

# Übungsaufgaben „Konventionelle Energieumwandlung“

## 1. Einführung in die Energiewirtschaft

### 1.1 Betriebsdauer Kraftwerk

Ein 500 MW-Kraftwerk (Nettoleistung) speist pro Jahr 3,25 TWh Strom in das Netz ein. Es ist insgesamt 7 000 h lang mit variabler Leistung am Netz und hat einen konstanten Eigenbedarf von 30 MW.

$$\begin{aligned} P_{\text{Netto}} &= 500 \text{ MW} & W_{\text{Netto}} &= 3,25 \text{ TWh} & T_{\text{Netz}} &= 7000 \text{ h} \\ P_{\text{Eigen}} &= 30 \text{ MW} \end{aligned}$$

- a) Berechnen Sie Bruttoleistung an den Generatorklemmen.

Bruttoleistung: 
$$P_{\text{Brutto}} = P_{\text{Netto}} + P_{\text{Eigen}} = 500 \text{ MW} + 30 \text{ MW} = \underline{\underline{530 \text{ MW}}}$$

- b) Berechnen Sie die jährliche Benutzungsdauer.

jährl. Benutzungsdauer: 
$$T_M = \frac{W}{P_{\text{Max}}} = \frac{W_{\text{Netto}}}{P_{\text{Netto}}} = \frac{3,25 \text{ TWh}}{500 \text{ MW}} = \underline{\underline{6500 \text{ h}}}$$

- c) Berechnen Sie die jährliche Strommenge für den Eigenbedarf.

jährl. eig. Strommenge: 
$$W_{\text{el,Eigen}} = T_{\text{Netz}} \cdot P_{\text{Eigen}} = 7000 \text{ h} \cdot 30 \text{ MW} = \underline{\underline{210 \text{ GWh}}}$$

### 1.2 Wirkungsgradberechnungen

Ein Kohlekraftwerk hat eine Brennstoffleistung von 1200 MW, die Dampfturbine treibt den Synchrongenerator mechanisch mit 570 MW an. Der Generator liefert eine Klemmenleistung von 550 MW, an das Netz werden 500 MW abgegeben.

$$\begin{aligned} P_{\text{BS}} &= 1200 \text{ MW} & P_{\text{Antrieb}} &= 570 \text{ MW} & P_{\text{Klemme}} &= 550 \text{ MW} \\ P_{\text{Netto}} &= 500 \text{ MW} \end{aligned}$$

- a) Berechnen Sie den gesamten Brutto- und den Nettowirkungsgrad des Kraftwerks.

Bruttowirkungsgrad: 
$$\eta_{\text{Brutto}} = \frac{P_{\text{Brutto}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{P_{\text{Klemme}}}{P_{\text{BS}}} = \frac{550 \text{ MW}}{1200 \text{ MW}} = \underline{\underline{45,8 \, \%}}$$

Nettowirkungsgrad: 
$$\eta_{\text{Netto}} = \frac{P_{\text{Netto}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{P_{\text{Netto}}}{P_{\text{BS}}} = \frac{500 \text{ MW}}{1200 \text{ MW}} = \underline{\underline{41,7 \, \%}}$$

- b) Berechnen Sie den Generatorwirkungsgrad und die Eigenbedarfsleistung.

Generatorwirkungsgrad: 
$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{P_{\text{Brutto}}}{P_{\text{Gen zu}}} = \frac{P_{\text{Klemme}}}{P_{\text{Antrieb}}} = \frac{550 \text{ MW}}{570 \text{ MW}} = \underline{\underline{96,5 \, \%}}$$

Eigenbedarfsleistung: 
$$P_{\text{Eigen}} = P_{\text{Brutto}} - P_{\text{Netto}} = 550 \text{ MW} - 500 \text{ MW} = \underline{\underline{50 \text{ MW}}}$$

- c) Das Kraftwerk benötigt pro Jahr 8,4 TWh an Brennstoffenergie und erzeugt daraus 3,25 TWh Strom. Wie groß ist der Jahresnutzungsgrad des Kraftwerks?

$$W_{\text{BS}} = 8,4 \text{ TWh} \quad W_{\text{Netto}} = 3,25 \text{ TWh}$$

Jahresnutzungsgrad: 
$$\eta_{\text{Jahr}} = \frac{W_{\text{Netto}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{W_{\text{Netto}}}{W_{\text{BS}}} = \frac{3,25 \text{ TWh}}{8,4 \text{ TWh}} = \underline{\underline{38,7 \, \%}}$$

### 1.3 Wirkungsgrade Gaskraftwerk

Der Leistungsfluss in einem Gaskraftwerksblock ohne Kraft-Wärme-Kopplung soll bestimmt werden. Bekannt sind bei einer Nettoleistung von 300 MW die Wirkungsgrade:

$$\eta_{\text{Netto}} = 38,8 \% \quad \eta_{\text{Brutto}} = 40,1 \% \quad \eta_{\text{therm}} = 41,4 \%$$

$\eta_{\text{Netto}}$  ist das Verhältnis der Nettoleistung zur im Brennstoff zugeführten Leistung  $P_{\text{Gas}}$ ,  $\eta_{\text{Brutto}}$  die Relation der Ausgangsleistung des Generators zu  $P_{\text{Gas}}$  und  $\eta_{\text{therm}}$  das Verhältnis der Leistung an der Welle des Generators zu  $P_{\text{Gas}}$ .

$$\eta_{\text{Netto}} = 38,8 \% \\ P_{\text{Netto}} = 300 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{Brutto}} = 40,1 \%$$

$$\eta_{\text{therm}} = 41,4 \%$$

- a) Berechnen Sie die im Brennstoff zugeführte Leistung  $P_{\text{gas}}$

Zugeführte Gas-Leistung: 
$$P_{\text{zu}} = \frac{P_{\text{Netto}}}{\eta_{\text{Netto}}} = P_{\text{Gas}} = \frac{300 \text{ MW}}{38,8 \%} = \underline{\underline{773,2 \text{ MW}}}$$

- b) die dem Generator zugeführte Leistung  $P_{\text{gen}}$  zu

Zugeführte Gen.-Leistung: 
$$P_{\text{zu,Gen}} = P_{\text{zu}} \cdot \eta_{\text{therm}} = 773,2 \text{ MW} \cdot 41,4 \% = \underline{\underline{320 \text{ MW}}}$$

- c) den Generatorwirkungsgrad

Generatorwirkungsgrad: 
$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{P_{\text{Brutto}}}{P_{\text{zu,Gen}}} = \frac{\eta_{\text{Brutto}} P_{\text{zu}}}{P_{\text{zu,Gen}}} = \frac{40,1 \% \cdot 773,2 \text{ MW}}{320 \text{ MW}} = \underline{\underline{96,9 \%}}$$

- d) den Kraftwerkseigenbedarf

Kraftwerkseigenbedarf: 
$$P_{\text{Eigen}} = P_{\text{zu}} \cdot \eta_{\text{Brutto}} - P_{\text{Netto}} = \underline{\underline{9,97 \text{ MW}}}$$

## 1.4 Jahreskosten eines Kohlekraftwerkes

Es gelten die folgenden Annahmen:

Nennleistung	400	MW
Erstellungskosten E der Anlage:	430	Mio €
Zinssatz	7,5	%
Laufzeit	20	Jahre
Steuern und Versicherung bezogen auf E	1,0	%
Wartung und Instandhaltung bezogen auf E	3,0	%
Personalkosten bei 250 Mitarbeitern	13	Mio €/a
spezifische Brennstoffkosten / Arbeitskosten	0,05	€/kWh

- a) Berechnen Sie die Jahreskosten für Annuität, Steuern und Versicherungen, Wartung und Instandhaltung und die gesamten Festkosten pro Jahr.

Zinsfuss:  $q = 1 + \frac{z}{100} = 1 + \frac{7,5}{100} = 1,075$

Annuitätsfaktor:  $a_n = \frac{q^n(q-1)}{q^n-1} = \frac{1,075^{20}(1,075-1)}{1,075^{20}-1} = 9,8 \%$

Annuität, Finanzierungskosten:  $k_F = a_n \cdot E = 9,8\% \cdot 430 \text{ Mio €} = \underline{\underline{42,17 \frac{\text{Mio €}}{\text{a}}}}$

Steuern und Versicherung:  $k_{S+V} = 1\% \cdot E = \underline{\underline{4,3 \frac{\text{Mio €}}{\text{a}}}}$

Wartung und Instandhaltung:  $k_{W+I} = 3\% \cdot E = \underline{\underline{12,9 \frac{\text{Mio €}}{\text{a}}}}$

gesamte Festkosten pro Jahr:  $k_{ges} = k_F + k_{S+V} + k_{W+I} + k_P = \underline{\underline{72,34 \frac{\text{Mio €}}{\text{a}}}}$

- b) Wie hoch sind der Jahreskostensatz bezogen auf die Investition und die spezifischen Festkosten pro kW?

Festkostensatz:  $k_{Fest} = \frac{k_{Ges}}{E} = \frac{72,34 \text{ Mio €}}{430 \text{ Mio €}} = 16,82 \%$

spez. Festkosten:  $k_p = \frac{k_{Fest}}{P_{el}} = \frac{72,34 \text{ Mio €}}{400 \text{ MW}} = 180,85 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$

- c) Welcher Durchschnittspreis ist jeweils für die kWh bei Jahresbenutzungsdauern von 1000 h, 3000 h, 5000 h und 7000 h anzusetzen?

