

Thermodynamik

1	THERMODYNAMIK	3
1.1	ZUSTANDSGRÖSSEN	3
1.1.1	Spezifisches Volumen	3
1.1.2	Druck	3
1.1.3	Temperatur	3
1.2	THERMISCHE ZUSTANDSGLEICHUNG	3
1.2.1	Wärmekapazitäten	3
1.2.1.1	Kappawerte	3
1.2.1.2	Normvolumen	3
1.2.1.3	Molare Gaskonstante (= Universelle oder Allgemeine Gaskonstante)	3
1.2.1.4	Mittlere Wärmekapazitäten	4
1.2.2	Weitere Zustandsgleichungen	4
1.2.2.1	Zustandsgleichung von „van der Waals“	4
1.2.2.2	Zustandsgleichung von „Kamerlingh-Onnes“ (Polynom)	4
1.3	ERSTER HAUPTSATZ	4
1.3.1	Zustandsgrößen	4
1.3.1.1	Innere Energie	4
1.3.1.2	Enthalpie	4
1.3.2	Geschlossenes System	4
1.3.2.1	Volumenänderungsarbeit	4
1.3.2.2	Dissipation	4
1.3.2.3	Nutzarbeit	4
1.3.3	Offenes System	5
1.3.3.1	Druckänderungsarbeit	5
1.3.3.2	mit kE_A/pE_A	5
1.4	ZWEITER HAUPTSATZ	5
1.4.1	Entropie	5
1.5	ZUSTANDSÄNDERUNGEN	5
1.5.1	Polytrope Zustandsänderung	5
1.5.1.1	Polytropenexponent	5
1.6	GASGEMISCHE	6
1.6.1	Massenanteil	6
1.6.2	Raumanteil (= Molanteil = Volumenanteil)	6
1.6.3	Molmasse	6
1.6.4	Umrechnung	6
1.6.5	Scheinbare Molmasse & Gaskonstante	6
1.6.6	Kalorische Zustandsgrößen von Gasgemischen	6
1.7	IDEALISIERTE KREISPROZESSE	7
1.7.1	Otto-Prozess	7
1.7.1.1	Verdichtungsverhältnis	7
1.7.2	Diesel-Prozess	7
1.7.2.1	Einspritzverhältnis	7
1.7.3	Seilinger-Prozess	7
1.7.3.1	Drucksteigerungsverhältnis	7
1.7.4	Carnot-Prozess	8
1.7.5	Joule-Prozess (Vergleichsprozess bei Gasturbinenanlagen mit zwei Wärmet.)	8
1.7.5.1	Druckverhältnis	8
1.7.6	Eriesson-Prozess (Vergleichsprozess bei Gasturbinenanlagen mit einem Wrm.)	8
1.8	DISSIPATIONSBEHAFTETE ABLÄUFE	8
1.8.1	Dissipationsbehaftete Verdichtung	8
1.8.2	Dissipationsbehaftete Expansion	8
1.8.3	Adiabate Drosselung (sehr schnelle ZÄ)	8
1.9	DÜSE	9
1.9.1	Überschalldüse	9
1.9.1.1	Schallgeschwindigkeit	9
1.10	REALER GASTURBINENPROZESS	9
1.11	KREISPROZESSE IM NASSDAMPFGEBIET	10
1.11.1	Zustandsgrößen im Nassdampfgebiet	10
1.11.2	Dissipationsbehaftete Abläufe	10
1.11.2.1	Dissipationsbehaftete Verdichtung	10
1.11.2.2	Dissipationsbehaftete Expansion	10
1.11.3	Clausius+Rankine-Prozess	10
1.11.3.1	Annäherung für Pumpenarbeit	10
1.11.4	GuD-Anlagen	10
1.12	LINKSLAUFENDE KREISPROZESSE	10
1.12.1	Leistungszahl	10
1.12.1.1	Kälteanlage	10
1.12.1.2	Wärmepumpeanlage	10

