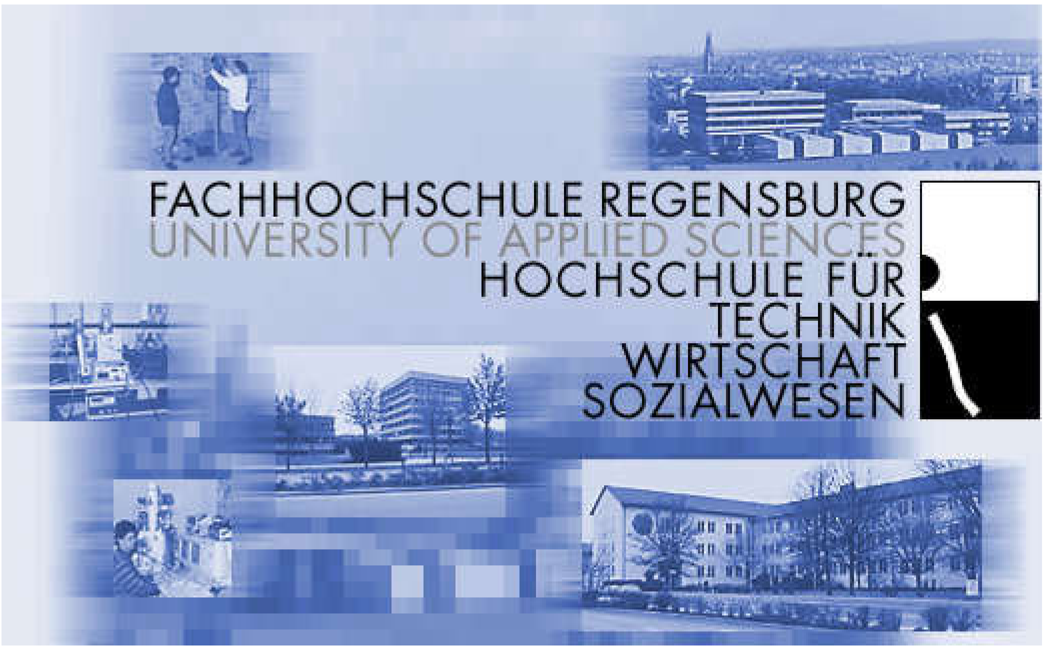

Formelsammlung

Thermodynamik

1. Systemzustand und Zustandsgrößen

Druck bezogen auf Fläche A: $p = \frac{F}{A}$ **(1.4)**

Überdruck: $\Delta p = p - p_u$ **(1.5)**

Unterdruck: $\Delta p = p_u - p$ **(1.6)**

Druckdifferenz zwischen Umgebung und beliebigen Punkt in Fluid: $\Delta p = \rho g \Delta z$ **(1.7)**

Spezifisches Volumen: $v = \frac{V}{m}$ **(1.8)**

Dichte: $\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}$ **(1.9)**

Zustandsgleichung für Gase bei kleinen Drücken (Ideale Gase): $pv = RT$ **(1.15)**

Kompressibilitätskoeffizient: $\chi = -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$ **(1.17)**

Thermischer Ausdehnungskoeffizient: $\alpha = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ **(1.18)**

Isobarer Spannungskoeffizient: $\beta = \frac{1}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$ **(1.19)**

$\Rightarrow \alpha = p\beta\chi$ **(1.20)**

2. Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Im System gespeicherte Energie : potentielle, kinetische und Innere Energie (Zustandsgrößen)
Dem System zugeführte Energie: Wärme, Arbeit (keine Zustandsgrößen)

Dem System zugeführte Energie hat positives Vorzeichen
Vom System abgegebene Energie hat negatives Vorzeichen

2.1 Geschlossene Systeme

Die Innere Energie ist eine kalorische Zustandsgröße

spezifische Innere Energie: $u = \frac{U}{m}$ **(2.2)**

molare Innere Energie: $u_m = \frac{U}{n}$ **(2.3)**

Innere Energie als vollständiges Differntial: $$\boxed{du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv}$$ **(2.5)**

Sonderfall konstantes Volumen: $$\boxed{du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT = c_v dT}$$ **(2.6)**

Grundgleichung der Kalorik (gültig für inkompressible Medien): $\boxed{dQ = m \cdot c \cdot dT}$ **(2.7)**

Spezifische Wärme: $$\boxed{q_{12} = \frac{Q_{12}}{m}}$$ **(2.9)**

Spezifische Arbeit: $$\boxed{w_{12} = \frac{W_{12}}{m}}$$ **(2.10)**

Volumenänderungsarbeit: $\boxed{W = -\int p \cdot A \cdot ds = -\int p \cdot dV}$ **(2.13)**

Ändert sich während des Vorgangs die Systemmasse nicht gilt: $\boxed{w = \int dw = -\int p \cdot dv}$ **(2.14)**

Wellenarbeit: $\boxed{W = 2\pi \int M \cdot n \cdot dt}$ **(2.17)**

Energiebilanz des geschlossenen Systems: $$\boxed{E = E_{pot} + E_{kin} + U = m\left(g \cdot z + \frac{c^2}{2} + u\right)}$$ **(2.18)**

Die innere Energie tritt nur im geschlossen System auf

Energiebilanz bei ZÄ zwischen zei Punkten 1 und 2:

$$\boxed{W_{12} + Q_{12} = E_2 - E_1 = m\left[g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}\left(c_2{}^2 - c_1{}^2\right) + u_2 - u_1\right]}$$ **(2.19)**

bezogen auf Systemmasse: $$\boxed{w_{12} + q_{12} = g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + u_2 - u_1}$$ **(2.20)**

in differentieller Schreibweise: $\boxed{dw + dq = g \cdot dz + c \cdot dc + du}$ **(2.21)**

Sonderfälle: $E_{kin} = const.\ E_{pot} = const. \Rightarrow$ $\boxed{dw + dq = du}$ **(2.22)**

$W = Q = 0 \Rightarrow$ $\boxed{g \cdot dz + c \cdot dc + du = 0}$ **(2.23)**

2.2 Offenes System

Größen die dem System zufließen bekommen den Index 1 Größen die vom System abfließen bekommen den Index 2.

Die Wärme dQ und die technische Arbeit dW_t können die Systemgrenze weiterhin überschreiten.

Die techinsche Arbeit ist die Energie die über die Grenze des Kontrollvolumens (ohne Ein- und Austrittsquerschnitte) übertragen wird.

Kalorische Zustandsgröße Enthalpie: $H = U + pV$ **bezogen auf die Masse:** $h = u + pv$ **(2.26+2.27)**

Energieinhalt der ein- und austretenden Stoffmenge:

$$E_1 = E_{pot,1} + E_{kin,1} + U_1 + p_1 V_1$$
$$E_2 = E_{pot,2} + E_{kin,2} + U_2 + p_2 V_2$$

(2.24+2.25)

Bzw. mit der Enthalpie:

$$dE_1 = dm_1\left(g \cdot z_1 + \frac{c_1^2}{2} + h_1\right)$$
$$dE_2 = dm_2\left(g \cdot z_2 + \frac{c_2^2}{2} + h_2\right)$$

(2.28+2.29)

Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck: $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$

Änderung des Energieinhaltes eines offenen Systems:

$$dE = dQ + dW_t + dm_1\left(h_1 + g \cdot z_1 + \frac{c_1^2}{2}\right) - dm_2\left(h_2 + g \cdot z_2 + \frac{c_2^2}{2}\right)$$

(2.33)

Energiebilanz des stationär durchströmten offenen Systems ($dE=0$, $dm_1=dm_2=dm$):

$$dQ + dW_t = dm\left[\left(h_2 + g \cdot z_2 + \frac{c_2^2}{2}\right) - \left(h_1 + g \cdot z_1 + \frac{c_1^2}{2}\right)\right]$$

(2.34)

mit

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$$
$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$
$$\dot{W}_t = \frac{dW_t}{dt}$$

bezogen auf die Zeit:

$$\dot{Q}_{12} + \dot{W}_{t,12} = \dot{m}\left[\left(h_2 + g \cdot z_2 + \frac{c_2^2}{2}\right) - \left(h_1 + g \cdot z_1 + \frac{c_1^2}{2}\right)\right]$$

(2.38)

bezogen auf den Massenstrom: $q_{12} + w_{t,12} = h_2 - h_1 + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2)$ **(2.39)**

Energiebilanz des instationären offenen Systems: $E = \int dE = \int\left(u + g \cdot z + \frac{c^2}{2}\right)dm$ **(2.41)**

Sonderfall: ein Ein- bzw. Ausströmvorgang

Änderung des Energieinhaltes dieses Systems: $\boxed{dE = dQ + dW_t \pm dm\left(h + g \cdot z + \frac{c^2}{2}\right)}$ **(2.42)**

Wobei das positive Vorzeichen für Einströmvorgänge und das negative für Ausströmvorgänge gilt.