Erzeugte Arbeit:  $W_{el} = P_{Nenn} \cdot T_{Nutz}$

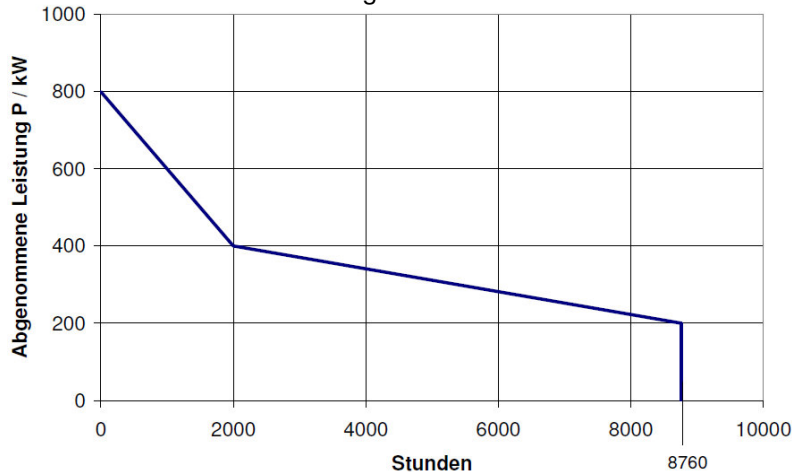
Brennstoffkosten:  $K_{BS} = k_{BS} \cdot T_{Nutz}$

Jahresdurchschnittspreis:  $k_{\emptyset} = \frac{\text{Jahresfestkosten} + K_{BS}}{W_{el}} = \frac{K_{ges} + K_{BS}}{W_{el}}$

$$\begin{aligned} k_{\emptyset}(1000 \text{ h}) &= \underline{\underline{0,23 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}} & k_{\emptyset}(3000 \text{ h}) &= \underline{\underline{0,11 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}} \\ k_{\emptyset}(5000 \text{ h}) &= \underline{\underline{0,086 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}} & k_{\emptyset}(7000 \text{ h}) &= \underline{\underline{0,080 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}} \end{aligned}$$

### 1.5 Stromverbrauch eines Industriebetriebes

Ein Industriebetrieb weist idealisiert folgende Dauerlinie des elektrischen Energieverbrauches auf:



Laut Vertrag mit dem EVU ist die höchste Leistungsspitze eines Jahres mit einem Jahresleistungspreis von 60 €/kW zu bezahlen. Für die Arbeit sind im Hochtarif 14 Cent/kWh und im Niedertarif 9 Cent/kWh zu zahlen. Das HT/NT Verhältnis ist mit 60/40 anzusetzen.

$$k_p = 60 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

$$k_{HT} = 14 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}$$

$$k_{NT} = 9 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}$$

$$\frac{HT}{NT} = \frac{60}{40}$$

- a) Berechnen Sie Jahresarbeit und Jahresbenutzungsdauer

Jahresarbeit:

$$W_{el} = \text{Fläche unter Graph} = \underline{\underline{3228 \text{ MWh}}}$$

Jahresnutzungsdauer:

$$t_{Nutz} = \frac{W_{el}}{P_{Max}} = \frac{3228 \text{ MWh}}{800 \text{ kW}} = \underline{\underline{4035 \text{ h}}}$$

- b) Berechnen Sie die jährlichen Gesamtkosten für elektrische Energie

Festkosten:

$$K_{Fest} = k_p \cdot P_{Max} = 60 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot 800 \text{ kW} = 48000 \text{ €}$$

spez. Stromerzeugungskosten:

$$k_w = \frac{k_{bew}}{W_{el}} = (0,6 \cdot k_{HT} + 0,4 \cdot k_{NT}) = 12 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}$$

bewegliche Kosten:

$$k_{bew} = k_w \cdot W_{el} = 12 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}} \cdot 3228 \text{ MWh} = 387360 \text{ €}$$

Gesamtkosten:

$$K_{Ges} = K_{Fest} + K_{Bew} = 48000 \text{ €} + 387360 \text{ €} = \underline{\underline{435360 \text{ €}}}$$

- c) Welcher Mischpreis ergibt sich für eine kWh?

Mischpreis/kWh:

$$k_{kWh} = \frac{K_{Ges}}{W_{el}} = \frac{435360 \text{ €}}{3228 \text{ MWh}} = \underline{\underline{13,487 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}}}$$

## 2. Fossile Dampfkraftwerke

### 2.1 Heizwert von Kohle berechnen

Berechnen Sie den Heizwert von Fettkohle nach der Tabelle im Skript.

(Roh-)Brennstoff	c	h	o	n	s	w	Asche	$H_O / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$H_U / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$H_U / \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$
Fettkohle	81	5	4	1	1	3	5	33772	32572	9,047

Heizwert (unterer Heizwert)

$$H_U = 34835 c + 93870 h + 10465 s + 6280 n - 10800 o - 2440 w$$

$$H_{U, \text{Fettkohle}} = 32,573 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Brennwert (oberer Heizwert)

$$H_O = H_U + 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (9h + w) = H_U + R(9h + w)$$

$$H_{O, \text{Fettkohle}} = 33,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

### 2.2 Emissionen eines Steinkohlekraftwerkes

Ein mit Steinkohle befeuerter 400-MW-Block fährt 24 h am Tag mit konstanter Leistung.

a) Wieviel elektrische Arbeit wird generiert?

El. Arbeit:  $W_{el} = P \cdot t_b = 400 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h} = \underline{9,6 \text{ GWh}}$

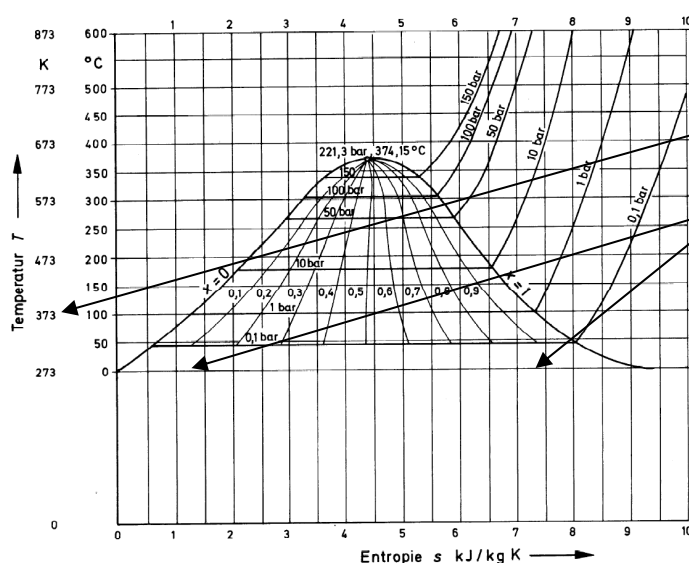
b) Welche lokale Mengen  $\text{SO}_2$  und  $\text{CO}_2$  werden emittiert?

Menge  $\text{SO}_2$ :  $M_{\text{SO}_2} = m_{\text{SO}_2} \cdot W_{el} = 0,913 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \cdot 9,6 \text{ GWh} = \underline{8,7648 \text{ t}}$

Menge  $\text{CO}_2$ :  $M_{\text{CO}_2} = 929 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \cdot 9,6 \text{ GWh} = \underline{8918,4 \text{ t}}$

### 2.3 Verdampfungswärme von Wasser im Ts-Diagramm

Ermitteln Sie die spezifische Verdampfungswärme von Wasser bei Drücken von 1 bar und 10 bar.



Entropie:  $\Delta s = \frac{\Delta Q}{T}$

$T_1 (1 \text{ bar}) = 373 \text{ K}$

$T_{10} (10 \text{ bar}) = 453 \text{ K}$

$\Delta s_1 = (7,3 - 1,3) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

$\Delta s_{10} = (6,6 - 2,1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 4,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

spez. Verdampfungswärme:

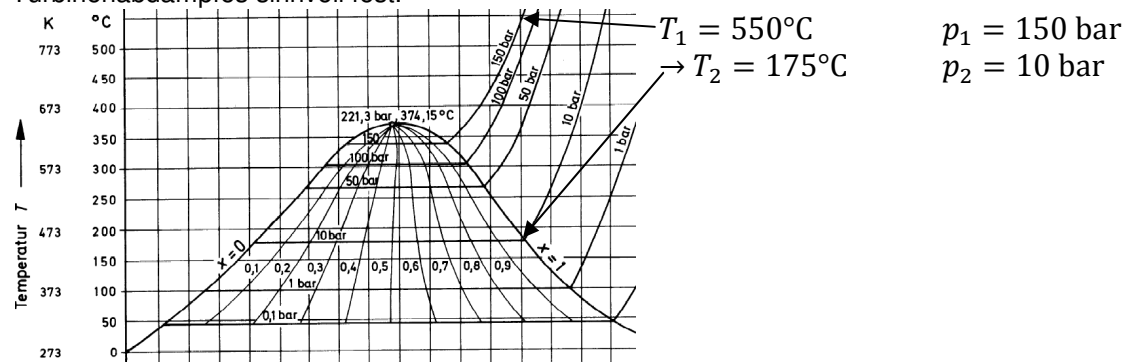
$$\Delta Q = \Delta s \cdot T$$

$\Delta Q_1 = 2238 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta Q_{10} = 2038 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

## 2.4 Dampfzustände HD-Turbine

Eine HD-Turbine erhält Frischdampf von 550°C und 150 bar. Legen Sie Temperatur und Druck des Turbinenabdampfes sinnvoll fest.



## 2.5 Eckdaten Dampfkreisprozeß

Ein Dampfkraftwerk hat folgende Daten:

Nennleistung der Turbine:	300 MW
Wirkungsgrad Turbine:	100 %
Wirkungsgrad Kreisprozess:	33 %
Temperatur des ND-Abdampfes:	27°C
Dampfgehalt X des ND-Abdampfes:	1
Prozessdruckdifferenz:	150 bar
Spezifische Wärmekapazität Wasser:	4,2 kJ/kg·K
Temperaturerhöhung Kühlwasser:	10 K

a) Wie groß ist der Dampfmassenstrom bei Nennbetrieb?

abgeführte Wärme:  $\Delta Q_{ab} = T_M \cdot \Delta s = 300 \text{ K} \cdot (8,2 - 0,3) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Wirkungsgrad:  $\eta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{W_{ab}}{W_{ab} + Q_{ab}} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Arbeit} + \text{abgeführte Wärme}}$

verrichtete Arbeit:  $W_{ab} = \frac{\eta \cdot \Delta Q_{ab}}{1 - \eta} = \frac{33\% \cdot 2430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1 - 33\%} = 1196,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Turbinenleistung:  $P_{\text{Turbine}} = W_{ab} \cdot \dot{m}$

Massestrom:  $\dot{m} = \frac{P_{\text{Turbine}}}{W_{ab}} = \frac{300 \text{ MW}}{1196,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \underline{\underline{250,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$

b) Wie groß ist die hydraulische Leistung der Speisewasserpumpe bei Nennbetrieb?

hydraulische Leistung:  $P_{\text{Hydr}} = \dot{V} \cdot \Delta p = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \Delta p = \frac{250,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1} \cdot 150 \text{ bar} = \underline{\underline{3,75 \text{ MW}}}$

c) Wie groß ist der Kühlwasserdurchfluss?