1.13	WÄRMEÜBERTRAGUNG	11
1.13.1	Wärmewiderstand	11
1.13.2	Wärmeleitung	11
1.13.2.1	Ebene Wand	11
1.13.2.2	Zylinder	11
1.13.2.3	Hohlkugel	11
1.13.2.4	Wand mit mehreren Schichten (Serieschaltung)	11
1.13.3	Wärmeübergang	11
1.13.3.1	Widerstand	11
1.13.3.2	Nusseltzahl	11
1.13.3.3	Prantlzahl	12
1.13.3.4	Grassofzahl	12
1.13.4	Wärmedurchgang	12
1.13.4.1	Wärmedurchgangswiderstand	12
1.13.4.2	Wärmedurchgangskoeffizient	12
1.13.4.3	Zylinder	12
1.13.4.4	Hohlkugel	12
1.13.5	Wärmeübertrager	12
1.13.5.1	Mittlere Logarithmische Temperaturdifferenz	12

1 Thermodynamik

1.1 Zustandsgrössen

1.1.1 Spezifisches Volumen

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

1.1.2 Druck

$$p = \frac{F_n}{A}$$

1bar = 10⁵ Pa
 1atm = 760mmHg = 1,01325bar(a)
 1Torr = 1mmHg

1.1.3 Temperatur

0K = -273.15°C
 $t_{°C} = \frac{5}{9} \cdot (t_F - 32)$
 $T_K = \frac{5}{9} \cdot T_R$

1.2 Thermische Zustandsgleichung

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

$$p \cdot v = R_i \cdot T$$

1.2.1 Wärmekapazitäten

$$c_p = \frac{dh}{dT} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R_i$$

$$c_v = \frac{du}{dT} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot R_i$$

$$c_p - c_v = R_i$$

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

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

T ↑:
 R = const
 c_p ↑
 c_v ↑
 κ = $\frac{c_p}{c_v}$ ↓

1.2.1.1 Kappawerte

1 Atomige Gase : κ ≈ 1.67
 2 Atomige Gase : κ ≈ 1.4

1.2.1.2 Normvolumen

$$V_{m, norm} = 22.4141 [m^3 / kmol]$$

1.2.1.3 Molare Gaskonstante (= Universelle oder Allgemeine Gaskonstante)

$$R_M = \langle T | 89 : _ Rc \rangle = M \cdot R_i = \frac{p \cdot V_m}{T} = \frac{101325 \cdot 22.4141}{273.15} = 8314.51 \left[\frac{J}{kmol \cdot K} \right]$$

$$v = \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

$$V = [m^3]$$

$$m = [kg]$$

$$\rho = \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$F = [N]$$

$$A = [m^2]$$

$$t = [°C]$$

$$T = [K]$$

$$R_i = \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] = \left[\frac{m^2}{K \cdot s^2} \right]$$

$$c_p = c_v = \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] = \left[\frac{m^2}{K \cdot s^2} \right]$$

$$M = \left[\frac{kmol}{kg} \right]$$

$$R_m = \left[\frac{J}{kmol \cdot K} \right]$$

1.2.1.4 Mittlere Wärmekapazitäten

$$c_{pm} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm} \Big|_{0°C}^{t_2} \cdot (t_2 - 0°C) - c_{pm} \Big|_{0°C}^{t_1} \cdot (t_1 - 0°C)}{t_2 - t_1}$$

$$c_{vm} \Big|_{t_1}^{t_2} = c_{pm} \Big|_{t_1}^{t_2} - R_i$$

1.2.2 Weitere Zustandsgleichungen

1.2.2.1 Zustandsgleichung von „van der Waals“

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b) = R_i \cdot T$$

$$v^3 - v^2 \cdot \left(\frac{R_i \cdot T}{p} + b \right) + v \cdot \frac{a}{p} - \frac{a \cdot b}{p} = 0$$

a, b sind stoffabhängige Konstanten

1.2.2.2 Zustandsgleichung von „Kamerlingh-Onnes“ (Polynom)

$$p = \frac{R_i \cdot T}{v} + \frac{K_2(T)}{v^2} + \frac{K_3(T)}{v^3} + \frac{K_4(T)}{v^4} + \dots$$

