

3.5 Aufgaben zu Nutzung fossiler Brennstoffe



Aufgaben zu Kap. 3.1 Verbrennung:

- Stellen Sie die Verbrennungsgleichung für Methan auf.
 - Was besagen der Brennwert und Heizwert ?
 - Was ist die Luftzahl und der Mindestluftbedarf?
- Eine deutsche Steinkohle hat folgende Stoff-Zusammensetzung (Gew.-%): 79,3 C; 4,7 H; 4,2 O; 1,1 N; 0,9 S; 5,6 Asche; 4,2 Wasser
 - Bestimme aus der Elementaranalyse den Heiz- und Brennwert (31,46 MJ/kg; 32,63 MJ/kg)
 - Bestimme den Mindestluftbedarf und tatsächlichen Verbrennungsbedarf trockener Luft bei einer Luftüberschußzahl $\lambda = 1,3$. (8,2 m³L/kgB; 10,65 m³ L/kg B)
- Heizöl S, bestehend aus 84,4% Kohlenstoff, 11,7% Wasserstoff und 3,9% Schwefel, wird mit feuchter Luft von 1 bar, 25 °C und 60% relativer Feuchte bei 15% Luftüberschuß vollständig verbrannt.
Es sind bei vernachlässigter Abweichung vom idealen Gaszustand, als Normvolumen in m³/kg Brennstoff zu ermitteln:
 - Der Mindestluftbedarf L_{\min} (10,7 m³ L/kg B)
 - Die trockene und feuchte Abgasmenge (11,7 m³A/kg B; 13,25 m³ fA/ kg B)
- Bestimme den Luftbedarf und die Rauchgasmenge bei der Verbrennung eines Erdgases folgender Zusammensetzung: CH₄ = 93 Vol-%; C₂H₆ = 2 %; C₃H₈ = 3%; CO₂ = 1 %; N₂ = 1 %. Die Verbrennung findet mit der Luftzahl $\lambda = 1,1$ statt. Der Luftfeuchtegehalt beträgt $x = 0,009$ kg/kg TL (10,9 m³/m³; 12,1 m³/m³)



Aufgaben zur Thermodynamik von Kraftwerken

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)

- b) Wie ändert sich der Wirkungsgrad, wenn der Arbeitsaufwand der Speisepumpe berücksichtigt wird? (0,4284)
- c) 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 °C , 180 bar , $h'' = 3535 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 352 \text{ kg/s}$. 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 °C ; $0,04 \text{ bar}$ wird im Kondensator nieder-geschlagen. Speisepumpen fördern das Speisewasser von $p = 240 \text{ bar}$; $h' = 135 \text{ kJ/kg}$ in den Dampferzeuger zurück.
- a) Welche thermische Leistung besitzt das Kraftwerk ? (1200 MW)
 - b) Wie groß sind der effektive Wirkungsgrad und die elektrische Bruttoleistung ? (42%; 500 MW)
 - c) Wie groß ist der Carnot-Wirkungsgrad ? (63%)
 - d) Was sind die Gründe für die Abweichung zwischen dem Carnot- und effektiven Wirkungsgrad ?
 - e) Mit welchen Maßnahmen kann man den Wirkungsgrad eines thermischen Kraftwerkes erhöhen?

3. 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, $h'' = 3535 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 352 \text{ kg/s}$. Der Dampf abgearbeitet und verstromt. Der Nassdampf von $h'' = 2334 \text{ kJ/kg}$; 90%; $h' = 121 \text{ kJ/kg}$; wird im Kondensator nieder-geschlagen. Speisepumpen fördern das Speisewasser von 135 kJ/kg in den Dampferzeuger 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 ? (60%)
 - Was sind die Gründe für die Abweichung zwischen dem Carnot- und effektive Wirkungsgrad ?
 - Mit welchen Maßnahmen kann man den Wirkungsgrad eines thermischen Kraftwerks erhöhen ?
4. Eine nach dem Clausius-Rankine-Prozess arbeitende Dampfkraftanlage ist zu berechnen. Der Kessel nach dem Überhitzer mit 140 bar und $530 \text{ }^\circ\text{C}$. Wegen der Wärmeverluste in der Rohrleitung tritt der Dampf mit 130 bar und $510 \text{ }^\circ\text{C}$ in die Turbine ein, die er mit 0,85 Wirkungsgrad ausführt. Die Konstruktion und Ausführung der Anlage lassen folgende Wirkungsgrade zu: $\eta_k = 0,85$; $\eta_{\text{gen}} = 0,94$; $\eta_{\text{ei}} = 0,93$. Für eine spezifische Enthalpie des Speisewassers von 200 kJ/kg und einer Speisepumpenleistung $P_p = 10 \text{ MW}$ sind zu bestimmen:
- Der thermische Wirkungsgrad und die spezifische Arbeit des reversiblen Clausius-Rankine-Prozesses (40,8%; -1.291 kJ/kg)
 - Der Rohrleitungswirkungsgrad (98,5%)