Technische Arbeit: $\boxed{dw_t = v \cdot dp}$ **(2.46)**

Technische Arbeit ideal: $\boxed{w_{t,12} = \int_1^2 v \cdot dp}$ **real:** $\boxed{w_{t,12} = \int_1^2 v \cdot dp + w_{R,12}}$ **(2.47+2.48)**

3. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Definitionsgleichung der Entropie: $\boxed{dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dU + p \cdot dV}{T} = \frac{dH - V \cdot dp}{T}}$ **(3.1)**

Die Wärmemenge dQ setzt sich aus der über die Systemgrenze zu- bzw. abgeführten Wärmemenge und der im System entstehenden Verlustwärme zusammen.

Bezogen auf die Masse: $\boxed{s = \frac{S}{m}}$ **(3.2)**

Entropieänderung eines Systems: $\boxed{dS = dS_{außen} + dS_{innen} = \frac{dQ}{T} + \frac{dW_R}{T}}$ **(3.3+3.4)**

Isochore Zustandsänderung (v=const.):dv=0 $\boxed{s_2 - s_1 = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = c_v \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}$ **(3.10)**

Isobare Zustandsänderung (p=const.):dp=0 $\boxed{s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = c_p \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}$ **(3.12)**

3.5 Exergie und Anergie

Unbeschränkt umwandelbare Energien werden als Exergie bezeichnet.
Die Restenergie die nicht umwandelbar ist wird als Anergie bezeichnet.

$$\boxed{Energie = Exergie + Anergie} \qquad \textbf{(3.13)}$$

Exergie und Anergie für stationär offene Prozesse:

Der Index U steht für den Umgebungszustand.
Maximale technische Arbeitsfähigkeit (Exergie): $\boxed{e = h - h_U - T_U(s - s_U)}$ **(3.14)**

Anergie: $\boxed{b = h - e = h_U + T_U(s - s_U)}$ **(3.15)**

3.6 Adiabater Drosselvorgang

Durch den Drosselvorgang verursachte Entropieänderung: $\boxed{ds = \frac{dh - v \cdot dp}{T} = -\frac{v}{T} dp}$ **(3.16)**

Für ideale Gase gilt für den Drosselvorgang: $\boxed{s_2 - s_1 = -R \int \frac{dp}{p} = -R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} > 0}$ **(3.17)**

4. Zustandseigenschaften und Zustandsänderung idealer Gase

4.1 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gas

allgemeine Gaskonstante: $\boxed{R_m = M \cdot R}$ $\boxed{R_m = 8{,}3143 \frac{kJ}{kmol \cdot K}}$ **(4.3+4.4)**

Die allgemeine Gaskonstante ist stoffunabhängig.

molare Masse: $\boxed{M = \frac{m}{n}}$ **(4.5)**

Thermische Zustandsgleichung: $\boxed{p \cdot v = R \cdot T}$ **(4.1)**

multipliziert mit der Masse: $\boxed{p \cdot V = mRT}$ **(4.2)**

multipliziert mit der Stoffmenge: $\boxed{p \cdot V = nR_m T}$ **(4.6)**

dividiert mit der Stoffmenge: $\boxed{p \cdot v_m = R_m \cdot T}$ **(4.7)**

physikalischer Normzustand: $\boxed{p_N = 101325\,Pa}$ $\boxed{T_N = 273{,}15 K}$ $\boxed{v_{m,N} = 22{,}4136 \frac{m^3}{kmol}}$

Loschmidtsche Konstante: $\boxed{N_L = 6{,}02217 \cdot 10^{26} \frac{1}{kmol}}$ **(4.11)**

Stoffmenge: $\boxed{n = \frac{N}{N_L}}$ **(4.12)**

4.2 Kalorische Zustandgleichung des idealen Gases

spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen: $\boxed{c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_V}$ **(4.15)**

spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck: $\boxed{c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p}$ **(4.19)**

totale Differential der spezifischen inneren Energie für ein ideales Gas: $du = c_v(T) \cdot dT$ **(4.22)**

für das Differential der Enthalpie kann abgeleitet werden: $h = u + p \cdot v = u + R \cdot T$ **(4.23)**

totale Differential der spezifischen Enthalpie für eine ideales Gas: $dh = c_p(T) \cdot dT$ **(4.26)**

Zusammenhang zwischen c_p und c_v für ideale Gase : $c_p = c_v + R$ **(4.27)**

Isentropenexponent: $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ **(4.28)**

Beziehungen für die spezifischen Wärmekapazitäten: $c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R$ $c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R$ **(4.29+4.30)**

für n statt m als Bezugsgröße gilt folgendes:

$c_{v,m} = M \cdot c_v$ $c_{p,m} = M \cdot c_p$ $c_{p,m} = c_{v,m} + R_m$ $\frac{c_{p,m}}{c_{v,m}} = \frac{c_p}{c_v} = \kappa$ $c_{v,m} = \frac{1}{\kappa - 1} R_m$ $c_{p,m} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_m$

Werte für κ : - einatomiges Gas: κ = 5 / 3 = 1,67
- zweiatomiges Gas: κ = 7 / 5 = 1,40
- dreiatomiges Gas: κ = 8 / 6 = 1,33

Für zwei- und dreiatomige Gase sind die Werte für κ nur Näherungen, da dieser Wert stark von Druck und Temperatur abhängig ist.

Mittlere spezifische Wärmekapazität: $\bar{c}_p(\vartheta) = \frac{1}{\vartheta} \cdot \int_0^{\vartheta} c_p(\vartheta) \cdot d\vartheta$ **(4.37)**

Änderung der spezifischen Enthalpie: $h(\vartheta_2) - h(\vartheta_1) = \bar{c}_p(\vartheta_2) \cdot \vartheta_2 - \bar{c}_p(\vartheta_1) \cdot \vartheta_1$ **(4.38)**

Entropieänderung: $ds = \frac{du + p \cdot dv}{T} = \frac{dh - v \cdot dp}{T}$ **(4.39)**

$ds = c_v(T) \cdot \frac{dT}{T} + R \cdot \frac{dv}{v}$ **(4.40)**

$ds = c_p(T) \cdot \frac{dT}{T} - R \cdot \frac{dp}{p}$ **(4.41)**

Steigung der Isochoren bei einer bestimmten Temperatur: $\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_v = \frac{T}{c_v}$ **(4.42)**

Steigung der Isobaren bei einer bestimmten Temperatur: $\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p = \frac{T}{c_p}$ **(4.43)**

4.3 Mischung Idealer Gase

Massenverhältnis: $\xi_i = \frac{m_i}{m_{ges}}$ $\sum_i \xi_i = 1$ **(4.44+4.46)**

Gemischzusammensetzung in Molanteilen (Volumenverhältnis): $\gamma_i = \frac{n_i}{n_{ges}}$ $\sum_i \gamma_i = 1$ **(4.47+4.49)**

Umrechnung von Massenanteilen in Molanteile und umgekehrt:

$$\gamma_i = \frac{n_i}{n_{ges}} = \frac{\frac{m_i}{M_i}}{\sum_i \frac{m_i}{M_i}} = \frac{m_i \cdot M_{Mischung}}{m \cdot M_i} = \xi_i \frac{M_{Mischung}}{M_i} \qquad (4.50)$$

$$\xi_i = \frac{m_i}{m_{ges}} = \frac{n_i \cdot M_i}{\sum_i n_i \cdot M_i} = \frac{n_i \cdot M_i}{n \cdot M_{Mischung}} = \gamma_i \frac{M_i}{M_{Mischung}} \qquad (4.51)$$

molare Masse des Gasgemisches: $M_{Mischung} = \sum_i \gamma_i \cdot M_i = \frac{1}{\sum_i \frac{\xi_i}{M_i}}$ **(4.52)**

Gaskonstante des Gasgemisches: $R_{Mischung} = \frac{R_m}{M_{Mischung}} = \sum_i \xi_i \cdot \frac{R_m}{M_i} = \sum_i \xi_i \cdot R_i$ **(4.53)**

Daltonsches Gesetz: $p = \sum_i p_i$ **mit dem Partialdruck eines Gases** p_i **(4.54)**

Für die thermische Zustandgleichung gilt dann: $p_i \cdot V = n_i \cdot R_m \cdot T$ **(4.55)**