1.3 Erster Hauptsatz

1.3.1 Zustandsgrössen

1.3.1.1 Innere Energie

$$u_2 - u_1 = c_{vm} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$U_2 - U_1 = m \cdot c_{vm} \cdot (T_2 - T_1)$$

1.3.1.2 Enthalpie

$$h = u + p \cdot v$$

$$h_2 - h_1 = c_{pm} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$H_2 - H_1 = m \cdot c_{pm} \cdot (T_2 - T_1)$$

1.3.2 Geschlossenes System

$$U_2 - U_1 = W_{v12} + J_{12} + Q_{12} = W_{ges12} + Q_{12}$$

1.3.2.1 Volumenänderungsarbeit

$$W_{v12} = - \int_1^2 p \, dV$$

1.3.2.2 Dissipation

$$J_{12} \geq 0$$

1.3.2.3 Nutzarbeit

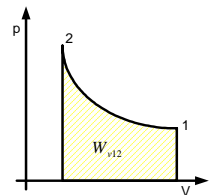
$$W_{nutz12} = - \int_1^2 p \cdot dV - \left(- \int_1^2 p_{umg} \cdot dV \right) = W_{v12} - W_{umg12}$$

$$u = \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$U = [J]$$

$$h = \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$H = [J]$$



1.3.3 Offenes System

$$u_2 + p_2 \cdot v_2 - u_1 - p_1 \cdot v_1 = q_{12} + w_{p12} + j_{12}$$

$$h_2 - h_1 = q_{12} + w_{i12}$$

1.3.3.1 Druckänderungsarbeit

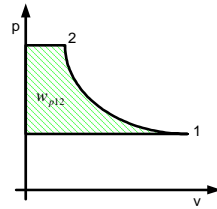
$$w_{p12} = -p_1 \cdot v_1 + w_{i12} + p_2 \cdot v_2 = + \int_1^2 v \cdot dp$$

1.3.3.2 mit KEÄ/pEÄ

$$h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) = q_{12} + w_{p12} + w_{KEÄ} + w_{pEÄ} + j_{12}$$

$$P_{i12}^* = \dot{m} \cdot w_{i12}^*$$

$$W_{i12}^* = w_{p12} + w_{KEÄ} + w_{pEÄ} + j_{12}$$



1.4 Zweiter Hauptsatz

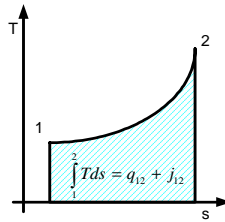
1.4.1 Entropie

$$ds = \frac{dq}{T} + dj = \frac{du + p \cdot dv}{T} = \frac{dh - v \cdot dp}{T}$$

$$s_2 - s_1 = c_{vm} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R_i \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = c_{pm} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_i \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$s = \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$$S = \left[\frac{J}{K} \right]$$



1.5 Zustandsänderungen

1.5.1 Polytrope Zustandsänderung

$$p \cdot v^n = konst$$

$$\text{Isobar: } n=0$$

$$\text{Isotherm: } n=1$$

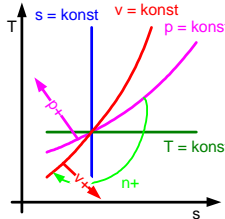
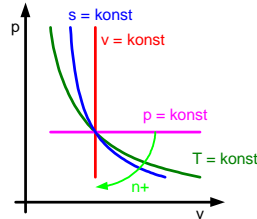
$$\text{Isentrop: } n=\kappa$$

