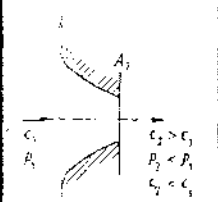


Gasdynamik

Düsenströmung (Isentrope)



S. 313

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot c_{pm} \cdot \Delta t}$$

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \Delta h}$$

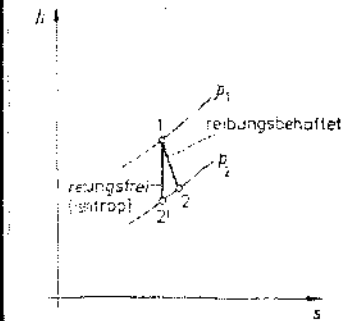
$$\Delta h = h_1 - h_2$$

$$\Delta h = c_{pm} \cdot \Delta t \quad ; \quad \Delta t = T_1 - T_2$$

c_1
 c_2
 h_1
 h_2
 T_1
 T_2

Geschw. im Behälter = 0
Geschw. an der Düse
spez. Enthalpie im Beh.
spez. Enthalpie an Düse
(h-s-Diagramm)
Temp. im Behälter
Temp. an der Düse

m/s
m/s
J/kgK
J/kgK
K
K



$$c_2 = \sqrt{2 \cdot c_{pm} \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \right]}$$

$$c_{2 \text{ fakt.}} = \zeta_D \cdot c_2$$

$$c_{2 \text{ max.}} = \sqrt{2 \cdot c_{pm} \cdot T_1} \quad \text{bei Ausströmen ins Vakuum}$$

c_2
 c_{pm}
 p_1
 p_2
 χ
 T_1
 $c_{2 \text{ max.}}$
 $c_{2 \text{ fakt.}}$
 ζ_D
 T_2

Geschw. an der Düse
mit spez. Wärmekap. S. 68
Druck im Behälter
Druck an der Düse
Verhältnis spez. Wärmeka.
Temperatur im Behälter
max. Düsen-geschw.
wirkl. Düsen-geschw.
Düsenfaktor $\leq 0,97$
Temperatur an der Düse

m/s
J/kgK
bar
bar
1
K
m/s
m/s
1
K

Gleichung nach Saint-Venant

$$c_2^2 - c_1^2 = 2 \cdot \frac{\chi}{\chi-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \right]$$

bei $c_2 \gg c_1$

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\chi}{\chi-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \right]}$$

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

$$\dot{m} = \frac{A \cdot c}{v} = \text{const.} = \dot{V} \cdot \rho \quad ; \quad v = \frac{1}{\rho}$$

$$\dot{m} = A \cdot \psi_s \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_1}{v_1}} = \text{const.} \quad ; \quad v_1 = \frac{T_1 \cdot R}{p_1}$$

bei Wasserdampf v_1 aus hs-Diagramm

\dot{m}
 A
 $v = v_2$
 R
 ρ
 \dot{V}
 $p = p_2$
 $c = c_2$
 T_1

Massenstrom
Kanalquerschnitt
spez. Volumen
spezielle Gaskonst. S. 60
Dichte
Volumenstrom
Druck 1 bar = 10^5 N/m²
Geschwindigkeit
Temperatur

kg/s
m²
m³/kg
J/kgK
kg/m³
m³/s
Pa
m/s
K

Durchflußfunktion

$$\psi_s = \sqrt{\frac{\chi}{\chi-1} \cdot \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\chi+1}{\chi}} \right]}$$

ψ_s
 p

Durchflußfunktion

Laval-Druckverhältnis

$$\frac{p_L}{p_1} = \left(\frac{2}{\chi+1} \right)^{\frac{\chi}{\chi-1}} \quad ; \quad p_L = \left(\frac{p_L}{p_1} \right) \cdot p_1$$

p_L
 p_1
 χ

Druck an der engsten St.
Druck
S. 61

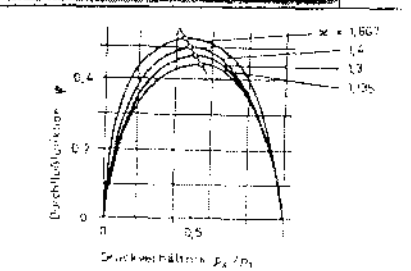
bar
bar
1

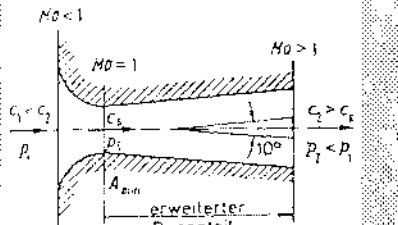
Durchflußfkt. am engsten Durchmesser

\Rightarrow bei $v_{s \text{ max.}} \Rightarrow A_{\text{min}}$

$$\psi_{s \text{ max.}} = \left(\frac{2}{\chi+1} \right)^{\frac{1}{\chi-1}} \cdot \sqrt{\frac{\chi}{\chi+1}}$$

Fluide:	χ	p_L/p_1	$\psi_{s \text{ max.}}$
Luft, zweratomige Gase	1,4	0,528	0,484
überh. Wasserd., 3-at. Gase	1,3	0,546	0,473
Sattdampf	1,135	0,577	0,450
Naßdampf	$\chi = 1,035 + 0,1x \Rightarrow$ berechnen.		



<p>Laval-Düse</p> 	$A_{\min} = \frac{\dot{m}}{\Psi_{s, \max} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_1}{\rho_1}} \cdot \left\{ \rho \right\}}$ $v_1 = \frac{T_1 \cdot R}{p_1}$ $T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \cdot T_1$	<p>\dot{m} Massenstrom A_{\min} Lavalquerschnitt (engster) v_1 spez. Volumen im Beh. R spezielle Gaskonst. S. 60 p_1 Druck im Beh. 1 bar = 10^5 N/m² T_1 Temperatur im Beh. $\Psi_{s, \max}$ max. Durchflußstrom p_2 Druck am Düsenquersch. T_2 Temp. Düsenquersch.</p> <p>kg/s m² m³/kg J/kgK Pa K 1 Pa K</p>
<p>Temperatur am engsten Dm</p>	$T_L = \left(\frac{p_L}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \cdot T_1 = \frac{2 \cdot T_1}{\chi + 1}$	<p>T_L Laval-Temp. p_L Laval-Druck</p> <p>K bar</p>
<p>Geschw. am engsten Dm bei A_{\min}</p>	$c_L = \sqrt{\frac{2 \cdot \chi}{\chi + 1} \cdot p_1 \cdot v_1}$ $c_L = \sqrt{\chi \cdot T_L \cdot R} = \sqrt{\chi \cdot p_L \cdot v_L} = a$	<p>c_L Laval-Geschw. v_L Laval-spez. Volumen a Schallgeschw. R spezielle Gaskonst. S. 60 χ S. 61</p> <p>K m³/kg m/s J/kgK</p>
<p>Mach-Zahl: $Ma < 1 \Rightarrow$ Unterschallbereich $Ma = 1 \Rightarrow$ Schallbereich $Ma > 1 \Rightarrow$ Überschallbereich</p>	$Ma = \frac{c}{a}$ $a = \sqrt{\chi \cdot T \cdot R}$ $a = \sqrt{\chi \cdot p \cdot v}$	

Kreisprozesse bei der Gasturbine

Nutzarbeit	$W_K = \sum Q = \sum W_t = \sum W_e$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> rechtsdr. linksdr. </div>	W_K Nutzarbeit W_t technische Arbeit W_e Volumenänderungsarbeit Q Wärme	J J J J
-------------------	---	--	------------------

Carnot-Faktor = Ericsson η immer < 1 nie negativ	$\eta_{car} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = \frac{ W_{car} }{Q_{zu}}$	η_{car} Carnot-Faktor T_{min} min. Temperatur T_{max} max. Temperatur	1 K K
---	---	--	-------------

wirkliche Prozeßführung **Joule-Prozeß als Vergleichsprozess der Gasturb.**

---- idealisierter Prozeß (mit der Masse m_i)
 --- wirklicher Prozeß (mit der Masse m)

$P' = \sum B$ Wirkleistung
 $P = \sum B$ Sommerleistung
 $W_K' = \sum B$ Wirkarbeit
 $W_K = \sum B$ Sommerarbeit
 $\frac{P'}{P} = \frac{m W_K'}{m W_K}$ Sommerarbeit
 Vergleich

1-2 Isentrope Verdichtung der Luft im Verdichter
 2-3 Isobare Wärmezufuhr Q_{23}
 3-4 Isentrope Ausdehnung der Luft in der Turbine (Expansion)
 4-1 Isobare Wärmeabfuhr Q_{41}

Nutzarbeit	$W_K = W_{IT} - W_{IV} $	W_K Nutzarbeit W_{IV} techn. Arbeit Verdichter W_{IT} techn. Arbeit Turbine	J J J
Leistung	$P = \dot{m} \cdot W_K$		
Innerer Arbeit	$W_{IK} = W_{IT} - W_{IV} $ $W_{IK} = W_{IT} \cdot \eta_{IT} - \frac{W_{IV}}{\eta_{IV}}$	W_{IK} innere Arbeit des Kreispr. W_{IV} techn. Arbeit Verdichter W_{IT} techn. Arbeit Turbine W_{IV} innere Arbeit Verdichter W_{IT} innere Arbeit Turbine η_{IT} innerer Wirkungsgr. Turb. η_{IV} innerer Wirkungsgr. Verd.	J J J J J 1 1

