

Aufgaben zur Thermodynamik von Kraftwerken

10/2006-koh

1. Ein Dampfkraftwerk arbeite nach dem Clausius-Rankine-Kreisprozess mit den Turbineneintrittsparametern $p_1 = 135 \text{ bar}$, $t_1 = 535 \text{ °C}$ und dem Kondensationsdruck $p_2 = 0,06 \text{ bar}$.
- a) Bestimmen Sie mit Hilfe des h,s -Diagramms und der Tabellen der Zustandsgrößen des Wassers und Dampfes bzw. den Wasserdampf-Tabellen die Zustandsgrößen des Arbeitsmittels an den Eckpunkten des Kreisprozesses, also Druck p , Temperatur t , spez. Volumen v , spez. Innere Energie u , spez. Enthalpie h , spez. Entropie s und den Dampfgehalt x .

| Zustandsgrößen von Wasser und Dampf an den Eckpunkten eines Clausius-Rankine-Prozesses | | | | | | | |
|--|--------------|------------|---------------------------|--------------|--------------|----------------|------|
| Zustand | p MPa | t °C | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg K | x |
| 1 | <u>13,5</u> | <u>535</u> | 0,0243 | 3392 | 3425 | 6,54 | 1,0 |
| 2 | <u>0,006</u> | 36,18 | 18,28 | 1905 | 2015 | 6,54 | 0,77 |
| 3 | 0,006 | 36,18 | $1,0064 \cdot 10^{-3}$ | 151,5 | 151,5 | 0,52 | 0 |
| 4 | 13,5 | 36,55 | $1,0064 \cdot 10^{-3}$ | 151,5 | 165,1 | 0,52 | 0 |

- b) Bestimme zuerst für das vorliegende Dampfkraftwerk die spez. Arbeit der Turbine w_T , die spez. zu- und abgeführte Wärmemenge q_{zu} , q_{ab} und den thermischen Wirkungsgrad η . Hierbei sei die Speisepumpenarbeit vernachlässigt.
(1410 kJ/kg; 3260 kJ/kg; 1863,5 kJ/kg; 0,4307)
- c) Wie ändert sich der Wirkungsgrad, wenn der Arbeitsaufwand der Speisepumpe berücksichtigt wird?
(0,4284)
- d) Es werden die Frischdampf-Parameter angehoben auf $p_1 = 200 \text{ bar}$, $t_1 = 600 \text{ °C}$. Hierdurch sind $h_1 = 3535 \text{ kJ/kg}$; $s_1 = 6,51 \text{ kJ/(kg K)}$; $h_2 = 2000 \text{ kJ/kg}$.
Wie ändert sich der Wirkungsgrad gegenüber der Referenzanlage (b)? (0,4537)
- e) Nun wird die Turbine in einen Hochdruck- und Niederdruckteil aufgeteilt und eine Zwischenüberhitzung bei einem Druck von $p_2 = 30 \text{ bar}$ auf einer Temperatur $t_3 = 535 \text{ °C}$ angewendet. Hierbei sind: Zwischenüberhitzung vor $h_2 = 2990 \text{ kJ/kg}$; nach $h_3 = 3535 \text{ kJ/kg}$; Abdampf $p = 0,006 \text{ MPa}$; $h = 2258 \text{ kJ/kg}$; $s = 7,33 \text{ kJ/(kg K)}$; $x = 0,87$.
Wie ändert sich hierdurch der Wirkungsgrad? (0,4483)
- f) Anschließend wird eine regenerative Speisewasservorwärmung eingebaut: Anzapfdampf $p = 0,6 \text{ MPa}$; $s = 6,54 \text{ kJ/kgK}$; $h = 2662,5 \text{ kJ/kg}$; Kondensat des Abdampfes $h = 359,9 \text{ kJ/kg}$; Anteil Abdampf $a = 0,083 \text{ kg/kg}$.
Wie ändert sich nun der Wirkungsgrad? (0,4425)
- g) Wie groß sind der effektive Kupplungs-Wirkungsgrad und der Gesamt-Wirkungsgrad des Kraftwerkes bei einer elektrischen Leistung von 900 MW?
Hierbei seien die einzelnen Komponentenwirkungsgrade: $\eta_{DE} = 0,92$; $\eta_{th} = 0,5$; $\eta_{iT} = 0,9$; $\eta_{mT} = 0,99$; $\eta_{GT} = 0,985$; Eigenbedarf $P = 63 \text{ MW}$.
(0,45; 0,38)