Kühlwasserabwärme:  $\dot{Q}_{KW} = \dot{Q}_{ab} = \Delta Q_{ab} \cdot \dot{m} = 2430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 250,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 608,958 \text{ MW}$

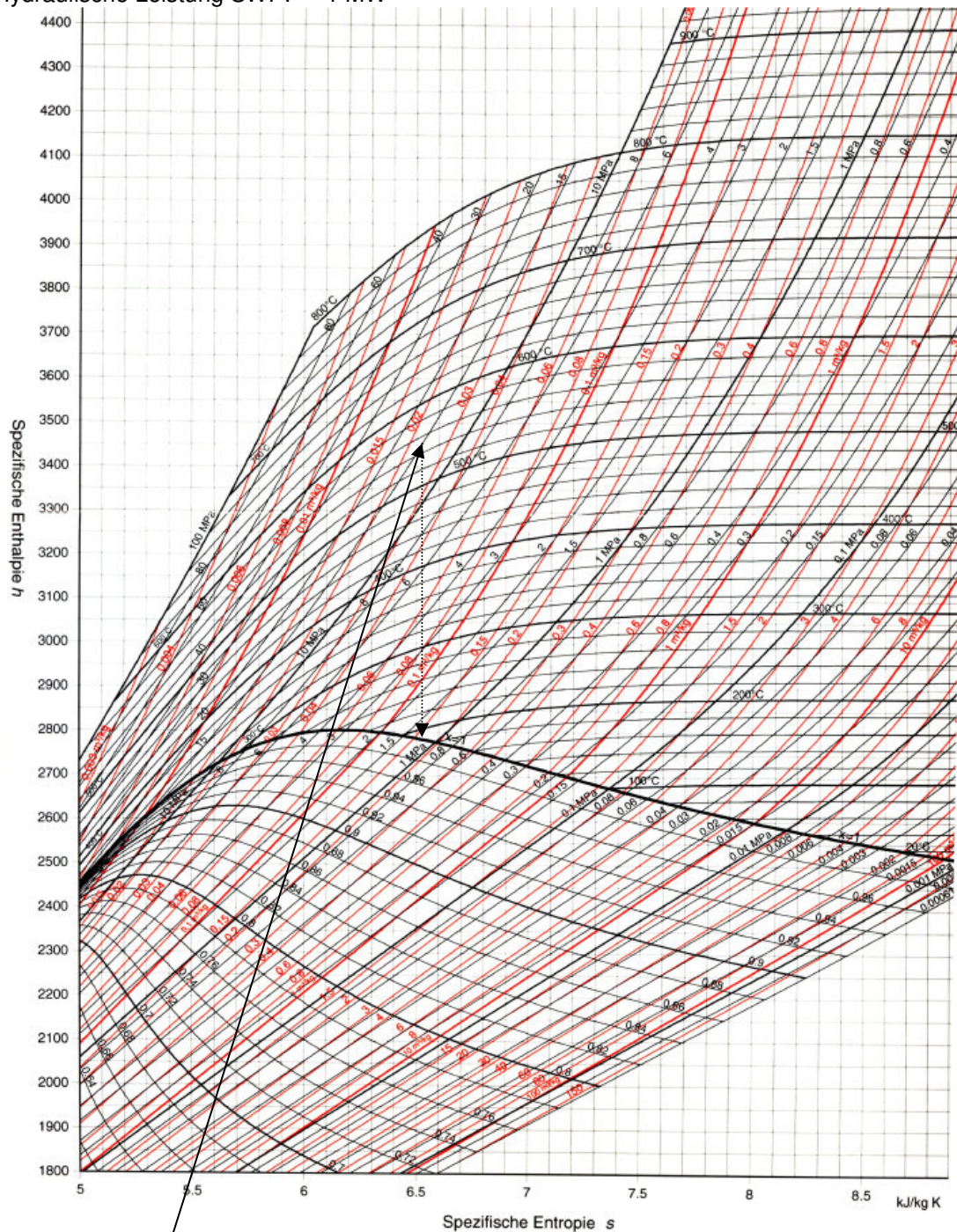
Kühlwasserdurchfluss:  $\dot{m}_{KW} = \frac{\dot{Q}_{KW}}{c_W \cdot \Delta T} = \frac{608,958 \text{ MW}}{4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 10 \text{ K}} = \underline{\underline{14,499 \frac{\text{t}}{\text{s}}}}$

Ergebnis: 13,26 t/s

## 2.6 Zweistufiger Dampfkreisprozess

Ein Dampfkraftprozess hat folgende Daten:

HD-Frischdampfzustand : 550°C, 150 bar  
 ND-Abdampfzustand: 45°C, 0,01 bar  
 Hydraulische Leistung SWP: 1 MW



- a) Legen Sie das Druckniveau des HD-Abdampfes sinnvoll mit Begründung fest.

Start: 550°C und 150bar → Runter bis auf Kondensationslinie → 1,2 MPa

- b) Berechnen Sie den Dampfmassenstrom des Kreisprozesses.

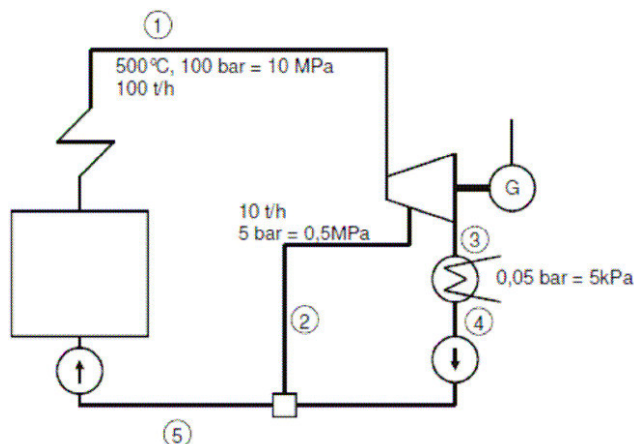
hydraulische Leistung: 
$$P_{Hydr} = \dot{V} \cdot \Delta p = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \Delta p$$

Massestrom: 
$$\dot{m} = \frac{\rho}{\Delta p} \cdot P_{Hydr} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{15 \text{ MPa}} \cdot 1 \text{ MW} = \underline{\underline{66,667 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$$



## 2.7 Dampfkraftanlage mit Anzapf-Speisewasservorwärmung

Der Kessel liefert 100 t/h überhitzten Dampf von 500°C und 100 bar. Der innere Wirkungsgrad der Turbine ist 80 %. Der Turbine kann Dampf zur Speisewasservorwärmung entnommen werden, und zwar 10 t/h bei 5 bar. Die Kondensationstemperatur ist 33°C. Pumpenarbeiten sind zu vernachlässigen.



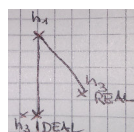
Zunächst arbeitet der Prozess ohne Speisewasservorwärmung.

- a) Bestimmen Sie die Enthalpien in den Punkten 1, 3, 4 und 5. Die Enthalpie 4 beträgt 138 kJ/kg bei 33°C.

Ergebnis:  $h_1 = 3370$  kJ/kg  $h_3 = 2280$  kJ/kg  $h_5 = h_4 = 138$  kJ/kg

Enthalpien in bestimmten Punkten

$$\eta_{i,Turbine} = \frac{\Delta h}{\Delta h_s} =$$



(Diagramm ablesen 1 Punkt)

Ideal einfach nur nach unten

$$h_3^*(ideal) = \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$h_{3(real)} = h_1 - (h_1 - h_3^*) \cdot 0.8 (\text{Wirkungsfaktor Turbine})$$

- b) Wie groß ist der Prozesswirkungsgrad ohne Speisewasservorwärmung?

Ergebnis: 33,7 %

$$\eta = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_5} = \frac{3370 - 2280}{3370 - 138} = 33,73\%$$

- c) Nun wird die Speisewasservorwärmung eingeschaltet. Bestimmen Sie die Enthalpien an den Stellen 1 bis 5.

Ergebnis:  $h_1$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  siehe a)  $h_2 = 2800$  kJ/kg  $h_5 = 404$  kJ/kg

Speisewasservorwärmung eingeschaltet. Enthalpien in Punkt 5

(Siehe: Enthalpien in bestimmten Punkten)

$$\dot{m}_{ges} \cdot h_5 = \dot{m}_{(Vorwärmer)} \cdot h_2 + \dot{m}_{(Kondensator)} \cdot h_4$$

$$h_5 = \frac{\dot{m}_{(Vorwärmer)} \cdot h_2 + \dot{m}_{(Kondensator)} \cdot h_4}{\dot{m}_{ges}} \rightarrow h_5 = (0,1 \cdot 2800 + 0,9 \cdot 138) \frac{kJ}{kg} = 404,2 \frac{kJ}{kg}$$

- d) Welchen Wert erreicht der Wirkungsgrad mit Speisewasservorwärmung

Ergebnis: 35 %

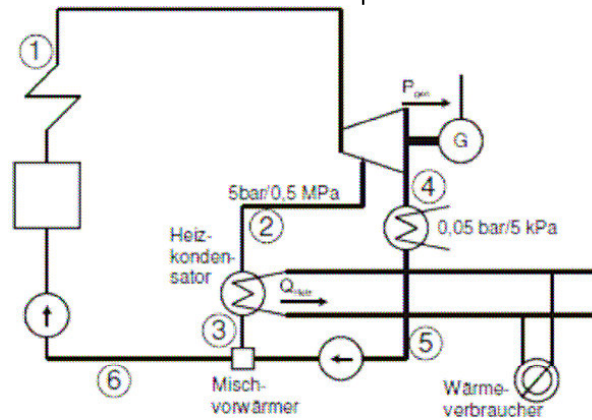
Wirkungsgrad mit Speisewasservorwärmung

$$\eta = \frac{\dot{m}_5(h_1 - h_5) - \dot{m}_4(h_3 - h_4)}{\dot{m}_5(h_1 - h_5)} = \frac{100 \frac{t}{h} \left( 3370 \frac{kJ}{kg} - 404 \frac{kJ}{kg} \right) - 90 \frac{t}{h} \left( 2280 \frac{kJ}{kg} - 138 \frac{kJ}{kg} \right)}{100 \frac{t}{h} \left( 3370 \frac{kJ}{kg} - 404 \frac{kJ}{kg} \right)} = 35,0\% \quad \text{oder} \quad \eta = \frac{\dot{m}_2(h_1 - h_2) - \dot{m}_4(h_1 - h_3)}{\dot{m}_5(h_1 - h_5)}$$



## 2.8 Dampfkraftanlage mit Wärmeauskopplung

Die Frischdampfdaten sind 540°C, 240 bar und 360 t/h. Der innere Wirkungsgrad der Turbine sei 80 %. Der Turbine kann variabel Dampf für den Heizkondensator entnommen werden, der Druck vor dem Heizkondensator sei 5 bar. Der Kondensationsdruck sei 0,05 bar. Die die Enthalpie des Kondensates ist 138 kJ/kg. Nach dem Heizkondensator sei die Enthalpie des Wasser-Dampf-Gemisches 192 kJ/kg.



Zunächst ist mit Betrieb des Heizkondensators (60 MW) zu rechnen.

- a) Bestimmen Sie die Enthalpien des Wassers/Dampfes nach dem Überhitzer (1), nach der Anzapfung der Turbine für den Heizkondensator (2), nach der Turbine vor dem Kondensator (4) und vor der Speisewasserpumpe (6).