$V_i \cdot p = n_i \cdot R_m \cdot T$ **(4.57)**

Für dieGemischzusammensetzung in Molanteilen (Volumenverhältnis) gilt dann:

$$\gamma_i = \frac{n_i}{n_{ges}} = \frac{p_i}{p_{ges}} \qquad (4.58)$$

kalorische Zustandsgrößen des idealen Gasgemisches:

$$U_{Mischung} = \sum_i U_i = \sum_i m_i \cdot u_i = \sum_i n_i \cdot u_{m,i} \qquad (4.59)$$

$$H_{Mischung} = \sum_i H_i = \sum_i m_i \cdot h_i = \sum_i n_i \cdot h_{m,i} \tag{4.60}$$

spezifische kalorische Zustandsgrößen: $$u_{Mischung} = \frac{U_{Mischung}}{m} = \sum_i \xi_i \cdot u_i \tag{4.61}$$

$$h_{Mischung} = \frac{H_{Mischung}}{m} = \sum_i \xi_i \cdot h_i \tag{4.62}$$

$$u_{m,Mischung} = \frac{U_{Mischung}}{n} = \sum_i \gamma_i \cdot u_{m,i} \tag{4.63}$$

$$h_{m,Mischung} = \frac{H_{Mischung}}{n} = \sum_i \gamma_i \cdot h_{m,i} \tag{4.64}$$

spezifische und molare Wärmekapazitäten des Gemisches: $$c_{v,Mischung} = \sum_i \xi_i \cdot c_{v,i} \tag{4.65}$$

$$c_{p,Mischung} = \sum_i \xi_i \cdot c_{v,i} \tag{4.66}$$

$$c_{v,m,Mischung} = \sum_i \gamma_i \cdot c_{v,m,i} \tag{4.66}$$

$$c_{p,m,Mischung} = \sum_i \gamma_i \cdot c_{p,m,i} \tag{4.68}$$

Gaskonstante des Gemisches: $$R_{Mischung} = c_{p,Mischung} - c_{v,Mischung} \tag{4.69}$$

$$R_m = c_{p,m,Mischung} - c_{v,m,Mischung} \tag{4.70}$$

4.4 Zustandsänderung idealer Gase

4.4.1 Isochore Zustandsänderung

$$dv = 0 \tag{4.71}$$

thermische Zustandsgleichung: $$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \tag{4.72}$$

Volumenänderungsarbeit: $$w_{12} = -\int_1^2 p \cdot dv = 0 \tag{4.73}$$

Änderung der spezifischen inneren Energie: $$du = dq = c_v \cdot dT \tag{4.74}$$

Bei der Annahme eines reversiblen Prozesses gilt für die technische Arbeit:

$$w_{t,12} = \int_1^2 v \cdot dp = v(p_2 - p_1) \tag{4.75}$$

4.4.2 Isobare Zustandsänderung

$\boxed{dp = 0}$ **(4.76)**

thermische Zustandsgleichung: $\boxed{\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}}$ **(4.77)**

Volumenänderungsarbeit: $\boxed{w_{12} = -\int_1^2 p \cdot dv = -p(v_2 - v_1)}$ **(4.78)**

Technische Arbeit: $\boxed{w_{t,12} = 0}$

Änderung der Enthalpie: $\boxed{dh = dq = c_p \cdot dT}$ **(4.79)**

4.4.3 Isotherme Zustandsänderung

$\boxed{dT = 0}$

thermische Zustandsgleichung: $\boxed{\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}}$ **(4.80)**

übertragene Wärmemenge: $\boxed{q_{12} = T(s_2 - s_1)}$ **(4.81)**

Volumenänderungsarbeit: $\boxed{w_{12} = u_2 - u_1 - T(s_2 - s_1)}$ **(4.82)**

Technische Arbeit: $\boxed{w_{t,12} = h_2 - h_1 - T(s_2 - s_1)}$ **(4.83)**

Daraus ergibt sich: $\boxed{w_{12} = w_{t,12} = -q_{12} = -T(s_2 - s_1)}$ **(4.84)**

Änderung der Entropie: $\boxed{s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dh - v \cdot dp}{T} = \int_1^2 -\frac{v}{T} \cdot dp = \int R \cdot \frac{dp}{p} = R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}$ **(4.85)**

Übertragene Wärme bzw. Arbeit: $\boxed{q_{12} = -w_{12} = -w_{t,12} = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}$ **(4.86)**

4.4.4 Isentrope (reversibel adiabate) Zustandsänderung

$\boxed{ds = 0}$

thermische Zustandsgleichung: $\boxed{\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$ **oder** $\boxed{p_1 \cdot v_1^{\kappa} = p_2 \cdot v_2^{\kappa}}$ **(4.87+4.88)**

übertragene Arbeit: $\boxed{dw = du = c_v \cdot dT}$ $\boxed{dw_t = dh = c_p \cdot dT}$ **(4.89+4.90)**

oder: $w_{12} = \frac{R \cdot T_1}{\kappa - 1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa - 1} - 1 \right] = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]$ **(4.91)**

technische Arbeit:

$$w_{t,12} = \kappa \cdot w_{12} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R \cdot T_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 \cdot v_1 \left[\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa - 1} - 1 \right] = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 \cdot v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] \quad \textbf{(4.92)}$$

4.4.5 Polytrope Zustandsänderung

$p \cdot v^n = const.$ **mit dem Polytropenexponenten n** **(4.93)**

- **Isobare Zustandsänderung mit p = const: n=0**
- **Isotherme Zustandsänderung mit p*v=const: n=1**
- **Isentrope Zustandsänderung mit $p*v^\kappa$=const: n= κ**
- **Isochore Zustandsänderung mit v=const: n= $\pm \propto$ aber mit** $p^{\frac{1}{n}} \cdot v = const.$ **(4.94)**

Thermische Zustandsgleichung: $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}$ **(4.95)**

Volumenänderungsarbeit: $w_{12} = \frac{R \cdot T_1}{n - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{p_1 \cdot v_1}{n - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$ **(4.96)**

Technische Arbeit: $w_{t,12} = \frac{n}{n - 1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n - 1} p_1 \cdot v_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$ **(4.97)**

Wobei gilt: $w_{t,12} = n \cdot w_{12}$ **(4.98)**

Übertragene Wärmemenge: $q_{12} = u_2 - u_1 - w_{12}$ **(4.99)**

Eingesetzt gilt: $q_{12} = c_v (T_2 - T_1) - \frac{1}{n - 1} R \cdot T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1)$ **(4.100)**

5. Zustandseigenschaften und Zustandsänderungen mehrphasiger Systeme

Die einfach gestrichenen Größen beziehen sich auf die siedende Flüssigkeit und die zweifach gestrichenen Größen auf den trocken gesättigten Dampf.

Dampfgehalt: $\boxed{x = \frac{m''}{m' + m''}}$ **(5.1)**

Gesamtmasse: $\boxed{m = m' + m''}$ **(5.2)**

Gesamtvolumen: $\boxed{V = (m' + m'')v_x = m' \cdot v' + m'' \cdot v''}$ **(5.3)**

Spezifisches Volumen: $\boxed{v_x = v' + x(v'' - v')}$ $\boxed{v_x = \frac{V}{m}}$ **(5.4)**

Regelfaktor: $\boxed{Z(p,T) = \frac{p \cdot v}{R \cdot T}}$ **(5.5)**

Thermisches Zustandsverhalten realer Gase nach van der Waals: $\boxed{R \cdot T = \left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - d)}$ **(5.7)**

mit den Korrekturtermen a und d: $\boxed{a = 3 p_k \cdot v_k^2}$ $\boxed{d = \frac{1}{3} v_k}$ **(5.8+5.9)**

Größen am Bezugszustandes(Tripelpunkt) von Wasser:

$\boxed{T_0 = 273{,}16 K}$ **(5.10)**

$\boxed{p_0 = 611{,}7 Pa}$ **(5.11)**

$\boxed{v_0' = 1{,}0 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{kg}}$ **(5.12)**

$\boxed{u_0' = 0 \frac{kJ}{kg}}$ **(5.13)**

$\boxed{s_0' = 0 \frac{kJ}{kg \cdot K}}$ **(5.14)**

$\boxed{h_0' = u_0' + p_0 \cdot v_0' = 0{,}0006 \frac{kJ}{kg}}$ **(5.15)**

5.2.3.1 Kalorische Zustandsgrößen von Flüssigkeiten

Für Flüssigkeiten gilt näherungsweise: $\boxed{c_p = c_v}$

a) bei konstanter Temperatur

Änderung der spezifischen inneren Energie: $\boxed{(du)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \cdot dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \cdot dv \approx 0}$ **(5.17)**

Änderung der spezifischen Enthalpie: $\boxed{(dh)_T = du + p \cdot dv + v \cdot dp \approx v \cdot dp}$ **(5.18)**

Änderung der spezifischen Entropie: $\boxed{(ds)_T = \frac{dq}{T} = \frac{du + p \cdot dv}{T} \approx 0}$ **(5.19)**

b) bei konstantem Druck:

Änderung der spezifischen Enthalpie: $\boxed{(dh)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \cdot dp = c_p \cdot dT}$ **(5.20)**

Änderung der spezifischen Entropie: $\boxed{(ds)_p = \frac{dq}{T} = \frac{dh - v \cdot dp}{T} = \frac{c_p \cdot dT}{T}}$ **(5.22)**

$$\boxed{q_{12} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)} \quad \textbf{(5.21)}$$

c) bei konstanter Entropie

Änderung der spezifischen Enthalpie: $\boxed{(dh)_s = du + p \cdot dv + v \cdot dp = v \cdot dp}$ **(5.23)**

Technische Arbeit: $\boxed{w_{t,12} = h_2 - h_1 \approx v(p_2 - p_1)}$ **(5.24)**