Wärmezufuhr	$Q_{zu} = Q_{23} = m \cdot c_{pm} \int_{t_2}^{t_3} (T_3 - T_2) > 0$ $Q_{zu} = \frac{Q_{ab}}{\eta_{th} - 1}$	Q_{zu} Wärme (zugeführt) T_3 Max. Prozeßtemperatur T_2 Kompressionstemperatur m Masse c_{pm} spez. Wärmekap S.68	J K K kg kJ/kgK
--------------------	---	--	-----------------------------

Wärmeabfuhr	$Q_{ab} = Q_{41} = m \cdot c_{pm} \int_{t_1}^{t_4} (T_1 - T_4) < 0$ $Q_{ab} = Q_{zu} (\eta_{th} - 1) \quad \left \quad T_4 = T_3 \cdot \frac{T_1}{T_2} \right.$	Q_{ab} Wärme (abgeführt) T_1 Anfangstemp. (Atmosph) T_4 Expansionstemperatur m Masse c_{pm} spez. Wärmekap S.68	J K K kg kJ/kgK
--------------------	--	---	-----------------------------

innerer Wirkungsgrad	$\eta_i = \frac{W_{IK}}{W_K}$	η_i innerer Wirkungsgrad W_K Nutzarbeit W_{IK} innere Arbeit des Kreispr.	1 J J
-----------------------------	-------------------------------	--	-------------

Thermischer Wirkungsgrad des Joule-Prozesses $\chi = 1,4$ für 2-atomige Gase (Luft) $\chi = 1,3$ für 3-atomige Gase $\chi = 1,667$ für 1-atomige Gase	$\eta_{th} = \frac{W_K}{Q_{zu}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} = \frac{W_K}{Q_{zu}}$ $\eta_{th} = \frac{Q_{zu} + Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 + \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}}$ <p style="font-size: small;"> Q_{ab} negativ Q_{ab} positiv $Q_B = Q_{zu}$ </p>	η_{th} therm. Wirkungsgrad W_K Nutzarbeit Q_{zu} Wärme (zugeführt) T_1 Anfangstemperatur T_2 Kompressionstemperatur p_1 Anfangsdruck (Atmosph) p_2 Kompressionsdruck χ Verhältnis c_p/c_v	1 J J K K bar bar 1
---	--	--	--

Verbrennungswirkungsgrad	$\eta_v = \frac{Q_{zu}}{Q_B} \quad ; \quad Q_B = m_B \cdot H_u$ $Q_B = \dot{m}_B \cdot H_u = \frac{P_{theo}}{\eta_{th}}$	η_v Verbrennungswirkungsgr. Q_{zu} zugeführte Wärme Q_B Verbrennungswärme H_u Heizwert m_B Brennstoffmasse	1 J J J/kg kg
---------------------------------	--	---	---------------------------

Drosselung

Drosselung des Idealgases $T = \text{const}$	$H_1 = H_2 = \text{const}$		
Entropieänderung	$S_2 - S_1 = m \cdot R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$		
Drosselung des Realgases $T_1 \neq T_2$	$H_1 = H_2 = \text{const}$		
Entleeren des Behälters	$U_1 - U_2 = p_b \cdot (V_2 - V_1)$ $u_1 - u_2 = p_b \cdot (v_2 - v_1)$ $u_1 - u_2 = c_{vm} \cdot (T_1 - T_2)$	p_b	p_2 bzw. Außerdruck
	$v = \frac{R \cdot T}{p}$		

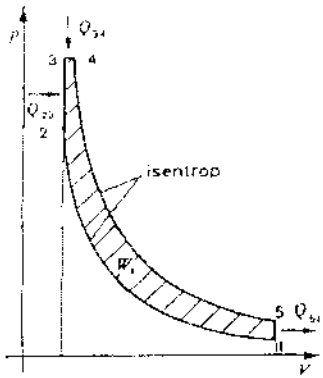
Der Dampf

Dampfgehalt	$x = \frac{m_D}{m_D + m_W} = \frac{m_D}{m_{\text{ges}}}$ <small>m_D und m_W siehe Massenbilanz nächste Seite</small>	x m_D m_W	Dampfgehalt des Naßdampfes Masse an Dampf (Satt-...) Masse an Wasser	% k k
Verdampfungswärme	$r = h'' - h'$ $r = (u'' - u') + p \cdot (v'' - v')$	r h' h'' u' u'' v' v'' p	Verdampfungswärme T 5.4 Enthalpie siedende Fl. T 5.4 Enthalpie Sattdampf T 5.4 innere Energie sied Flüssigkeit innere Energie Sattdampf spez. Vol. sied Flüssigkeit T 5.4 spez. Vol. Sattdampf T 5.4 Druck	kJ kJ kJ kJ kJ m³ m³ k
spez. Volumen Naßdampf	$v_x = v' + x \cdot (v'' - v')$	v_x v' v'' x	spez. Vol. Naßdampf spez. Vol. sied Flüssigkeit T 5.4 spez. Vol. Sattdampf T 5.4 Dampfgehalt des Naßdampfes	m³ m³ m³ %
spez. Enthalpie des Naßdampfes	$h_x = h' + x \cdot (h'' - h')$ $h_x = u + p \cdot v$ $h_x = h' + x \cdot r$	h_x h' h'' x p v u r	spez. Enthalpie Naßdampf spez. Enthalpie sied. Fl. T 5.4 spez. Enthalpie Sattdampf T 5.4 Dampfgehalt des Naßdampfes Druck spez. Volumen spez. innere Energie Verdampfungswärme	kJ kJ kJ % k m³ kJ kJ
spez. Entropie des Naßdampfes	$s_x = s' + x \cdot (s'' - s')$	s_x s' s'' x	spez. Entropie Naßdampf spez. Entropie sied. Fl. T 5.4 spez. Entropie Sattdampf T 5.4 Dampfgehalt des Naßdampfes	kJ kJ kJ %
spez. Innere Energie des Naßdampfes	$u_x = u' + x \cdot (u'' - u')$ $u_x = \underbrace{h' + x \cdot (h'' - h')} - p \cdot \underbrace{[v' + x \cdot (v'' - v)]}$ $u_x = h - p \cdot v$	u_x u' u'' x p	spez. in. Energie Naßdampf spez. in. Energie sied. Fl. T 5.4 spez. in. Energie Sattdampf T 5.4 Dampfgehalt des Naßdampfes Druck	kJ kJ kJ % k
Wärmeleistung	$\dot{Q} = \dot{m} \cdot q$	\dot{Q} \dot{m} q	Wärmeleistung Massenstrom spez. Wärme auf Masse bez.	k k k
Volumenstrom	$\dot{V} = \dot{m} \cdot v$; $\dot{V} = A \cdot \bar{c}$ $\dot{V} = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T}{p}$; $A = \frac{d^2 \pi}{4}$	\dot{V} \dot{m} v A \bar{c}	Volumenstrom Massenstrom spez. Volumen Fläche Rohrdurchmesser mittlere Geschw.	m³ k m³ m² m/s
spez. Volumen	$v = \frac{V}{m} = V \cdot m^{-1}$	v V	spez. Volumen Volumen	m³ m³

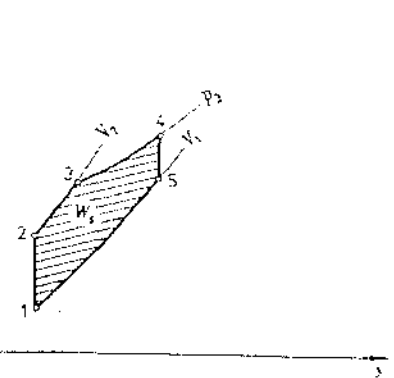
Enthalpie Wasser	$h_W = c_W \cdot t_W$ $c_W = 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ h_W ist druckunabhängig!	h_W c_W t_W	Enthalpie Wasser spez. Wärmekap. Wasser Temperatur Wasser	kJ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $^{\circ}\text{C}$
Massenbilanz	$m_{\text{ges}} = m_D + m_W$	m_{ges} m_D m_W	Gesamtmasse Masse Dampf Masse Wasser	kg kg kg
Masse des Dampfanteils (Sattdampf)	$m_D = \frac{V_D}{v''}$; $m_D = x \cdot m_{\text{ges}}$	m_D V_D v''	Masse des Dampfanteils Volumen des Dampfanteils spez. Vol. Sattdampf T 5.4	kg m^3 $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
Masse des Siedewasseranteils	$m_W = \frac{V_W}{v'}$; $m_W = m_{\text{ges}} - m_D$	m_W V_W v'	Masse des Siedewasseranteils Volumen des Siedewasserant. spez. Vol. Siedewasser T 5.4	kg m^3 $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
Enthalpiebilanz $p = \text{const}$	$h'' \cdot (m_D + m_W) = m_D \cdot h_D + m_W \cdot h_W$ $m_D = \frac{m_W \cdot (h_W - h'')}{(h'' - h_D)}$	m_{ges} m_D m_W h'' h_D h_W	Gesamtmasse Masse Dampf Masse Wasser Enthalpie Endzustand Sattdampf Enthalpie Dampf Enthalpie Wasser	kg kg kg $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Überhitzer bekommt vom Kessel Sattdampf und muß dann daraus überhitzter Dampf machen $p = \text{const}$.	$\dot{Q}_{\text{Üb}} = \dot{m}_D \cdot (h_x - h'')$	$\dot{Q}_{\text{Üb}}$ \dot{m}_D h_x h''	Wärmeleistung Überhitzer Massenstrom Sattdampf Enthalpie Endzustand bei Temp x Enthalpie Sattdampf	kW $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Kessel bekommt Siedewasser von der Speisepumpe, daraus wird Sattdampf für den Überhitzer gemacht. $p = \text{const}$.	$\dot{Q}_{\text{Ke}} = \dot{m}_D \cdot (h'' - h')$	\dot{Q}_{Ke} \dot{m}_D h'' h'	Wärmeleistung Kessel Massenstrom Siedewasser Enthalpie Siedewasser Enthalpie Sattdampf	kW $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Abdampf nach Dampfturbine $S = \text{const}$				
Dampfstrom	\dot{m}_D [kg/h]			
vollständige Kondensation	d.h. nur noch Siedewasser vorhanden			
Frischdampfdaten sind:	Druck und Temperatur			
Dampfzustand ist:	Druck und Temperatur			
Kondensatmenge:	\dot{m}_W [kg/h]			

Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren

p, V-Diagramm gemischter Prozeß



T, s-Diagramm gemischter Prozeß

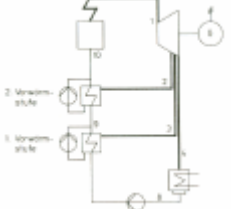
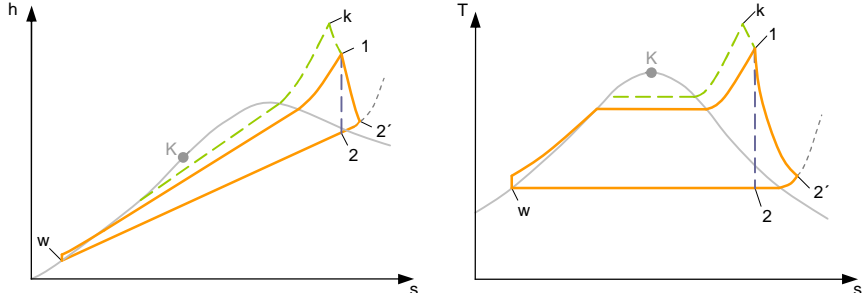
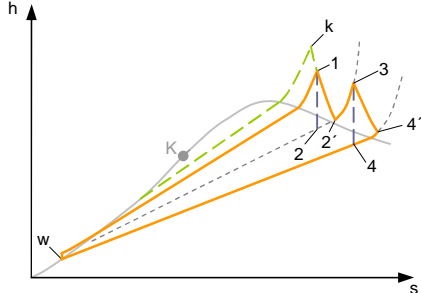


$$V_1 = V_5, \quad V_2 = V_3, \quad p_3 = p_4$$

Verdichterverhältnis	$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad ; \quad \varepsilon^{\chi-1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\chi-1} = \frac{T_2}{T_1}$	ε Verdichterverhältnis χ Verhältnis c_p/c_v (1.4 Luft) V_1 Volumen vor Verdichten V_2 Volumen beim Verdichten T_1 Anfangstemperatur T_2 Temp. nach Verdichten	1 1 m^3 m^3 K K
Einspritzverhältnis	$\psi = \frac{V_4}{V_3} = \frac{T_4}{T_3}$	ψ Einspritzverhältnis V_3 Volumen beim Verdichten V_4 Volumen beim Verdichten T_4 Temp. beim Verdichten T_3 Temp. beim Verdichten	
Druckverhältnis	$\xi = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$	ξ Druckverhältnis p_2 p_3 T_2 T_3	
zugeführte Wärme $W = \frac{J}{s}$ $Q_B = Q_{zu}$	$Q_{zu} = m \cdot c_v \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{\chi-1} \cdot [(\xi - 1) + \chi \cdot (\psi - 1) \cdot \xi]$ $Q_{zu} = Q_{23} + Q_{34}$ $Q_{zu} = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) + m \cdot \chi \cdot c_v \cdot (T_4 - T_3)$ $Q_{zu} = m_B \cdot H_u$	Q_{zu} zugeführte Wärme m Masse c_v spez. Wärmekap. TB S.60 ψ Einspritzverhältnis ξ Druckverhältnis ε Verdichterverhältnis m_B Masse Brennstoff H_u Heizwert P_{zu} zugeführte Leistung \dot{m}_B Brennstoffmassenstrom χ Verhältnis c_p/c_v (1.4 Luft)	J kg kJ/kgK 1 1 1 kg kJ/kg W kg/s 1
zugeführte Leistung	$P_{zu} = \dot{m}_B \cdot H_u = \dot{Q}_B$		
abgeführte Wärme	$Q_{ab} = m \cdot c_v \cdot T_1 \cdot (\psi^\chi \cdot \xi - 1)$ $Q_{ab} = Q_{51}$ $Q_{ab} = m \cdot c_{vm} \cdot \underbrace{(T_1 - T_5)}_{\Delta t}$	Q_{ab} abgeführte Wärme m Masse c_v spez. Wärmekap. TB S.60 ψ Einspritzverhältnis ξ Druckverhältnis χ Verhältnis c_p/c_v (1.4 Luft)	J kg kJ/kgK 1 1 1
Thermischer Wirkungsgrad allg. nach <u>Selinger</u> <u>Seliger</u> (schnelllaufendes Diesel)	$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}} \cdot \frac{\psi^\chi \cdot \xi - 1}{[(\xi - 1) + \chi \cdot (\psi - 1) \cdot \xi]}$		
Thermischer Wirkungsgrad bei Otto - Prozeß bei $\psi=1$	$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}}$		
Thermischer Wirkungsgrad bei klassischem Diesel-Prozeß bei $\xi=1$	$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}} \cdot \frac{\psi^\chi - 1}{\chi \cdot (\psi - 1)}$		
Masse	$m = V \cdot \rho$	m Masse V Volumen ρ Dichte	kg m^3 kg/ m^3

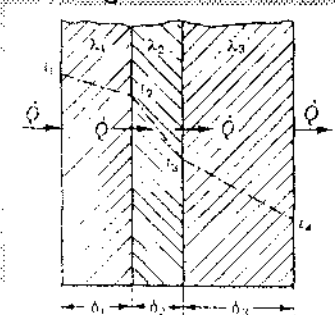
mechanischer Wirkungsgrad	$\eta_m = \frac{W_{eK}}{W_{iK}}$	η_m mech. Wirkungsgrad W_{eK} Kupplungsarbeit W_{iK} innere Arbeit des Kreispr.	1 J J
elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el} = \frac{W_{ef}}{W_{eK}}$	η_{el} elektr. Wirkungsgrad W_{ef} elektr. Arbeit W_{eK} Kupplungsarbeit	1 J J
Eigenbedarfswirkungsgrad	$\eta_{eig} = \frac{W_{ef} - W_{eig}}{W_{ef}} = \frac{W}{W_{ef}}$	η_{eig} eigenbed. Wirkungsgrad W_{ef} elektr. Arbeit W_{eig} eigenbed. Arbeit	1 J J
Gesamtwirkungsgrad	$\eta = \frac{W}{Q_B} = \eta_v \cdot \eta_{th} \cdot \eta_l \cdot \eta_m \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{eig}$		
Effektiver Wirkungsgrad	$\eta_{eff} = \frac{W}{Q_B} = \frac{P}{Q_B} = \eta_l \cdot \eta_m \cdot \eta_{el}$		
Druckverhältnis	Druckverhältnis = $\frac{p_2}{p_1}$	p_1 Anfangsdruck (Atmosph) p_2 Kompressionsdruck	bar bar
Volumenstrom	$\dot{V} = \frac{\dot{m}_B}{\rho}$ umrechnen auf Lit/Std.	V° Volumenstrom m°_B Brennmassenstrom ρ Dichte	m^3/s kg/s kg/m^3
Stromkosten	$K_{Str.} = \frac{\dot{V}}{P} \cdot G$	$K_{Str.}$ Stromkosten P Leistung (effektiv) V° Volumenstrom G Preis pro m^3 oder Liter	$\frac{DM}{kWh}$ kW m^3/h $\frac{DM}{m^3}$ $\frac{DM}{l}$
Verbrennungszeit	$\tau = \frac{Q_B}{P}$ umrechnen auf Std. (mal 3600)	τ Verbrennungszeit P Leistung Q_B Verbrennungswärme	s kJ kW