Ergebnis:  $h_1 = 3\,320 \text{ kJ/kg}$   $h_2 = 2\,600 \text{ kJ/kg}$   $h_4 = 2\,144 \text{ kJ/kg}$   $h_6 = 151 \text{ kJ/kg}$

HK Heizkondensat

$$\dot{Q}_{HK} = \dot{m}_2 \cdot \Delta h = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{Q}_{HK}}{\Delta h_{13}} = \frac{60 \text{ MW}}{(2600 - 192) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 24,92 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{3600}{1000} = 89,70 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 360 \frac{\text{t}}{\text{h}} - 89,70 \frac{\text{t}}{\text{h}} = 270,3 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_4 \cdot h_5 =$$

$$h_6 = \frac{\dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_4 \cdot h_5}{\dot{m}_6} = \frac{89,70 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 192 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 270,3 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 138 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{360 \frac{\text{t}}{\text{h}}} = 151,455 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- b) Berechnen Sie den Gesamtwirkungsgrad des gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugungsprozesses.

Ergebnis: 52,3 %

Gesamtwirkungsgrad des gekoppelten Strom- und

Wärmeerzeugungsprozesses.

$$\eta_{Ges} = \frac{\dot{Q}_{Zu} - \dot{Q}_{ab,kond}}{\dot{Q}_{Zu}} = 1 - \frac{\dot{m}_4(h_4 - h_5)}{\dot{m}_1(h_1 - h_6)} = 1 - \frac{270,3 \frac{\text{t}}{\text{h}} (2\,144 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 138 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{360 \frac{\text{t}}{\text{h}} (3\,320 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 151 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 52,47\%$$

$$W_{\text{technische Arbeit}} = \dot{m} \cdot c_p [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]$$

$$P_{tech} = \frac{\dot{m}}{\frac{dm}{dt}} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2 - T_4 + T_1)$$

Jetzt ist der Prozess ohne Betrieb des Heizkondensators zu betrachten.

- c) Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Kraftwerkes im reinen Kondensationsbetrieb.

Ergebnis: 37,1 %

$$\eta_{Ges} = \frac{\dot{Q}_{Zu} - \dot{Q}_{ab,kond}}{\dot{Q}_{Zu}} = 1 - \frac{(h_4 - h_5)}{(h_1 - h_6)} = 1 - \frac{(2\,144 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 138 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(3\,320 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 151 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 36,67\%$$

### 3.1 Optimaler Jouleprozess einer GT

Der theoretische Wirkungsgrad eines Jouleprozesses soll 40% betragen.  
Berechnen Sie das entsprechende Druckverhältnis dieses Prozesses.

Wirkungsgrad:

$$\eta_{therm} = 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \text{ mit } \kappa = 1,4 = \frac{c_p}{c_v} = 40\%$$

Druckverhältnis:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{(1-\eta_{therm})^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}} = \frac{1}{(1-0,4)^{\frac{1,4}{1,4-1}}} = 5,98 = \underline{6}$$

### 3.2 GuD-Kraftwerk

Die Gasturbine eines GuD-Kraftwerkes hat folgende Daten (idealer Prozess):

Umgebungstemperatur T <sub>1</sub> :	20°C
Turbineneintrittstemperatur T <sub>3</sub> :	1 200°C
Abgastemperatur T <sub>4</sub> :	550°C
Luftmassenstrom:	800 kg/s
Spezifische Wärmekapazität c <sub>p</sub> von Luft:	1 kJ/(kg·K)

a) Berechnen Sie den theoretischen thermodynamischen Wirkungsgrad der Gasturbine.

Wirkungsgrad: 
$$\eta_{therm} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{(550-273)K}{(1200+273)K} = \underline{44,1\%}$$

b) Berechnen Sie die Temperatur nach dem Verdichter T<sub>2</sub>.

Verhältnis: 
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

Verdichtertemperatur: 
$$T_2 = \frac{T_3 \cdot T_1}{T_4} = \frac{1473K \cdot 293K}{823K} = 524,4K = \underline{251^\circ C}$$

c) Welche mechanische Leistung gibt die Gasturbine an den Generator ab?  
Ergebnis: 335 MW

*mechanische Leistung gibt die Gasturbine an den Generator ab*

$$P_{mech} = m \cdot c_p [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)] \quad \text{!!Kein Kelvin dazu addieren!!}$$

$$P_{mech} = 800 \frac{kg}{s} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} [(1200 - 251) - (550 - 20)]K = 335,2MW$$

$$1kg \text{ Wasser } 1 \text{ Grad erhöhen } Q_W = 1kg \cdot 4,2 \frac{kJ}{kg \cdot K} = 4200kJ$$

d) Berechnen Sie die Wärmeleistung aus dem Abgas der Gasturbine an den Dampferzeuger der Dampfturbine unter der Annahme, dass alle Verluste im Abgas enthalten sind.  
Ergebnis: 424 MW

*Wärmeleistung aus dem Abgas der Gasturbine an den Dampferzeuger der Dampfturbine unter der Annahme, dass alle Verluste im Abgas enthalten sind.*

$$100\% = \frac{335MW(\text{mechanische Leistung})}{44,1\%(\text{theoretischen Wirkungsgrad})} = 759,63(\text{Gesamt Leistung})$$

$$100\% - 44,1\%(\text{theoretischen Wirkungsgrad}) = 55,9\%(Verlust) \%$$

$$55,9\%(Verlust)\% \cdot 759,63 MW(\text{Gesamt Leistung}) = 424,63MW(\text{Wärmeleistung aus dem Abgas})$$

**Alternativ:**

$$\dot{Q}_{Abgas} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{4(Abgastemperatur)} - T_{1(Umgebungstemperatur)}) = 800 \frac{kg}{s} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (550 - 20) = 424MW$$

- e) Die Frischdampfdaten sind 500°C und 100 bar. Bestimmen Sie die Frischdampfenenthalpie aus einem h-s-Diagramm.

Ergebnis: 3375 kJ/kg

*Frischdampfenenthalpie aus einem h-s-Diagramm.*

Einfach ablesen  $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

- f) Berechnen Sie den erforderlichen Dampfmassenstrom in kg/s, wenn das Speisewasser eine Enthalpie von 600 kJ/kg hat.

Ergebnis: 152 kg/s

*erforderlichen Dampfmassenstrom in kg/s, wenn das Speisewasser eine Enthalpie von 600 kJ/kg hat.*

$$\dot{Q}_{\text{zu}}(\text{Abgas Wärmeleistung}) = \dot{m}_{\text{D}} * \Delta h$$

$$\Delta h = \left( \begin{array}{c} \text{Abgelesene Frischdampf} \\ h-s \text{ Diag.} \end{array} \right) \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Speisewasser} \\ \text{Enthalpie} \end{array} \right) = 3375 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2775 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_{\text{D}} = \frac{\dot{Q}_{\text{zu}}}{\Delta h} \text{ mit } \dot{m}_{\text{D}} = \frac{424 \text{ MW}}{2775 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 152,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{hyd}} = \dot{V} * \varphi * g * \Delta h = \dot{V} * \Delta p = 0,152 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 100 * 0,1 \text{ MPa} =$$

- g) In der Dampfturbine soll der Dampf isentrop und reibungsfrei bis zur Kondensationslinie entspannt werden. Bestimmen Sie die Enthalpie des Abdampfes Dampfturbine.

Ergebnis: 2775 kJ/kg

*Dampfturbine soll der Dampf isentrop und reibungsfrei bis zur Kondensationslinie entspannt werden.*

*Bestimmen Sie die Enthalpie des Abdampfes Dampfturbine.*

h-s Diag. -> senkrecht nach unten -> dicke linie h ablesen  $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

- h) Berechnen Sie die mechanische Leistung der Dampfturbine.

Ergebnis: 91,2 MW

*Berechnen Sie die mechanische Leistung der Dampfturbine.*

$$P_{\text{DT}} = \dot{m}_{\text{Dampf}} * (h_{\text{FD(Frischdampf)}} - h_{\text{K(Kondensator)}}) = 152 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left( 3375 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2775 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

### 3.3 Gasturbine

In einer GT läuft folgender Jouleprozess ab:

- Polytrope Verdichtung der Luft von 1 bar, 20°C auf 10 bar mit einem inneren Wirkungsgrad von 80%
  - Isobare Erwärmung auf 1 000°C
  - Polytrope Entspannung auf 1 bar mit einem inneren Wirkungsgrad von 90%
  - Abkühlung auf die Umgebungstemperatur 20°C
  - $\kappa = 1,4$
  - $c_{p, \text{Luft}} = 1,2 \text{ kJ/kg} \times \text{K}$
  -
- a) Skizzieren Sie den realen Prozess qualitativ in einem T-s-Diagramm.
- b) Welche Temperaturen ergeben sich nach dem Verdichter und nach der Expansionsturbine?  
Ergebnis: 360°C 447°C

- c) Wie groß ist die abgegebene Nutzleistung an der Welle bei einem Massenstrom von 20 kg/s?  
Ergebnis: 5,11 MW

$$W_{\text{technische Arbeit}} = \dot{m} * c_p [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]$$

$$P_{tech} = \dot{m} * c_p * (T_3 - T_2 - T_4 + T_1)$$

$$P_{tech} = 20 \frac{kg}{s} * 1,2 \frac{KJ}{kgK} * (1000 - 360 + 447 - 20)K = 5,11 \text{ MW}$$

- d) Die Umgebungsluftsdichte sinkt um 10% (Sommer, große Höhenlage), wie verändern sich Massenstrom und Nutzleistung?  
 Ergebnis: -10%

### 3.4 Gasturbine des historischen Strahlflugzeuges Me 262 A

Das im Deutschen Museum München ausgestellte Junkers Jumo 004-Luftstrahltriebwerk war 1944 das erste serienreife Strahltriebwerk der Welt.

Einige Daten:	Druckverhältnis Verdichter:	3,1:1
	Umgebungsluft:	1 bar, 15°C
	Luftdurchsatz:	21,2 kg/s
	Verbrennungstemperatur:	1300°C
	$c_p$ , Luft:	1,2 kJ/kg·K
	$\kappa$ :	1,4

- a) Skizzieren Sie den idealen GT-Prozess qualitativ in einem T-s-Diagramm bis zur Turbineneintrittstemperatur. Tragen Sie alle Drücke ein und die 3 Temperaturen der Ansaugluft, der verdichteten Luft und die T-Eintrittstemperatur. Verdichter und Arbeitsturbine können als adiabat betrachtet werden.

Ergebnis:  $p_1 = 1 \text{ bar}$   $p_2 = 3,1 \text{ bar}$   $T_1 = 15^\circ\text{C}$   $T_2 = 124^\circ\text{C}$   $T_3 = 1300^\circ\text{C}$

$$\sqrt[\kappa]{\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1-\kappa}} * T_1 = T_2 \quad \sqrt[1,2]{\left(\frac{1}{3,1}\right)^{-0,2}} * (15 + 273)\text{K} = 124^\circ\text{C}$$

- b) Wie groß ist die erforderliche Antriebsleistung des Verdichters?

