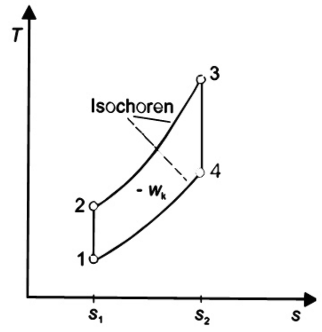
Ü 11.1 Nachrechnung eines Otto-Vergleichsprozesses – (1)

Annahmen: Arbeitsmedium ist Luft, die spezifischen Wärmekapazitäten sind konstant

Anfangstemperatur	$T_1 = 288$ K
Anfangsdruck	$p_1 = 1.013$ bar
Maximaltemperatur	$T_3 = 2273$ K
Isentropenexponent von Luft	$\kappa = 1.4$
Verdichtungsverhältnis	$\varepsilon = 10$



ges.:
- Drücke und Temperaturen in allen Eckpunkten
- Thermischer Wirkungsgrad

1 - 2 Isentrope Kompression

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1 \cdot \varepsilon^{\kappa} = 1.013\,bar \cdot 10^{1.4} = 25.45\,bar$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = 288\,K \cdot 10^{1.4-1} = 723.4\,K$$

2 - 3 Isochore Wärmezufuhr

$$p_3 = p_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 25.45\,bar \cdot \frac{2273\,K}{723.4\,K} = 79.97\,bar$$

3 - 4 Isentrope Expansion

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa} = p_3 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa} = p_3 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa} = 79.97\,bar \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{1.4} = 3.18\,bar$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = T_3 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = T_3 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1} = 2273\,K \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{1.4-1} = 904.9\,K$$

Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{1}{10^{1.4-1}} = 0.602$$

Ü 11.2 Nachrechnung eines Otto-Vergleichsprozesses (2)

Annahmen: Arbeitsmedium ist Luft, die spezifischen Wärmekapazitäten sind konstant

Verdichtungsverhältnis	ε	=	7.6
pro Zyklus zugeführte Wärme	Q_{zu}	=	2.92 [kJ]

ges.:
- Thermischer Wirkungsgrad η_{th}
- Technische Arbeit W_K
- Nicht genutzte Wärme Q_{ab}

Thermischer Wirkungsgrad η_{th}

Bei Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten $\bar{c}_{v_{23}} = \bar{c}_{v_{41}} = c_v$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad \Rightarrow \quad \eta_{th} = 1 - \frac{1}{7.6^{1.4-1}} = 0.556$$

Nicht genutzte Wärme Q_{ab}

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{\bar{c}_{v_{41}} \cdot (T_4 - T_1)}{\bar{c}_{v_{23}} \cdot (T_3 - T_2)}$$

$$\Rightarrow \quad |q_{ab}| = (1 - \eta_{th}) \cdot q_{zu}$$

$$\Rightarrow \quad |Q_{ab}| = (1 - \eta_{th}) \cdot Q_{zu} = (1 - 0.556) \cdot 2.92 = 1.29 [kJ]$$

$$\Rightarrow \quad Q_{ab} = -1.29 [kJ]$$

Technische Arbeit W_K

Spezifische Nutzarbeit w_k bei reversiblen Kreisprozessen

$$-w_k = q_{23} + q_{41} = q_{zu} + q_{ab} = q_{zu} - |q_{ab}|$$

$$\Rightarrow \quad -W_k = Q_{zu} - |Q_{ab}|$$

$$\Rightarrow \quad W_k = 2.92 - 1.29 = -1.63 [kJ]$$

Ü 11.3 Nachrechnung eines Otto-Vergleichsprozesses (3)

Verdichtungsverhältnis	ε	=	7.8
Temperatur der angesaugten Luft	T_1	=	20 [°C]
Umgebungsluftdruck	p_∞	=	0.09 [MPa]

a) Arbeitsmedium ist Luft, die spezifischen Wärmekapazitäten sind konstant, pro Zyklus zugeführte spezifische Wärme: q_{zu} = 950 [kJ/kg]

ges.:
- Thermischer Wirkungsgrad η_{th}
- spezifische technische Arbeit w_K
- Drücke und Temperaturen in allen Eckpunkten des Prozesses

Thermischer Wirkungsgrad η_{th}

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad \Rightarrow \quad \eta_{th} = 1 - \frac{1}{7.8^{1.4-1}} = 0.560$$

Spezifische technische Arbeit w_K

$$-w_k = q_{zu} - |q_{ab}|$$

mit $|q_{ab}| = (1-\eta_{th}) \cdot q_{zu}$ folgt

$$-w_k = q_{zu} - (1-\eta_{th}) \cdot q_{zu} = q_{zu} \cdot \eta_{th} \quad \Rightarrow \quad w_k = -950 \cdot 0.56 = -532 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Drücke und Temperaturen in den Eckpunkten

(1) Isentrope Kompression der Umgebungsluft von (T_1, p_1) auf (T_2, p_2)

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} \quad \Rightarrow \quad T_2 = (20 + 273.15) \cdot 7.8^{1.4-1} = 666.7 [K]$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \Rightarrow \quad p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}}$$

mit $p_1 = p_\infty = 0.09[MPa]$

$$\Rightarrow \quad p_2 = 0.09 \cdot \left(\frac{293.15}{666.7}\right)^{\frac{1.4}{-0.4}} = 1.597 [MPa]$$

(2) Isochore Wärmezufuhr q_{23} von (T_2, p_2) auf (T_3, p_3)

$$q_{zu} = q_{23} = c_v (T_3 - T_2)$$

$$\Rightarrow \quad T_3 = \frac{q_{23}}{c_v} + T_2 \quad \Rightarrow \quad T_3 = \frac{950 \cdot 10^3}{717.5} + 666.7 = 1990.7 [K]$$

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{T_2}{T_3} \quad \Rightarrow \quad p_3 = p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} \quad \Rightarrow \quad p_3 = 1.597 \cdot \frac{1990.7}{666.7} = 4.768 [MPa]$$

Ü 11.3 Nachrechnung eines Otto-Vergleichsprozesses (3)

(3) Isentrope Expansion von (T_3, p_3) auf (T_4, p_4)

$$T_4 = T_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad \Rightarrow \quad T_4 = 1990.7 \cdot \frac{1}{7.8^{1.4-1}} = 875.3[K]$$

