{mit} \quad p_D = \frac{x_W}{\frac{R_L}{R_W} + x_W} \cdot p$$

□ WDT

Feuchtkugelttemperatur: t_φ auf $\varphi = 1$ über verlängerte Nebelisotheime t_φ

→ Berechnung von t_φ iterativ möglich aus:

$$h_{1+x}^{\text{unges}}(t, x_W) = h_{1+x}^{\text{Nebel}}(t_\varphi, x_W)$$

Berechnung von x_W für geg. $t \rightarrow \Delta t \triangleq \frac{t}{^\circ\text{C}} \cdot \text{K}$ und $t_\varphi \rightarrow \Delta t_\varphi \triangleq \frac{t_\varphi}{^\circ\text{C}} \cdot \text{K}$:

$$x_W = \frac{c_{pL} \cdot (\Delta t_\varphi - \Delta t) + x_{Ws}(t_\varphi) \cdot [\Delta h_{IV}^\circ + (c_{pD} - c_{pF}) \cdot \Delta t_\varphi]}{\Delta h_{IV}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta t - c_{pF} \cdot \Delta t_\varphi}$$

$$x_{Ws}(t_\varphi) = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{p_{Ds}(t_\varphi)}{p - p_{Ds}(t_\varphi)} \quad \text{wobei} \quad p_{Ds}(t_\varphi) = p_s(t_\varphi) \quad \square \text{ WDT}$$

$$\text{daraus: } \varphi = \frac{x_W}{\left(\frac{R_L}{R_W} + x_W \right)} \cdot \frac{p}{p_{Ds}(t)}$$

h_{1+x}, x_w - Diagramm