Ergebnis: 1,98 MW

$$\Delta W_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) = \frac{c_p}{\kappa} * (124 - 15)\text{K} = 1,98\text{MW}$$

- c) Da die Arbeitsturbine nur den Verdichter antreiben muss, haben die Abgase nach der Arbeitsturbine noch einen höheren Druck als der Umgebungsdruck, da ja noch nicht die ganze mögliche Enthalpie abgearbeitet wurde. Diese wird über die mechanische Schubkraft des Abgasstrahls zum Vortrieb genutzt. Erst hinter dem Abgasrohr (adiabat) der Gasturbine herrscht Umgebungsdruck. Wie groß sind also Temperatur und Druck direkt nach der Arbeitsturbine (adiabat)? Zeichnen Sie den Punkt in das T-s-Diagramm qualitativ ein.

Ergebnis: 1191°C 2,41 bar

- d) Berechnen Sie die zugeführte Wärmeleistung.

Ergebnis: 30 MW

$$W_{\text{technische Arbeit}} = \dot{m} * c_p[(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]$$

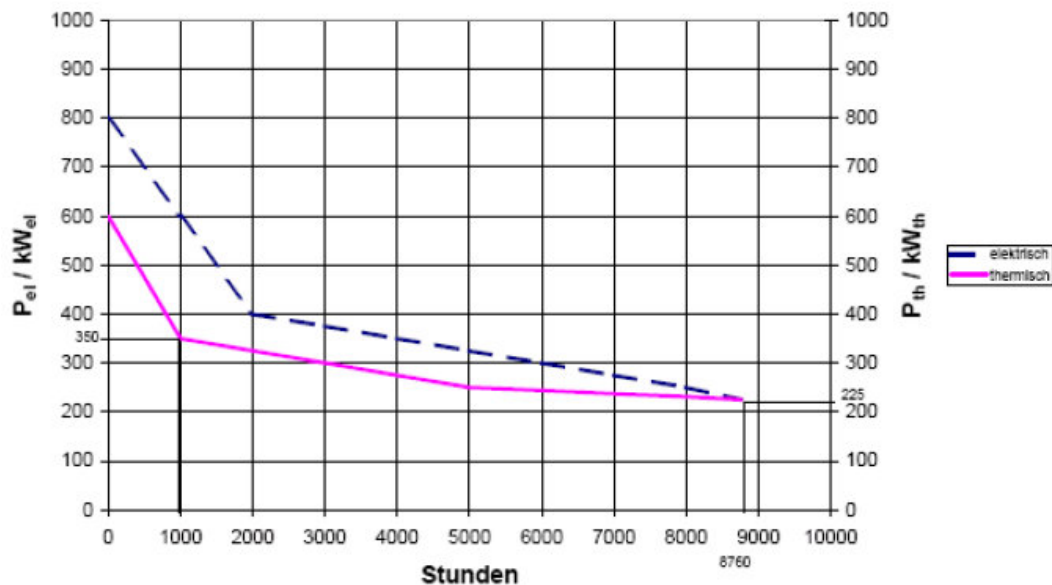
$$P_{\text{tech}} = \frac{\dot{m}}{\frac{\text{dm}}{\text{dt}}} * c_p * (T_3 - T_2 - T_4 + T_1)$$

$$P_{\text{tech}} = 21,2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} * (15 - 124 + 1300 - 15)\text{K} = 29,91 \text{ MW}$$

## 4 Kraft-Wärme-Kopplung

### 4.1 KWK bei einem Industriebetrieb

Die Jahresdauerlinien des Strom- und Wärmebedarfes eines Industriebetriebes haben folgendes Aussehen:



Bei einem Umbau sollen die Betriebskosten der Energiebereitstellung minimiert werden. Zwei Möglichkeiten sind vorgesehen:

**Variante 1:** Einsatz eines mit Gas befeuerten Heizkessels nur für die Wärmeerzeugung und Strombezug

**Variante 2:** Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung mit einem gasbefeuerten stromgeführten BHKW und für den restlichen Strombedarf Fremdbezug.

<b>BHKW-Daten:</b>	$P_{\min, el} =$	100 $\text{kW}_{el}$
	$P_{N, el} =$	200 $\text{kW}_{el}$
	$P_{\min, th} =$	141 $\text{kW}_{th}$
	$P_{N, th} =$	282 $\text{kW}_{th}$

Näherungsweise konstante Wirkungsgrade:  $\eta_{th} = 45 \%$  und  $\eta_{el} = 32 \%$

#### Gas-Daten:

- Arbeitspreis bezogen auf  $H_o$ :  $k_{Gas} = 5 \text{ cent/kWh}$
- Der Gaspreis wird üblicherweise auf den oberen Heizwert  $H_o$  des Gases  $H_o = 42\,400 \text{ kJ/m}^3$  bezogen. Der untere Heizwert  $H_u$  beträgt  $40\,300 \text{ kJ/m}^3$ .
- Für das Gas wird keine Leistung verrechnet, da der Betrieb mit dem zuständigen GVV einen Abschaltvertrag geschlossen hat. Nach Vorankündigung kann der Versorger bei hohem Gasbedarf, beispielsweise im Winter, die Gasversorgung unterbrechen. Der Kunde muss dann auf Ölbetrieb umschalten.

#### Gaskessel-Daten:

Wirkungsgrad des Gaskessels:  $\eta_{Kessel} = 92 \%$

#### Strompreise:

Arbeitspreis: 13 Ct/kWh

Leistungspreis: 120 €/kW

Die höchste jährliche elektrische Leistung wird einmalig mit dem Leistungspreis verrechnet.

### Variante 1: Strombezug und Gaskessel

a) Welchen Wert hat die elektrische Energiemenge, wie groß ist die benötigte thermische Energie?

Ergebnis: 3312 MWh 2568 MWh

Wert hat die elektrische Energiemenge / benötigte thermische Energie

Flächen unter der Kurve berechnen Dreiecke / Quadrate einteilen (Wh)

elektrische Energiemenge:

$$(1,5 * 400kW * 2000h) + 6760h(225kW + 0,5 * 175kW) = 3312,5MWh$$

thermische Energie

$$1000h(350kW + 0,5 * 250kW) + 4000h(250kW + 0,5 * 100kW) + 3760h(225kW + 0,5 * 25kW) = 2568MWh$$

b) Wie hoch sind die Kosten für den Gasbedarf des Gaskessels zur Wärmeerzeugung?

Ergebnis: 146 850 €

*Kosten für den Gasbedarf des Gaskessels zur Wärmeerzeugung*

$$Q_{Ges} = \frac{Q_{th}}{\eta_{Kessel}} = \frac{2568MWh}{0,92} = 2,79 * 10^9 GWh \quad \text{und} \quad K_{Ges} = \frac{5Cent}{kWh} * \frac{H_O}{H_U} = Erg := \frac{5Cent}{kWh} * \frac{42400 \frac{kJ}{m^3}}{40300 \frac{kJ}{m^3}} = 5,26 \frac{cent}{kWh}$$

$$Erg * Q_{Ges} = \text{Kosten Gasbedarf} = 5,26 \frac{cent}{kWh} * 2,79 * 10^9 GWh = 146837,84€$$

c) Welche Kosten treten für den Strombezug auf?

Ergebnis: 526 560 €

*Kosten treten für den Strombezug*

$$K_{Kessel} = \text{elk. Leistung(Wh)} * \text{Arbeitspreis} = € = 3312MWh * 13 \frac{cent}{kWh} = 43,956 * 10^6 Cent = 430560 €$$

$$K_{Pel} = \text{max. Elk Leistung (W)} * \text{Leistungspreis} = € = 800kW * 120 \frac{€}{kWh} = 96000 €$$

$$K_{Strom} = K_{Kessel} + K_{Pel} = 430560 € + 96000 € = 526560€$$

d) Welche Gesamtkosten für Strom- und Gas ergeben sich?

Ergebnis: 673 410 €

*Gesamtkosten für Strom- und Gas*

$$K_{Ges} = \text{Kosten Gasbedarf} + K_{Strom} = 526560€ + 146837,84€ = 673 397€$$

### 2. Variante 2: BHKW mit KWK

e) Wie groß ist jetzt die elektrische Energiemenge, die das BHKW bei stromgeführten Betrieb erzeugt?

Ergebnis: 1752 MWh

$$W_{el BHKW} = P_{N,el} * \text{Stundenanzahl} = (MWh) = 200kW_{el} * 8760 h = 1752 MWh$$

f) Welche Brennstoffenergie (H<sub>o</sub>) wird in Form von Gas bezogen?

Ergebnis: 5 760 MWh<sub>Ho</sub>

*Brennstoffenergie (H<sub>o</sub>) wird in Form von Gas bezogen*

$$Q_{ges,Hu} = \frac{W_{el BHKW}}{\eta_{el}} = \frac{W_{el BHKW}}{\eta_{Kessel}} = \frac{1752 MWh}{0,32} = 5475 MWh$$

$$Q_{ges,Ho} = Q_{ges,Hu} * \frac{H_O}{H_U} = 5475 MWh * \frac{42400}{40300} = 5760,29MWh_{Ho}$$

g) Welche thermische Energiemenge könnte das BHKW abgeben? Wie hoch sind die Kosten für den Gasbezug für das BHKW?

Ergebnis: 2 464 MWh 288 000 €

$$W_{th BHKW} = P_{N,th} * \text{Stundenanzahl} = (MWh) = 282kW_{th} * 8760 h = 2470,32 MWh$$

$$\text{Brennstoffenergie (MWh)} * \text{Arbeitspreis Gas} = 5760 MWh_{Ho} * 5 \frac{Cent}{kWh} = 288 000 €$$



h) Welche Kosten treten nun für den Reststrombezug vom EVU auf? Nichtverfügbarkeiten des BHKW sollen unberücksichtigt bleiben.

Ergebnis: 274 800 €

$$W_{el,Netz} = W_{el} - W_{el\ BHKW} = 3312,5\ MWh - 1752\ MWh = 1560,5\ MWh$$

$$k_{Netz} = P_{maxth} * K_P + W_{el,Netz} * K_W = 600\ kW * 120\ \frac{€}{kW} + 1560\ MWh * 13\ \frac{Cent}{kWh} = 274800\ €$$

Welche Gesamtkosten für Strom- und Gas ergeben sich für Variante 2?

Ergebnis: 562 800 €

$$\text{Kosten gesamt: } K_{ges} = K_{gaseigen} + K_{Netz} = 288\ 000\ € + 274800\ € = 562800\ €$$

Achtung: Hier werden keine Investitionskosten berücksichtigt, was zu einer umfassenden, objektiven Beurteilung notwendig wäre!