$$\text{Isochor: } n=\infty$$

$$\text{Polytrop: } n = -\infty, \dots, +\infty$$

1.5.1.1 Polytropenexponent

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



1.6 Gasmische

1.6.1 Massenanteil

$$m_{Ges} = \sum m_i$$

$$\xi_i = \frac{m_i}{m_{Ges}}$$

$$m = [kg]$$

$$n = [mol]$$

1.6.2 Raumanteil (= Molanteil = Volumenanteil)

$$n_{Ges} = \sum n_i$$

$$\psi_i = \frac{n_i}{n_{Ges}}$$

$$r_i = \frac{V_i}{V_{Ges}}$$

1.6.3 Molmasse

$$M_i = \frac{m_i}{n_i} = \frac{\xi_i \cdot m_{Ges}}{n_i}$$

$$n_i = \frac{\xi_i}{M_i} \cdot m_{Ges}$$

$$M = \left[\frac{kg}{mol} \right]$$

1.6.4 Umrechnung

$$\xi_i = \psi_i \cdot \frac{M_i}{M_{Ges}}$$

$$\psi_i = \xi_i \cdot \frac{M_{Ges}}{M_i}$$

1.6.5 Scheinbare Molmasse & Gaskonstante

$$M_{Ges} = \frac{m_G}{n_G} = \sum (\psi_i \cdot M_i)$$

$$R_{Ges} = \frac{R_m}{M_{Ges}}$$

1.6.6 Kalorische Zustandsgrößen von Gasmischen

$$c_{pGes} = \sum (\xi_i \cdot c_{pi})$$

$$h_{Ges} = \sum (\xi_i \cdot h_i)$$

$$c_{vGes} = \sum (\xi_i \cdot c_{vi})$$

$$u_{Ges} = \sum (\xi_i \cdot u_i)$$

$$s_{G2} - s_{G1} = c_{pGes} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_G \cdot \ln\left(\frac{p_{G2}}{p_{G1}}\right) - \sum (\xi_i \cdot R_i \cdot \ln(r_i))$$

1.7 Idealisierte Kreisprozesse

Keine Dissipation, Keine Wärmeverluste

$$w_{Kreis} = -q_{Kreis} = -\int T ds$$

$$\eta = \frac{|w_{Kreis}|}{q_{zu}}$$

$$\frac{T_y}{T_x} = \frac{T_y - T_x}{\ln \left| \frac{T_y}{T_x} \right|}$$

$$q_{ab} = \int_a^b T ds$$

1.7.1 Otto-Prozess

- 1->2 s=const Isentrope Verdichtung
- 2->3 v=const Isochore Druckerhöhung durch Wärmezufuhr = Wärmezufuhr bei konstantem Volumen
- 3->4 s=const Isentrope Expansion der Luft
- 4->1 v=const Isochore Druckreduktion durch Wärmeabfuhr

$$\eta_{thOtto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} = 1 - e^{1-\kappa} = 1 - \frac{T_{41}}{T_{23}} = \frac{|w_{Kreis}|}{q_{zu}}$$

1.7.1.1 Verdichtungsverhältnis

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

1.7.2 Diesel-Prozess

- 1->2 s=const Isentrope Verdichtung
- 2->3 p=const Isobare Expansion durch Wärmezufuhr = Wärmezufuhr bei konstantem Druck
- 3->4 s=const Isentrope Expansion der Luft
- 4->1 v=const Isochore Druckreduktion durch Wärmeabfuhr

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

$$\eta_{thDiesel} = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\phi^{\kappa} - 1}{\phi - 1} = 1 - \frac{T_{41}}{T_{23}} = \frac{|w_{Kreis}|}{q_{zu}} = \frac{c_p \cdot (T_3 - T_2) - c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)}$$

1.7.2.1 Einspritzverhältnis

$$\phi = \frac{v_3}{v_2}$$

1.7.3 Seilinger-Prozess

- 1->2 s=const Isentrope Verdichtung
- 2->3 v=const Isochore Druckerhöhung durch Wärmezufuhr
- 3->4 p=const Isobare Expansion durch Wärmezufuhr
- 4->5 s=const Isentrope Expansion
- 5->1 v=const Isochore Druckreduktion

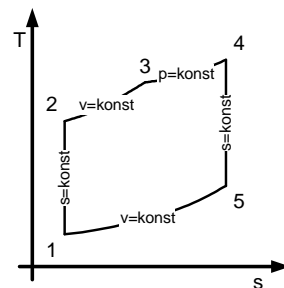
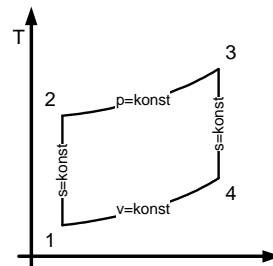
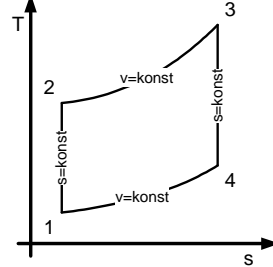
$$\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

