Zustandsänderungen

Einheiten

Druck	$1\,\text{Pa} = 1\,\text{Nm}^{-2} = 1\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ $1\,\text{bar} = 10^5\,\text{Pa}$
Kraft	$1\,\text{N} = 1\,\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Energie	$1\,\text{J} = 1\,\text{Nm} = 1\,\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2} = 1\,\text{Ws}$
Leistung	$1\,\text{W} = \text{J}\cdot\text{s}^{-1} = 1\,\text{J}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$
Normdruck	$p_n = 1{,}01325\,\text{bar}$
Normtemperatur	$T_n = 273{,}15\,\text{K}$
	$1000\,\text{l} = 1\,\text{m}^3 = 1000\,\text{kg}$

Grundlagen der Thermodynamik

Nutzarbeit	$w_{n12} = w_{v12} + p_b \cdot (v_2 - v_1)$
Volumenänderungsarbeit	$w_{v12} = -\int p\,dv$
zugeführte Arbeit	$w_{g12} = w_{v12} + w_{diss12}$
Wärme (nichtadiabates System)	$q_{12} + w_{g12} = u_2 - u_1$
Arbeit (offenes System)	$w_{i12} = w_{t12} + w_{diss12}$
technische Arbeit	$w_t = \int v\,dp$
Wärme und Arbeit (zugeführte Energie wandelt sich beim offenen System in Enthalpie sowie kinetische und potentielle Energie um)	$Q_{12} + W_{i12} = H_2 - H_1 + \frac{m\left(c_2^2 - c_1^2\right)}{2} + m\cdot g\cdot\left(z_2 - z_1\right)$ $q_{12} + w_{i12} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g\cdot\left(z_2 - z_1\right)$

Zustandsänderungen

Gasgleichung	$p\cdot v = R\cdot T$
spezifisches Volumen	$v = \frac{V}{m} \rightarrow p\cdot V = m\cdot R\cdot T \quad m = \frac{p\cdot V}{R\cdot T}$
spezielle Gaskonstante (Luft)	$R_L = 0{,}2827\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
bei konstanter Temperatur gilt	$p\cdot V = \text{const.}$
bei konstantem Druck gilt	$\frac{V}{T} = \text{const.}$
Normvolumen	$V_N = \frac{m\cdot R\cdot T_N}{p_N}$
innere Energie	$u_2 - u_1 = c_v\cdot(T_2 - T_1)$
Enthalpie	$h_2 - h_1 = c_p\cdot(T_2 - T_1)$
Wärmemenge	$Q_{12} = m\cdot c_v\cdot(T_2 - T_1)$
spezielle Wärmekapazität	konstantes Volumen: c_v konstanter Druck: c_p
Isentropenexponent	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$

Prozesse und ZÄ im geschlossenen System

Isochore

Kennzeichen	$V = const. \quad \Rightarrow \quad dv = 0 \quad \Rightarrow \quad w_{v12} = 0$
Zustandsgleichung	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
Erster Hauptsatz	$dq = c_v\ dT \quad \Rightarrow \quad q_{12} = u_2 - u_1 = c_v \cdot (T_2 - T_1)$
Bei isochorer ZÄ dient die zugeführte Wärme allein zur Erhöhung der inneren Energie.	

Isobare

Kennzeichen	$p = const. \quad \Rightarrow \quad dp = 0 \quad \Rightarrow \quad dq = c_p\ dT$
Zustandsgleichung	$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$
Erster Hauptsatz	$dq - p\ dv = du \quad \Rightarrow \quad q_{12} + w_{v12} = u_2 - u_1$
Volumenänderungsarbeit	$w_{v12} = p \cdot (v_1 - v_2) = R \cdot (T_1 - T_2)$
zu- oder abgeführte Wärme	$q_{12} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$
Wird Volumenänderungsarbeit zugeführt, wird Wärme abgeführt. Die Wärmeabfuhr wird dabei aus der Enthalpieerniedrigung des Systems bestritten. Die innere Energie wird um die Differenz zwischen abgeführter Wärme und zugeführter Volumenänderungsarbeit reduziert.	