5.2.3.2 Kalorische Zustandsgrößen überhitzter Dämpfe

Bei konstantem Druck gilt im Bereich des überhitzten Dampfes:

Änderung der spezifischen Enthalpie: $\boxed{(dh)_p = c_p \cdot dT}$ **(5.25)**

$$\boxed{q_{12} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)} \quad \textbf{(5.26)}$$

Änderung der spezifischen Entropie: $\boxed{(ds)_p = \frac{dq}{T} = \frac{dh - v \cdot dp}{T} = \frac{c_p \cdot dT}{T}}$ **(5.27)**

Bei konstanter Entropie übertragene technische Arbeit: $\boxed{w_{t,12} = h_2 - h_1}$ **(5.28)**

5.2.3.3 Kalorische Zustandsgrößen von Nassdampf

Spezifische Energie: $u_x = u' + x(u'' - u')$ **(5.29)**

Spezifische Enthalpie: $h_x = h' + x(h'' - h')$ **(5.30)**

Spezifische Entropie: $s_x = s' + x(s'' - s')$ **(5.31)**

Weiterhin gilt: $h' = u' + p \cdot v'$ $h'' = u'' + p \cdot v''$ **(5.32+5.33)**

Verdampfungsenthalpie: $r = h'' - h' = T(s'' - s')$ **(5.34)**

Gleichung von Clausius-Clapeyron: $r_{Verd} = h'' - h' = T(v'' - v')\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{Verd}$ **(5.36)**

$$r_{Schm} = T(v' - v_{fest})\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{Schm} \quad \textbf{(5.37)}$$

$$r_{Subl} = T(v'' - v_{fest})\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{Subl} \quad \textbf{(5.38)}$$

Am Tripelpunkt gilt folgende Beziehung: $r_{Subl} = r_{Schm} + r_{Verd}$ **(5.39)**

6. Kreisprozesse

6.1 Allgemeine Grundlagen

Aus dem ersten Hauptsatz folgt: $q_{zu} = q_{ab} = -w$ **(6.1)**

Rechtsläufige Kreisprozesse

Bei Rechtsprozessen gilt: $|w_{Exp}| > w_{Komp}$ **(6.2)**

Für die Kreisprozessarbeit gilt: $w = w_{Exp} + w_{Komp} < 0$ **(6.3)**

Energiebilanz: $q_{zu} > |q_{ab}|$ **(6.4)**

$\frac{q_{zu}}{T_{zu}} + \frac{q_{ab}}{T_{ab}} = 0$ **Bei nicht konstanten Temperaturen werden Mitteltemperaturen eingesetzt** **(6.5)**

Aus Gleichung (6.4) und (6.5) folgt: $T_{zu} > T_{ab}$ **(6.6)**

Bei rechtsläufigen Kreisprozessen gilt für die Kreisprozessarbeit: $|w| = q_{zu} - |q_{ab}|$ **(6.7)**

Bei rechtsläufigen Kreisprozessen gilt für die Nutzleistung: $\left|\dot{W}\right| = \dot{m} \cdot |w|$ **(6.8)**

Thermischer Wirkungsgrad: $\eta = \frac{|w|}{q_{zu}} = \frac{q_{zu} - |q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = \frac{Nutzen}{Aufwand}$ **(6.9)**

Linksläufige Kreisprozesse

Bei Linksprozessen gilt: $|w_{Exp}| < w_{Komp}$ **(6.10)**

Für die Kreisprozessarbeit gilt: $w = w_{Exp} + w_{Komp} > 0$ **(6.11)**

Energiebilanz: $q_{zu} < |q_{ab}|$ **(6.12)**

Für die Temperaturen bei denen Wärme übertragen wird gilt: $T_{zu} < T_{ab}$ **(6.13)**

Bei linksläufigen Kreisprozessen gilt für die Kreisprozessarbeit: $w = |q_{ab}| - q_{zu}$ **(6.14)**

Leistungsziffer einer Kältemaschine: $\varepsilon_K = \frac{q_{zu}}{w} = \frac{q_{zu}}{|q_{ab}| - q_{zu}}$ **(6.15)**

Leistungsziffer einer Wärmepumpe: $\varepsilon_{WP} = \frac{|q_{ab}|}{w} = \frac{|q_{ab}|}{|q_{ab}| - q_{zu}} = \frac{w + q_{zu}}{|q_{ab}| - q_{zu}}$ **(6.16)**

Nur für den Idealprozess gilt: $\varepsilon_{WP} = \varepsilon_K + 1$

6.2 Kreisprozesse mit idealen Gasen

6.2.1 Carnot-Prozess

$1 \rightarrow 2$: Isentrope Kompression
$2 \rightarrow 3$: Isotherme Wärmezufuhr
$3 \rightarrow 4$: Isentrope Expansion
$4 \rightarrow 1$: Isotherme Wärmeabfuhr

Für die zu- und abgeführte Wärmemenge gilt: $q_{zu} = q_{23} = T_{\max}(s_3 - s_2)$ **(6.17)**

$|q_{ab}| = |q_{41}| = T_{\min}(s_4 - s_1)$ **(6.18)**

Aus dem Zustandsverlauf folgt: $s_3 - s_2 = s_4 - s_1 = \Delta s$ **(6.19)**

Wirkungsgrad des Carnot-Prozess: $\eta_{rev} = \frac{|w|}{q_{zu}} = 1 - \frac{T_{\min}\Delta s}{T_{\max}\Delta s} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$ **(6.20)**

Kreisprozessarbeit: $|w| = (T_{\max} - T_{\min})\Delta s$ **(6.21)**

Für eine isotherme Zustandsänderung gilt: $\boxed{\Delta s = s_3 - s_2 = R \cdot \ln \frac{p_2}{p_3}}$ **(6.22)**

Aus (6.21) und (6.22) folgt: $\boxed{|w| = (T_{\max} - T_{\min}) \cdot R \cdot \ln \frac{p_2}{p_3}}$ **(6.23)**

6.2.2 Vergleichsprozesse von Gasturbinenanlagen

6.2.2.1 Ericson-Prozess

1 $\rightarrow$ 2 : Isotherme Kompression mit gleichzeitiger Wärmeabfuhr
2 $\rightarrow$ 3 : Isobare (regenerative) Wärmezufuhr
3 $\rightarrow$ 4 : Isotherme Expansion mit gleichzeitiger Wärmezufuhr
4 $\rightarrow$ 1 : Isobare (regenerative) Wärmeabfuhr

Für den regenerativen Wärmeaustausch gilt im Idealfall: $q_{23} = |q_{41}|$ **(6.24)**

Wärmezufuhr: $\boxed{q_{zu} = R \cdot T_{zu} \cdot \ln \frac{p_{\max}}{p_{\min}}}$ **(6.25)**

Wärmeabfuhr: $\boxed{q_{ab} = -R \cdot T_{ab} \cdot \ln \frac{p_{\max}}{p_{\min}}}$ **(6.26)**

Kreisprozessarbeit: $\boxed{w_t = -R \cdot (T_{zu} - T_{ab}) \cdot \ln \frac{p_{\max}}{p_{\min}}}$ **(6.27)**

Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_{rev} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}}$ **(6.28)**

6.2.2.2 Einfacher Joule-Prozess

1 $\rightarrow$ 2 : Isentrope Kompression
2 $\rightarrow$ 3 : Isobare Wärmezufuhr
3 $\rightarrow$ 4 : Isentrope Expansion
4 $\rightarrow$ 1 : Isobare Wärmeabfuhr

Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_{rev} = 1 - \frac{\bar{T}_{ab}}{\bar{T}_{zu}}}$ **(6.29)**

Wärmezufuhr: $\boxed{q_{zu} = c_p (T_3 - T_2)}$ **(6.30)**

Wärmeabfuhr: $\boxed{q_{ab} = c_p (T_1 - T_4)}$ **(6.31)**

Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_{rev} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right) \cdot T_1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) \cdot T_2}}$ **(6.32)**

Für das Druckverhältnis gilt: $\boxed{\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_4}{p_3}}$ **(6.33)**

Für das Temperaturverhältnis gilt: $\boxed{\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}}$ **und damit** $\boxed{\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}}$ **(6.34)**

Damit gilt für den Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_{rev} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$ **(6.35)**

Kreisprozessarbeit: $\boxed{|w_t| = q_{zu} - |q_{ab}| = c_p \cdot [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]}$ **(6.36)**

Die Kreisprozessarbeit wird maximal wenn gilt: $\boxed{T_2 = T_4}$ **(6.37)**

6.2.2.3 Joule-Prozess mit regenerativer Wärmerückgewinnung

Bedingung für die regenerative Wärmerückgewinnung: $\boxed{T_4 > T_3}$ **(6.38)**

Bei idealem Wärmeaustausch gilt für die Temperaturen: $\boxed{T_2 = T_{4'}}$ $\boxed{T_{2'} = T_4}$ **(6.39+6.40)**

Von außen zugeführte Wärmemenge: $\boxed{q_{zu} = c_p \cdot (T_3 - T_{2'}) = c_p \cdot (T_3 - T_4)}$ **(6.41)**