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}} \quad \Rightarrow \quad p_4 = 4.768 \cdot \left(\frac{1990.7}{875.3}\right)^{\frac{1.4}{1-1.4}} = 0.269[MPa]$$

b) Arbeitsmedium ist Luft, die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten ist zu berücksichtigen
Alle Drücke und Temperaturen entsprechen denen von a)

ges.:
- Thermischer Wirkungsgrad η_{th}
- spezifische technische Arbeit w_K

Thermischer Wirkungsgrad η_{th}

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{|q_{41}|}{q_{23}}$$

Temperaturabhängige Werte für c_p von Luft aus Tab. 14.7

(1) $T_1 = 293.15[K] = 20[°C]$

$\Rightarrow$ $c_{p_1}(20°C) = 1004.1\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

$\Rightarrow$ $c_{v_1} = c_v(293.15K) = c_p(293.15K) - R = 1004.1 - 287 = 717.1\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

(2) $T_2 = 666.7[K] = 393.55[°C]$

$c_p(350°C) = 1023.7\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$, $c_p(400°C) = 1028.6\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

$\Rightarrow$ $c_{p_2}(393.55°C) = 1028.0\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

$\Rightarrow$ $c_{v_2} = c_v(666.7K) = c_p(666.7K) - R = 1028 - 287 = 741\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

(3) $T_3 = 1990.7[K] = 1717.55[°C]$

$c_p(1700°C) = 1144.5\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$, $c_p(1800°C) = 1150.5\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

$\Rightarrow$ $c_{p_3}(1717.55°C) = 1145.6\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

Ü 11.3 Nachrechnung eines Otto-Vergleichsprozesses (3)

$\Rightarrow \qquad c_{v_3} = c_v(1990.7\,K) = c_p(1990.7K) - R = 1145.6 - 287 = 858.6\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

(4) $\qquad T_4 = 875.3[K] = 602.15[°C]$

$\qquad c_p(600°C) = 1049.8\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right],\ c_p(650°C) = 1055.2\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

$\Rightarrow \qquad c_{p_4}(602.15°C) = 1050\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

$\Rightarrow \qquad c_{v_4} = c_v(875.3K) = c_{p_4}(875.3K) - R = 1050 - 287 = 763\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

zugeführte spezifische Wärme $q_{zu} = q_{23}$

$$q_{23} = c_{v_3} \cdot T_3 - c_{v_2} \cdot T_2 \quad \Rightarrow \qquad q_{23} = 858.6 \cdot 1990.7 - 741 \cdot 666.7 = 1215.2\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

abgeführte spezifische Wärme $q_{ab} = q_{41}$

$$q_{41} = c_{v_1} \cdot T_1 - c_{v_4} \cdot T_4 \quad \Rightarrow \qquad q_{41} = 717.1 \cdot 293.15 - 763 \cdot 875.3 = -457.6\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Thermischer Wirkungsgrad η_{th}

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{|q_{41}|}{q_{23}} \quad \Rightarrow \qquad \eta_{th} = 1 - \frac{457.6}{1215.2} = 0.623$$

Spezifische technische Arbeit w_K

$$-w_k = q_{23} + q_{41} \qquad \Rightarrow$$

$$w_k = -(q_{23} + q_{41}) = -(1215.2 - 457.6) = -757.6\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Zum Vergleich:
Werte bei gleichen Ecktemperaturen, aber temperaturabhängigen Wärmekapazitäten

Thermischer Wirkungsgrad: $\eta_{th} = 0.560$

Spezifische technische Arbeit: $w_k = -532\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Ü 11.4: Nachrechnung eines Diesel-Vergleichsprozesses

Mit Luft (ideales Gas) als Arbeitsmedium sollen
a) die Drücke und Temperaturen in den Endzeitpunkten der Zustandsänderungen berechnet werden

b) Einspritzverhältnis $\varphi = \frac{V_3}{V_2}$

c) Thermischer Wirkungsgrad η_{th}

Anfangstemperatur: T_1 = 288 K
Anfangsdruck: p_1 = 1.01325 bar
Maximaltemperatur: T_3 = 2273 K
Verhältnis der spezifischen Wärmen: κ = 1.4
Verdichtungsverhältnis: ε = 21

Isentrope Verdichtung 1 - 2:

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1 \cdot \varepsilon^{\kappa} = 1.01325\,bar \cdot 21^{1.4} = 71.92\,bar$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = 288\,K \cdot 21^{1.4-1} = 973.38\,K$$

Isobare Wärmezufuhr 2 -3:

$$p_3 = p_2 = 71.92\,bar$$

$$T_3 = 2273\,K$$

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$$ (ideale Gasgleichung für isobare Zustandsänderung)

Isentrope Expansion 3 - 4:

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa} = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_2} \cdot \frac{v_2}{v_4}\right)^{\kappa}$$

$$\Rightarrow \qquad p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa} = 71.92\,bar \cdot \left(\frac{2273\,K}{973.38\,K} \cdot \frac{1}{21}\right)^{1.4} = 3.32\,bar$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1} = 2273\,K \cdot \left(\frac{2273\,K}{973.38\,K} \cdot \frac{1}{21}\right)^{1.4-1} = 944.14\,k$$

Einspritzverhältnis

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = 2.335$$

Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\kappa \cdot \varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1} = 1 - \frac{1}{1.4 \cdot 21^{1.4-1}} \cdot \frac{2.335^{1.4} - 1}{2.335 - 1} = 0.639$$

Ü 11.5: Nachrechnung eines Dieselmotors

Der theoretische Kreisprozeß eines Dieselmotors wird durch folgenden Kreisprozeß angenähert

1-2: Polytrope Verdichtung mit $n_V = 1.35$
2-3: Isochore Wärmezufuhr
3-4: Isobare Wärmezufuhr
4-5: Polytrope Expansion mit $n_E = 1.37$
5-1: Isochore Wärmeabfuhr
Arbeitsmedium ist Luft als ideales Gas mit konstanten Wärmekapazitäten

geg.: $T_1 = 318$ [K], $p_1 = 83.5$ [kPa]
Maximaler Prozeßdruck $p_{max} = 8.6$ MPa
Verdichtungsverhältnis $\varepsilon = 16$
spez. zugeführte Wärme bei der Verbrennung $q_{zu} = 1730$ [kJ/kg]

ges.:
1. Zustandsgrößen p, v und T in allen 5 Eckpunkten
2. Übertragene Energien bei jeder Zustandsänderung (1-2-3-4-5-1)
3. Spezifische Arbeit des Kreisprozesses
4. Thermischer Wirkungsgrad