## 5. Brennstoffverbrauch fossiler Kraftwerke

### 5.1 Kohlekraftwerk

Es sollen zwei Kohlekraftwerke, ein altes und ein neues, verglichen werden. Beide weisen eine Brutto-Nennleistung von 700 MW auf. Kraftwerk 1 sei ein Altbau mit einem Bruttowirkungsgrad von 35%, Kraftwerk 2 ein Neubau mit 42% Bruttowirkungsgrad.

Betriebsweise für beide Anlagen: Grundlast mit 6 200 h/a

Brennstoff: Braunkohle mit  $H_U = 9 \text{ MJ/kg}$ ,  $m_{CO_2} = 110 \text{ kg/GJ}_{BS}$

$$P_{Brutto} = 700 \text{ MW}$$

$$\eta_{Brutto, KW1} = 0,35$$

$$H_U = 9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$T_M = 6200 \frac{\text{h}}{\text{a}}$$

$$\eta_{Brutto, KW2} = 0,42$$

$$m_{CO_2} = 110 \frac{\text{kg}}{\text{GJ}_{BS}}$$

a) Wieviel t Brennstoff werden pro Jahr bei gleicher Betriebsweise im Neubau eingespart?

Zugeführte Leistung:  $P_{zu} = \frac{P_{Brutto}}{\eta_{Brutto}}$

$$P_{zu, KW1} = \frac{700 \text{ MW}}{0,35} = 2000 \text{ MW}$$

$$P_{zu, KW2} = \frac{700 \text{ MW}}{0,42} = 1667 \text{ MW}$$

Brennstoffverbrauch:  $B = \frac{P_{zu}}{H_U}$

$$B_{KW1} = \frac{2000 \text{ MW}}{9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = \frac{2000 \text{ MW}}{9 \frac{\text{MWs}}{\text{kg}}} = 222,2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 8 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$B_{KW2} = \frac{1667 \text{ MW}}{9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = \frac{1667 \text{ MW}}{9 \frac{\text{MWs}}{\text{kg}}} = 185,2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 6,66 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Brennstoffverbrauch  $\frac{1}{a}$ :  $B_{Ges/a} = B \cdot T_M$

$$B_{Ges, KW1} = 8 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 6200 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 4,96 \cdot 10^6 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$B_{Ges, KW2} = 6,66 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 6200 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 4,13 \cdot 10^6 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

Einsparung:  $B_{Einsp} = B_{Ges, KW1} - B_{Ges, KW2} = \underline{\underline{0,83 \cdot 10^6 \frac{\text{t}}{\text{a}}}}$

b) Wieviel t CO<sub>2</sub> werden im Neubau weniger emittiert als in der Altanlage?

Benes Lösung:

$$2,066 \cdot 10^{12} \text{ Wh (Diff Watt)} \cdot 3600 \cdot 110 \frac{\text{kg}}{1 \cdot 10^9 \text{ J}_{BS}} = 0,818 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

Zugeführte Wärme:  $Q_{zu} = P_{zu} \cdot T_M$

$$Q_{zu, KW1} = 2000 \text{ MW} \cdot 6200 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 12,4 \cdot 10^6 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$

$$Q_{zu, KW2} = 1667 \text{ MW} \cdot 6200 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 10,3 \cdot 10^6 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$

Menge CO<sub>2</sub>:  $M_{CO_2} = Q_{zu} \cdot m_{CO_2}$

$$M_{CO_2, KW1} = 12,4 \cdot 10^6 \text{ MWh} \cdot 110 \frac{\text{kg}}{\text{GJ}_{BS}} \cdot \frac{3600}{3600} = 4,91 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

$$M_{CO_2, KW2} = 10,3 \cdot 10^6 \text{ MWh} \cdot 110 \frac{\text{kg}}{\text{GJ}_{BS}} \cdot \frac{3600}{3600} = 4,09 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

Einsparung:  $M_{Einsp} = M_{CO_2, KW1} - M_{CO_2, KW2} = \underline{\underline{0,818 \cdot 10^6 \text{ kg}}}$

- c) Wenn das neue Kraftwerk um 30% höhere Anlagekosten benötigt als das alte (auf den heutigen Zeitpunkt bezogen), lohnt sich dann die Investition? Festkostensatz: 12 %; Kohlepreis: 100 €/t, bezogene Anlagekosten der Altanlage: 1000 €/kW.

$$k_p = 12\%$$

$$k_{Kohle} = 100 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$

$$k_{KW1} = 1000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

$$\frac{K_{KW1}}{K_{KW2}} = \frac{1}{1 + 30\%}$$

Anlagekosten:

$$\boxed{K_{KW1} = k_p P_{Brutto} k_{KW1}} = 12\% \cdot 700 \text{ MW} \cdot 1000 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 84 \text{ Mio €}$$

$$\boxed{K_{KW2} = K_{KW1} \cdot 1,3} = 84 \text{ Mio €} \cdot 1,3 = 109,2 \text{ Mio €}$$

Brennstoffkosten:

$$\boxed{K_{BS} = \frac{Q_{zu}}{H_u} \cdot k_{Kohle}} = \frac{12,4 \cdot 10^6 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} \cdot 100 \frac{\text{€}}{\text{t}} = \frac{12,4 \cdot 10^{12} \frac{\text{Wh}}{\text{a}}}{2500 \frac{\text{W}}{\text{kg}}} \cdot 100 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$

$$K_{BS,KW1} = \frac{12,4 \cdot 10^6 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} \cdot 100 \frac{\text{€}}{\text{t}} = \frac{12,4 \cdot 10^{12} \frac{\text{Wh}}{\text{a}}}{2500 \frac{\text{W}}{\text{kg}}} \cdot 100 \frac{\text{€}}{\text{t}} = 496 \text{ Mio } \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

$$K_{BS,KW2} = \frac{10,3 \cdot 10^6 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} \cdot 100 \frac{\text{€}}{\text{t}} = \frac{10,3 \cdot 10^{12} \frac{\text{Wh}}{\text{a}}}{2500 \frac{\text{W}}{\text{kg}}} \cdot 100 \frac{\text{€}}{\text{t}} = 413 \text{ Mio } \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

Gesamtkosten:

$$K_{Ges,KW1} = K_{KW1} + K_{BS,KW1} = \underline{\underline{580 \text{ Mio } \frac{\text{€}}{\text{a}}}}$$

$$K_{Ges,KW2} = K_{KW2} + K_{BS,KW2} = \underline{\underline{522 \text{ Mio } \frac{\text{€}}{\text{a}}}}$$

**Ia, die Investition lohnt sich!**

- d) Bei welchen Anlagekosten des neuen Kraftwerks ist der Punkt gleicher Stromerzeugungskosten erreicht?  
Ergebnis: 1983 €/kW

## 5.2 Dieseldiekraftwerk

Ein flusswassergekühltes Dieseldiekraftwerk hat einen Jahresverbrauch an Heizöl EL (  $H_u = 42 \text{ MJ/kg}$  ) von  $4,3 \cdot 10^4 \text{ t}$ . Der Bruttowirkungsgrad sei 33% und die Jahresbenutzungsdauer 2 840 h. Es sollen 70% der abzuführenden Wärmemenge ins Kühlwasser, 25% als Abstrahlung ins Maschinenhaus und 5% über den Kamin ins Freie gehen.

- a) Berechnen Sie den Kühlwasserbedarf des Kraftwerks in  $\text{m}^3/\text{s}$  bei den Ein- und Austritts-Temperaturen  $18^\circ\text{C}$  bzw.  $38^\circ\text{C}$ .  
Ergebnis:  $0,986 \text{ m}^3/\text{s}$

$$42 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 4,3 \cdot 10^4 \text{ t} = 1,806 \cdot 10^{15} \text{ J (Gesamter Energiebedarf)} \quad \frac{1,806 \cdot 10^{15} \text{ J}}{3600} = 5,01 \cdot 10^{11} \text{ W}$$

$$\frac{5,01 \cdot 10^{11} \text{ W}}{2840 \text{ h}} = 176,64 \text{ MW pro Stunde wird verbraucht}$$

$$176,64 \text{ MW} \cdot 0,7 \cdot 0,67 = 82,84 \text{ MW}$$

(Leistung pro Stunde) \* Wirkungsgrad für Wärme \* Was ans Kühlwasser abgegeben wird

$$\text{Kühlwasserdurchfluss: } \boxed{\dot{m}_{KW} = \frac{\dot{Q}_{KW}}{c_{W'} \Delta T}} = \frac{82,84 \text{ MW}}{4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 20 \text{ K}} = \underline{\underline{0,9862 \frac{\text{t}}{\text{s}} = 0,9862 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}$$

- b) Wie groß ist der Kühlluftbedarf in  $\text{m}^3/\text{h}$  des Maschinenhauses ohne Verbrennungsluft, wenn die Ein- bzw. Auslasstemperaturen  $28^\circ\text{C}$  bzw.  $44^\circ\text{C}$  sind?  
Ergebnis:  $5,13 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$

$$176,64 \text{ MW} \cdot 0,25 \cdot 0,67 = 29,58 \text{ MW}$$

(Leistung pro Stunde) \* Wirkungsgrad für Wärme \* Was ans Kühlwasser abgegeben wird

$$\text{Kühlwasserdurchfluss: } \boxed{\dot{m}_{KW} = \frac{\dot{Q}_{KW}}{c_{Luft} \Delta T}} = \frac{29,58 \text{ MW}}{1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 16 \text{ K}} \cdot 60 = \text{????? Stimmt nicht}$$

### 5.3 Berechnungen zu konventionellen Kraftwerken

- a) Ein mit Steinkohle befeuertes Kraftwerk wird in einem Jahr rechnerisch 4 320 h mit seiner Nettonennleistung von 300 MW betrieben. Welche lokale Mengen  $SO_2$  und  $CO_2$  erzeugt es?

$$P_{Netto} = 300 \text{ MW} \quad T_M = 4320 \frac{\text{h}}{\text{a}}$$

Tabelle Seite 25:

Brennstoff, Typ des Kraftwerkes	Lokale Emissionen in g/kWh <sub>el</sub>			Globale Emissionen in g/kWh <sub>el</sub>		
	$SO_2$	$NO_x$	$CO_2$	$SO_2$	$NO_x$	$CO_2$
Steinkohle mit Dampfturbine	0,913	0,949	929	0,124	0,128	44
Erdgas mit Dampfturbine	0,003	0,529	521	0,009	0,065	16
Heizöl mit Dampfturbine	1,253	0,817	740	0,326	0,296	74

Menge  $SO_2$ :

$$M_{SO_2} = Q_{zu} \cdot m_{SO_2} = P_{Netto} \cdot T_M \cdot m_{SO_2}$$

$$M_{SO_2} = 300 \text{ MW} \cdot 4320 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 0,913 \frac{\text{g}}{\text{kWh}_{el}} = \underline{\underline{1183,2 \frac{\text{t}}{\text{a}}}}$$

$$M_{CO_2} = 300 \text{ MW} \cdot 4320 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 929 \frac{\text{g}}{\text{kWh}_{el}} = \underline{\underline{1,20 \text{ Mio} \frac{\text{t}}{\text{a}}}}$$