Isotherme

Kennzeichen	$T = const. \quad \Rightarrow \quad dT = 0 \quad \Rightarrow \quad du = 0$
Zustandsgleichung	$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$
Erster Hauptsatz	$dq - dw_v = 0 \quad \Rightarrow \quad q_{12} = -w_{v12} = \int p\ dv$
Volumenänderungsarbeit	$w_{v12} = R \cdot T \cdot \ln \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$
Die Volumenänderungsarbeit hängt nur von der Temperatur und dem Druckverhältnis ab, nicht vom Ausgangsdruck. Die innere Energie ändert sich nicht.	

Isentrope

Kennzeichen	$q_{12} = 0 \quad \Rightarrow \quad dq = 0$
Zustandsgleichung	$\frac{p_1 \cdot v_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot v_2}{T_2}$
Erster Hauptsatz	$-p\,dv = du \quad \Rightarrow \quad w_{v12} = u_2 - u_1 = c_v \cdot (T_2 - T_1)$
Isentropenexponent	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ $\quad p_2 = \frac{p_1}{\sqrt[\frac{\kappa-1}{\kappa}]{\frac{T_1}{T_2}}}$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa}$ $\quad v_2 = v_1 \cdot \sqrt[\kappa]{\frac{p_1}{p_2}}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1}$ $\quad T_2 = \frac{T_1}{\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1}}$
Volumenänderungsarbeit	$w_{v12} = u_2 - u_1$ $w_{v12} = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) = \frac{R \cdot T_1}{\kappa - 1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$ $= \frac{1}{\kappa - 1} \cdot (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1)$
Die zugeführte Volumenänderungsarbeit dient ausschließlich der Erhöhung der inneren Energie des Systems	
Auch bei der isentropen Zustandsänderung ist die Volumenänderungsarbeit nur abhängig von der Ausgangstemperatur und dem Druckverhältnis	

Polytrope

Kennzeichen	keine besonderen Einschränkungen	
Zustandsgleichung	$\frac{p_1 \cdot v_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot v_2}{T_2}$	$T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2 \cdot T_1}{p_1 \cdot v_1}$
Erster Hauptsatz	$dq - p\,dv = du \quad \Rightarrow \quad q_{12} + w_{v12} = u_2 - u_1$	
Polytropenexponent	$n = \frac{\ln \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\ln \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right) - \ln \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$	
Gemäß dem ersten Hauptsatz wird zugeführte Wärme und Volumenänderungsarbeit in innere Energie umgesetzt. Es kann Arbeit verrichtet und Wärme zu- oder abgeführt werden. Es gelten für die Polytrope die Gleichungen für die Isentrope, ausgenommen $w_{v12} = u_2 - u_1$. Es ist lediglich der Isentropenexponent κ durch den Polytropenexponenten n zu ersetzen.		
Die Polytrope ist eine allgemeine Zustandsänderung ohne besondere Einschränkungen. Für alle Zustandsänderungen gilt: $p \cdot v^n$ = const.		
Isochore	$v = \text{const.}$	$n = \infty$
Isotherme	$p \cdot v = \text{const.}$	$n = 1$
Isobare	$p = \text{const.}$	$n = 0$
Isentrope	$p \cdot v^{\kappa} = \text{const.}$	$n = \kappa$