- b) Wie ändert sich der Wirkungsgrad, wenn der Arbeitsaufwand der Speisepumpe berücksichtigt wird? (0,4284)
- c) 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)

- a) Der für eine Klemmenleistung von 10.000 kW bei adiabater Isolierung der Turbine erforderliche Dampfmassenstrom
(40.436 kg/h)
- b) Der für diese Leistung bei einem Heizwert $H_u = 31,4$ MJ/kg erforderliche Brennstoffmassenstrom (4.859 kg/h)
- c) Die Änderung der spezifischen Enthalpie und der spezifischen Exergie in der Rohrleitung (41,0 kJ/kg; 38,1 kJ/kg)
- d) Der spezifische Arbeitsverlust der wirklichen Turbine gegenüber dem reversiblen Vergleichsprozess (219 kJ/kg)
- e) Der spezifische Exergieverlust in der Turbine (200,5 kJ/kg)
4. Wie viel Tonnen CO_2 emittiert stündlich ein Steinkohlekraftwerk der Leistung $P_{el} = 720$ MW ($\eta = 40\%$; $H_u = 30$ 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 $p_1 = 1$ bar und $t_1 = 10$ °C an. Die Turbineneintrittstemperatur t_3 beträgt 1100 °C. ($R_{Luft} = 0,287$ kJ/kg K; $x = 1,4$; $c_p = 1,005$ kJ/(kg K))
- a) Bestimme p , T und spez. Volumen v an den Eckpunkten
- b) Bestimme die spez. Verdichtungsarbeit, spezif. Expansionsarbeit und die spez. Nutzarbeit (332,2 kJ/kg; 743,3 kJ/kg; 411,1 kJ/kg)
- c) Bestimme den thermischen Wirkungsgrad (0,538)
- d) 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 Dampfturbinenwirkungsgrad der GuD-Anlage
- ohne Zusatzfeuerung (53,5 %)
 - mit Zusatzfeuerung,
wenn 40 % des Brennstoffs in der Zusatzfeuerung des Abhitzekessels verbrannt wird.
(45,4%)
 - Wie groß ist der Bedarf an Heizöl EL ($H_u = 42,7$ MJ/kg) in der Brennkammer der Gasturbine?
(15,3 bzw. 18,05 kg/s)
8. Der idealisierte Kreisprozeß eines Dieselmotors mit dem Verdichtungsverhältnis $\varepsilon = 18$, einer höchsten Temperatur $T_3 = 1973$ K mit Luft als Arbeitsmittel ($x = 1,4$) ist zuerst zu bestimmen Sie:
- den Druck und die Temperatur an den vier Eckpunkten der Zustandsänderungen
(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 spezif. Kraftstoffverbrauch $b_e = 240$ g/kWh ($H_u = 11,67$ kWh/kg) und einem mechanisch
(166 PS; 35,7%)
9. a) Was versteht man unter Kraft-Wärme-Kopplung?
b) Was sind die Unterschiede zwischen folgenden Anlagen: Dampfkraftwerk (KW); Heizkraftwerk (BHKW) und kombinierter Gas- und Dampfturbinenanlage (GuD-Anlage)?
Skizzieren Sie die Schemabilder dieser Anlagen.

ETW
10/2006



Institut für Energie- und Umwelttechnik

Aufgaben zu EWT

GuD-Anlagen und Kraft-Wärme-Kopplung

1. Wie groß ist der Gesamtwirkungsgrad einer GuD-Anlage
 - a) ohne Zusatzfeuerung (53,5 %)
 - b) mit Zusatzfeuerung,
wenn der thermische Wirkungsgrad der Gasturbine 0,38 und der der Dampfturbine 0,25 beträgt? Bei b) werden 40 % des Brennstoffs in der Zusatzfeuerung des Abhitzekessels verbrannt. (45,4%)
 - c) Wie groß ist der Bedarf an Heizöl EL ($H_u = 42,7 \text{ MJ/kg}$) in der Brennkammer der Gasturbine bei der elektr. Leistung $P_{el} = 350 \text{ MW}$? (15,3 bzw. 18,05 kg/s)