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

$$\eta_{thSeilinger} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\psi \cdot \phi^{\kappa} - 1}{\psi - 1 + \kappa \cdot \psi \cdot (\phi - 1)} = \frac{|w_{Kreis}|}{q_{zu}}$$

1.7.3.1 Drucksteigerungsverhältnis

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

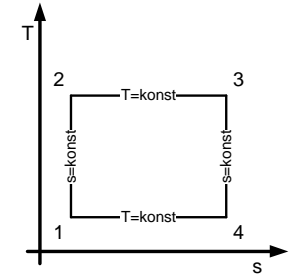


1.7.4 Carnot-Prozess

Technisch nicht möglich

- 1->2 t=const Isotherme Verdichtung mit Wärmezufuhr
- 2->3 s=const Isentrope Verdichtung
- 3->4 t=const Isotherme Expansion mit Wärmeabfuhr
- 4->1 s=const Isentrope Expansion

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$



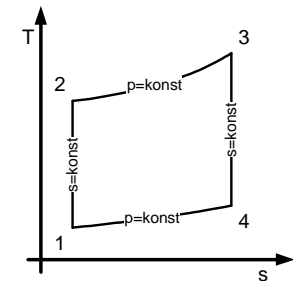
1.7.5 Joule-Prozess (Vergleichsprozess bei Gasturbinenanlagen mit zwei Wärmet.)

- 1->2 s=const Isentrope Verdichtung
- 2->3 p=const Isobare Wärmezufuhr (durch Wärmetauscher)
- 3->4 s=const Isentrope Expansion
- 4->1 p=const Isobare Wärmeabfuhr (durch Wärmetauscher)

$$\eta_{thJoule} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = \frac{|w_{Kreis}|}{q_{zu}}$$

1.7.5.1 Druckverhältnis

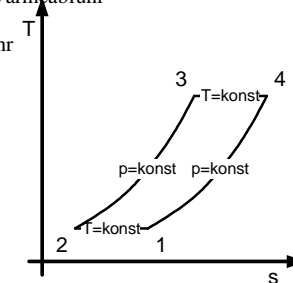
$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}$$



1.7.6 Ericsson-Prozess (Vergleichsprozess bei Gasturbinenanlagen mit einem Wärmt.)

- 1->2 t=const Isotherme Verdichtung der Luft bei gleichzeitiger Wärmeabfuhr
- 2->3 p=const Isobare Wärmezufuhr (durch Wärmetauscher)
- 3->4 t=const Isotherme Expansion bei gleichzeitiger Wärmezufuhr
- 4->1 p=const Isobare Wärmeabfuhr (durch Wärmetauscher)

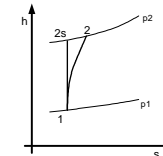
$$\eta_{thEricsson} = \eta_{thCarnot} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = \frac{|w_{Kreis}|}{q_{zu}}$$



1.8 Dissipationsbehaftete Abläufe

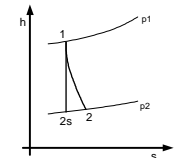
1.8.1 Dissipationsbehaftete Verdichtung

$$\eta_{VerdSt} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$



1.8.2 Dissipationsbehaftete Expansion

$$\eta_{ExpSt} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \Rightarrow \frac{T_2 - T_1}{T_{2s} - T_1}$$

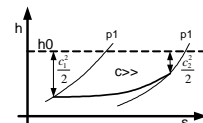
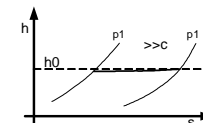
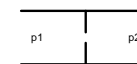