Ü 11.5: Nachrechnung eines Dieselmotors

1. Zustandsgrößen p, v und T in allen 5 Eckpunkten

1: Ausgangspunkt

Angabe: $\Rightarrow$ $T_1 = 318$ [K]

$\Rightarrow$ $p_1 = 83.5$ [kPa]

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \Rightarrow \quad v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 318}{0.0835 \cdot 10^6} \quad \Rightarrow \quad v_1 = 1.093 \left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

1-2: Polytrope Verdichtung mit $n_V = 1.35$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{n_V} \quad \Rightarrow \quad p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{-n_V} = 83.5 \cdot \left(\frac{1}{16}\right)^{-1.35} \quad \Rightarrow \quad p_2 = 3.525 [MPa]$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{n_V - 1} \quad \Rightarrow \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{1-n_V} = 318 \cdot \left(\frac{1}{16}\right)^{1-1.35} \quad \Rightarrow \quad T_2 = 839 [K]$$

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \Rightarrow \quad v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 839}{3.53 \cdot 10^6} \quad \Rightarrow \quad v_2 = 0.068 \left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

2-3: Isochore Wärmezufuhr

$$v_2 = v_3 \quad \Rightarrow \quad v_3 = 0.068 \left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

$$p_3 = p_4 = p_{\max} \quad \Rightarrow \quad p_3 = 8.6 [MPa]$$

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{T_2}{T_3} \quad \Rightarrow \quad T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = 839 \cdot \frac{8.6}{3.525} \quad \Rightarrow \quad T_3 = 2047 [K]$$

3-4: Isobare Wärmezufuhr

$$p_3 = p_4 = p_{\max} = 8.6 [MPa]$$

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} = \frac{287}{1.4 - 1} \quad \Rightarrow \quad c_v = 717.5 \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$$

$$q_{zu} = q_{23} + q_{34} = 1730 \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad \Rightarrow \quad q_{zu} = c_p \cdot (T_4 - T_3) + c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

$$\Rightarrow \quad T_4 = \frac{q_{zu} - c_v \cdot (T_3 - T_2)}{c_p} + T_3 = \frac{1730 \cdot 10^3 - 717.5 \cdot (2047 - 839)}{1004.5} + 2047 [K]$$

$$\Rightarrow \quad T_4 = 2906 [K]$$

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \Rightarrow \quad v_4 = \frac{R \cdot T_4}{p_4} = \frac{287 \cdot 2906}{8.6 \cdot 10^6} \quad \Rightarrow \quad v_4 = 0.097 \left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

Ü 11.5: Nachrechnung eines Dieselmotors

4-5: Polytrope Expansion mit n_E = 1.37

$$v_5 = v_1 \qquad \Rightarrow \qquad v_5 = 1.093\left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

$$\frac{p_4}{p_5} = \left(\frac{V_5}{V_4}\right)^{n_E} = \left(\frac{v_5}{v_4}\right)^{n_E} \Rightarrow \qquad p_5 = p_4 \cdot \left(\frac{v_5}{v_4}\right)^{-n_E} = 8.6 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{1.093}{0.097}\right)^{-1.37} \Rightarrow \qquad p_5 = 0.312\left[MPa\right]$$

$$\frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{p_4}{p_5}\right)^{\frac{n_E-1}{n_E}} \Rightarrow \qquad T_5 = T_4 \cdot \left(\frac{p_4}{p_5}\right)^{\frac{1-n_E}{n_E}} = 2906 \cdot \left(\frac{8.6}{0.312}\right)^{\frac{1-1.37}{1.37}} \Rightarrow \qquad T_5 = 1187\left[K\right]$$

5-1: Isochore Wärmeabfuhr

$$v_5 = v_1 = 1.093\left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

Zustandspunkt	p [MPa]	T [K]	v [m³/kg]
1	0.0835	318	1.093
2	3.525	839	0.068
3	8.6	2047	0.068
4	8.6	2906	0.097
5	0.312	1187	1.093

2. Übertragene Energien bei jeder Zustandsänderung (1-2-3-4-5-1)

1-2: Polytrope Verdichtung mit n_V = 1.35

mit $c_v = \dfrac{R}{\kappa - 1}$

$$q_{12} = c_v \cdot \frac{n_V - \kappa}{n_V - 1} \cdot (T_2 - T_1) = 717.5 \cdot \frac{1.35 - 1.4}{1.35 - 1} \cdot (839 - 318) \qquad \Rightarrow \qquad q_{12} = -53.4\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

2-3: Isochore Wärmezufuhr

$$q_{23} = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 717.5 \cdot (2047 - 839) \qquad \Rightarrow \qquad q_{23} = 866.7\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

3-4: Isobare Wärmezufuhr

$$q_{34} = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 1004.5 \cdot (2906 - 2047) \qquad \Rightarrow \qquad q_{34} = 862.9\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Ü 11.5: Nachrechnung eines Dieselmotors

4-5: Polytrope Expansion mit $n_E = 1.37$

$$q_{45} = c_v \cdot \frac{n_E - \kappa}{n_E - 1} \cdot (T_5 - T_4) = 717.5 \cdot \frac{1.37 - 1.4}{1.37 - 1} \cdot (1187 - 2906) \quad \Rightarrow \quad q_{45} = 100.0 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

5-1: Isochore Wärmeabfuhr

$$q_{51} = c_v \cdot (T_1 - T_5) = 717.5 \cdot (318 - 1187) \quad \Rightarrow \quad q_{51} = -623.5 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

3. Spezifische Arbeit des Kreisprozesses

$$w_K = -\sum q = -53.4 + 866.7 + 862.9 + 100.0 - 623.5 \quad \Rightarrow \quad w_K = -1152.7 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

4. Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{|q_{12}| + |q_{51}|}{q_{23} + q_{34} + q_{45}} = 1 - \frac{53.4 + 623.5}{866.7 + 862.9 + 100} \quad \Rightarrow \quad \eta_{th} = 0.63$$

Ü 11.6 Einfluß des Arbeitsmediums auf Wirkungsgrad und spezifische Arbeit

Wie verändert sich der thermische Wirkungsgrad und die spezifische technische Arbeit unter der Annahme eines Ericson-Prozesses bei Verwendung von Helium anstelle von Luft?