2. Ein Steinkohlekraftwerk verfeuert 135 t/h Steinkohle ($H_u = 32 \text{ MJ/kg}$) und erzeugt überhitzten Dampf von $540 \text{ }^\circ\text{C}$, 180 bar , $h'' = 3535 \text{ kJ/kg}$, $dm/dt = 352 \text{ kg/s}$. Der Dampf wird in der Turbine abgearbeitet und verstromt. Der Nassdampf von $h'' = 2334 \text{ kJ/kg}$; 90% ; $h' = 121 \text{ kJ/kg}$; 10% ; $29 \text{ }^\circ\text{C}$; $0,04 \text{ bar}$ wird im Kondensator niedergeschlagen. Speisepumpen fördern das Speisewasser von $p = 240 \text{ bar}$; $h' = 135 \text{ kJ/kg}$ in den Dampfzeuger zurück.
- Welche thermische Leistung besitzt das Kraftwerk ? (1200 MW)
 - Wie groß sind der effektive Wirkungsgrad und die elektrische Bruttoleistung ? (42%; 500 MW)
 - Wie groß ist der Carnot-Wirkungsgrad ? (63%)
 - Was sind die Gründe für die Abweichung zwischen dem Carnot- und effektiven Wirkungsgrad ?
 - Mit welchen Maßnahmen kann man den Wirkungsgrad eines thermischen Kraftwerkes erhöhen?
3. Eine nach dem Clausius-Rankine-Prozeß arbeitende Dampfkraftanlage ist zu berechnen. Der Dampf verlässt den Kessel nach dem Überhitzer mit 140 bar und $530 \text{ }^\circ\text{C}$. Wegen der Wärmeverluste und der Reibung in der Rohrleitung tritt der Dampf mit 130 bar und $510 \text{ }^\circ\text{C}$ in die Turbine ein, die er mit $0,12 \text{ bar}$ verlässt. Die Konstruktion und Ausführung der Anlage lassen folgende Wirkungsgrade zu: $\eta_k = 0,85$; $\eta_i = 0,83$; $\eta_m = 0,95$; $\eta_{gen} = 0,94$; $\eta_{ei} = 0,93$. Für eine spezifische Enthalpie des Speisewassers von 200 kJ/kg und eine Bezugstemperatur $t_b = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ sind zu bestimmen:
- Der thermische Wirkungsgrad und die spezifische Arbeit des reversiblen Clausius-Rankine-Prozesses (40,8%; -1.291 kJ/kg)
 - Der Rohrleitungswirkungsgrad (98,7 %)
 - Der für eine Klemmenleistung von 10.000 kW bei adiabater Isolierung der Turbine erforderliche Dampfmassenstrom (40.436 kg/h)
 - Der für diese Leistung bei einem Heizwert $H_u = 31,4 \text{ MJ/kg}$ erforderliche Brennstoffmassenstrom (4.859 kg/h)
 - Die Änderung der spezifischen Enthalpie und der spezifischen Exergie in der Rohrleitung (41,0 kJ/kg; $38,1 \text{ kJ/kg}$)
 - Der spezifische Arbeitsverlust der wirklichen Turbine gegenüber dem reversiblen Vergleichsprozesse (219 kJ/kg)
 - Der spezifische Exergieverlust in der Turbine (200,5 kJ/kg)
4. Wie viel Tonnen CO_2 emittiert stündlich ein Steinkohlekraftwerk der Leistung $P_{el} = 720 \text{ MW}$ ($\eta = 40\%$; $H_u = 30 \text{ MJ/kg}$)? (792 t/h)
5. Beschreiben Sie die prinzipielle Wirkungsweise (Verfahren, Reaktionsgleichungen, Komponenten, etc.) einer REA und DENOX-Anlage eines modernen Kraftwerkes.
6. Eine Gasturbinen-Kraftanlage arbeitet nach einem Joule-Kreisprozeß und mit einem Druckverhältnis $\beta = p_2 / p_1 = 15$. Der Verdichter saugt Luft bei $p_1 = 1 \text{ bar}$ und $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ an. Die Turbineneintrittstemperatur t_3 beträgt $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. ($R_{Luft} = 0,287 \text{ kJ/kg K}$; $x = 1,4$; $c_p = 1,005 \text{ kJ/(kg K)}$)
- Bestimme p , T und spez. Volumen v an den Eckpunkten
 - Bestimme die spez. Verdichtungsarbeit, spezif. Expansionsarbeit und die spez. Nutzarbeit (332,2 kJ/kg; $743,3 \text{ kJ/kg}$; $411,1 \text{ kJ/kg}$)
 - Bestimme den thermischen Wirkungsgrad (0,538)
 - Wie ändert sich der thermische Wirkungsgrad des Kreisprozesses bei einem Druckverhältnis $\beta = 4$ bzw. 30 ? (0,327; $0,621$)