Nach außen abgegebene Wärmemenge: $\boxed{q_{ab} = c_p \cdot (T_1 - T_{4'}) = c_p \cdot (T_1 - T_2)}$ **(6.42)**

Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_{rev} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \cdot T_1}{T_4 \cdot \left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right) \cdot T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_4}}$ **(6.43)**

$\boxed{\eta_{rev} = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 \cdot T_4}}$ **(6.44)**

Kreisprozessarbeit: $\boxed{|w_t| = q_{zu} - |q_{ab}| = c_p \cdot [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]}$ **(6.45)**

6.2.2.4 Joule-Prozess mit regenerativer Wärmerückgewinnung

siehe Skript

6.2.2.5 Wirklicher Gasturbinenprozess

Für die Drücke gilt: $\boxed{p_{2'} > p_3}$ $\boxed{p_{4'} > p_1}$ **(6.46+6.47)**

Wirkungsgrade einer Expansionsmaschine:

$\boxed{w_{t,rev} = w_{t,34} = h_4 - h_3}$ **(6.48)**

$$\boxed{w_{t,i} = w_{t,34'} = h_{4'} - h_3} \tag{6.49}$$

$$\boxed{\eta_G = \frac{w_{t,i}}{w_{t,rev}} = \frac{w_{t,34'}}{w_{t,34}} = \frac{h_{4'} - h_3}{h_4 - h_3}} \tag{6.50}$$

$$\boxed{\eta_{mech} = \frac{w_{t,eff}}{w_{t,i}}} \tag{6.51}$$

$$\boxed{\eta_{eff} = \frac{w_{t,eff}}{w_{t,rev}} = \eta_G \cdot \eta_{mech}} \tag{6.52}$$

Wirkungsgrade einer Kompressionsmaschine:

$$\boxed{w_{t,rev} = w_{t,12} = h_2 - h_1} \tag{6.53}$$

$$\boxed{w_{t,i} = w_{t,12'} = h_{2'} - h_1} \tag{6.54}$$

$$\boxed{\eta_G = \frac{w_{t,rev}}{w_{t,i}} = \frac{w_{t,12}}{w_{t,12'}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}} \tag{6.55}$$

$$\boxed{\eta_{mech} = \frac{w_{t,i}}{w_{t,eff}}} \tag{6.56}$$

$$\boxed{\eta_{eff} = \frac{w_{t,rev}}{w_{t,eff}} = \eta_G \cdot \eta_{mech}} \tag{6.57}$$

Weiterhin gilt für wirkliche Gasturbinenprozesse:

innerer Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_i = \frac{\left|\dot{W}_{t,i}\right|}{\dot{Q}_{zu}}}$ **(6.58)**

Gütegrad: $\boxed{\eta_G = \frac{\dot{W}_{t,i}}{\dot{W}_{t,rev}}}$ **(6.59)**

mechanischer Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_{mech} = \frac{\dot{W}_{t,eff}}{\dot{W}_{t,i}}}$ **(6.60)**

effektiver Wirkungsgrad: $\boxed{\eta_{eff} = \frac{\left|\dot{W}_{t,eff}\right|}{\dot{Q}_{zu}} = \eta_i \cdot \eta_{mech} = \eta_G \cdot \eta_{mech} \cdot \frac{\left|\dot{W}_{t,rev}\right|}{\dot{Q}_{zu}}}$ **(6.61)**

reversibler Wirkungsgrad: $\eta_{rev} = \frac{\left|\dot{W}_{t,rev}\right|}{\dot{Q}_{zu}}$ **(6.62)**

effektive Leistung: $\left|\dot{W}_{t,eff}\right| = \eta_{rev} \cdot \eta_G \cdot \eta_{mech} \cdot \dot{Q}_{zu} = \eta_i \cdot \eta_{mech} \cdot \dot{Q}_{zu}$ **(6.63)**

6.2.3 Vergleichsprozesse von Verbrennungsmotoren

Zylindervolumen (H = Hub; Komp = Kompressionsvolumen): $V_{Zyl} = V_H + V_{Komp}$ **(6.64)**

theoretischer Massendurchsatz beim Zweitaktmotor: $\dot{m} = \frac{V_{Zyl} \cdot n}{v_6}$ **(6.65)**

mit v_6= spezifisches Volumen im Ansaugzustand

theoretischer Massendurchsatz beim Viertaktmotor: $\dot{m} = \frac{V_{Zyl} \cdot n}{2 \cdot v_1}$ **(6.66)**

mit v_1= spezifisches Volumen im Ansaugzustand

Vereinfachungen bei Verbrennungsmotoren:

- **das Arbeitsgas soll den Zylinder nicht verlassen**
- **die Verbrennung wird durch eine Wärmezufuhr von außen simuliert**
- **der Ladungswechsel wird durch eine Wärmeabfuhr nach außen ersetzt**

6.2.3.1 Seiliger-Prozess

1 $\rightarrow$ 2 : Isentrope Kompression
2 $\rightarrow$ 3 : Isochore Wärmezufuhr
3 $\rightarrow$ 4 : Isobare Wärmezufuhr
4 $\rightarrow$ 5 : Isentrope Expansion
5 $\rightarrow$ 1 : Isochore Wärmeabfuhr

für die zugeführte Wärmemenge gilt: $q_{zu} = c_v\left(T_3 - T_2\right) + c_p\left(T_4 - T_3\right)$ **(6.67)**

für die abgeführte Wärmemenge gilt: $q_{ab} = c_v\left(T_1 - T_5\right)$ **(6.68)**

Wirkungsgrad verlustloser Prozess: $\eta_{rev} = 1 - \frac{\left|q_{ab}\right|}{q_{zu}} = 1 - \frac{c_v\left(T_5 - T_1\right)}{c_v\left(T_3 - T_2\right) + c_p\left(T_4 - T_3\right)}$ **(6.69)**

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{c_v \cdot T_1\left(\frac{T_5}{T_1} - 1\right)}{c_v \cdot T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) + c_p \cdot T_3\left(\frac{T_4}{T_3} - 1\right)} = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_5}{T_1} - 1\right)}{T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) + \kappa \cdot \frac{T_3}{T_2}\left(\frac{T_4}{T_3} - 1\right)}$$ **(6.73)**

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{\tau^{\kappa} \cdot \zeta - 1}{\varepsilon^{\kappa-1}\left[(\zeta - 1) + \kappa \cdot \zeta(\tau - 1)\right]} \quad \textbf{(6.75)}$$

Verdichtungsverhältnis: $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$ **(6.70)**

Einspritzverhältnis: $\tau = \frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3}$ **(6.71)**

Druckverhältnis der Wärmezufuhr: $\zeta = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$ **(6.72)**

Temperaturverhältnis:

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{T_5}{T_4} \cdot \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{\kappa-1} \cdot \tau \cdot \zeta \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_4}{v_2}\right)^{\kappa-1} \cdot \tau \cdot \zeta = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\kappa-1} \cdot \tau \cdot \zeta = \tau^{\kappa} \cdot \zeta \quad \textbf{(6.74)}$$

Zwei Grenzfälle des Seiliger-Prozesses:

Gleichraumprozess (Otto-Prozess) mit ausschließlich isochorer Wärmezufuhr: $\tau = 1$

Gleichdruckprozess (Diesel-Prozess) mit ausschließlich isobarer Wärmezufuhr: $\zeta = 1$

6.2.3.2 Otto-Prozess

1 $\rightarrow$ 2 : Isentrope Kompression
2 $\rightarrow$ 3 (4): Isochore Wärmezufuhr
3 (4) $\rightarrow$ 5 : Isentrope Expansion
5 $\rightarrow$ 1 : Isochore Wärmeabfuhr

Die Zustandspunkte 3 und 4 fallen zusammen !

reversibler Wirkungsgrad: $\eta_{rev} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = \frac{T_1}{T_2}$ **(6.76)**

zugeführte Wärmemenge: $q_{zu} = c_v(T_3 - T_2)$ **(6.77)**

abgeführte Wärmemenge: $q_{ab} = c_v(T_1 - T_5)$ **(6.78)**

Kreisprozessarbeit: $w = -(q_{zu} + q_{ab}) = -c_v(T_3 - T_2 + T_1 - T_5)$ **(6.79)**

6.2.3.3 Diesel-Prozess

1 $\rightarrow$ 2 (3): Isentrope Kompression
2 (3) $\rightarrow$ 4 : Isobare Wärmezufuhr
4 $\rightarrow$ 5 : Isentrope Expansion
5 $\rightarrow$ 1 : Isochore Wärmeabfuhr

Die Zustandspunkte 2 und 3 fallen zusammen !

reversibler Wirkungsgrad: $$\eta_{rev} = 1 - \frac{\tau^{\kappa} - 1}{\kappa \cdot \varepsilon^{\kappa-1} \cdot (\tau - 1)} \quad (6.80)$$

zugeführte Wärmemenge: $$q_{zu} = c_p (T_4 - T_3) \quad (6.81)$$

abgeführte Wärmemenge: $$q_{ab} = c_v (T_1 - T_5) \quad (6.82)$$

Kreisprozessarbeit: $$w = -(q_{zu} + q_{ab}) = -[c_p (T_4 - T_3) + c_v (T_1 - T_5)] \quad (6.83)$$