Kreisprozeß der Dampfmaschine				
Zugeführte Brennstoffleistung kW	$\dot{Q}_B = \dot{m}_B \cdot H_u$	\dot{m}_B H_u	Brennstoffmassenstrom Heizwert	kg/s kJ/kg
Effektiver Wirkungsgrad	$h_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{KL}}}{\dot{Q}_B} = h_K \cdot h_R \cdot h_{\text{th}} \cdot h_i \cdot h_m \cdot h_{\text{el}} \cdot h_{\text{eig}}$	P_{KL} \dot{Q}_B	Klemmleistung am Netz Zugeführte Brennstoffleistung	kW kW
Kesselwirkungsgrad	<p>einfache Prozeßführung</p> $h_K = \frac{\dot{m}_D \cdot (h_K - h_W)}{\dot{Q}_B}$ <p>zweifache Prozeßführung (mit Zwischenüberhitzer)</p> $h_K = \frac{\dot{m}_D \cdot [(h_K - h_W) + (h_3 - h'_2)]}{\dot{Q}_B}$	\dot{m}_D h_K h_W h_3 h'_2 \dot{Q}_B	Dampfmassenstrom spez. Enthalpie des Dampfes am Dampferzeugeraustritt spez. Enthalpie des Wassers am Dampferzeugereintritt ($\triangleq h'$) spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzereintritt (wirklich) Zugeführte Brennstoffleistung	kg/s kJ/kg kJ/kg kJ/kg kJ/kg kW
Rohrleitungswirkungsgrad	$h_R = \frac{h_1 - h_W}{h_K - h_W}$	h_K h_W h_1	spez. Enthalpie des Dampfes am Dampferzeugeraustritt spez. Enthalpie des Wassers am Dampferzeugereintritt ($\triangleq h'$) spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang	kJ/kg kJ/kg kJ/kg
Thermischer Wirkungsgrad	<p>einfache Prozeßführung</p> $h_{\text{th}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_W} = \frac{w_K}{q_{\text{zu}}}$ <p>zweifache Prozeßführung (mit Zwischenüberhitzer)</p> $h_{\text{th}} = \frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{h_1 - h_W + h_3 - h_2} = \frac{w_K}{q_{\text{zu}}}$	h_1 h_2 h_W h_3 h_4	spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (isentrop) spez. Enthalpie des Wassers am Dampferzeugereintritt ($\triangleq h'$) spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (isentrop)	kJ/kg kJ/kg kJ/kg kJ/kg kJ/kg
Innerer Wirkungsgrad im Hochdruck-Teil bzw. bei einfacher Prozeßführung	$h_{\text{iHD}} = \frac{h_1 - h'_2}{h_1 - h_2}$ (= ? bei einfachem Prozeß)	h_1 h_2 h'_2	spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (isentrop) spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (wirklich)	kJ/kg kJ/kg kJ/kg
Innerer Wirkungsgrad im Niederdruck-Teil	$h_{\text{iND}} = \frac{h_3 - h'_4}{h_3 - h_4}$	h_3 h_4 h'_4	spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (isentrop) spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (wirklich)	kJ/kg kJ/kg kJ/kg
Gesamter innerer Wirkungsgrad bei zweifacher Prozeßführung	$h_i = \frac{h_1 - h'_2 + h_3 - h'_4}{h_1 - h_2 + h_3 - h_4} = \frac{w_{\text{ik}}}{w_K} \approx \frac{h_{\text{iHD}} + h_{\text{iND}}}{2}$	w_{ik} w_K	spez. innere Arbeit spez. Nutzarbeit	kJ/kg kJ/kg
Mechanischer Wirkungsgrad	$h_m = \frac{w_{\text{ek}}}{w_{\text{ik}}} = \frac{P_e}{P_i}$	w_{ek} w_{ik} P_e P_i	spez. Kupplungsarbeit spez. innere Arbeit Kupplungsleistung Innere Leistung	kJ/kg kJ/kg kW kW
Elektrischer Wirkungsgrad	$h_{\text{el}} = \frac{w_{\text{el}}}{w_{\text{ek}}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_e}$	w_{el} w_{ek} P_{el} P_e	spez. el. Arbeit des Generator spez. Kupplungsarbeit Generatorleistung Kupplungsleistung	kJ/kg kJ/kg kW kW
Eigenbedarfswirkungsgrad	$h_{\text{eig}} = \frac{w_{\text{KL}}}{w_{\text{el}}} = \frac{w_{\text{el}} - w_{\text{eig}}}{w_{\text{el}}} = \frac{P_{\text{KL}}}{P_{\text{el}}}$	w_{KL} w_{el} w_{eig} P_{KL} P_{el}	spez. abgeg. el. Arbeit spez. el. Arbeit des Generator spez. Arbeit als Eigenbedarf Klemmleistung am Netz Generatorleistung	kJ/kg kJ/kg kJ/kg kW kW
Technische Arbeit im Hochdruck-Teil kJ/kg	$w_{\text{tHD}} = h_1 - h_2$ (= w_K bei einfachem Prozeß)	h_1 h_2	spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (isentrop)	kJ/kg kJ/kg
Technische Arbeit im Niederdruck-Teil kJ/kg	$w_{\text{tND}} = h_3 - h_4$	h_3 h_4	spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (isentrop)	kJ/kg kJ/kg
Spezifische Nutzarbeit bei zweifacher Prozessführung kJ/kg	$w_K = w_{\text{tHD}} + w_{\text{tND}} = h_1 - h_2 + h_3 - h_4$	h_1 h_2 h_3 h_4	spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (isentrop) spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (isentrop)	kJ/kg kJ/kg kJ/kg kJ/kg

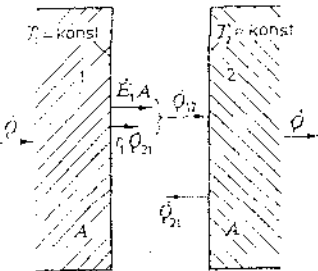
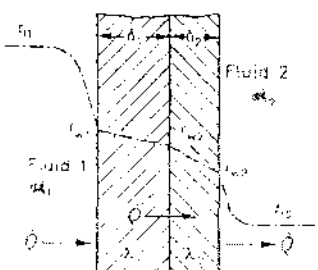
<p>Innere Leistung kW</p>	<p>einfache Prozeßführung $P_i = \dot{m}_D \cdot (h_1 - h'_2) = \dot{m}_D \cdot w_{ik}$</p> <p>zweifache Prozeßführung (mit Zwischenüberhitzer) $P_i = \dot{m}_D \cdot (h_1 - h'_2 + h_3 - h'_4) = \dot{m}_D \cdot w_{ik}$</p>	<p>\dot{m}_D Dampfmassenstrom kg/s h_1 spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang kJ/kg h'_2 spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (wirklich) kJ/kg h_3 spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt kJ/kg h'_4 spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (wirklich) kJ/kg w_{ik} spez. innere Arbeit kJ/kg</p>
<p>Theoretische Leistung kW</p>	<p>einfache Prozeßführung $P_{theo} = \dot{m}_D \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_D \cdot w_K$</p> <p>zweifache Prozeßführung (mit Zwischenüberhitzer) $P_{theo} = \dot{m}_D \cdot (h_1 - h_2 + h_3 - h_4) = \dot{m}_D \cdot w_K$</p>	<p>\dot{m}_D Dampfmassenstrom kg/s h_1 spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang kJ/kg h'_2 spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (wirklich) kJ/kg h_3 spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt kJ/kg h'_4 spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (wirklich) kJ/kg w_K spez. Nutzarbeit kJ/kg</p>
<p>Leistung Überhitzer+Kessel kW</p>	<p>$\dot{Q}_{Üb} = \dot{m}_D \cdot (h_1 - h_w) > 0$</p>	<p>\dot{m}_D Dampfmassenstrom kg/s h_1 spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbineneingang kJ/kg h_w spez. Enthalpie des Wassers am Dampferzeugereintritt ($\triangleq h'$) kJ/kg</p>
<p>Leistung Zwischenüberhitzer kW</p>	<p>$\dot{Q}_{ZÜ} = \dot{m}_D \cdot (h_3 - h'_2) > 0$</p>	<p>\dot{m}_D Dampfmassenstrom kg/s h_3 spez. Enthalpie des Dampfes am Zwischenüberhitzeraustritt kJ/kg h'_2 spez. Enthalpie des Dampfes am HD-Turbinenausgang (wirklich) kJ/kg</p>
<p>Leistung Kondensator kW</p>	<p>$\dot{Q}_{Ko} = \dot{m}_D \cdot (h_w - h'_4) < 0$</p>	<p>\dot{m}_D Dampfmassenstrom kg/s h_w spez. Enthalpie des Wassers am Dampferzeugereintritt ($\triangleq h'$) kJ/kg h'_4 spez. Enthalpie des Dampfes am ND-Turbinenausgang (wirklich) kJ/kg</p>
<p>Klemmleistung kW</p>	<p>Nur bei einfacher Prozessführung $P_{KL} = P_{theo} \cdot h_i \cdot h_m \cdot h_{el} \cdot h_{eig} \approx P_{theo} \cdot h_{eff}$</p>	<p>P_i Innere Leistung kW h_m Mechanischer Wirkungsgrad h_{el} Elektrischer Wirkungsgrad h_{eig} Eigenbedarfswirkungsgrad</p>
<p>Spezifischer Dampfverbrauch</p>	<p>$d = \frac{\dot{m}_D}{P_{KL}}$</p>	<p>\dot{m}_D Dampfmassenstrom kg/s P_{KL} Klemmleistung am Netz kW</p>
<p>Speisewasservorwärmung</p>  <p>Erste Abzweigstelle $a \cdot (h_2 - h_{10}) = (1 - a) \cdot (h_{10} - h_9)$</p> <p>Zweite Abzweigstelle $b \cdot (h_3 - h_9) = (1 - a - b) \cdot (h_9 - h_8)$</p>		<p>a Dampfmassenstromanteil der Abgezweigt wird kJ/kg $(1 - a)$ Verbleibender Dampfmassenstromanteil kJ/kg h_2 spez. Enthalpie des Dampfes an der Abzweigstelle kJ/kg h_{10} spez. Enthalpie des Wassers nach dem zumischen kJ/kg h_9 spez. Enthalpie des Wassers vor dem zumischen kJ/kg</p>
<p>Einfache Prozeßführung</p>		
<p>Zweifache Prozeßführung</p>		