7. In einer GuD-Anlage habe die Gasturbine einen Wirkungsgrad $\eta_{GT} = 0,38$ und die Dampfturbine $\eta_{DT} = 0,25$. Wie groß ist der Gesamtwirkungsgrad der GuD-Anlage
- ohne Zusatzfeuerung (53,5 %)
 - mit Zusatzfeuerung,
wenn 40 % des Brennstoffs in der Zusatzfeuerung des Abhitzeessels verbrannt wird. (45,4%)
 - Wie groß ist der Bedarf an Heizöl EL ($H_u = 42,7$ MJ/kg) in der Brennkammer der Gasturbine bei der elektr. Leistung $P_{el} = 350$ MW? (15,3 bzw. 18,05 kg/s)
8. Der idealisierte Kreisprozeß eines Dieselmotors mit dem Verdichtungsverhältnis $\varepsilon = 18$, einem Anfangszustand $T_1 = 343$ K, $p_1 = 1$ bar und einer höchsten Temperatur $T_3 = 1973$ K mit Luft als Arbeitsmittel ($\gamma = 1,4$) ist zuerst zu berechnen.
Bestimmen Sie:
- den Druck und die Temperatur an den vier Eckpunkten der Zustandsänderungen (1 bar; 57,4 bar; 57,4 bar; 2,28 bar; 343 K; 1090 K; 1973 K; 785 K)
 - das Einspritzverhältnis φ (1,81)
 - den thermischen Wirkungsgrad η_{th} (64,0)
 - den idealisierten Wirkungsgrad η_C (Carnot-Wirkungsgrad) (82,6)
 - Bestimmen Sie nun zum Vergleich die effektive Leistung P_{eff} (in kWh und PS) und den effektiven Wirkungsgrad η_{eff} eines realen Dieselmotors mit dem Hubraum $V_H = 5,75$ l, Verdichtungsverhältnis $\varepsilon = 18$, Drehzahl $n = 3000$ U/min, indiziertem Druck $p_i = 10$ bar, spezif. Kraftstoffverbrauch $b_e = 240$ g/kWh ($H_u = 11,67$ kWh/kg) und einem mechanischen Wirkungsgrad $\eta_m = 0,85$. (122,2 kWh; 166 PS; 35,7%)
9. a) Was versteht man unter Kraft-Wärme-Kopplung?
b) Was sind die Unterschiede zwischen folgenden Anlagen: Dampfkraftwerk (KW); Heizwerk (HW), Heizkraftwerk (HKW), Blockheizkraftwerk (BHKW) und kombinierter Gas- und Dampfturbinenanlage (GuD-Anlage)?
Skizziere die Schaltbilder dieser Anlagen.
c) Unter welchen Bedingungen und zu welchem Zweck werden die unter b) genannten Anlagen eingesetzt ?
10. In einem Industriekraftwerk mit Gegendruckturbine soll Prozesswärme ausgekoppelt werden. Die Anlage weist folgende Parameter auf: Frischdampf-Zustand: $p_1 = 100$ bar, $\theta_1 = 550$ °C, $h_1 = 3500$ kJ/kg, $m = 50$ kg/s; Abdampf $h_2 = 2717$ kJ/kg; Speisewasser $h_3 = 584,3$ kJ/kg; ferner sei der Innenwirkungsgrad der Turbine $\eta_T = 0,90$ und der Wirkungsgrad des Generators $\eta_G = 0,98$.
Bestimmen Sie
- den thermischen Wirkungsgrad η_{GD} der Gegendruck-Anlage (0,269)
 - die elektrische Leistung P_{el} (38,4 MW)
 - die Nutzwärmeleistung P_{QN} , wenn der Wärmeverlust beim Verbraucher $\eta_V = 20\%$ beträgt (85,3 MW)
 - die Stromkennzahl σ und schließlich (0,45)
 - den Energienutzungsgrad η_{KWK} der KWK-Anlage. (84,8 %)
11. Eine KWK-Anlage besteht aus einer Gasturbine mit elektrischer Leistung $P_{GT} = 240$ MW, einem Abhitzeessel und einer Dampfturbine mit elektrischer Leistung $P_{DT} = 120$ MW. Die Anlage wird zur Strom- und Heizwärmeversorgung eines Stadtbezirks eingesetzt. Sie weist einen Energienutzungsgrad $\eta_{KWK} = 87\%$ auf. In der Gasturbinenbrennkammer werden $m = 12,9$ kg/s Erdgas ($H_u = 49$ MJ/kg) mit einer Luftüberschusszahl $\lambda = 2,4$ verbrannt.