2. Eine KWK-Anlage besteht aus einer Gasturbine mit elektrischer Leistung $P_{GT} = 240 \text{ MW}$, einem Abhitzekessel und einer Dampfturbine mit elektrischer Leistung $P_{DT} = 120 \text{ MW}$. Die Anlage wird zur Strom- und Heizwärmeversorgung eines Stadtbezirks eingesetzt. Sie weist einen Energienutzungsgrad $\eta_{KWK} = 87\%$ auf. In der Gasturbinenbrennkammer werden $m = 12,9 \text{ kg/s}$ Erdgas ($H_u = 49 \text{ MJ/kg}$) mit einer Luftüberschusszahl $\lambda = 2,4$ verbrannt.
Bestimmen Sie
 - a) die Heizwärmeleistung Q_{HW} (190 MW)
 - b) die Stromkennzahl σ der KWK-Anlage (1,9)
 - c) den thermischen Wirkungsgrad der Gasturbine η_{GT} und Dampfturbine η_{DT} (0,38; 0,31)
 - d) den gesamten elektrischen Wirkungsgrad η_{GUD} der Anlage sowie (57,0 %)
 - e) den Abgaswärmeverlust Q_{AG} und die Abgastemperatur T_{AG} des Abhitzekessels. Dabei sei der Mindest-Verbrennungsluftbedarf $L_{min} = 17 \text{ kg/kg}$ und die spezif. Wärmekapazität des Abgases $c_{p,AG} = 1,05 \text{ kJ/kg K}$. (82 MJ/s; 145 °C)

3. In einem Industriekraftwerk mit Gegendruckturbine soll Prozesswärme ausgekoppelt werden. Die Anlage weist folgende Parameter auf: Frischdampf-Zustand: $p_1 = 100 \text{ bar}$, $\theta_1 = 550 \text{ °C}$, $h_1 = 3500 \text{ kJ/kg}$, $m = 50 \text{ kg/s}$; Abdampf $h_2 = 2717 \text{ kJ/kg}$; Speisewasser $h_3 = 584,3 \text{ kJ/kg}$; ferner sei der Innenwirkungsgrad der Turbine $\eta_T = 0,90$ und der Wirkungsgrad des Generators $\eta_G = 0,98$.

Bestimmen Sie

- a) den thermischen Wirkungsgrad η_{GD} der Gegendruck-Anlage (0,269)
- b) die elektrische Leistung P_{el} (38,4 MW)
- c) die Nutzwärmeleistung P_{QN} , wenn der Wärmeverlust beim Verbraucher $\eta_V = 20\%$ beträgt (85,3 MW)
- d) die Stromkennzahl σ und schließlich (0,45)
- e) den Energienutzungsgrad η_{KWK} der KWK-Anlage. (84,8 %)

4. Der idealisierte Kreisprozeß eines Dieselmotors mit dem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 18$, einem Anfangszustand $T_1 = 343 \text{ K}$, $p_1 = 1 \text{ bar}$ und einer höchsten Temperatur $T_3 = 1973 \text{ K}$ mit Luft als Arbeitsmittel ($x = 1,4$) ist zuerst zu berechnen.

Bestimmen Sie:

- a) 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)
- b) das Einspritzverhältnis ϕ (1,81)
- c) den thermischen Wirkungsgrad η_{th} (64,0)
- d) den idealisierten Wirkungsgrad η_C (Carnot-Wirkungsgrad) (82,6)
- e) 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 $V_H = 5,75 \text{ l}$, Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 18$, Drehzahl $n = 3000 \text{ U/min}$, indiziertem Druck $p_i = 10 \text{ bar}$, spezif. Kraftstoffverbrauch $b_e = 240 \text{ g/kWh}$ ($H_u = 11,67 \text{ kWh/kg}$) und einem mechanischen Wirkungsgrad $\eta_m = 0,85$.
(122,2 kWh; 166 PS; 35,7%)

4. Ein Gasmotor-BHKW verbrennt 0,04 kg Erdgas ($H_u = 46 \text{ MJ/kg}$) je Sekunde und gibt dabei eine Heizleistung $P_{QH} = 930 \text{ kW}$ bei einer Stromkennzahl $\sigma = 0,72$ ab. Bestimmen Sie den elektrischen Wirkungsgrad η_{el} und den gesamten Energienutzungsgrad η_{BHKW} . (0,364; 0,869)
5. Ein BHKW ($\eta_{BHKW} = 0,88$) erzeuge 80 MWh Strom und 100 MWh Wärme. Der Brennstoff habe den Heizwert $H_u = 11 \text{ kWh/kg}$. Wie groß sind die Primärenergieeinsparung und Brennstoffeinsparung in diesem BHKW gegenüber der Bezugsvariante mit getrennter Erzeugung von Strom in einem Dampfkraftwerk (DKW, $\eta_{DKW} = 0,36$) und Wärme in einem Heizwerk (HW, $\eta_{HW} = 0,90$)? (128,8 MWh; 38,6 %)