- b) Ein Gaskraftwerk der Nennleistung 400 MW (brutto) wird eine Stunde mit der elektrischen Bruttoleistung von 250 MW betrieben. Dabei werden 52 221 m<sup>3</sup> Gas des unteren Heizwertes 42100 kJ/m<sup>3</sup> bezogen. Mit welchem Bruttowirkungsgrad wird es dabei betrieben?

$$P_{Brutto} = 400 \text{ MW} \quad t_{el} = 1 \text{ h} \quad H_U = 42100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$P_{Brutto,el} = 250 \text{ MW} \quad V = 52221 \text{ m}^3$$

Zugeführte Energie:  $Q_{zu} = H_U \cdot V = 42100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \cdot 52221 \text{ m}^3 = 2198,5 \cdot 10^6 \text{ kWs}$

Zugeführte Leistung:  $P_{zu} = \frac{Q_{zu}}{t_{el}} = \frac{2198,5 \cdot 10^6 \text{ kWs}}{1 \text{ h}} = 610,7 \text{ MW}$

Bruttowirkungsgrad:  $\eta_{Brutto} = \frac{P_{Brutto,el}}{P_{Netto}} = \frac{250 \text{ MW}}{610,7 \text{ MW}} = \underline{\underline{40,937 \%}}$

- c) Ausgehend von b) soll der Nettowirkungsgrad bestimmt werden, wenn der Eigenbedarf 17,2 MW beträgt.

$$P_{Eigen} = 17,2 \text{ MW}$$

Nettoleistung:  $P_{Netto} = P_{Brutto,el} - P_{Eigen} = 232,8 \text{ MW}$

Nettowirkungsgrad:  $\eta_{Netto} = \frac{P_{Netto}}{P_{zu}} = \frac{232,8 \text{ MW}}{610,7 \text{ MW}} = \underline{\underline{38,12 \%}}$

- d) Bei einer weiteren Messung wird der Block 1 h lang mit seiner Nennleistung von 400 MW brutto gefahren, dabei werden 72 344 m<sup>3</sup> Gas bezogen, der Heizwert sei der gleiche wie in b). Zu bestimmen ist die Gleichung des absoluten Brennstoffverbrauchs  $Q\& = a \cdot P + b$  im Bereich 250 MW bis 400 MW.  
Ergebnis:  $a = 5,64 \text{ GJ/MWh}$   $b = 786,54 \text{ GJ/h}$

Aufstellung von zwei Gleichungssystemen:

$$72\,344 \text{ m}^3 * 42100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} = a * 400 \text{ MW} + b$$

$$52\,221 \text{ m}^3 * 42100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} = a * 250 \text{ MW} + b$$

Gleichungssystem lösen:

$$72\,344 \text{ m}^3 * 42100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} = a * 400 \text{ MW} + b$$

$$52\,221 \text{ m}^3 * 42100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} * -1,6 = a * 250 \text{ MW} * -1,6 + b * -1,6$$

$$(72\,344 * 42100 * 10^3) + (52\,221 * 42100 * 10^3 * -1,6) = -0,6 * b \frac{\text{GJ}}{\text{h}}$$

$$b = 789,54 \frac{\text{GJ}}{\text{h}} \rightarrow \frac{72\,344 \text{ m}^3 * 42100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - 789,54 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}}{400 \text{ MW}} = a \rightarrow a = 5,6479 \frac{\text{GJ}}{\text{MWh}}$$

## 5.4 Gasverbrauch eines Kraftwerks

In einem EVU wird ein Erdgaskraftwerk ohne Kraft-Wärme-Kopplung mit  $P_{\min} = 50 \text{ MW}$  und  $P_{\max} = 420 \text{ MW}$  eingesetzt. Der Brennstoff weist einen Heizwert von  $H_u = 40\,400 \text{ kJ/m}^3$  auf, sein Preis beträgt  $2,5 \text{ cent/kWh}$ . Alle Leistungen sind Nettowerte.

Die Brennstoffenergie-Verbrauchskennlinie, gültig zwischen  $P_{\min}$  und  $P_{\max}$ , lautet:

$$\dot{Q} = 0,013333 \cdot P^2 - 0,8 \cdot P + 1633,29$$

Setzt man  $P$  in MW ein, so erhält man den Energieverbrauch  $\dot{Q}$  in GJ/h.

- a) Bei welcher Leistung liegt der Bestpunkt?  
Ergebnis: 350 MW

Spezifischer Brennstoffenergieverbrauch  $q = \dot{Q}/P = f(P)$

$$q = \frac{\dot{Q}}{P} \rightarrow \frac{(0,013333 \cdot P^2 - 0,8 \cdot P + 1633,29)}{P} \rightarrow P \text{ einsetzen und schauen wo es minimal wird.}$$

Tabelle erstellen da wo MINIMAL Lösung 350 MW

- b) Wieviel  $m^3$  Erdgas pro Stunde werden bei  $P=200 \text{ MW}$  benötigt?  
Ergebnis:  $49\,653 \text{ m}^3/\text{h}$

$$0,013333 \frac{\text{GJ}}{\text{MW}^2 \text{h}} \cdot (200 \text{ MW})^2 - 0,8 \frac{\text{GJ}}{\text{MW h}} \cdot 200 \text{ MW} + 1633,29 \text{ GJ} = 2,0066 \cdot 10^{12} \frac{\text{J}}{\text{h}}$$
$$\frac{2,0066 \cdot 10^{12} \frac{\text{J}}{\text{h}}}{40400 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} = 49\,668,564 \text{ m}^3$$

- c) Welche gesamten absoluten Brennstoffkosten treten damit pro Stunde auf?  
Ergebnis:  $13\,934 \text{ €/h}$

$$49\,668,564 \text{ m}^3 \cdot 2,5 \frac{\text{cent}}{\text{kWh}} \cdot \frac{40400 \text{ kWh}}{3600 \text{ m}^3} = 1\,393\,479,157 \text{ cent} = 13\,934,79 \text{ €}$$

- d) Welche reinen Brennstoffkosten in  $\text{cent/kWh}$  entfallen damit auf jede abgegebene kWh?  
Ergebnis:  $6,9 \text{ Cent/kWh}$

$$\frac{1\,393\,479,157 \text{ cent}}{200 \cdot 10^3 \text{ kWh}} = 6,9673 \frac{\text{cent}}{\text{kWh}}$$

## 6. Kernkraftwerke

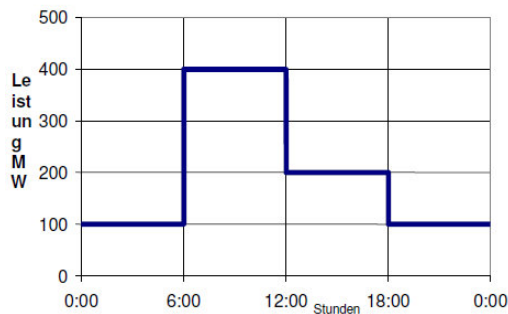
### 6.1 Heizwert von Kernbrennstoff für Siedewasserreaktor

- a) Welche nutzbare Kernenergie ist in einem Gramm des Kernes eines Siedewasserreaktors enthalten?  
Ergebnis:  $648 \text{ kWh/g}$
- b) Der Bruttowirkungsgrad sei  $33,3 \%$ . Welche Brennstoffmenge benötigt man für die Erzeugung einer kWh Bruttostrom?  
Ergebnis:  $4,68 \text{ mg}$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad P_{zu} = \frac{1 \text{ kWh}}{33,3\%} = 3 \text{ kWh} \quad \rightarrow \quad \frac{3 \text{ kWh}}{648 \frac{\text{kWh}}{\text{g}}} = 4,629 \text{ mg}$$

## 7 Kraftwerkseinsatz und Strombeschaffung

### 7.1 Kraftwerkseinsatz



Bei einem Kraftwerksbetreiber werden ein mit Erdgas befeuerter Kraftwerksblock ohne Kraft-Wärme-Kopplung (GAS) mit einer Mindestleistung  $P_{\min} = 50$  MW und einer Maximalleistung  $P_{\max} = 420$  MW und ein Pumpspeicherkraftwerk (PSW) zur Deckung der nebenstehenden vereinfachten Tageslastkurve  $P = f(t)$  eingesetzt. Im ersten Schritt soll die Deckung nur mit GAS untersucht werden, im zweiten die mit GAS und PSW. Alle Leistungen sind Nettowerte.

Das Erdgas für GAS weist den Heizwert  $H_U = 40100 \text{ kJ/m}^3$  auf, sein Preis beträgt  $k_{\text{Gas}} = 1,5 \text{ Ct/kWh}$ .

Die Gleichung der Brennstoffverbrauchskennlinie von GAS, gültig zwischen  $P_{\min}$  und  $P_{\max}$ , lautet:

$$\dot{Q} = 0,013334 \cdot P^2 - 0,811 \cdot P + 1629,00$$

Setzt man  $P$  in MW ein, so erhält man  $\dot{Q}$  in GJ/h. Alle Betrachtungen sollen für einen Tag erfolgen.

PSW kann im Motor-/Pumpbetrieb mit einer konstanten Leistung von 40 MW aus dem Netz betrieben werden, im Generator-/Turbinenbetrieb können bis zu 50 MW an das Netz abgegeben werden. Die mittlere nutzbare Fallhöhe beträgt 300 m, der Gesamtwirkungsgrad bei Motorbetrieb beträgt 85,0%, der bei Generatorbetrieb 87,2%.

$$P_{\min} = 50 \text{ MW}$$

$$P_{\text{PSW}} = 40 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{Motor}} = 0,85$$

$$P_{\max} = 420 \text{ MW}$$

$$P_{\text{Netz}} = 50 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{Gen}} = 0,872$$

$$H_U = 40100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{Gas}} = 1,5 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}$$

$$h_{\text{Fallhöhe}} = 300 \text{ m}$$

- a) Bestimmen Sie zunächst die Werte des Brennstoffverbrauchs von GAS bei den Leistungen 100 MW, 400 MW und 200 MW in der Einheit GJ/h.

$$\dot{Q} = 0,013334 \cdot P^2 - 0,811 \cdot P + 1629,00$$

$$\dot{Q}(100 \text{ MW}) = \underline{1681,24 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}}$$

$$\dot{Q}(400 \text{ MW}) = \underline{3438,04 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}}$$

$$\dot{Q}(200 \text{ MW}) = \underline{2000,16 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}}$$

- b) Welche Brennstoffenergie  $Q_{\text{Gas}}$  und wie viel  $\text{m}^3$  Erdgas  $B_{\text{Gas}}$  werden in den 24 h benötigt?