Feuchte Luft				
Relative Feuchte 1	$j = \frac{p_D}{p_s} = \frac{r_D}{r_s} \quad 0 \leq j \leq 1$	p_D p_s r_D r_s	Partialdruck Wasserdampf Sättigungsdruck $T_{6.1}$ Dichte Wasserdampf Sättigungsdichte $T_{6.1}$	Pa Pa $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Gesamtdruck Pa	$p = p_L + p_D \quad 1\text{Pa} = 1\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad 1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$	p_L p_D	Partialdruck trockene Luft Partialdruck Wasserdampf	Pa Pa
Massenstrom feuchte Luft $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\begin{aligned} \dot{m}_f &= \dot{m}_L + \dot{m}_D \\ \dot{m}_f &= \dot{V}_f \cdot r_f \\ \dot{m}_f &= \dot{m}_L (1 + x) \end{aligned}$	\dot{m}_L \dot{m}_D \dot{V}_f r_f x	Massenstrom trockene Luft Massenstrom Wasserdampf Volumenstrom feuchte Luft Dichte feuchte Luft Feuchtegrad	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$
Massenstrom trockene Luft $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_f}{1+x} \quad \dot{m}_L = \frac{(p_0 - j \cdot p_s) \cdot \dot{V}}{R_L \cdot T}$ $R_L = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	\dot{m}_f p_0 j p_s \dot{V}_f	Massenstrom feuchte Luft Atmosphärendruck (1,01325bar) Relative Feuchte Sättigungsdruck $T_{6.1}$ Volumenstrom feuchte Luft	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ Pa 1 Pa $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Feuchtegrad $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$	$x = 0,622 \cdot \frac{j \cdot p_s}{p - j \cdot p_s} = \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_L}$	R_L T \dot{m}_D	spez. Gaskonstante tr. Luft Temperatur ($0^\circ=273\text{K}$) Massenstrom Wasserdampf	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ K $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Verdunstete Wassermenge $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_L \cdot \Delta x$	\dot{m}_L Δx	Massenstrom trockene Luft Feuchtegraddifferenz	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$
Befeuchtung mit Dampf	$h_D = \frac{\Delta h}{\Delta x}$ $\Delta \dot{m}_D = \dot{m}_L \cdot \Delta x$	h_D Δh Δx $\Delta \dot{m}_D$ \dot{m}_L	Enthalpie Satttdampf bzw. Frischdampf $T_{B5.4}$ bzw. $T_{5.5}$ Enthalpiedifferenz Feuchtegraddifferenz Dampfmenge Massenstrom trockene Luft	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Spez. Enthalpie $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$h = 1,004 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2500)$	t x	Temperatur Feuchtegrad	$^\circ\text{C}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$
Dichte der feuchten Luft $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$r_f = r_{tr} \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \frac{j \cdot p_s}{p_0} \right)$ $r_{tr} = \frac{p_0}{R_L \cdot T} \quad R_L = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	r_{tr} j p_s p_0 R_L T	Dichte trockene Luft Relative Feuchte Sättigungsdruck $T_{6.1}$ Atmosphärendruck (1,01325bar) spez. Gaskonstante tr. Luft Temperatur ($0^\circ=273\text{K}$)	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ 1 Pa Pa $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ K
Umrechnung auf andere Drücke	$j_{\text{ist}} = j_{\text{Dia}} \cdot \frac{p_{\text{ist}}}{p_{\text{Dia}}}$	j_{ist} j_{Dia} p_{ist} p_{Dia}	Vorhandene rel. Feuchte Rel. Feuchte aus Diagramm Vorhandener Druck Druck für Diagramm (1,01325bar)	1 1 bar bar
Wärmeleistung kW	$\dot{Q}_H = P_H = \dot{m}_L \cdot \Delta h > 0 \quad \text{kW} = \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$	P_H \dot{m}_L Δh	Wärmeleistung Massenstrom trockene Luft Enthalpiedifferenz	kW $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Kälteleistung kW	$\dot{Q}_K = P_K = \dot{m}_L \cdot \Delta h < 0 \quad \text{kW} = \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$	P_K \dot{m}_L Δh	Kälteleistung Massenstrom trockene Luft Enthalpiedifferenz	kW $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Mischung zweier feuchten Luftmengen	$\dot{m}_L = \dot{m}_{La} + \dot{m}_{Lb}$ $\frac{h_m - h_b}{h_a - h_m} = \frac{x_m - x_b}{x_a - x_m} = \frac{\dot{m}_{La}}{\dot{m}_{Lb}}$	\dot{m}_L \dot{m}_{La} \dot{m}_{Lb} h_m h_a h_b x_m x_a x_b	Massenstrom trockene Luft Massenstrom a trockene Luft Massenstrom b trockene Luft Enthalpie der Mischung Enthalpie des Massenstrom a Enthalpie des Massenstrom b Feuchtegrad der Mischung Feuchtegrad des Massenstrom a Feuchtegrad des Massenstrom b	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$
Enthalpie der Mischung zweier feuchten Luftmengen $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$h_m = \frac{\dot{m}_{La} \cdot h_a + \dot{m}_{Lb} \cdot h_b}{\dot{m}_{La} + \dot{m}_{Lb}}$ $\dot{m}_{La} = \dot{m}_L \cdot \frac{h_m - h_b}{h_a - h_b} \quad \dot{m}_{Lb} = \dot{m}_L \cdot \frac{h_m - h_a}{h_b - h_a}$	\dot{m}_L \dot{m}_{La} \dot{m}_{Lb} h_a h_b	Massenstrom trockene Luft Massenstrom a trockene Luft Massenstrom b trockene Luft Enthalpie des Massenstrom a Enthalpie des Massenstrom b	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Feuchtegrad der Mischung zweier feuchten Luftmengen $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$	$x_m = \frac{\dot{m}_{La} \cdot x_a + \dot{m}_{Lb} \cdot x_b}{\dot{m}_{La} + \dot{m}_{Lb}}$ $\dot{m}_{La} = \dot{m}_L \cdot \frac{x_m - x_b}{x_a - x_b} \quad \dot{m}_{Lb} = \dot{m}_L \cdot \frac{x_m - x_a}{x_b - x_a}$	\dot{m}_L \dot{m}_{La} \dot{m}_{Lb} x_a x_b	Massenstrom trockene Luft Massenstrom a trockene Luft Massenstrom b trockene Luft Feuchtegrad des Massenstrom a Feuchtegrad des Massenstrom b	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$

Wärmeübertragung

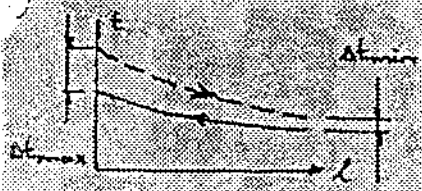
Fouriersche Gleichung) Wärmemenge	$Q_\lambda = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin: 10px auto; width: fit-content;"> WÄRMELEITUNG (KONDUKTION) </div>	Q_λ λ δ τ $t_1 - t_2$ A	Wärmemenge Wärmeleitfähigkeit S.325-327 Wanddicke Zeit Temperaturdifferenz Fläche \perp Wärmestromrichtung	J, kJ W/Km m s K m ²
Wärmestrom	$\Phi = \dot{Q}_\lambda = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$	Φ λ δ $t_1 - t_2$ A	Wärmestrom Wärmeleitfähigkeit S.325-327 Wanddicke Temperaturdifferenz Fläche \perp Wärmestromrichtung	W W/Km m K m ²
spezifischer Wärmestrom	$\varphi = \frac{\Phi}{A} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) \quad ; \quad \varphi = \dot{q}_\lambda$	φ λ δ $t_1 - t_2$	spez. Wärmestrom Wärmeleitfähigkeit S.325-327 Wanddicke Temperaturdifferenz	W/m ² W/Km m K
Wärmewiderstand	$R_\lambda = \frac{\Delta t}{\Phi} = \frac{\delta}{\lambda \cdot A}$	R_λ Φ λ δ Δt A	Wärmewiderstand Wärmestrom Wärmeleitfähigkeit S.325-327 Wanddicke Temperaturgefälle Fläche \perp Wärmestromrichtung	K/W W W/Km m K m ²
Wärmewiderstand = $\frac{\text{Temperaturgefälle}}{\text{Wärmestrom}}$	$R_{\lambda_{ges}} = \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\Delta t}{\Phi}$			
Wärmestrom durch mehrschichtige Wand 	$\Phi = \frac{A \cdot (t_1 - t_{n+1})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{\Delta t}{R_{\lambda_{ges}}}$ $t_2 = t_1 + \frac{\Phi \cdot \delta_1}{A \cdot \lambda_1}$ $t_3 = t_2 + \frac{\Phi \cdot \delta_2}{A \cdot \lambda_2}$	Φ λ δ t_1 t_{n+1} A n	Wärmestrom Wärmeleitfähigkeit S.325-327 Wanddicke Anfangstemperatur Endtemperatur Fläche \perp Wärmestromrichtung Anz. der Schichten	W W/Km m K K m ²
mittlere Temperatur / Temperaturdifferenz	$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad ; \quad t_1 - t_2 = \frac{\varphi \cdot \delta_1}{\lambda_1}$			