1.8.3 Adiabate Drosselung (sehr schnelle ZÄ)

$$h_0 = h + \frac{c^2}{2}$$

$$c \ll \Rightarrow h_2 \approx h_1$$

$$c \gg \Rightarrow h_2 > h_1$$



1.9 Düse

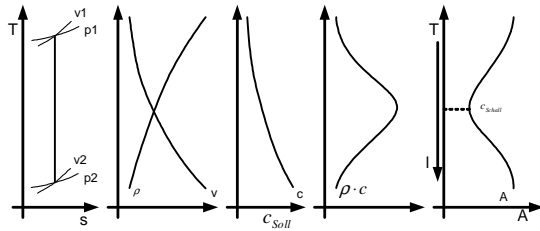
1.9.1 Überschalldüse

$$\rho = \frac{1}{v}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot c \cdot A$$

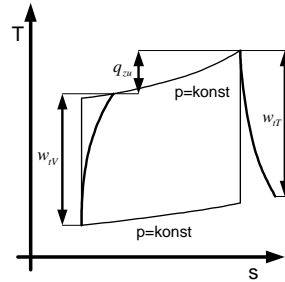
1.9.1.1 Schallgeschwindigkeit

$$c_{Schall} = \sqrt{\kappa \cdot R_i \cdot T}$$



1.10 realer Gasturbinenprozess

$$w_k = w_{IT} - w_{IV}$$



1.11 Kreisprozesse im Nassdampfgebiet

1.11.1 Zustandsgrößen im Nassdampfgebiet

$$h_x = (1-x) \cdot h' + x \cdot h'' = h' + x \cdot (h'' - h')$$

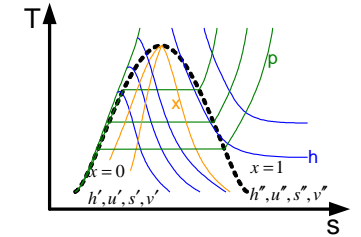
$$s_x = (1-x) \cdot s' + x \cdot s'' = s' + x \cdot (s'' - s')$$

$$u_x = \dots ; v_x = \dots$$

$$x = \frac{m''}{m' + m''}$$

$$m'' = x \cdot (m' + m'') = x \cdot m_{total}$$

$$m' = (1-x) \cdot (m' + m'') = (1-x) \cdot m_{total}$$



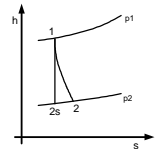
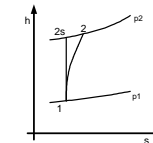
1.11.2 Dissipationsbehaftete Abläufe

1.11.2.1 Dissipationsbehaftete Verdichtung

$$\eta_{VerdS} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

1.11.2.2 Dissipationsbehaftete Expansion

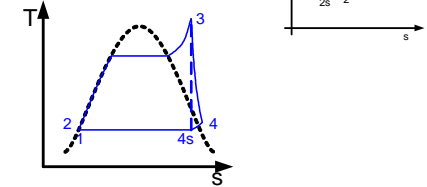
$$\eta_{ExpS} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1}$$



1.11.3 Clausius+Rankine-Prozess

$$\eta_{hCR} = \frac{|w_k|}{q_{zu}} = \frac{|w_{12} + w_{34}|}{q_{zu}} = \frac{[(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)]}{h_3 - h_2}$$

$$x_{4min} = 0.85$$



1.11.3.1 Annäherung für Pumpenarbeit

$$w_{Pumpe} (= w_{12}) = \Delta p \cdot v$$

1.11.4 GuD-Anlagen

$$\eta_{Gesamt} = \eta_{hGT} + \eta_{hDy-DT} (1 - \eta_{hGT})$$

1.12 Linkslaufende Kreisprozesse

1.12.1 Leistungszahl

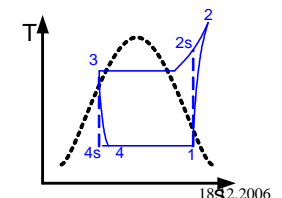
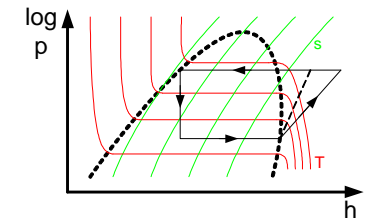
$$\varepsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{q}{w_{Kreis}}$$