Verdichtungsverhältnis $\pi = p_2 / p_1 = 10$, $T_1 = T_2 = 300 [K]$, $T_3 = T_4 = 2400 [K]$

Tabelle 14.3:
- Luft, ideales Gas mit $\kappa = 1.4$, $R = 287 [J/kg \cdot K]$
- Helium mit $\kappa = 1.66$, $R = 2077 [J/kg \cdot K]$

a) Thermische Wirkungsgrad

<u>Isotherme</u> Kompression von p_1 auf p_2

$$q_{12} = p_1 \cdot v_1 \cdot ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = -R \cdot T_1 \cdot ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\Rightarrow \quad q_{12,Luft} = -287 \cdot 300 \cdot \ln(10) = -198.25 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$\Rightarrow \quad q_{12,He} = -2077 \cdot 300 \cdot \ln(10) = -1434.74 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Ü 11.6 Einfluß des Arbeitsmediums auf Wirkungsgrad und spezifische Arbeit

Isotherme Expansion mit $p_3 = p_2$ und $p_4 = p_1$

$$q_{34} = p_3 \cdot v_3 \cdot ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = R \cdot T_3 \cdot ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$\Rightarrow$ $$q_{34,Luft} = 287 \cdot 2400 \cdot \ln(10) = 1586\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$\Rightarrow$ $$q_{34,He} = 2077 \cdot 2400 \cdot \ln(10) = 11477.92\left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{|q_{12}|}{q_{34}} \Rightarrow \qquad \eta_{th,Luft} = 1 - \frac{198.25}{1586} = 0.875,$$

$$\eta_{th,Helium} = 1 - \frac{1434.74}{11477.92} = 0.875$$

Was aufgrund der Definition des Wirkungsgrades über die Temperatur sich sofort ergibt:

$$\boxed{\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3}}$$

$\Rightarrow$ keine Abhängigkeit des thermischen Wirkungsgrades von dem Arbeitsmedium

b) Spezifische technische Arbeit

$$-w_t = R \cdot T_1 \cdot \left(\frac{T_3}{T_1} - 1\right) \cdot ln(\pi)$$

$\Rightarrow$ $$-w_{t,Luft} = 287 \cdot 300 \cdot \left(\frac{2400}{300} - 1\right) \cdot \ln(10) = 1.38\left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

$\Rightarrow$ $$-w_{t,He} = 2077 \cdot 300 \cdot \left(\frac{2400}{300} - 1\right) \cdot \ln(10) = 10.04\left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

Spezifische technische Arbeit verändert sich proportional dem Verhältnis der spezifischen Wärmen der Arbeitsmedien

Ü 11.7 Nachrechnung einer Dampfturbinenanlage

Eine Dampfturbine verarbeitet pro Stunde 170t Frischdampf mit einer Temperatur von 350°C und einem Druck von 100 bar. Die Wassertemperatur vor dem Eintritt in die Speisewasserpumpe beträgt 25°C.

Gesucht werden die Leistung und der thermische Wirkungsgrad nach Clausius-Rankine

Ü 11.7 Nachrechnung einer Dampfturbinenanlage

Für die Sättigungstemperatur T_0 = 25°C liefert die Dampftafel für Wasser:

p_0 = 0.03166 bar
v'_0 = $1.0029\cdot10^{-3}$ m^3/kg
h'_0 = 104.77 kJ/kg
s'_0 = 0.367 kJ/(kg K)
v''_5 = 43.40 m^3/kg
s''_5 = 8.559 kJ/(kg K)
h''_5 = 2547 kJ/kg

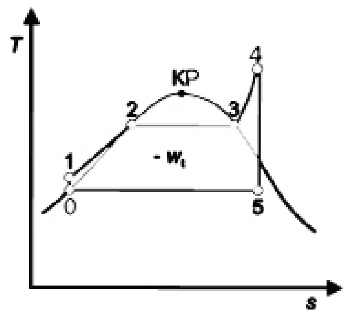
Für den Sättigungsdruck p_2 = 100 bar liefert die Dampftafel für Wasser:

T_2 = 310.96°C
v'_2 = 0.001453 m^3/kg
h'_2 = 1408 kJ/kg
h''_3 = 2728 kJ/kg

Aus dem h,s-Diagramm für Wasserdampf (Abb. 9-21, Mollier-Diagramm von Wasserdampf) liest man für den überhitzten Dampf mit p_4 = 100 bar und T_4 = 350°C ab:

h_4 = 2926 kJ/kg
s_4 = 5.95 kJ/(kg K)

0 - 1: Isentrope Druckerhöhung in der Speisewasserpumpe
Spezifische Arbeit der Speisewasserpumpe



$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 100\,bar$$

$$w_{01} = v'_0 \cdot (p_1 - p_0) = 1.0029\cdot10^{-3}\cdot(100-0.03166)\cdot10^5$$

$$w_{01} = 10.03\frac{kJ}{kg}$$

Enthalpie

$$h_1 = h'_0 + w_{01} = 104.77 + 10.03 \quad\Rightarrow\quad h_1 = 114.8\frac{kJ}{kg}$$

Massestrom der Speisewasserpumpe

$$\dot{m} = 170\frac{t}{h} = 47.222\frac{kg}{s}$$

Leistung der Speisewasserpumpe

$$P_{Sp} = \dot{m}\cdot w_{01} = 47.222\cdot10.03 \quad\Rightarrow\quad P_{Sp} = 473.64\,kW\left(=\frac{kJ}{s}\right)$$

1 - 2: Isobare Wärmezufuhr im Dampferzeuger

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}\cdot(h'_2 - h_1) = 47.222\cdot(1408-114.8) \quad\Rightarrow\quad \dot{Q}_{12} = 61067.49\frac{kJ}{s}$$

2 - 3: Isobar-isotherme Verdampfung im Dampferzeuger

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}\cdot(h''_3 - h'_2) = 47.222\cdot(2728-1408) \quad\Rightarrow\quad \dot{Q}_{23} = 62333.04\frac{kJ}{s}$$