Wärmeübertragung $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Wärmeleitung (Konduktion)} \\ \bullet \text{ Wärmeübergang (Konvektion)} \\ \bullet \text{ Wärmestrahlung} \end{array} \right\}$ Wärmedurchgang

<p>Wärmeübergang durch Strahlung</p> 	<p>Körper 1: $\dot{Q}_{12} = A \cdot \dot{E}_1 + r_1 \cdot \dot{Q}_{21}$ Körper 2: $\dot{Q}_{21} = A \cdot \dot{E}_2 + r_2 \cdot \dot{Q}_{12}$</p> <p>$\Phi = \dot{Q} = \dot{Q}_{12} - \dot{Q}_{21}$ bei $d = 0$; $r = 1 - \epsilon$</p> <p>$\Phi = C_{12} \cdot A_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$ (S.V.)</p>	<p>Φ Wärmestrom W C_{12} Strahlungsaustauschkoeff W/m^2K A_1 Wandfläche bei $A_1=A_2=A$ m^2 T_1 Temp. Körper 1 K T_2 Temp. Körper 2 K r_1 Reflexionskoeff. Körper 1 1 r_2 Reflexionskoeff. Körper 2 1 E_1 Energiestrom Körper 1 W/m^2 E_2 Energiestrom Körper 2 W/m^2 Q_{12} Gesamtenergie Körper 1 W Q_{21} Gesamtenergie Körper 2 W</p>
<p>Strahlungsaustauschkoeff. ebene Wand ($A_1=A_2=A$)</p> <p>für Innenrohr bzw. $A_1 \neq A_2$</p> <p>wenn $A_2 \gg A_1$ (großer Raum mit kleinem Ofen)</p>	<p>$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$</p> <p>$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$</p> <p>$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \omega \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$; $\omega = \frac{A_1}{A_2}$</p> <p>$\omega = 0 \Rightarrow C_{12} = \epsilon_1 \cdot C_s$ (S.V.)</p>	<p>C_{12} Strahlungsaustauschkoeff W/m^2K C_s Strahlungskonst. schw. K. W/m^2K ϵ_1 Emissionskoeff. S. 349 1 ϵ_2 Emissionskoeff. S. 349 1 A_1 Oberfl. Innenrohr m^2 A_2 Mantelröhr. Außenrohr m^2</p>
<p>spez. Wärmeübergang durch Strahlung</p>	<p>$\varphi = \dot{q} = C_{12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$</p>	<p>φ spez. Wärmestrom W/m^2 C_{12} Strahlungsaustauschkoeff. W/m^2K T_1 Temp. Körper 1 K T_2 Temp. Körper 2 K</p>
<p>Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung</p> <p>$\alpha_s = \frac{\Phi}{A(T_1 - T_2)}$</p>	<p>$\alpha_s = C_{12} \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2}$</p>	<p>α_s Koeff. Strahlung W/m^2K C_{12} Strahlungsaustauschkoeff. W/m^2K T_1 Temp. Körper 1 K T_2 Temp. Körper 2 K</p>
<p>Wärmeübergangskoeff. (durch Strahlung und Konvektion)</p>	<p>$\alpha_{ges.} = \alpha_s + \alpha_k$</p>	<p>$\alpha_{ges.}$ Koeff. Wärme + Konvekt. W/m^2K α_s Koeff. Strahlung W/m^2K α_k Koeff. Konv. S. 344 W/m^2K</p>
<p>Wärmeübertragung (Konvektion + Strahlung)</p>	<p>$\Phi = \alpha_{ges.} \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$</p> <p>Körper Fluid (Luft)</p>	<p>Φ Wärmestrom W $\alpha_{ges.}$ Koeff. Wärme + Konvekt. W/m^2K A Wandfläche m^2 T_1 Temp. Fluid K T_2 Temp. Wand K</p>
<p>spez. Wärmeübertragung</p>	<p>$\varphi = \alpha_{ges.} \cdot (T_1 - T_2)$</p>	<p>φ spez. Wärmestrom W/m^2 $\alpha_{ges.}$ Koeff. Wärme + Konvekt. W/m^2K T_1 Temp. Fluid K T_2 Temp. Wand K</p>
<p>Wärmedurchgang</p>		
<p>Wärmedurchgang ebene Wand</p> 	<p>WÄRMEDURCHGANG</p> <p>$\Phi = k \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$</p> <p>$\Phi = \dot{m}_w \cdot \Delta t$; $\dot{m}_w = \frac{\Phi}{\Delta t}$</p>	<p>Φ Wärmestrom W k Wärmedurchgangszahl W/m^2K A Wandfläche m^2 t_1 Temp. wärmeres Fluid K t_2 Temp. kälteres Fluid K</p>
<p>Wärmedurchgangszahl</p>	<p>$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$</p>	<p>δ Wanddicke m α Wärmeübergangsz. S.344 W/m^2K λ Wärmeleitfähigkeit S. 325-327 W/mK</p>

Wärmeleitwiderstand <i>durchgangs</i>	$R_d = \frac{t_1 - t_2}{\Phi} = \frac{1}{k \cdot A}$ $R_d = R_{\alpha_1} + R_{\lambda} + R_{\alpha_2}$	R_d Wärmeleitwiderst. R_{α} Wärmeübergangswid. R_{λ} Wärmewiderstand	KW KW KW
Wärmedurchgang für mehrschichtige Zylinderwand <i>freie Konvektion [9]</i> <i>$\gamma = \text{Verhältnis von innerer zu äußerer Oberfläche}$</i>	$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_{n+1}}}$ $\Phi = \dot{m}_K \cdot \gamma$ <p style="text-align: right;">\dot{m}_K: Kondensat</p>	Φ Wärmestrom t_1 Temp. innen t_2 Temp. außen r_1 Innenradius r_{n+1} Außenradius n Anzahl Wandschichten λ Wärmeleitzahl α Wärmeübergangszahl l Zylinderlänge	W K K m m 1 W/m W/m m
Wärmedurchgang für einschichtige Kugelwand	$\Phi = \frac{4 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1^2} + \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2^2}}$	Φ Wärmestrom t_1 Temp. innen t_2 Temp. außen r_1 Innenradius r_2 Außenradius λ Wärmeleitzahl α Wärmeübergangszahl	W K K m m W/m W/m

Wärmetauscher

Wärmestrom: 	$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta t_m$ $\Phi = k \cdot A \cdot \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}\right)}$	Φ Wärmestrom k Wärmedurchgangszahl A Fläche Wärmetauscher Δt_m mittlere log. Temp. diff. Δt_{\max} = $t_{a1} - t_{b1}$ Anfangstemp. Stoff a - Anfangstemp. Stoff b Δt_{\min} = $t_{a2} - t_{b2}$ Endtemp. Stoff a - Endtemp. Stoff b	W W/m m ² K K K
mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}\right)}$		
	$\Phi = \dot{m}_w \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2)$		
	$\dot{m}_w = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot c$		
	$\dot{V} = A \cdot c$		

Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs

Nußelt-Zahl	$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	Nu α λ l	Nußelt-Zahl Wärmeübergangszahl Wärmeleitzahl charakteristische Länge	1 W/m ² K W/mK m
Reynolds-Zahl	$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$	Re w l ν	Reynoldszahl Geschwindigkeit charakteristische Länge kin. Viskosität	1 m/s m m ² /s
Temperaturleitzahl	$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$	a λ ρ c_p	Temperaturleitzahl Wärmeleitzahl Dichte des Fluids spez. Wärmekap. $\rho = \text{const}$	1 W/mK kg/m ³ J/kgK
Prandtl-Zahl	$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$	Pr a λ ρ c_p η	Prandtl-Zahl Temperaturleitzahl Wärmeleitzahl Dichte des Fluids spez. Wärmekap. $\rho = \text{const}$ dyn. Viskosität	1 1 W/mK kg/m ³ J/kgK kg/ms
Peclet-Zahl	$Pe = \frac{w \cdot l}{a}$	Pe w a l	Peclet-Zahl Geschwindigkeit Temperaturleitzahl charakteristische Länge	1 m/s 1 m
Grashof-Zahl	$Gr = \frac{g \cdot \gamma \cdot \Delta t \cdot h^3}{\nu^2}$ $\Delta t = t_{\text{Fluid}} - t_{\text{Wand}} \quad ; \quad \gamma = \frac{1}{T_f}$	Gr g γ Δt ν h T_f	Grashof-Zahl Fallbeschl. 9,81 m/s ² Raumausdehnungskoeff. Temperaturdifferenz kin. Viskosität Höhe Fluidtemp.	1 m/s ² 1/K K m ² /s m K
Anhaltswerte		α [W/m ² K]		
	<p><u>Gase</u> freie Konv. 5-25 erzw. Konv. 12-120</p> <p><u>Wasser</u> freie Konv. 70-700 erzw. Konv. 600-12000 Verdampfung 2000-12000 Filmkondensation 4000-12000 Tropfenkondensat. 35000-45000</p>			