Bestimmen Sie

- b) die Heizwärmeleistung Q_{HW} (190 MW)
 - c) die Stromkennzahl σ der KWK-Anlage (1,9)
 - d) den thermischen Wirkungsgrad der Gasturbine η_{GT} und Dampfturbine η_{DT} (0,38; 0,31)
 - e) den gesamten elektrischen Wirkungsgrad η_{GUD} der Anlage sowie (57,0 %)
 - f) den Abgaswärmeverlust Q_{AG} und die Abgastemperatur T_{AG} des Abhitzeessels. Dabei sei der Mindest-Verbrennungsluftbedarf $L_{\text{min}} = 17 \text{ kg/kg}$ und die spezif. Wärmekapazität des Abgases $c_{p,\text{AG}} = 1,05 \text{ kJ/kg K}$. (82 MJ/s; 145°C)
12. Ein ölbefeuertes BHKW ($\eta = 88\%$; $H_u = 39,6 \text{ MJ/l}$) liefert jährlich 80 MWh Strom und 100 MWh Wärme.
- a) Wie groß ist Primärenergieeinsparung gegenüber der Bezugsvariante mit getrennter Erzeugung von Strom in einem KW ($\eta = 36\%$,) und Wärme in einem HW ($\eta = 90\%$)? (38,6 %)
 - b) Skizziere die Sankey-Diagramme für das BHKW und die Bezugsvariante.
13. Ein Gasmotor-BHKW verbrennt 0,04 kg Erdgas ($H_u = 46 \text{ MJ/kg}$) je Sekunde und gibt dabei eine Heizleistung $P_{\text{QH}} = 930 \text{ kW}$ bei einer Stromkennzahl $\sigma = 0,72$ ab. Bestimmen Sie den elektrischen Wirkungsgrad η_{el} und den gesamten Energienutzungsgrad η_{BHKW} . (0,364; 0,869)
14. Was versteht man unter anthropogenen Treibhauseffekt und Ozonloch (Definition, Ursache, Ort, Stoffe, Mechanismus, Wirkung)? Welche Gegenmaßnahmen sind wirkungsvoll und welche wurden bereits getroffen?