© BK

Prozesse und ZÄ in offenen Systemen

Es werden nur stationäre reversible Prozesse unter Vernachlässigung der kinetischen und potentiellen Energie behandelt, wobei die Gleichungen bezüglich der Zustandsgrößen und der zu- oder abgeführten Wärme der Prozesse und ZÄ im geschlossenen System gelten und für die reversible technische Arbeit w_t die folgenden Beziehungen:	
Isochore	$w_{t12} = \int v\,dp = v \cdot (p_2 - p_1) = R \cdot (T_2 - T_1)$
Isobare	$v\,dp = 0 \quad \Rightarrow \quad w_{t12} = 0$
Isotherme	$w_{t12} = \int v\,dp = \int R \cdot T \cdot \frac{dp}{p} = R \cdot T \cdot \left(\ln \frac{p_2}{p_1} \right) = w_{v12}$
Isentrope	$w_{t12} = h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1)$ $w_{v12} = u_2 - u_1 = c_v \cdot (T_2 - T_1)$ $\Rightarrow \frac{w_{t12}}{w_{v12}} = \kappa$
Polytrope	$q_{12} + w_{t12} = h_2 - h_1$ $q_{12} + w_{v12} = u_2 - u_1$ $\Rightarrow \frac{w_{t12}}{w_{v12}} = n$
bei der Polytropen gilt für w_{v12}	$w_{v12} = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{R \cdot T_1}{n-1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$ $= \frac{1}{n-1} \cdot (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1)$

Kreisprozess

Da am Ende des Prozesses der Ausgangspunkt und damit die Ausgangstemperatur wieder erreicht werden, ändert sich über den gesamten Kreisprozess gesehen die innere Energie und die Enthalpie nicht.	
geschlossenes System	$dq = -dw_v \quad \Rightarrow \quad \sum q_i = -\sum w_{vi}$
offenes System	$dq = -dw_t \quad \Rightarrow \quad \sum q_i = -\sum w_{ti}$
Wirkungsgrad	$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = \frac{\lvert w_t \rvert}{q_{zu}} = \frac{\dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{th}}{\dot{Q}_{zu}}$
Carnot-Wirkungsgrad	$\eta_c = 1 - \frac{T_u}{T_o}$
Wärmemenge (bei der Verbrennung)	$\dot{Q} = \dot{m}_B \cdot H_u$
Leistung	$P_{th} = \dot{V}_G \cdot H_u \cdot \eta = \dot{m}_L \cdot q_{zu} \cdot \eta_{th} = \dot{m}_L \cdot w_{t12}$

Kältemaschine und Wärmepumpe

Kältemaschine	Nutzen: q_{zu} Aufwand: w_t Energiebilanz: $q_{ab} = q_{zu} + w_t$
Leistungsziffer	$\varepsilon_{cKM} = \frac{q_{zu}}{w_t} = \frac{q_{zu}}{q_{ab} - q_{zu}} = \frac{T_u}{T_o - T_u}$
Wärmepumpe	Nutzen: q_{ab} Aufwand: w_t Energiebilanz: $q_{ab} = q_{zu} + w_t$
Leistungsziffer	$\varepsilon_{cWP} = \frac{q_{ab}}{w_t} = \frac{q_{ab}}{q_{ab} - q_{zu}} = \frac{T_o}{T_o - T_u}$
Leistung	$P_{WP} = \frac{P_H}{\varepsilon_{cWP}}$