1.12.1.1 Kälteanlage

$$\varepsilon = \frac{q_{zu}}{w_{Kreis}}$$

1.12.1.2 Wärmepumpeanlage

$$\varepsilon = \frac{|q_{ab}|}{w_{Kreis}}$$



1.13 Wärmeübertragung

1.13.1 Wärmewiderstand

$$R = \frac{|\Delta T|}{\dot{Q}}$$

1.13.2 Wärmeleitung

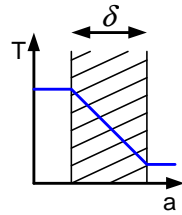
1.13.2.1 Ebene Wand

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t$$

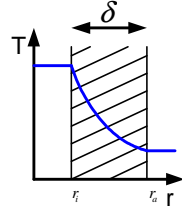
$$R = \frac{\delta}{\lambda \cdot A}$$



1.13.2.2 Zylinder

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A(r) \cdot \frac{dt}{dr}$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot l}$$



1.13.2.3 Hohlkugel

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot 4 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{1/r_1 - 1/r_2}$$

$$R = \frac{1/r_1 - 1/r_2}{\lambda \cdot 4 \cdot \pi}$$

1.13.2.4 Wand mit mehreren Schichten (Serieschaltung)

$$R_{ges} = \sum R_i$$

1.13.3 Wärmeübergang

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (t_{Fluid} - t_{Wand})$$

1.13.3.1 Widerstand

$$R_0 = \frac{1}{\alpha \cdot A}$$

1.13.3.2 Nusseltzahl

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

1.13.3.2.1 Erzwungene Konvektion

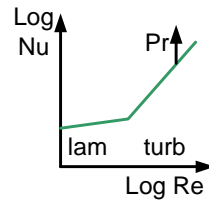
$$Nu = Nu(Re, Pr)$$

1.13.3.2.2 Freie Konvektion

$$\begin{aligned} Q &= [Ws] \\ \lambda &= \left[\frac{W}{K \cdot m} \right] \\ A &= [m^2] \\ t_s &= [^{\circ}C (= K)] \\ \tau &= [s] \\ \Delta t &= [K] \\ \dot{Q} &= [W] \\ R &= \left[\frac{K}{W} \right] \\ \dot{q} &= \left[\frac{W}{m^2} \right] \\ \delta &= [m] \end{aligned}$$

$$\alpha = \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$Nu = [-]$$



$$Nu = Nu(Gr, Pr)$$

1.13.3.3 Prantlzahl

$$Pr \sim \frac{\delta_{Strömungs-Grenzschicht}}{\delta_{Temperatur-Grenzschicht}}$$

$$Pr = Pr(\lambda, \nu)$$

	Pr (0.0.. - 1000)
Feste Stoffe	>100
Flüssigkeiten	10..100
Gase	<10

1.13.3.4 Grassofzahl

$$Gr \sim \frac{\Delta \rho}{\nu^2} = \frac{F_{Auftrieb}}{F_{Reibung}}$$

1.13.4 Wärmedurchgang

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (t_{Fluid1} - t_{Fluid2})$$

1.13.4.1 Wärmedurchgangswiderstand

$$R_d = \frac{t_{Fluid1} - t_{Fluid2}}{\dot{Q}} = \frac{1}{k \cdot A}$$

$$R_d = R_{01} + \sum_{Wand} R_i + R_{02}$$

1.13.4.2 Wärmedurchgangskoeffizient

1.13.4.2.1 Ebene Wand

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k = \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

1.13.4.3 Zylinder

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_{Fluid1} - t_{Fluid2})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2}}$$

1.13.4.4 Hohlkugel

$$\dot{Q} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (t_{Fluid1} - t_{Fluid2})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1^2} + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2^2}}$$

1.13.5 Wärmeübertrager

$$\dot{Q} = k_m \cdot A \cdot \Delta T_m = -\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta T_2$$

1.13.5.1 Mittlere Logarithmische Temperaturdifferenz

$$\Delta T_{mLog} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_0}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_0}\right)}$$