Ü 11.7 Nachrechnung einer Dampfturbinenanlage

3 - 4: Isobare Überhitzung im Dampferzeuger

$$\dot{Q}_{34} = \dot{m} \cdot \left(h_4 - h_3''\right) = 47.222 \cdot \left(2926 - 2728\right) \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_{34} = 9350.0 \frac{kJ}{s}$$

4 - 5: Isentrope Expansion in der Turbine

$$h_5 = (1 - x) \cdot h_0' + x \cdot h_5''$$

Berechnung des Dampfgehalts aus der Entropieänderung (5 - 0) mit $s_4 = s_5 = 5.95$ kJ/(kg K)

$$x = \frac{s_5 - s_0'}{s_5'' - s_0'} = \frac{5.95 - 0.367}{8.559 - 0.367} \quad \Rightarrow \quad x = 0.6815$$

Dampfgehalt $0 < x < 1 \Rightarrow$ Expansion führt ins Naßdampfgebiet

Enthalpie

$$h_5 = (1 - x) \cdot h_0' + x \cdot h_5'' = (1 - 0.6815) \cdot 104.77 + 0.6815 \cdot 2547 \quad \Rightarrow \quad h_5 = 1769.15 \frac{kJ}{kg}$$

Gesamtleistung der Turbine

$$P_T = \dot{m} \cdot \left(h_5 - h_4\right) = 47.222 \cdot \left(1769.15 - 2926\right) \quad \Rightarrow \quad P_T = -54628.77\, kW$$

5 - 0: Isobare Kondensation im Kondensator, abgegebene Wärme

$$\dot{Q}_{50} = -\dot{m} \cdot \left[x \cdot \left(h_5'' - h_0'\right)\right] = 47.222 \cdot \left[0.6815 \cdot \left(2547 - 104.77\right)\right]$$

$$\Rightarrow \quad \dot{Q}_{50} = -78593.3 \frac{kJ}{s}$$

Nutzleistung des Kreisprozesses

$$P_N = P_T + P_{Sp} = -54628.77 + 473.64$$

$$\Rightarrow \quad P_N = -54155.1\, kW$$

oder

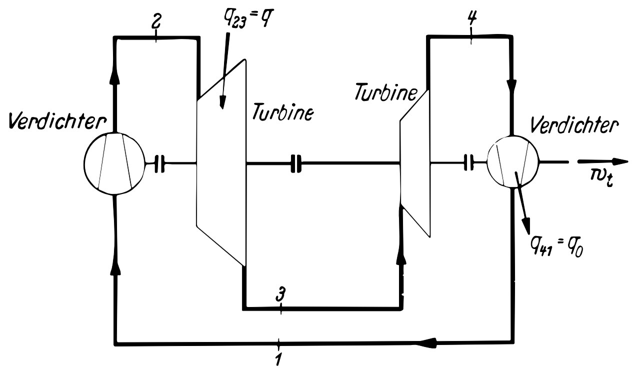
$$P_N = -\left(\dot{Q}_{12} + \dot{Q}_{23} + \dot{Q}_{34} + \dot{Q}_{50}\right) = -\left(61067.49 + 62333.04 + 9350 - 78593.3\right)$$

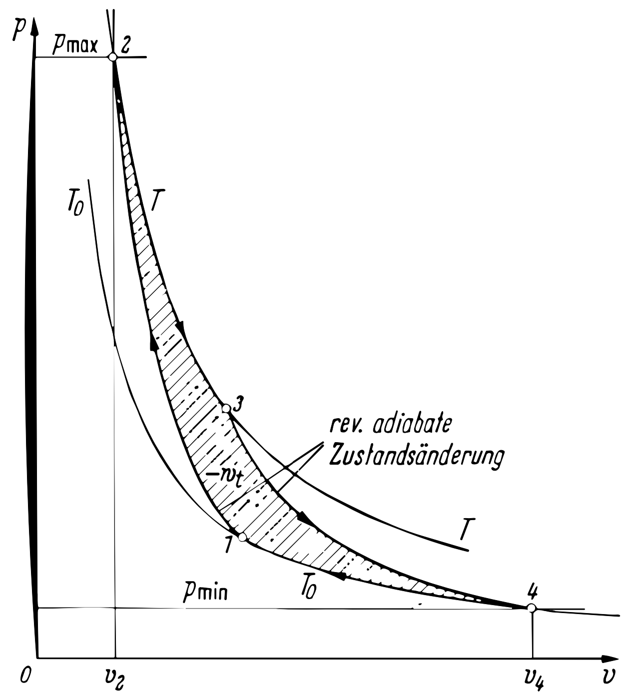
$$\Rightarrow \quad P_N = -54157.2\, kW$$

Thermischer Wirkungsgrad des Kreisprozesses

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{h_5 - h_0'}{h_4 - h_1} = 1 - \frac{1769.15 - 104.77}{2926 - 114.8} \quad \Rightarrow \quad \eta_{th} = 0.408$$

Ü 11.8: Kreisprozeß mit stationär umlaufendem Fluid (Carnot-Prozeß)





Wärmekraftmaschine (Carnot-Prozeß)

Teilprozesse des Carnot-Prozesses:

- Adiabate Verdichtung 1-2
- Isotherme Entspannung 2-3
- Adiabate Entspannung 3-4
- Isotherme Verdichtung 4-1

Mit Helium als Arbeitsmedium sollen die bei den vier Teilprozessen als technische Arbeit und als Wärme aufgenommenen oder abgeführten Energien sowie die spezifische Nutzarbeit des Kreisprozesses berechnet werden.