© BK

Wärme- und Verbrennungskraftanlagen

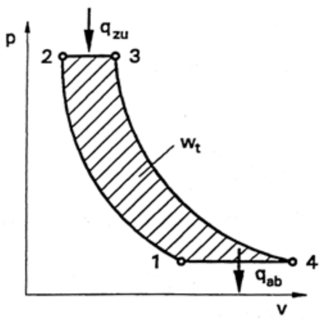
Wirkungsgrade

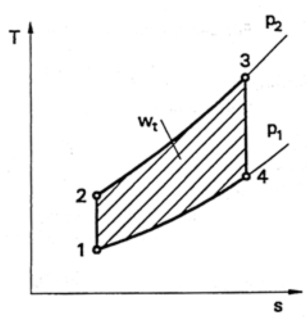
therm. WG des reversiblen Prozesses	$\eta_{th\,rev} = \frac{\dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab\,rev}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{th}}{\dot{Q}_{zu}}$
therm. WG des realen Prozesses	$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_i}{\dot{Q}_{zu}}$
innerer Wirkungsgrad	$\eta_i = \frac{P_i}{P_{th}}$
mechanischer Wirkungsgrad	$\eta_m = \frac{P_e}{P_i}$
effektiver Wirkungsgrad	$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{Q}_{zu}}$ $\eta_e = \frac{P_e}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{th}}{\dot{Q}_{zu}} \cdot \frac{P_i}{P_{th}} \cdot \frac{P_e}{P_i} = \eta_{th\,rev} \cdot \eta_i \cdot \eta_m = \eta_{th} \cdot \eta_m$

Gesetzmäßigkeiten der Zustandsänderungen

Gasgleichung	$p \cdot v = R \cdot T, \qquad p \cdot V = m \cdot R \cdot T$
Isobare	$q_{12} = h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1), \quad w_{v12} = p \cdot (v_1 - v_2)$
Isochore	$q_{12} = u_2 - u_1 = c_v \cdot (T_2 - T_1), \quad w_{t12} = v \cdot (p_2 - p_1)$
Isentrope	$w_{t12} = h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1), \quad w_{v12} = \frac{w_{t12}}{\kappa}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}$
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = \frac{\lvert w_t \rvert}{q_{zu}}$
Stoffwerte für Luft	$R_L = 0{,}287 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ $c_p = 1{,}0 \frac{kJ}{kg \cdot K}, \quad c_v = 0{,}717 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

Gasturbine

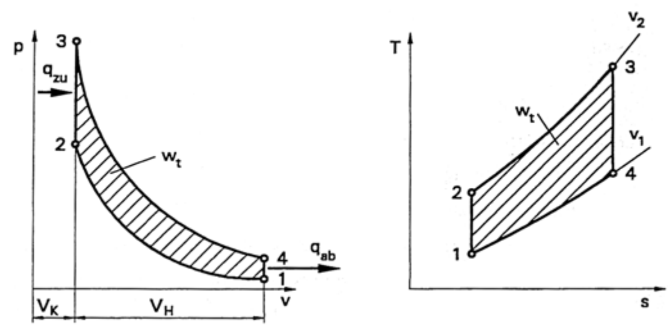




1-2 Isentrope Verdichtung
2-3 Isobare Wärmezufuhr
3-4 Isentrope Expansion
4-1 Isobare Wärmeabfuhr

technische Arbeit	$\lvert w_t \rvert = q_{zu} - q_{ab} = q_{23} - \lvert q_{41} \rvert$
Wärmezufuhr	$q_{zu} = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p \cdot (T_3 - T_2)$
Wärmeabfuhr	$q_{ab} = \lvert q_{41} \rvert = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1)$
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \dfrac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = \dfrac{\lvert w_t \rvert}{q_{zu}} = \dfrac{\lvert w_{tT} - w_{tV} \rvert}{q_{zu}} = 1 - \dfrac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\dfrac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$
optimale Temperatur	$T_{2opt} = \sqrt{T_1 \cdot T_3}$
optimales Druckverhältnis	$\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)_{opt} = \left(\dfrac{T_{2opt}}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$
theoretische Leistung	$P_{th} = \dot{m}_L \cdot \lvert w_t \rvert = \dot{m}_L \cdot q_{zu} \cdot \eta_{th}$
Brennstoffverbrauch	$\dot{m}_L \cdot q_{zu} = \dot{Q}_{zu} = \dot{m}_B \cdot H_u$
isentrope Entspannung	$\dfrac{T_3}{T_4} = \left(\dfrac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$