Wärmeübertragung durch Strahlung

Auftreten von Strahlung $a = 1$ für schwarze Körper $r = 1$ für weiße Körper $d = 0$ für feste und flüssige Körper	$a + r + d = 1$	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> WÄRME - STRAHLUNG </div>	a Absorptionskoeff. Aufnahme r Reflexionskoeff. d Durchlaßkoeff.	1 1 1
Emissionskoeffizient	$\epsilon = a$		a Absorptionskoeff. Aufnahme ϵ Emissionskoeff. S. 349	1 1
Energiestrom	$\dot{E} = \epsilon \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4$		ϵ Emissionskoeff. S. 349 C_s Strahlungskonst. schw. fK T Temp. des Körpers E° Energiestrom	1 W/m ² K K W/m ²
Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	$C_s = 5,67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$		

$$\Phi = \sigma_{12} \cdot A (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\sigma_{12} = 10^{-8} C_{12}$$

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

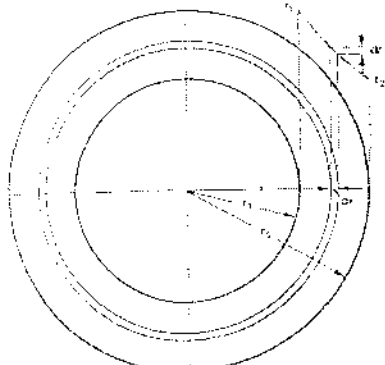
(s.o.)

$$\Phi = C_{12} \cdot A \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$

$$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

$$C_s = 5,67 \frac{W}{m^2 K^4}$$

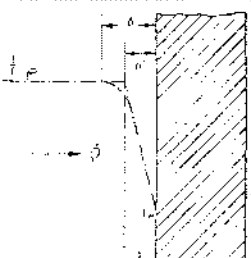
Zylindrische Wand

<p>Wärmestrom einschichtig</p> 	$\Phi = \frac{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	<p>Φ Wärmestrom λ Wärmeleitfähigkeit S.325-327 l Zylinderlänge t_1 Innentemperatur t_2 Außentemperatur r_1 Innenradius r_2 Außenradius</p> <p>W W/Km m K K m m</p>
<p>Wärmeleitwiderstand einschichtig</p>	$R_\lambda = \frac{t_1 - t_2}{\Phi} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot l}$	<p>R_λ Wärmeleitwiderstand Φ Wärmestrom λ Wärmeleitfähigkeit S.325-327 l Zylinderlänge t_1 Innentemperatur t_2 Außentemperatur r_1 Innenradius r_2 Außenradius</p> <p>K/W W W/Km m K K m m</p>
<p>Wärmeleitwiderstand für mehrschichtige Zyl.-Wand</p>	$R_{\lambda \text{ ges}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\Phi} = R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2} + \dots + R_{\lambda_n}$ $R_{\lambda \text{ ges}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right) \right]$	<p>R_λ Wärmeleitwiderstand Φ Wärmestrom λ Wärmeleitfähigkeit S.325-327 l Zylinderlänge t_1 Innentemperatur t_2 Außentemperatur r_1 Innenradius r_2 Außenradius</p> <p>K/W W W/Km m K K m m</p>
<p>Wärmestrom durch mehrschichtige Zylinderwand</p>	$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_{n+1})}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right)}$	<p>Φ Wärmestrom λ Wärmeleitfähigkeit S.325-327 δ Wanddicke t_1 Anfangstemperatur t_{n+1} Endtemperatur A Fläche \perp Wärmestromrichtung n Anz. der Schichten</p> <p>W W/Km m K K m²</p>

Hohlkugelwand

<p>Wärmestrom Vollkugel Halbkugel</p>	$\Phi = \frac{\lambda \cdot 4 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$	<p>Φ Wärmestrom λ Wärmeleitfähigkeit S.325-327 t_1 Innentemperatur t_2 Außentemperatur r_1 Innenradius r_2 Außenradius</p> <p>W W/Km K K m m</p>
---	--	--

(Konvektion)

<p>Wärmestrom durch Konvektion</p> 	<p style="text-align: center;">WÄRMEÜBERGANG</p> $\Phi = \dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (t_{\text{Fluid}} - t_{\text{Wand}})$ <p style="text-align: center;">bzw. $(t_{\text{Wand}} - t_{\text{Fluid}})$</p> <p>$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot \Delta t$ $h_w = c_w \cdot t_w \quad c_w = 4,2 \text{ kJ/kg}$</p>	<p>Φ Wärmestrom α Wärmeübergangszahl A Wandfläche t_{Fluid} Temp. Fluid t_{Wand} Temp. Wand</p> <p>W W/m²K m² K K</p>
<p>Wärmeübergangswiderstand</p>	$R_\alpha = \frac{t_1 - t_w}{\Phi} = \frac{1}{\alpha \cdot A}$	<p>R_α Wärmeübergangswid. Φ Wärmestrom α Wärmeübergangszahl A Wandfläche t_{Fluid} Temp. Fluid t_{Wand} Temp. Wand</p> <p>K/W W W/m²K m² K K</p>

T 6.1 Partialdruck des Wasserdampfes und absolute Feuchte (Partialdichte) in gesättigter feuchter Luft und anderen gesättigten Gasen¹

t °C	p_s bar	q_s $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	t °C	p_s bar	q_s $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
-20	0,001029	0,000881	26	0,03360	0,02437
-18	0,001247	0,001059	27	0,03564	0,02576
-16	0,001504	0,001267	28	0,03778	0,02723
-14	0,001809	0,001513	29	0,04004	0,02876
-12	0,002169	0,001800	30	0,04241	0,03037
-10	0,002594	0,002136	32	0,04753	0,03382
-8	0,003094	0,002529	34	0,05318	0,03759
-6	0,003681	0,002986	36	0,05940	0,04172
-4	0,004368	0,003517	38	0,06624	0,04624
-2	0,005172	0,004133	40	0,07375	0,05116
0	0,006108	0,004847	42	0,08198	0,05652
1	0,006566	0,005192	44	0,09100	0,06236
2	0,007055	0,005558	46	0,10086	0,06869
3	0,007575	0,005946	48	0,11162	0,07557
4	0,008129	0,006358	50	0,12335	0,08302
5	0,008718	0,006795	52	0,13613	0,09108
6	0,009345	0,007258	54	0,15002	0,09979
7	0,010012	0,007748	56	0,16511	0,1092
8	0,010720	0,008267	58	0,18147	0,1193
9	0,011472	0,008816	60	0,1992	0,1302
10	0,012270	0,009396	62	0,2184	0,1420
11	0,013116	0,01001	64	0,2391	0,1546
12	0,014014	0,01066	66	0,2615	0,1681
13	0,014965	0,01134	68	0,2856	0,1826
14	0,015973	0,01206	70	0,3116	0,1982
15	0,017039	0,01282	72	0,3396	0,2148
16	0,018168	0,01363	74	0,3696	0,2326
17	0,019362	0,01447	76	0,4019	0,2515
18	0,02062	0,01536	78	0,4365	0,2718
19	0,02196	0,01630	80	0,4736	0,2933
20	0,02337	0,01729	90	0,7011	0,4235
21	0,02485	0,01833	100	1,0133	0,5977
22	0,02642	0,01942			
23	0,02808	0,02057			
24	0,02982	0,02177			
25	0,03166	0,02304			

T 8.2 Wärmeübertragungseigenschaften einiger Flüssigkeiten¹

Stoff	t °C	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	λ $\frac{\text{W}}{\text{K m}}$	γ $\frac{1}{\text{K}}$	η $\frac{\text{kg Ns}}{\text{m s m}^2}$	ν $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	a $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr —
Ammoniak (NH ₃)	20	610	4,77	0,494	0,00244	$220 \cdot 10^{-6}$	$0,361 \cdot 10^{-6}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$	2,12
Wasser	0	999,8	4,217	0,555	0,00006	$1790 \cdot 10^{-6}$	$1,789 \cdot 10^{-6}$	$0,132 \cdot 10^{-6}$	13,6
Wasser	20	998,2	4,182	0,598	0,00020	$1002 \cdot 10^{-6}$	$1,006 \cdot 10^{-6}$	$0,143 \cdot 10^{-6}$	7,03
Wasser	60	983	4,184	0,651	0,00054	$469 \cdot 10^{-6}$	$0,478 \cdot 10^{-6}$	$0,159 \cdot 10^{-6}$	3,01
Wasser	100	958	4,216	0,681	0,00078	$282 \cdot 10^{-6}$	$0,294 \cdot 10^{-6}$	$0,169 \cdot 10^{-6}$	1,75
Wasser	200	865	4,499	0,665	0,00155	$138 \cdot 10^{-6}$	$0,160 \cdot 10^{-6}$	$0,171 \cdot 10^{-6}$	0,94
Transformatoröl	40	854	1,99	0,123	0,00069	$14220 \cdot 10^{-6}$	$16,7 \cdot 10^{-6}$	$0,072 \cdot 10^{-6}$	230
Transformatoröl	80	830	2,09	0,120	0,00071	$4315 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$0,066 \cdot 10^{-6}$	79,4

¹ Bei 0,980665 bar. Wenn der Dampfdruck größer ist, bei dem zu der genannten Temperatur gehörenden Sättigungsdruck.