Für Diesel- und Otto-Prozess gilt für den Wirkungsgrad: $$\eta_{rev} = 1 - \frac{\bar{T}_{ab}}{\bar{T}_{zu}} \quad (6.84)$$

6.2.3.4 Verluste bei Verbrennungsmotoren

innerer Wirkungsgrad: $$\eta_i = \frac{|\dot{W}_i|}{\dot{Q}_{zu}} \quad (6.85)$$

mechanischer Wirkungsgrad: $$\eta_{mech} = \frac{\dot{W}_{eff}}{\dot{W}_i} \quad (6.86)$$

Gütegrad: $$\eta_G = \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_{rev}} \quad (6.87)$$

effektiver Wirkungsgrad: $$\eta_{eff} = \frac{|\dot{W}_{eff}|}{\dot{Q}_{zu}} = \eta_{rev} \cdot \eta_G \cdot \eta_{mech} = \eta_i \cdot \eta_{mech} \quad (6.88)$$

6.2.4 Stirling Prozess

$1 \to 2$: Isotherme Verdichtung bei gleichzeitiger Wärmeabgabe
$2 \to 3$: Isochore Zustandsänderung mit regenerativ zugeführter Wärme
$3 \to 4$: Isotherme Expansion bei gleichzeitiger Wärmezufuhr
$4 \to 1$: Isochore Zustandsänderung mit regenerativ abgeführter Wärme

die übertragenen Wärmemengen sind im Idealfall betragsgleich:

$$q_{23} = c_v (T_3 - T_2) = |q_{41}| = c_v (T_4 - T_1) \quad (6.89)$$

für die isotherm übertragenen Wärmemengen gilt: $$q_{12} = R \cdot T_{ab} \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6.90)$$

$$q_{34} = R \cdot T_{zu} \cdot \ln \frac{v_4}{v_3} \quad (6.91)$$

Kreisprozessarbeit: $w = -(q_{12} + q_{34}) = -R(T_{zu} - T_{ab}) \cdot \ln \frac{v_4}{v_3}$ **(6.92)**

Wirkungsgrad des verlustlosen Stirling-Prozesses:

$$\eta_{rev} = \frac{|w|}{q_{zu}} = \frac{R(T_{zu} - T_{ab}) \cdot \ln \frac{v_4}{v_3}}{R \cdot T_{zu} \cdot \ln \frac{v_4}{v_3}} = \frac{T_{zu} - T_{ab}}{T_{zu}} = 1 - \frac{T_{zu}}{T_{ab}} \quad (6.93)$$

6.3 Kreisprozesse mit Phasenänderung

6.3.1 Carnot-Prozess

6.3.2 Vergleichsprozesse von Dampfkraftanlagen

6.3.2.1 Clausius-Rankine-Prozess

1 → 2 : Isentrope Druckerhöhung des flüssigen Arbeitsmittels in der Speisepumpe
2 → 3 : Isobare Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung des Arbeitsmittels
3 → 4 : Isentrope Expansion des Dampfes in der Turbine
4 → 1 : Isobare Verflüssigung des expandierten Dampfes im Kondensator

zugeführte Wärmemenge: $q_{zu} = q_{23} = h_3 - h_2$ **(6.94)**

abgeführte Wärmemenge: $q_{ab} = q_{41} = h_1 - h_4$ **(6.95)**

für die Arbeiten gilt: $w_{t,Sp} = w_{t,12} = h_2 - h_1$ **(6.96)**

$$w_{t,Exp} = w_{t,34} = h_4 - h_3 \quad (6.97)$$

Kreisprozessarbeit: $w_t = w_{t,Sp} + w_{t,Exp} = -(q_{zu} + q_{ab}) = -(h_3 - h_4 + h_1 - h_2)$ **(6.98)**

reversibler Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der Pumpenarbeit:

$$\eta_{rev} = \frac{|w_t|}{q_{zu}} = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (6.99)$$

reversibler Wirkungsgrad ohne Berücksichtigung der Pumpenarbeit:

$$\eta_{rev} = \frac{|w_t|}{q_{zu}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} \quad (6.100)$$

reversibler Wirkungsgrad: $$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$$ **(6.101)**

6.3.2.2 Verbesserungsmöglichkeiten des Clausius-Rankine-Prozess

a) einstufige Zwischenüberhitzung

für die übertragenen Arbeiten und Wärmemengen gilt dann:

$$q_{zu} = q_{23} + q_{45} = h_3 - h_2 + h_5 - h_4$$ **(6.102)**

$$q_{ab} = q_{61} = h_1 - h_6$$ **(6.103)**

$$w_{t,Sp} = h_2 - h_1$$ **(6.105)**

$$w_{t,Exp} = h_4 - h_3 + h_6 - h_5$$ **(6.104)**

reversibler Wirkungsgrad: $$\eta_{rev} = \frac{|w_t|}{q_{zu}} = \frac{h_3 - h_4 + h_5 - h_6 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2 + h_5 - h_4} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_3 - h_2 + h_5 - h_4}$$ **(6.106)**

b) regenerative Speisewasservorwärmung

hier zweistufig:

Dampfmenge der 2. Vorwärmstufe: $$\dot{m}_{W,2} = \dot{m} - \dot{m}_{D,2}$$ **(6.107)**

Dampfmenge der 1. Vorwärmstufe: $$\dot{m}_{W,1} = \dot{m} - \dot{m}_{D,1} - \dot{m}_{D,2}$$ **(6.108)**

Wärmebilanz im Vorwärmer 1: $$\dot{m}_{D,1} \cdot (h_{D,1} - h_{W,1}) = (\dot{m} - \dot{m}_{D,1} - \dot{m}_{D,2}) \cdot (h_{W,1} - h_1)$$ **(6.109)**

Wärmebilanz im Vorwärmer 2: $$\dot{m}_{D,2} \cdot (h_{D,2} - h_{W,2}) = (\dot{m} - \dot{m}_{D,2}) \cdot (h_{W,2} - h_{W,1})$$ **(6.110)**

Anzapfdampfmengen: $$\dot{m}_{D,2} = \dot{m} \cdot \frac{h_{W,2} - h_{W,1}}{h_{D,2} - h_{W,1}}$$ **(6.111)**

$$\dot{m}_{D,1} = (\dot{m} - \dot{m}_{D,2}) \cdot \frac{h_{W,1} - h_1}{h_{D,1} - h_1}$$ **(6.112)**

Restdampfmenge die vollständig expandiert: $$\dot{m}_4 = \dot{m} - \dot{m}_{D,1} - \dot{m}_{D,2}$$ **(6.113)**

zugeführte Wärmemenge: $$q_{zu} = q_{23} = h_3 - h_2$$ **(6.114)**

abgeführte Wärmemenge: $q_{ab} = q_{41} = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}} \cdot (h_1 - h_4)$ **(6.115)**

reversibler Wirkungsgrad: $\eta_{rev} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{\frac{\dot{m}_4}{\dot{m}} \cdot (h_1 - h_4)}{h_3 - h_2}$ **(6.116)**

von der Turbine abgebene Arbeit:

$$w_{t,Exp} = (h_{D,2} - h_3) + \left(1 - \frac{\dot{m}_{D,2}}{\dot{m}}\right) \cdot (h_{D,1} - h_{D,2}) + \left(1 - \frac{\dot{m}_{D,2} + \dot{m}_{D,1}}{\dot{m}}\right) \cdot (h_4 - h_{D,1}) \quad \textbf{(6.117)}$$

6.3.2.2 Verluste beim Clausius-Rankine-Prozess

Gütegrad der Turbine: $\eta_{G,Exp} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{rev}} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4}$ **(6.118)**

Gütegrad der Speisepumpe: $\eta_{G,Sp} = \frac{\Delta h_{rev}}{\Delta h_i} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$ **(6.119)**

Wirkungsgrade für den Gesamtprozess der Dampfkraftanlage:

reversibler Wirkungsgrad: $\eta_{rev} = \frac{|\dot{W}_{t,rev}|}{\dot{Q}_{zu}}$ **(6.120)**

innerer Wirkungsgrad: $\eta_i = \frac{|\dot{W}_{t,i}|}{\dot{Q}_{zu}}$ **(6.121)**

Gütegrad: $\eta_G = \frac{\dot{W}_{t,i}}{\dot{W}_{t,rev}}$ **(6.122)**

mechanischer Wirkungsgrad: $\eta_{mech} = \frac{\dot{W}_{t,eff}}{\dot{W}_{t,i}}$ **(6.123)**

effektiver Wirkungsgrad: $\eta_{eff} = \frac{|\dot{W}_{t,eff}|}{\dot{Q}_{zu}} = \eta_{rev} \cdot \eta_G \cdot \eta_{mech} = \eta_i \cdot \eta_{mech}$ **(6.124)**

6.3.3 Vergleichsprozesse von Kompressionskälteanlagen

1 → 2 : Isentrope Verdichtung des trocken gesättigten Dampfes
2 → 3 : Isobare Abkühlung und Verflüssigung des Kältemitteldampfs unter Wärmeabgabe
3 → 4 : Isenthalpe Drosselung
4 → 1 : Isobare Verdampfung des Nassdampfes bei Wärmezufuhr

zugeführte Wärmemenge: $q_{zu} = h_1 - h_4$ **(6.125)**

abgeführte Wärmemenge: $q_{ab} = h_3 - h_2$ **(6.126)**

dem Verdichter zugeführte technische Arbeit: $w_t = h_2 - h_1$ **(6.127)**

Leistungsziffer des Kälteprozesses: $\varepsilon_K = \frac{q_{zu}}{w_t} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$ **(6.128)**

Leistungsziffer der Wärmepumpe: $\varepsilon_{WP} = \frac{|q_{ab}|}{w_t} = \frac{q_{zu} + w_t}{w_t}$ **(6.129)**

für den Idealprozess gilt: $\varepsilon_{WP} = 1 + \varepsilon_K$

Die Verluste werden durch den Gütegrad des Verdichters erfasst !