Ottoprozess

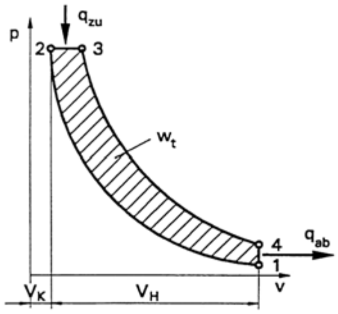


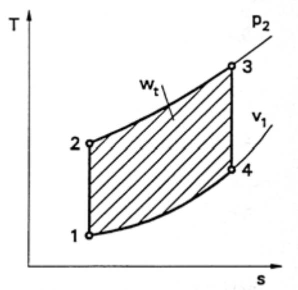
1-2 Isentrope Verdichtung
2-3 Isochore Wärmezufuhr
3-4 Isentrope Expansion
4-1 Isochore Wärmeabfuhr

V_H = Hubvolumen
V_K = Kompressionsvolumen

technische Arbeit	$\lvert w_t \rvert = q_{zu} - q_{ab} = q_{23} - \lvert q_{41} \rvert$
Wärmezufuhr	$q_{zu} = q_{23} = u_3 - u_2 = c_v \cdot (T_3 - T_2)$
Wärmeabfuhr	$q_{ab} = \lvert q_{41} \rvert = u_4 - u_1 = c_v (T_4 - T_1)$
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \dfrac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = \dfrac{\lvert w_t \rvert}{q_{zu}} = 1 - \dfrac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \dfrac{q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \dfrac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$
Verdichtungsverhältnis	$\varepsilon = \dfrac{V_H + V_K}{V_K} = \dfrac{v_1}{v_2}$
theoretische Leistung	$P_{th} = \dfrac{\dot{m}_L \cdot \lvert w_t \rvert \cdot n}{2} = \dfrac{\dot{m}_L \cdot q_{zu} \cdot \eta_{th} \cdot n}{2} = \dfrac{\dot{Q}_{zu} \cdot \eta_{th} \cdot n}{2}$
Drehzahl	$n \quad \left[\min^{-1}\right]$
Brennstoffverbrauch	$\dfrac{\dot{m}_L \cdot q_{zu} \cdot n}{2} = \dot{m}_B \cdot H_u$

Dieselprozess



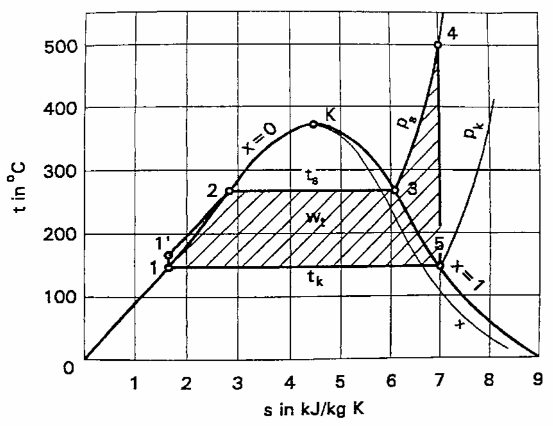


1-2 Isentrope Verdichtung
2-3 Isobare Wärmezufuhr
3-4 Isentrope Expansion
4-1 Isochore Wärmeabfuhr

V_H = Hubvolumen
V_K = Kompressionsvolumen

technische Arbeit	$\left\|w_t\right\| = q_{zu} - q_{ab} = q_{23} - \left\|q_{41}\right\|$
Wärmezufuhr	$q_{zu} = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p \cdot (T_3 - T_2)$
Wärmeabfuhr	$q_{ab} = \left\|q_{41}\right\| = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = \frac{\left\|w_t\right\|}{q_{zu}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa \cdot (\varphi - 1)}$ $= 1 - \frac{q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)}$
Verdichtungsverhältnis	$\varepsilon = \frac{V_H + V_K}{V_K} = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$
Einspritzverhältnis	$\varphi = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$ $\qquad V_1 = \frac{m \cdot R_L \cdot T_1}{p_1}$
isentrope Entspannung	$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{\varphi}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1}$
Wärmezufuhr im Volllastbereich	$q_{zu} = c_p \cdot (T_3 - T_2) = c_p \cdot T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2 - 1}\right) = c_p \cdot T_2 \cdot (\varphi - 1)$
theoretische Leistung	$P_{th} = \frac{\dot{m}_L \cdot \left\|w_t\right\| \cdot n}{2} = \frac{\dot{m}_L \cdot q_{zu} \cdot \eta_{th} \cdot n}{2} = \frac{\dot{Q}_{zu} \cdot \eta_{th} \cdot n}{2}$
Drehzahl	$n \quad \left[\min^{-1}\right]$
Brennstoffverbrauch	$\frac{\dot{m}_L \cdot q_{zu} \cdot n}{2} = \dot{m}_B \cdot H_u$