T 8.3b Wärmeübertragungseigenschaften einiger Gase bei 0,980665 bar²

Stoff	t °C	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	λ $\frac{\text{W}}{\text{K m}}$	η $\frac{\text{kg Ns}}{\text{m s m}^2}$	ν $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	a $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr —
Kohlendioxid (CO ₂)	50	1,617	0,875	0,0178	$16,2 \cdot 10^{-6}$	$10,0 \cdot 10^{-6}$	$12,6 \cdot 10^{-6}$	0,80
Kohlenmonoxid (CO)	0	1,210	1,040	0,022	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$13,28 \cdot 10^{-6}$	$16,74 \cdot 10^{-6}$	0,794
Sauerstoff (O ₂)	20	1,289	0,915	0,026	$20,3 \cdot 10^{-6}$	$18,4 \cdot 10^{-6}$	$25,7 \cdot 10^{-6}$	0,716
Schwefeldioxid (SO ₂)	0	2,832	0,609	0,0084	$11,6 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$	0,86
Stickstoff (N ₂)	0	1,210	1,039	0,023	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$13,26 \cdot 10^{-6}$	$18,3 \cdot 10^{-6}$	0,725
Wasserdampf (H ₂ O)	100	0,578	1,88	0,0242	$12,8 \cdot 10^{-6}$	$22,1 \cdot 10^{-6}$	$19,6 \cdot 10^{-6}$	1,12
Wasserdampf (H ₂ O)	200	0,452	1,93	0,0328	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$36,8 \cdot 10^{-6}$	$37,6 \cdot 10^{-6}$	0,97
Wasserdampf (H ₂ O)	400	0,316	2,05	0,0551	$23,5 \cdot 10^{-6}$	$74,4 \cdot 10^{-6}$	$85,0 \cdot 10^{-6}$	0,88
Wasserstoff (H ₂)	50	0,0735	14,4	0,202	$9,42 \cdot 10^{-6}$	$128 \cdot 10^{-6}$	$191 \cdot 10^{-6}$	0,67
Ammoniak (NH ₃)	100	0,540	2,23	0,0300	$13,0 \cdot 10^{-6}$	$24,1 \cdot 10^{-6}$	$24,9 \cdot 10^{-6}$	0,97

Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ (näherungsweise) bei 0,980665 bar

Luft	$\{\lambda\} = 0,0242 (1 + 0,003 \{t\})$ in W/K · m
Kohlendioxid (CO ₂)	$\{\lambda\} = 0,0143 (1 + 0,004 \{t\})$ in W/K · m
Wasserstoff (H ₂)	$\{\lambda\} = 0,176 (1 + 0,003 \{t\})$ in W/K · m

² ρ und c_p teilweise aus T 2.1 berechnet.
Werte aus Gröber / Erk / Grigull [9].

$$\gamma = \frac{1}{T_f} \quad (\text{s. Erläuterungen zu Gl 8.14})$$

$$\nu = \nu_{\text{Tab}} \frac{\rho_{\text{Tab}}}{p}$$

T 8.1 Wärmeübertragungseigenschaften einiger fester Stoffe¹

	t °C	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	λ $\frac{\text{W}}{\text{K m}}$	a $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Aluminium 99,75	20	2700	0,896	229	$94,6 \cdot 10^{-6}$
Stahl, unlegiert	0	7850	0,465	59	$16,2 \cdot 10^{-6}$
Stahl, unlegiert	200	7800	0,535	52	$12,5 \cdot 10^{-6}$
Stahl, unlegiert	400	7730	0,630	44	$9,0 \cdot 10^{-6}$
Kupfer, Handelsware	20	8300	0,419	372	$107 \cdot 10^{-6}$
Messing	20	8600	0,381	81–116	$25–35 \cdot 10^{-6}$
Zink	20	7130	0,835	113	$39 \cdot 10^{-6}$
Kiesbeton	20	2200	0,879	1,28	$0,66 \cdot 10^{-6}$
Fensterglas	20	2480	0,70–0,93	1,16	$0,59 \cdot 10^{-6}$
Ziegelmauerwerk	20	1420–1460	–	0,76	$0,55 \cdot 10^{-6}$
Glaswolle	25	120	0,66	0,046	$0,58 \cdot 10^{-6}$

¹ Werte aus Gröber/Erk/Grigull [9], erweitert durch Werte aus Stephan/Mayinger [6].

T 8.3a Wärmeübertragungseigenschaften von trockener Luft bei 1 bar¹

t °C	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	λ $\frac{\text{W}}{\text{K m}}$	η $\frac{\text{kg}}{\text{ms}}$	ν $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	a $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr –
–20	1,3765	1,007	0,02263	$16,22 \cdot 10^{-6}$	$11,78 \cdot 10^{-6}$	$16,33 \cdot 10^{-6}$	0,7215
0	1,2754	1,004	0,02418	$17,24 \cdot 10^{-6}$	$13,52 \cdot 10^{-6}$	$18,83 \cdot 10^{-6}$	0,7179
20	1,1881	1,007	0,02569	$18,24 \cdot 10^{-6}$	$15,35 \cdot 10^{-6}$	$21,47 \cdot 10^{-6}$	0,7148
40	1,1120	1,007	0,02716	$19,20 \cdot 10^{-6}$	$17,26 \cdot 10^{-6}$	$24,24 \cdot 10^{-6}$	0,7122
60	1,0452	1,009	0,02860	$20,14 \cdot 10^{-6}$	$19,27 \cdot 10^{-6}$	$27,13 \cdot 10^{-6}$	0,7100
80	0,9859	1,010	0,03001	$21,05 \cdot 10^{-6}$	$21,35 \cdot 10^{-6}$	$30,14 \cdot 10^{-6}$	0,7083
100	0,9329	1,012	0,03139	$21,94 \cdot 10^{-6}$	$23,51 \cdot 10^{-6}$	$33,26 \cdot 10^{-6}$	0,7070
120	0,8854	1,014	0,03275	$22,80 \cdot 10^{-6}$	$25,75 \cdot 10^{-6}$	$36,48 \cdot 10^{-6}$	0,7060
140	0,8425	1,016	0,03408	$23,65 \cdot 10^{-6}$	$28,07 \cdot 10^{-6}$	$39,80 \cdot 10^{-6}$	0,7054
160	0,8036	1,019	0,03539	$24,48 \cdot 10^{-6}$	$30,46 \cdot 10^{-6}$	$43,21 \cdot 10^{-6}$	0,7050
180	0,7681	1,022	0,03668	$25,29 \cdot 10^{-6}$	$32,93 \cdot 10^{-6}$	$46,71 \cdot 10^{-6}$	0,7049
200	0,7356	1,026	0,03795	$26,09 \cdot 10^{-6}$	$35,47 \cdot 10^{-6}$	$50,30 \cdot 10^{-6}$	0,7051
250	0,6653	1,035	0,04106	$28,02 \cdot 10^{-6}$	$42,11 \cdot 10^{-6}$	$59,62 \cdot 10^{-6}$	0,7063
300	0,6072	1,046	0,04409	$29,86 \cdot 10^{-6}$	$49,18 \cdot 10^{-6}$	$69,43 \cdot 10^{-6}$	0,7083
400	0,5170	1,069	0,04996	$33,35 \cdot 10^{-6}$	$64,51 \cdot 10^{-6}$	$90,38 \cdot 10^{-6}$	0,7137
500	0,4502	1,093	0,05564	$36,62 \cdot 10^{-6}$	$81,35 \cdot 10^{-6}$	$113,1 \cdot 10^{-6}$	0,7194
600	0,3986	1,116	0,06114	$39,71 \cdot 10^{-6}$	$99,63 \cdot 10^{-6}$	$137,5 \cdot 10^{-6}$	0,7247
700	0,3576	1,137	0,06646	$42,66 \cdot 10^{-6}$	$119,3 \cdot 10^{-6}$	$163,5 \cdot 10^{-6}$	0,7295
800	0,3243	1,155	0,07154	$45,48 \cdot 10^{-6}$	$140,2 \cdot 10^{-6}$	$191,0 \cdot 10^{-6}$	0,7342
900	0,2967	1,171	0,07633	$48,19 \cdot 10^{-6}$	$162,4 \cdot 10^{-6}$	$219,7 \cdot 10^{-6}$	0,7395
1000	0,2734	1,185	0,08077	$50,82 \cdot 10^{-6}$	$185,9 \cdot 10^{-6}$	$249,2 \cdot 10^{-6}$	0,7458

¹ Werte aus VDI-Wärmeatlas, Auszug [10], c_p bei 0 °C nach Baehr [1] und Stephan/Mayinger [6].

T 8.5 Wärmeübergangskoeffizienten (Anhaltswerte)

	Wärmeübergangskoeffizient α in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	
	erreichbare Werte	in der Praxis übliche Werte
1. <i>Gase und Dämpfe</i>		
freie Strömung	5 ... 25	8 ... 15
erzwungene Strömung	12 ... 120	20 ... 60
2. <i>Wasser</i>		
freie Strömung	70 ... 700	200 ... 400
erzwungene Strömung	600 ... 12000	2000 ... 4000
Verdampfung	2000 ... 12000	ca. 4000
Filmkondensation	4000 ... 12000	ca. 6000
Tropfenkondensation	35000 ... 45000	–
3. <i>Zähe Flüssigkeiten</i>		
erzwungene Strömung	60 ... 600	300 ... 400