Temperaturen:

$T_0 = T_1 = T_4 = 300$ K
$T = T_2 = T_3 = 850$ K

Druckverhältnisse:

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{p_2}{p_4} = 50$$

Die spezifische Wärmekapazität wird temperaturunabhängig angenommen, Änderungen von kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

Helium

$$R = 2077 \text{ J/kg·K}, \; c_p^0 = 5193 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Adiabate Verdichtung von 1-2

$$q_{12} + w_{t,12} = h_2 - h_1$$

Da es sich um eine adiabaten Teilprozeß handelt, gilt $q_{12} = 0$

$$\Rightarrow \quad w_{t,12} = h_2 - h_1 = c_p^0 (T_2 - T_1) = c_p^0 (T - T_0)$$

Ü 11.8: Kreisprozeß mit stationär umlaufendem Fluid (Carnot-Prozeß)

Technische Arbeit für die adiabate Entspannung von 3-4 wegen $q_{34} = 0$

$$w_{t,34} = h_4 - h_3 = c_p^0 (T_4 - T_3) = -c_p^0 (T - T_0)$$

Die beiden Arbeiten heben sich gerade auf. Der adiabate Verdichter und die adiabate Turbine laufen sozusagen nutzlos gegeneinander. Die Nutzarbeit bei diesem Kreisprozeß kann also nur aus der Differenz der technischen Arbeiten bei der isothermen Verdichtung und der isothermen Entspannung stammen.

Bei idealen Gasen hängt die Enthalpie nur von der Temperatur ab. Bei der isothermen Entspannung 2-3 gilt also wegen $T_2 = T_3$

$$q_{23} + w_{t,23} = h_3 - h_2 = 0$$

$$\Rightarrow \quad q_{23} = -w_{t,23} = -\int_2^3 v \cdot dp = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_3}\right)$$

und entsprechend für die isotherme Verdichtung 4-1 wegen $T_1 = T_4$

$$q_{41} = -w_{t,41} = -\int_4^1 v \cdot dp = R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_1}\right)$$

Für das Verhältnis von Druck und Temperatur idealer Gase bei reversiblen adiabaten Prozessen gilt

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{c_v^0 + R}{R}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{c_p^0}{R}}$$

Für den Carnot-Prozeß gilt

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{c_p^0}{R}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{c_p^0}{R}} \quad \text{und} \quad \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{c_p^0}{R}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{c_p^0}{R}}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \quad \text{bzw.} \quad \frac{p_2}{p_3} = \frac{p_1}{p_4}$$

Mit

$$p_2 = p_4 \cdot \frac{p_{\max}}{p_{\min}}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{p_4 \cdot \frac{p_{\max}}{p_{\min}}}{p_1} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{c_p^0}{R}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{p_4}{p_1} = \frac{p_{\min}}{p_{\max}} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{c_p^0}{R}} = \frac{1}{50} \cdot \left(\frac{850\,K}{300\,K}\right)^{\frac{5.193 \frac{kJ}{kg \cdot K}}{2.077 \frac{kJ}{kg \cdot K}}} = 0.2703$$

$$\Rightarrow \quad \frac{p_2}{p_3} = \frac{p_1}{p_4} = \frac{1}{0.2703} = 3.7$$

Ü 11.8: Kreisprozeß mit stationär umlaufendem Fluid (Carnot-Prozeß)

Isotherme Entspannung 2-3

$$q_{23} = -w_{t,23} = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_3}\right) = 2.077\,\frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 850\,K \cdot \ln(3.7) = 2310\,\frac{kJ}{kg}$$

Isotherme Verdichtung 1-4

$$q_{41} = -w_{t,41} = R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_1}\right) = 2.077\,\frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 300\,K \cdot \ln(0.2703) = -815\,\frac{kJ}{kg}$$

Abgegebene Nutzarbeit des reversiblen Carnot-Prozesses

$$-w_t = -w_{t,23} - w_{t,41} = R \cdot (T - T_0) \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_3}\right) = 2310\,\frac{kJ}{kg} - 815\,\frac{kJ}{kg} = +1495\,\frac{kJ}{kg}$$

Thermischer Wirkungsgrad, d.h. das Verhältnis von zugeführter Wärme zu abgegebener Nutzarbeit, beträgt

$$\eta_{th} = \frac{-w_t}{q_{23}} = \frac{T - T_0}{T} = 0.647$$

Der thermische Wirkungsgrad des reversiblen Carnot-Prozesses hängt also lediglich von der Temperatur T_0 bei der isothermen Verdichtung und der Temperatur T bei der isothermen Entspannung ab.

Dem Vorteil des relativ hohen thermischen Wirkungsgrades stehen die Nachteile hinsichtlich der technischen Realisierung einer isothermen Verdichtung und einer isothermen Entspannung entgegen

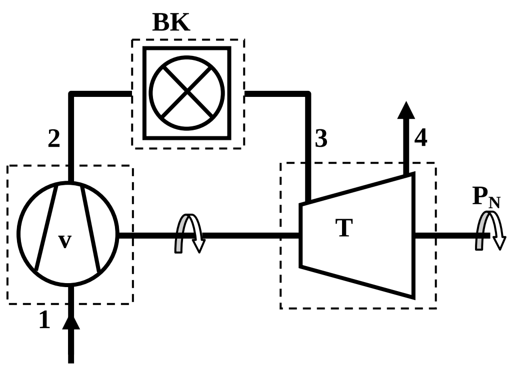
Ü 11.9 Isentroper Wirkungsgrad einer stationären Gasturbine

Eine stationäre Gasturbinenanlage besteht aus den Hauptkomponenten Verdichter V, Brennkammer BK und Turbine T. Verdichter und Turbine sitzen auf einer gemeinsamen Welle.

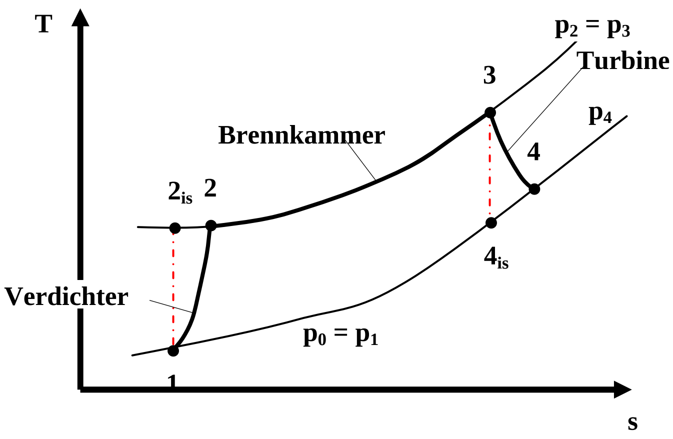
geg.: Umgebungszustand = Ansaugzustand (1): $p_0 = 1.013$ bar und $t_0 = 15$ °C
Luftmassenstrom $\dot{m} = 7.02$ kg/s
Verdichterdruckverhältnis $\pi_V = 9.5$
Isentropenwirkungsgrad des Verdichters $\eta_{V,is} = 84$ %
Isentropenwirkungsgrad der Turbine $\eta_{T,is} = 86$ %
Maximale Turbineneintrittstemperatur $T_{3,max} = 1800$ K