Dampfturbine



1-1' Isentrope Druckerhöhung in der Speisewasserpumpe. Dieser Vorgang wird im Weiteren vernachlässigt und damit fallen die Punkte 1 und 1' zusammen.

1'-4 Isobare Wärmezufuhr

- 1'-2 Erwärmung des Wassers, ausgehend von der Speisewassertemperatur t_{sp}, bis zur Siedetemperatur t_s
- 2-3 Verdampfungsvorgang
- 3-4 Überhitzung des Dampfes

4-5 Isentrope Expansion

5-1 Isobare Wärmeabfuhr (Kondensation)

technische Arbeit	$\lvert w_t \rvert = q_{zu} - q_{ab}$
Wärmezufuhr	$q_{zu} = h_4 - h_1$
Wärmeabfuhr	$q_{ab} = \lvert q_{51} \rvert = h_5 - h_1 \quad \Rightarrow \quad \lvert w_t \rvert = h_4 - h_5$
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \frac{q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \frac{h_5 - h_1}{h_4 - h_1} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_1}$
Enthalpie Wasser	$h_w = c_w \cdot t_w$
theoretische Leistung	$P_{th} = \dot{m}_D \cdot \lvert w_t \rvert = \dot{m}_D \cdot q_{zu} \cdot \eta_{th} = \dot{Q}_{zu} \cdot \eta_{th}$
Brennstoffverbrauch	$\dot{m}_D \cdot q_{zu} = \dot{m}_B \cdot H_u$

Gemische

Gemische idealer Gase

Massenanteil	$m = \sum m_i \qquad \sum g_i = 1$ $g_i = \frac{m_i}{m}$
Volumetrische Zusammensetzung	$V = \sum V_i \qquad \sum r_i = 1$ $r_i = \frac{V}{V_i}$
Partialdruck	$p_i \cdot V = m_i \cdot R_i \cdot T \qquad \sum p_i = p$ $\frac{p_i}{p} = \frac{V_i}{V} = r_i$
Gaskonstante der Gasmischung	$R_m = \sum g_i \cdot R_i$
Dichte der Gasmischung	$\rho_m = \sum r_i \cdot \rho_i$
Spezifische Wärmen der Gasmischung	$c_{vm} = \sum g_i \cdot c_{vi} \qquad c_{pm} = \sum g_i \cdot c_{pi}$