Gütegrad Verdichter: $\eta_G = \frac{w_{t,rev}}{w_{t,i}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$ **(6.130)**

7. Feuchte Luft

7.1 Grundlagen

7.2 Zustandsgrößen feuchter Luft

relative Feuchte: $\varphi = \frac{p_S}{p_D(T)}$ $\varphi = \frac{p_D}{p_S} = \frac{\rho_D}{\rho_S}$ **(7.1+7.4)**

Partialdruck des Wasserdampfes: $p_D = \rho_D R_D T$ $p_S = \rho_S R_D T$ **(7.2+7.3)**

Gesamtdruck: $p = p_D + p_L$ **(7.5)**

Wassergehalt: $x = \frac{m_{H_2O}}{m_L} = \frac{m_D + m_W + m_E}{m_L} = x_D + x_W + x_E$ **(7.6)**

Sättigungsgrad bei übersättigter Luft: $\Psi = \frac{x}{x_S}$ **(7.7)**

Gesamtmasse der feuchten Luft: $m = m_L + m_{H_2O} = m_L(1 + x)$ **(7.8)**

für ungesättigte Luft (x = x_D < x_S; x_W = x_E = 0) gilt: $p_L \cdot V = m_L \cdot R_L \cdot T$ $p_D \cdot V = m_D \cdot R_D \cdot T$ **(7.9+7.10)**

Verhältnis der Partialdrücke: $\frac{p_D}{p_L} = \frac{m_D R_D}{m_L R_L} = \frac{m_D M_L}{m_L M_D} = x_D \frac{M_L}{M_D}$ **(7.11)**

Nach einsetzten der Werte folgt: $x_D = 0{,}622 \cdot \frac{p_D}{p_L}$ **(7.12)**

$$x_D = 0{,}622 \frac{p_D}{p - p_D} = 0{,}622 \frac{\varphi \cdot p_S}{p - \varphi \cdot p_S} \qquad \textbf{(7.13)}$$

relative Feuchte in Abhängigkeit des Wassergehalts: $\varphi = \frac{x_D \cdot p}{p_S \cdot (0{,}622 + x_D)}$ **(7.14)**

Partialdruck der trockenen Luft: $p_L = \frac{0{,}622}{0{,}622 + x_D} p$ **(7.15)**

Partialdruck des Wasserdampfes: $p_D = \frac{x_D}{0{,}622 + x_D} p$ **(7.16)**

Dichte der ungesättigten feuchten Luft: $\rho = \frac{m_L + m_D}{V} = \rho_L + \rho_D$ **(7.17)**

$$\rho = \frac{p}{R_L T} - \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_D} \right) \frac{p_D}{T} \qquad \textbf{(7.20)}$$

Dichte trockene Luft: $\rho_L = \frac{m_L}{V} = \frac{p_L}{R_L \cdot T}$ **(7.18)**

Dichte Wasserdampf: $\rho_D = \frac{m_D}{V} = \frac{p_D}{R_D \cdot T}$ **(7.19)**

für gesättigte Luft gilt:

Wassergehalt: $x_D = 0{,}622 \frac{p_S}{p - p_S}$ **(7.21)**

Tritt Wasser in fester und/oder flüssiger Phase auf gilt:

$$x_D = x_S \qquad \textbf{(7.22)}$$

$$x = x_S + x_W + x_E \qquad \textbf{(7.23)}$$

$$p_D = p_S \qquad \textbf{(7.24)}$$

Enthalpie der feuchten Luft: $\boxed{m_L \cdot h_{1+x} = m_L \cdot h_L + m_D \cdot h_D + m_W \cdot h_W + m_E \cdot h_E}$ **(7.25)**

$$\boxed{h_{1+x} = h_L + x_D \cdot h_D + x_W \cdot h_W + x_E \cdot h_E} \quad \textbf{(7.26)}$$

für ungesättigte bis maximal gesättigte Luft ($x \leq x_s$) gilt:

Enthalpie: $\boxed{h_{1+x} = c_{p,L} \vartheta + x_D \left(c_{p,D} \cdot \vartheta + r_{Verd} \right)}$ **(7.27)**

Für x > x_S (Wasser in flüssiger Form): $\boxed{h_{1+x} = c_{p,L} \cdot \vartheta + x_S \left(c_{p,D} \cdot \vartheta + r_{Verd} \right) + \left(x - x_S \right) \cdot c_W \cdot \vartheta}$ **(7.28)**

Für x > x_S (Wasser in fester Form): $\boxed{h_{1+x} = c_{p,L} \cdot \vartheta + x_S \left(c_{p,D} \cdot \vartheta + r_{Verd} \right) + \left(x - x_S \right) \cdot \left(c_E \cdot \vartheta - r_{schm} \right)}$ **(7.29)**

Für die Gleichungen (7.27) bis (7.29) gelten folgende Werte:

Bezugstemperatur zur Berechnung der Enthalpie: ϑ **= 0°C**

$$\boxed{c_{p,L} = 1{,}00 \frac{kJ}{kg \cdot K}}$$

$$\boxed{c_{p,D} = 1{,}86 \frac{kJ}{kg \cdot K}}$$

$$\boxed{c_W = 4{,}19 \frac{kJ}{kg \cdot K}}$$

$$\boxed{c_E = 2{,}05 \frac{kJ}{kg \cdot K}}$$

$$\boxed{r_{Verd} = 2501 \frac{kJ}{kg}}$$

$$\boxed{r_{schm} = 333 \frac{kJ}{kg}}$$

7.3 Mollier-h,x-Diagramm:

Steigungen der einzelnen Geraden im Mollier-h,x-Diagramm:

Bereich der ungesättigten bzw. gerade gesättigten Luft:

$$\boxed{\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x} \right)_{\vartheta} = c_{p,D} \cdot \vartheta + r_{Verd}} \quad \textbf{(7.30)}$$

Steigung der Isotherme oberhalb des Eispunktes: $\boxed{\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x} \right)_{\vartheta} = c_W \cdot \vartheta}$ **(7.31)**

für ϑ = 0° gilt: $\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x}\right)_{\vartheta=0°C} = 0$ **(7.32)**

Steigung der Isotherme im Eisnebelgebiet (ϑ < 0°C) $\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x}\right)_{\vartheta} = c_E \cdot \vartheta - r_{Schm}$ **(7.33)**

Steigung der Eisnebelisotherme bei 0°C: $\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x}\right)_{\vartheta=0°C} = -r_{Schm}$ **(7.34)**

7.4 Zustandsänderungen feuchter Luft

7.4.1 Mischung von Luftströmen

Massenbilanz: $\dot{m}_{L,1} + \dot{m}_{L,2} = \dot{m}_{L,M}$ **(7.35)**

$\dot{m}_{L,1} \cdot x_1 + \dot{m}_{L,2} \cdot x_2 = \dot{m}_{L,M} \cdot x_M$ **(7.36)**

Energiebilanz: $\dot{m}_{L,1} \cdot (h_{1+x})_1 + \dot{m}_{L,2} \cdot (h_{1+x})_2 = \dot{m}_{L,M} \cdot (h_{1+x})_M$ **(7.37)**

Wassergehalt der Mischluft: $x_M = \frac{\dot{m}_{L,1} \cdot x_1 + \dot{m}_{L,2} \cdot x_2}{\dot{m}_{L,1} + \dot{m}_{L,2}}$ **(7.38)**

Enthalpie der Mischluft: $(h_{1+x})_M = \frac{\dot{m}_{L,1} \cdot (h_{1+x})_1 + \dot{m}_{L,2} \cdot (h_{1+x})_2}{\dot{m}_{L,1} + \dot{m}_{L,2}}$ **(7.39)**