Annahmen
- in allen Komponenten herrscht gleicher und konstanter Massenstrom
- mechanische Verluste (Lager, Getriebe) können vernachlässigt werden
- der Druckverlust in der Brennkammer kann vernachlässigt werden
- Arbeitsmedium kann als ideales Gas mit konstanten Stoffgrößen betrachtet werden
  $R = 287$ J/kg K; $\kappa = 1.39$; $c_p = 1023$ J/kg K

1. Skizzieren Sie das Schaltschema der Anlage (Ebenenbezeichnung 1 – 4)



2. Skizzieren Sie das zugehörige *Ts* – Diagramm



Ü 11.9 Isentroper Wirkungsgrad einer stationären Gasturbine

3. Berechnen Sie Druck p_2 und Temperatur T_2 nach dem Verdichter

1. Schritt: Berechnung von $T_{2,is}$ über die Isentropen-Beziehung und das Verdichterdruckverhältnis π_V

$$T_1 = T_0 = 288.15\,K \qquad p_1 = p_0 = 1.013\,bar$$

$$\frac{T_1}{T_{2,is}} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\Rightarrow \qquad T_{2,is} = T_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_1 \cdot \left(\frac{1}{\pi_V}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = 288.15\,K \cdot \left(\frac{1}{9.5}\right)^{\frac{1-1.39}{1.39}} = 541.9\,K$$

2. Schritt: Berechnung von T_2 über den isentropen Verdichter-Wirkungsgrad $\eta_{is,V}$

$$\eta_{is,V} = \frac{T_{2,is} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\Rightarrow \qquad T_2 = \frac{T_{2,is} - T_1}{\eta_{is,V}} + T_1 = \frac{541.9\,K - 288.15\,K}{0.84} - 288.15\,K \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{T_2 = 590.2\,K}$$

Kontrolle: Beim Verdichter muß die reale Temperatur nach der Verdichtung immer über der isentropen (verlustfreien) Temperatur liegen, $T_2 > T_{2,is}$, d.h. für die verlustbehaftete Kompression muß immer mehr Arbeit aufgewendet werden als für die verlustfreie (isentrope) Kompression:

Kompressionsarbeit, isentrop: $w_{t,is} = c_p \cdot \left(T_{2,is} - T_1\right)$

Kompressionsarbeit, real: $w_t = c_p \cdot \left(T_2 - T_1\right)$

Verdichter: $w_t > w_{t,is}$

$$p_2 = p_1 \cdot \pi_V = 1.013\,bar \cdot 9.5 \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{p_2 = 9.6235\,bar}$$

4. Berechnen Sie die Brennkammerdruck und -austrittstemperatur p_3, T_3

Brennkammeraustrittstemperatur = Turbineneintrittstemperatur $T_3 = T_{max}$

$$\Rightarrow \qquad \boxed{T_3 = 1800\,K}$$

Brennkammerdruck $p_2 = p_3 = \text{const.}$

$$\Rightarrow \qquad \boxed{p_3 = 9.6235\,bar}$$

Ü 11.9 Isentroper Wirkungsgrad einer stationären Gasturbine

5. Wie groß sind Temperatur T_4 im Turbinenaustritt, wenn die Turbine genau auf den Umgebungsdruck entspannt?

Berechnung von $T_{4,is}$ über die Isentropen-Beziehung (T_4 und $T_{4,is}$ liegen auf der gleichen Isobaren $p_4 = p_1 = p_0 = 1.013$ bar)

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_3}{T_{4,is}}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\Rightarrow \quad T_{4,is} = T_3 \cdot \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = 1800 \cdot \left(\frac{9.6235}{1.013}\right)^{\frac{1-1.39}{1.39}} \quad \Rightarrow \quad T_{4,is} = 957\,K$$

Berechnung von T_4 über den isentropen Turbinen-Wirkungsgrad $\eta_{is,T}$

$$\eta_{T,is} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4,is}}$$

$$\Rightarrow \quad T_4 = T_3 - \eta_{T,is} \cdot \left(T_3 - T_{4,is}\right) = 1800 - 0.86 \cdot (1800 - 957) \quad \Rightarrow \quad \boxed{T_4 = 1075\,K}$$

Kontrolle: Bei einer Turbine muß die reale Temperatur nach der Expansion immer über der isentropen (verlustfreien) Temperatur liegen, d.h. $T_4 > T_{4,is}$, d.h. die verlustbehaftete Expansion liefert immer weniger Arbeit als die verlustfreie (isentrope) Expansion:

Expansionsarbeit, isentrop: $w_{t,is} = c_p \cdot \left(T_{4,is} - T_3\right)$

Expansionsarbeit, real: $w_t = c_p \cdot \left(T_4 - T_3\right)$

Turbine: $|w_t| < |w_{t,is}|$

6. Berechnen Sie die abgegebene Nutzleistung P_N der Anlage

$$P_N = P_T + P_V$$

$$\Rightarrow \quad P_N = \dot{m} \cdot w_{t,T} + \dot{m} \cdot w_{t,V} = \dot{m} \cdot \left[\left(h_4 - h_3\right) + \left(h_2 - h_1\right)\right] = \dot{m} \cdot c_p \cdot \left[\left(T_4 - T_3\right) + \left(T_2 - T_1\right)\right]$$

$$\Rightarrow \quad P_N = 7.02 \cdot 1023 \cdot \left[(1075 - 1800) + (590.2 - 288.15)\right] \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_N = -3.037\,[MW]}$$

Kontrolle: Die abgegebene Leistung der Turbine P_T muß immer negativ sein, die aufgenommene Leistung des Verdichters P_V muß immer positiv sein. Die Nutzleistung P_N muß ebenfalls immer negativ sein und entspricht der Turbinenleistung P_T, die um die erforderliche Antriebsleistung für den Verdichter P_V verringert wurde.

Ü 11.10 Dieselmotor mit Abgasturbolader

Die Leistung eines Dieselmotors soll durch einen Abgasturbolader modifiziert werden.