Feuchte Luft

Wassergehalt	$x = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_L}$ $x = 0{,}622 \cdot \frac{p_d}{(p - p_d)}$
Partialdruck	$p_d = \frac{p \cdot x}{(0{,}622 + x)}$
Wassergehalt (gesättigte feuchte Luft)	$x_s = 0{,}622 \cdot \frac{p_s}{(p - p_s)} = x_s(p,t)$
relative Feuchte	$\varphi = \frac{p_d(t)}{p_s(t)} = \frac{p_s(t_T)}{p_s(t)}$ $x = 0{,}622 \cdot \frac{p_s(t)}{\frac{p}{\varphi} - p_s(t)}$ $\varphi = \frac{x}{0{,}622 + x} \cdot \frac{p}{p_s(t)}$
Wärmestrom	$\dot{Q} = \dot{m}_L \left[(h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1 \right] \qquad [kW]$
Spezifisches Volumen feuchter Luft	$v_{1+x} = \frac{\dot{V}}{\dot{m}_L} = 0{,}4615 \frac{kJ}{kg_d} \cdot \frac{T}{p} \cdot (0{,}622 + x) \qquad \left[\frac{m^3}{kg} \right]$
Spezifische Enthalpie feuchter Luft	
Wasser ist dampfförmig, feuchte Luft ungesättigt $(x \le x_s)$	$h_{1+x} = c_{pL} \cdot t + x(r_o + c_{pd} \cdot t)$
gesättigte feuchte Luft enthält flüssiges Wasser $(x > x_s)$	$h_{1+x} = c_{pL} \cdot t + x_s(r_o + c_{pd} \cdot t) + (x - x_s) \cdot c_w \cdot t$
gesättigte feuchte Luft, Temp. unter 0°C, enthält Eis $(x > x_s, t < 0°C)$	$h_{1+x} = c_{pL} \cdot t + x_s(r_o + c_{pd} \cdot t) + (x - x_s) \cdot (-\sigma + c_{eis} \cdot t)$

Stoffwerte:

$c_{pL} = 1{,}0 \dfrac{kJ}{kg \cdot K}$	$c_{pd} = 1{,}86 \dfrac{kJ}{kg \cdot K}$
$c_w = 4{,}2 \dfrac{kJ}{kg \cdot K}$	$c_{eis} = 2{,}05 \dfrac{kJ}{kg \cdot K}$
$r_o = 2500 \dfrac{kJ}{kg}$	$\sigma = 333 \dfrac{kJ}{kg}$

Wärmeübertragung

Wärmeleitung

λ Wärmeleitfähigkeit $\left[\frac{W}{K \cdot m}\right]$	δ Wandstärke $[mm]$
Wärmestrom	$\dot{Q}_l = -\lambda A \cdot \frac{dt}{dx}$
Wärmewiderstand	$R = \frac{\lvert dt \rvert}{\dot{Q}}$
Wärmeleitung	$R_l = \frac{dx}{\lambda A}$
$\dot{Q} = \frac{(t_1 - t_{n+1})}{R_l}$	$\dot{Q} = \frac{(t_1 - t_{n+1}) \cdot A}{\sum(\delta_i / \lambda_i)}$ $\qquad A = \frac{A \cdot \Delta t}{\delta / \lambda}$
ebene Wand	$R_l = \sum \frac{(\delta_i / \lambda_i)}{A}$ $\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A(t_1 - t_2)}{\delta}$
mehrschichtige Wand	$R_l = \frac{1}{A}\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right) = R_{l1} + R_{l2} + R_{l3}$ $\dot{Q} = \frac{A(t_1 - t_4)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}$
Zylinderwand	$R_l = \frac{1}{2\pi \cdot l} \sum \left[\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{(r_{i+1})}{r_i}\right]$ $\dot{Q} = (t_1 - t_2) \cdot \frac{\lambda \cdot 2\pi \cdot l}{\ln(r_2 / r_1)}$
Kugelwand	$R_l = \frac{1}{4\pi} \sum \left[\frac{1}{\lambda_i}\left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}}\right)\right]$ $\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot 4\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$

Wärmeübergang (Konvektion)

α Wärmeübergangskoeffizient $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	tf Fluidtemperatur tw Wandtemperatur
Wärmestrom	$\dot{Q} = \alpha \cdot A\left(t_f - t_w\right)$
Wärmeübergangswiderstand	$R_ü = \frac{t_f - t_w}{\dot{Q}} = \frac{1}{\alpha \cdot A}$
erzwungene Konvektion	$Nu = Nu\left(Re, Pr\right)$
freie Konvektion	$Nu = \left(Gr, Pr\right)$
$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	$Re = \frac{w \cdot l}{v}$
$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$	$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$
$Gr = \frac{g \cdot Y \cdot \Delta t \cdot l^3}{v^2}$	$Ra = Gr \cdot Pr$
l charakteristische Abmessung [m] (beim Rohr Innendurchmesser d, bei längs angeströmter Platte die Länge l, bei freier Konvektion die Plattenhöhe h, bei unregelmäßigen Kanal hydraulischer Durchmesser $d_h = \frac{4 \cdot A}{U}$ mit A als Fläche und U als benetztem Umfang)	
w mittlere Strömungsgeschwindigkeit	g Fallbeschleunigung
ρ Dichte des Fluids $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	η dyn. Viskosität des Fluids $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$
$v = \frac{\eta}{\rho}$ kinematische Viskosität d. Fluids $\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Y Volumenausdehnungskoeffizient des Fluids $\left[\frac{1}{K}\right]$