Verhältnis der beiden Massenströme: $\frac{\dot{m}_{L,2}}{\dot{m}_{L,1}} = \frac{x_1 - x_M}{x_M - x_2} = \frac{(h_{1+x})_1 - (h_{1+x})_M}{(h_{1+x})_M - (h_{1+x})_2}$ **(7.40)**

7.4.2 Erwärmung feuchter Luft

zugeführte Wärme im ungesättigten Gebiet:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_L \cdot \left[(h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1\right] = \dot{m}_L \cdot \left(c_{p,L} + x \cdot c_{p,D}\right) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad \textbf{(7.41)}$$

7.4.3 Kühlung und Entfeuchtung

ausgeschiedenen Kondensatmenge: $\Delta\dot{m}_W = \dot{m}_L \cdot \Delta x = \dot{m}_L \cdot (x_1 - x_{4'})$ **(7.42)**

abzuführender Wärmestrom: $\dot{Q}_{14} = \dot{m}_L \cdot \left[(h_{1+x})_4 - (h_{1+x})_1\right]$ **(7.43)**

7.4.4 Befeuchtung mit Wasser oder Dampf

Wasserbilanz: $\dot{m}_L \cdot x_1 + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_L \cdot x_M$ **(7.44)**

Wassergehalt des Gemisches: $x_M = x_1 + \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_L}$ **(7.45)**

Energiebilanz: $\dot{m}_L \cdot (h_{1+x})_1 + \dot{m}_{H_2O} \cdot h_{H_2O} = \dot{m}_L \cdot (h_{1+x})_M$ **(7.46)**

Enthalpie des Gemisches: $(h_{1+x})_M = (h_{1+x})_1 + \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_L} \cdot h_{H_2O}$ **(7.47)**

(7.45) in (7.47) eingesetzt: $\frac{(h_{1+x})_M - (h_{1+x})_1}{x_M - x_1} = \frac{\Delta h_{1+x}}{\Delta x} = h_{H_2O}$ **(7.48)**

8. Verbrennungsprozesse

8.1 Verbrennungsrechnung für feste und flüssige Brennstoffe

Bei der Verbrennung beteiligte Produkte: Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Schwefel (S), Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Wasseranteil (W), Ascheanteil (A)

Brennstoffzusammensetzung: $\xi_C + \xi_H + \xi_S + \xi_O + \xi_N + \xi_W + \xi_A = 1$ **(8.1)**

Massenanteile auf Brennstoffmasse bezogen: $\xi_C = \frac{m_C}{m_B}$ $\xi_H = \frac{m_H}{m_B}$ **(8.2+8.3)**

$\xi_S = \frac{m_S}{m_B}$ $\xi_O = \frac{m_O}{m_B}$ **(8.4+8.5)**

$\xi_N = \frac{m_N}{m_B}$ $\xi_W = \frac{m_W}{m_B}$ **(8.6+8.7)**

$\xi_A = \frac{m_A}{m_B}$ **(8.8)**

8.1.1 Sauerstoff - Luftbedarf

Reaktionen bei vollständiger Verbrennung: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ **(8.9)**

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ **(8.10)**

$S + O_2 \rightarrow SO_2$ **(8.11)**

unter Angabe der Stoffmengen: $1mol\ C + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ CO_2$ **(8.12)**

$2mol\ H_2 + 1mol\ O_2 \rightarrow 2mol\ H_2O$ **(8.13)**

$1mol\ S + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ SO_2$ **(8.14)**

bezogen auf die Bestandteile des Brennstoffs: $$\boxed{1mol\ C + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ CO_2} \quad (8.15)$$

$$\boxed{1mol\ H\ \ + \frac{1}{4} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{2} mol\ H_2O} \quad (8.16)$$

$$\boxed{1mol\ S + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ SO_2} \quad (8.17)$$

Berechnung der Stoffmenge über die Molmasse: $$\boxed{12g\ C + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ CO_2} \quad (8.18)$$

$$\boxed{1g\ H\ \ + \frac{1}{4} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{2} mol\ H_2O} \quad (8.19)$$

$$\boxed{32g\ S + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ SO_2} \quad (8.20)$$

Bezug auf die Masse des zu oxidierenden Reaktionspartners:

$$\boxed{1g\ C + \frac{1}{12} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{12} mol\ CO_2} \quad (8.21)$$

$$\boxed{1g\ H\ \ + \frac{1}{4} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{2} mol\ H_2O} \quad (8.22)$$

$$\boxed{1g\ S + \frac{1}{32} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{32} mol\ SO_2} \quad (8.23)$$

Mindestsauerstoffmenge: $$\boxed{O_{\min} = \frac{1}{12}\xi_C + \frac{1}{4}\xi_H + \frac{1}{32}\xi_S - \frac{1}{12}\xi_O} \text{ in } \boxed{\left[\frac{kmol\ O_2}{kg\ Brennstoff}\right]} \quad (8.24)$$

Mindestluftbedarf: $$\boxed{L_{\min} = \frac{O_{\min}}{\gamma_{O_2,L}}} \quad (8.25)$$

Luftverhältnis: $$\boxed{L = \lambda \cdot L_{\min}} \quad (8.26)$$

$$\boxed{O = \lambda \cdot O_{\min}} \quad (8.27)$$

8.1.2 Rauchgasmenge und –zusammensetzung

$$\boxed{1mol\ C + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ CO_2} \quad (8.28)$$

$$\boxed{2mol\ H_2 + 1mol\ O_2 \rightarrow 2mol\ H_2O} \quad (8.29)$$

$$\boxed{1mol\ S + 1mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ SO_2} \quad (8.30)$$

$$\boxed{1mol\ N\ \ \rightarrow \frac{1}{2} mol\ N_2} \quad (8.31)$$

werden die Ausgangsstoffe auf die Masse bezogen gilt:

$$1g\ C + \frac{1}{12} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{12} mol\ CO_2 \quad (8.32)$$

$$1g\ H + \frac{1}{4} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{2} mol\ H_2O \quad (8.33)$$

$$1g\ S + \frac{1}{32} mol\ O_2 \rightarrow \frac{1}{32} mol\ SO_2 \quad (8.34)$$

$$1g\ N \rightarrow \frac{1}{28} mol\ N_2 \quad (8.35)$$

trockene Rauchgasmenge (H_2O kondesiert): $\frac{n_{R,tr}}{m_B} = \frac{n_{CO_2,R}}{m_B} + \frac{n_{SO_2,R}}{m_B} + \frac{n_{N_2,R}}{m_B} + \frac{n_{O_2,R}}{m_B}$ **(8.36)**

feuchte Rauchgasmenge (H_2O liegt dampfförmig vor):

$$\frac{n_{R,f}}{m_B} = \frac{n_{CO_2,R}}{m_B} + \frac{n_{H_2O,R}}{m_B} + \frac{n_{SO_2,R}}{m_B} + \frac{n_{N_2,R}}{m_B} + \frac{n_{O_2,R}}{m_B} \quad (8.37)$$

8.2 Verbrennungsrechnung für gasförmige Brennstoffe

Brennstoffzusammensetzung in Volumenanteilen: $\gamma_i = \frac{n_i}{n_B}$ $\sum_i \gamma_i = 1$ **(8.38+8.39)**

8.2.1 Sauerstoff- und Luftbedarf

Gasförmige Brennstoffe bestehen aus: C_nH_m, CO, CO_2, H_2S, O_2, N_2, SO_2 und H_2O

Reaktionsgleichungen der an der Verbrennung teilnehmenden Komponenten:

$$1mol\ C_nH_m + \left(n + \frac{m}{4}\right) mol\ O_2 \rightarrow n\ mol\ CO_2 + \frac{m}{2} mol\ H_2O \quad (8.40)$$

$$1mol\ H_2 + \frac{1}{2}\ mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ H_2O \quad (8.41)$$

$$1mol\ CO + \frac{1}{2}\ mol\ O_2 \rightarrow 1mol\ CO_2 \quad (8.42)$$

$$1\mathrm{mol\ H_2S} + \frac{3}{2}\mathrm{mol\ O_2} \rightarrow 1\mathrm{mol\ H_2O} + 1\mathrm{mol\ SO_2} \quad (8.43)$$

molarer Sauerstoffbedarf: $O_{\min,m} = \gamma_{C_nH_m} \cdot \left(n + \frac{m}{4}\right) + \gamma_{H_2} \cdot \frac{1}{2} + \gamma_{CO} \cdot \frac{1}{2} + \gamma_{H_2S} \cdot \frac{3}{2} - \gamma_{O_2}$ **(8.44)**

auf die Masse bezogener Sauerstoffbedarf: $O_{\min} = \frac{O_{\min,m}}{M_B}$ **(8.45)**

8.2.2 Rauchgasmenge und –zusammensetzung

siehe Tabelle 8.2

Für die Ermittlung von Menge und Zusammensetzung des trockenen und feuchten Rauchgases gelten die Gleichungen (8.36+8.37).

8.3 Energiebilanz der Verbrennung

Brennwert oder oberer Heizwert: $\Delta h_O = \Delta h_u + \frac{m_{H_2O}}{m_B} \cdot r_{Verd}$ **(8.46)**