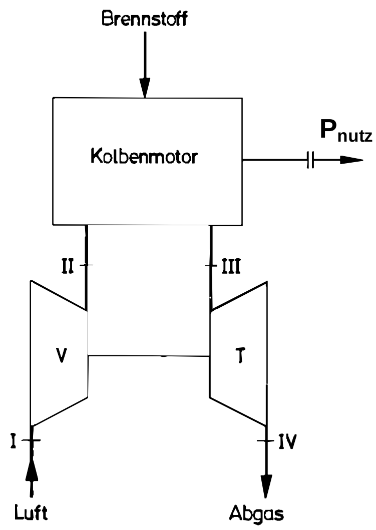
Die Bedingungen im Turbineneintritt des Abgasladers (Zustand III) entsprechen den Zustandsgrößen des Dieselmotors nach dem Expansionstakt, d.h. die Turbineneintritts-temperatur T_{III} entspricht der Abgastemperatur T_4 = 940 K des Dieselmotors und der Druck im Turbineneintritt p_{III} ist gleich dem Abgasdruck nach dem Expansionstakt von p_4 = 3.32 bar.

Für den Abgasturbolader gelten folgende Größen:

Mechanischer Wirkungsgrad:	η_{mech}	= 0.98
Isentroper Verdichterwirkungsgrad:	$\eta_{V,is}$	= 0.80
Isentroper Turbinenwirkungsgrad:	$\eta_{T,is}$	= 0.82
Darüber hinaus gilt:	$\dot{m}$	= $\dot{m}_V$ = $\dot{m}_T$ = 0.15 kg/s

Als Arbeitsmedium kann mit Luft (ideales Gas: R = 287 J/kgK, κ = 1.4) gerechnet werden.
Umgebungsbedingungen: T_0 = 15°C, p_0 = 1.013 bar

1. Skizzieren Sie das Schaltbild des Abgasturboladers (Ebenenbezeichnung I-IV).



2. Das Abgas expandiert in der Turbine von $p_{III} = p_4$ = 3.32 bar auf den Umgebungs-druck $p_{IV} = p_0$ = 1.013 bar.
Berechnen Sie die Temperatur T_{IV} im Turbinenaustritt.

$$T_{IV,isentrop} = T_{III} \cdot \left(\frac{p_{III}}{p_{IV}}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_4 \cdot \left(\frac{p_4}{p_0}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = 940\,K \cdot \left(\frac{3.32\,bar}{1.013\,bar}\right)^{\frac{1-1.4}{1.4}} = 669.6\,K$$

$$\eta_{T,is} = \frac{T_{III} - T_{IV}}{T_{III} - T_{IV,is}} \Rightarrow T_{IV} = T_{III} - \eta_{T,is} \cdot \left(T_{III} - T_{IV,is}\right) = T_4 - \eta_{T,is} \cdot \left(T_4 - T_{IV,is}\right)$$

$$T_{IV} = 940\,K - 0.82 \cdot \left(940\,K - 669.6\,K\right) = 718.3\,K$$

Ü 11.10 Dieselmotor mit Abgasturbolader

3. Berechnen Sie die Leistung P_V , die dem Verdichter des Abgasladers zur Verfügung gestellt wird.

$$P_V = -\eta_{mech} \cdot P_T = -\eta_{mech} \cdot \dot{m} \cdot (h_{IV} - h_{III}) = -\eta_{mech} \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{IV} - T_{III})$$

$$c_p = \frac{R \cdot \kappa}{\kappa - 1} = \frac{287 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 1.4}{1.4 - 1} = 1004.5 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$P_V = -0.98 \cdot 0.15 \frac{kg}{s} \cdot 1004.5 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (718.3\,K - 940\,K) = 32.74\,kW$$

4. Wie hoch ist die Temperatur T_{II} , die sich nach der Vorverdichtung der Umgebungsluft von $p_I = p_0$ auf p_{II} durch den Verdichter ergibt?

$$P_V = \dot{m}_V \cdot (h_{II} - h_I) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{II} - T_I) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{II} - T_0)$$

$$\Rightarrow \quad T_{II} = \frac{P_V}{\dot{m} \cdot c_p} + T_0 = \frac{32.74 \cdot 10^3\,W}{0.15 \frac{kg}{s} \cdot 1004.5 \frac{J}{kg \cdot K}} + 288.15\,K = 505.4\,K$$

5. Berechnen Sie das Kompressionsverhältnis $\pi_V = p_{II} / p_I$ des Verdichters des Abgasturboladers.

$$\eta_{V,is} = \frac{T_{II,is} - T_I}{T_{II} - T_I} \Rightarrow T_{II,is} = T_I + \eta_{V,is} \cdot (T_{II} - T_I) = T_0 + \eta_{V,is} \cdot (T_{II} - T_0)$$

$$T_{II,is} = 288.15\,K + 0.8 \cdot (505.4 - 288.15) = 462.0\,K$$

$$\pi_V = \frac{p_{II}}{p_I} = \left(\frac{T_{II,is}}{T_I}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_{II,is}}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{462.0\,K}{288.15\,K}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 5.219$$

6. Wie hoch ist der Druck p_{II} , der sich nach der Vorverdichtung der Umgebungsluft von $p_I = p_0$ auf p_{II} durch den Verdichter des Abgasturboladers ergibt?

$$p_{II} = \pi_V \cdot p_I = \pi_V \cdot p_0 = 5.219 \cdot 1.013\,bar = 5.287\,bar$$

Ü 11.10 Dieselmotor mit Abgasturbolader

7. Die Umgebungsluft wurde durch den Verdichter des Laders bereits auf den Druck p_{II} und die Temperatur T_{II} vorkomprimiert. Welcher Druck p_2* und welche Temperatur T_2* würde sich bei einer weiteren isentropen Verdichtung durch den Dieselmotor mit einem unveränderten Verdichtungsverhältnis von $\varepsilon = v_1 / v_2 = 19$ ergeben?

'II'-'2*': Isentrope Kompression

$$T_2^* = T_{II} \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = 505.4\,K \cdot 19^{1.4-1} = 1641\,K$$
$$p_2^* = p_{II} \cdot \varepsilon^{\kappa} = 5.287\,bar \cdot 19^{1.4} = 326.2\,bar$$