Wärmestrahlung

Auftreffen von Strahlung	$a + r + d = 1$ a Absorptionskoeffizient r Reflexionskoeffizient d Durchlasskoeffizient
Wärmestrom	$\dot{Q} = \alpha_s \cdot A_1\left(T_1 - T_2\right)$
Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_s = C_{12} \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$
Strahlungsaustauschkonstante	$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$
Strahlungskonstante für schwarze Körper	$C_s = 5{,}67 \frac{W}{m^2K^4}$
Gesamtenergie	$\dot{Q} = \frac{A \cdot C_s \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$
gesamt Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_{ges} = \alpha_s + \alpha_{konv}$

Wärmedurchgang

Wärmestrom	$\dot{Q} = k \cdot A\left(t_{f1} - t_{f2}\right) = \frac{\left(t_{f1} - t_{f2}\right)}{R_d}$
Wärmedurchgangswiderstand	$R_d = \frac{\left(t_{f1} - t_{f2}\right)}{\dot{Q}} = \frac{1}{k \cdot A}$
Wärmestrom (ebene Wand)	$\dot{Q} = \frac{A\left(t_{f1} - t_{f2}\right)}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$
Wärmedurchgangskoeffizient (ebene Wand)	$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
Wärmestrom (Zylinder)	$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l\left(t_{f1} - t_{f2}\right)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2}}$
Wärmedurchgangskoeffizient (Zylinder)	$k = \frac{1}{\frac{r}{\alpha_1 \cdot r_1} + \sum \frac{r}{\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) + \frac{r}{\alpha_2 \cdot r_2}}$ $k = \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \sum \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2}}$ $r =$ mittlerer Rohrradius
Wärmestrom (Kugelwand)	$\dot{Q} = \frac{4\pi\left(t_{f1} - t_{f2}\right)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1^2} + \frac{1}{\lambda}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2^2}}$
Wärmedurchgangskoeffizient (Kugelwand)	$k = \frac{1}{\frac{r^2}{\alpha_1 \cdot r_1^2} + \sum \frac{r^2}{\lambda_i}\left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}}\right) + \frac{r^2}{\alpha_2 \cdot r_2^2}}$

Wärmeübertrager

Wärmestrom	$\dot{Q} = \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot \Delta t_a = \dot{m}_b \cdot c_{pb} \cdot \Delta t_b$
	m_a Massenstrom von Fluid a c_{pa} spezifische Wärmekapazität von Fluid a Δt_a Temperaturdifferenz $(t_{a1} - t_{a2})$
Wärmestrom gesamt	$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t_m$
mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}\right)}$
maximale Temperaturdifferenz	Gleichstrom: $\Delta t_{max} = t_{max\,außen} - t_{min\,innen}$ Gegenstrom: $\Delta t_{max} = t_{max\,außen} - t_{max\,innen}$
minimale Temperaturdifferenz	Gleichstrom: $\Delta t_{min} = t_{min\,außen} - t_{max\,innen}$ Gegenstrom: $\Delta t_{max} = t_{min\,außen} - t_{min\,innen}$
	$\dot{V}_w = 1 \cdot \left[\frac{m^3}{h}\right] = \dot{m}_w = 1000 \cdot \left[\frac{kg}{h}\right]$