$$\text{Brennstoffenergie: } Q_{\text{Gas}} = \sum \dot{Q}(x) \cdot t$$

$$Q_{\text{Gas}} = 2 \cdot 1681 \frac{\text{GJ}}{\text{h}} \cdot 6 \text{ h} + 3438 \frac{\text{GJ}}{\text{h}} \cdot 6 \text{ h} + 2000 \frac{\text{GJ}}{\text{h}} \cdot 6 \text{ h} = \underline{520804,08 \text{ GJ}}$$

$$\text{Brennstoffmenge: } B_{\text{Gas}} = \frac{Q_{\text{Gas}}}{H_U} = \frac{520804 \text{ GJ}}{40100 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} = \underline{1316810 \text{ m}^3}$$

- c) Welche gesamten Brennstoffkosten  $K_{\text{Gas}}$  in € treten auf?

$$\text{Brennstoffkosten: } K_{\text{Gas}} = Q_{\text{Gas}} \cdot k_{\text{Gas}} = 520804 \text{ GJ} \cdot 1,5 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}} \frac{3600}{3600} = \underline{220017,67 \text{ €}}$$



- d) Welche Brennstoffkosten kw in Cent/kWh entfallen so auf jede abgegebene kWh?

$$Q_{Graph} = \text{aus Graph Tageslastkurve} = 4800 \text{ MWh}$$

$$\text{spez. Brennstoffkosten: } k_{BS} = k_w = \frac{K_{Gas}}{Q_{Graph}} = \frac{220017 \text{ €}}{4800 \text{ MWh}} \cdot \frac{1000}{1000} = 0,0458 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = \underline{\underline{4,6 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}}}$$

Zur Deckung der Lastkurve eines Tages  $P = f(t)$  stehe zusätzlich zu GAS das PSW bereit. Es gilt:  
 $P = P(\text{GAS}) + P(\text{PSW})$ .

- e) Bestimmen Sie zunächst den Volumenstrom des Wassers bei Motorbetrieb und bei Generatorbetrieb jeweils mit maximaler Leistung.

$$\text{potentielle Energie: } E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

$$\text{hydraulische Leistung: } P_{Hydr} = \dot{m} \cdot g \cdot h$$

$$P_{el} = \eta_{Gen} \cdot P_{Hydr}$$

$$\text{Generator } \dot{m} = \frac{P_{Hydr}}{g \cdot h} = \frac{P_{el}}{\eta_{Gen}} \cdot \frac{1}{g \cdot h} = \frac{50 \text{ MW}}{87,2\%} \cdot \frac{1}{9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 300 \text{ m}} = \underline{\underline{19490 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}$$

$$\text{Pump: } \dot{m} = \frac{P_{Hydr}}{g \cdot h} = \frac{P_{el}}{\eta_{Gen}} \cdot \frac{1}{g \cdot h} = 40 \text{ MW} \cdot 0,85 \cdot \frac{1}{9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 300 \text{ m}} = \underline{\underline{11,552 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}$$

Ergebnis: 11,56 m³/s 19,49 m³/s

- f) Von 00:00 bis 06:00 soll jeweils mit maximaler Leistung gepumpt werden, von 06:00 bis 12:00 generatorisch mit  $P_{max}$  Strom in das Netz eingespeist werden. Ab 12:00 soll genau die generatorisch im Zeitraum von 06:00-12:00 genutzte Wassermenge in das Oberbecken zurückgepumpt werden. Wie viele Stunden ist zu pumpen?

Ergebnis: 10,12 h

$\left(11,552 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} - 19,490 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \cdot 6 \text{ h} \cdot 60 \cdot 60 = 171288 \text{ m}^3$  Die Differenz die mehr Abgelassen als in den 6 Stunden Hochgepumpt wird.

$$11,552 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 60 \cdot 60 = 41616 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\frac{171288 \text{ m}^3}{41616 \text{ m}^3} \text{ h} + 6 \text{ h} = 10,1156 \text{ h}$$

## 8 Frequenzregelung im Verbundnetz

### 8.1 Frequenzeinbruch bei Ausfall Verbundkraftwerk

Im europäischen Verbundnetz fällt ein größerer Kraftwerksblock mit einer Leistung von 1 300 MW aus. Welcher maximale Frequenzeinbruch erfolgt nach Eingreifen der Primärregelung?

$$\Delta P = 1300 \text{ MW}$$

$$K = -20000 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

Frequenzeinbruch:  $\Delta f = \frac{\Delta P}{K} = \frac{1300 \text{ MW}}{-20000 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}} = \underline{\underline{-0,065 \text{ Hz}}}$

### 8.2 Netzkennlinie

Die Gesamtleistung eines Verbundnetzes mit einer Statik von 5% beträgt 50 GW. Wie groß ist der Frequenzeinbruch bei Ausfall von 1 GW?

$$s = 0,05$$

$$P_N = 50 \text{ GW}$$

$$\Delta P = 1 \text{ GW}$$

$$f_0 = 50 \text{ Hz}$$

Frequenzeinbruch:  $\Delta f = \frac{\Delta P}{P_N} \cdot f_0 \cdot s = \underline{\underline{0,05 \text{ Hz}}}$

### 8.3 Statikkennlinie Wasserkraftwerk

Ein Wasserkraftwerk mit einer Nennleistung von 300 MW bei 50 Hz besitzt einen 16-poligen Generator und eine Reglerstatik von 8%.

$$P_{\text{Brutto}} = 300 \text{ MW}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$s = 0,08$$

- Zeichnen Sie die Kennlinie  $f(P)$ .
- Berechnen Sie den Leerlaufdrehzahlsollwert.  
Ergebnis: 393,75 1/min
- Berechnen Sie  $\Delta P$  bei einem Frequenzabfall im Netz von  $\Delta f = -30 \text{ mHz}$   
Ergebnis: 60 MW

## 9 Drehstrom-Synchrongeneratoren

### 9.1 Drehstrom-Synchrongenerator

Der Synchrongenerator eines Kraftwerkes hat folgende Daten:

Nennscheinleistung  $S_N$ : 100 MVA

Nennspannung  $U_N$ : 10,5 kV

Bezogene synchrone Reaktanz  $x_d$ : 1,6

- Wie groß ist der Effektivwert (Betrag) der verketteten Polradspannung  $U_P$ , wenn der Generator an einem starren Netz der Nennspannung 10,5 kV liegt, ohne dass Strom ins Netz fließt?  
Ergebnis: 10,5 kV

Da kein Strom fließt bleibt die Spannung konstant.  $U_P = U_K = 10,5 \text{ kV}$

- Berechnen Sie die absolute synchrone Reaktanz  $X_d$  in  $\Omega$ .  
Ergebnis: 1,76  $\Omega$

$$X_d = x_d \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = 1,6 \cdot \frac{(10,5 \text{ kV})^2}{100 \text{ MVA}} = 1,764 \Omega$$

- Was passiert, wenn die Polradspannung auf 12 kV erhöht wird, ohne dem Generator mechanische Leistung von der Turbine zuzuführen? Welchen Wert nimmt der Polradwinkel  $\vartheta$  an.  
Ergebnis: Blindstromfluß  $0^\circ$   
 $0^\circ$  induktiver Blindstrom mit  $\vartheta = 0^\circ$

8 Berechnen Sie den komplexen Generatorstrom, der beim Betriebsfall c) ins Netz fließt.

Ergebnis: -j 492 A

$$\Delta U = \frac{12kV}{\sqrt{3}} - \frac{10,5kV}{\sqrt{3}} \quad I = \frac{\Delta U}{X_d} \quad I = \frac{866,02 V}{1,764\Omega} = 492,05 A$$

e) Der Generator läuft nun mit seiner Nennscheinleistung von 100 MVA und einer Wirkleistung von 90 MW am Netz. Berechnen Sie den Effektivwert des Netzstromes und den.

Ergebnis: 5 498 A 0,9

$$S = 100 MVA = \sqrt{3} * U_N * I_N$$

$$I = \frac{100MVA}{\sqrt{3} * 10,5kV} = 5498A \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} = 0,9$$

## 9.2 Turbogenerator

Ein Turbogenerator hat folgende Nenndaten:

Nennscheinleistung $S_N$ :	150 MVA
Nennspannung $U_N$ :	10,5 kV
Bezogene synchrone Reaktanz $x_d$ :	1,6
$\cos \varphi$ bei Nennbetrieb:	0,8 induktiv

- a) Berechnen Sie die absolute synchrone Reaktanz  $X_d$  in  $\Omega$ .

Ergebnis: 1,17  $\Omega$

$$X_d = x_d * \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = 1,6 * \frac{(10,5 \text{ kV})^2}{150 \text{ MVA}} = 1,176 \Omega$$

- b) Zeichnen Sie das prinzipielle Zeigerdiagramm im Nennbetrieb (ohne genaue Werte für Strom und Spannungen).

- c) Berechnen Sie den Strom und die 3 Spannungen des Diagrammes.

Ergebnis:  $I = 8248 \text{ A}$   $U_{Y, \text{Netz}} = 6,06 \text{ kV}$   $U_{Y, P} = 14,2 \text{ kV}$   $U_{Xd} = 9,65 \text{ kV}$

$$S = U * I * \sqrt{3} \quad \frac{S}{U * \sqrt{3}} = I \quad \rightarrow \quad \frac{150 \text{ MVA}}{10,5 \text{ kV} * \sqrt{3}} = 8247,86 \text{ A}$$

$$U_{(\text{Dreieck})N} = \frac{10,5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 6062 \text{ V} \quad U_{(\text{Dreieck})P} = ???$$

- d) Berechnen Sie Wirkleistung und Blindleistung im Nennbetrieb.

Ergebnis: 120 MW 90 MVA

$$P = U * I * \cos \varphi = S * \cos \varphi = 150 \text{ MVA} * 0,8 = 120 \text{ MW}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \rightarrow \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 90 \text{ MVAR}$$

- e) Auf welchen Wert muss die Polradspannung geändert werden, damit reine Wirkleistung eingespeist wird?

Ergebnis: 11,39 kV

## 9.3 Drehstrom-Synchrongenerator mit Freileitung

Ein Wasserkraftgenerator speist über eine lange Freileitung ein starres Netz :

Nennscheinleistung $S_N$ :	100 MVA
Nennspannung $U_N$ :	21 kV
Bezogene synchrone Reaktanz $x_d$ :	1
Längenbezogene Leitungsreaktanz:	0,3 $\Omega/\text{km}$

- a) Berechnen Sie die absolute synchrone Reaktanz  $X_d$  in  $\Omega$  und den Nennstrom.

Ergebnis: 0,44  $\Omega$  2 750 A

$$X_d = x_d * \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = 1 * \frac{(21 \text{ kV})^2}{100 \text{ MVA}} = 0,441 \Omega$$

$$S = U * I * \sqrt{3} \quad \frac{S}{U * \sqrt{3}} = I \quad \rightarrow \quad \frac{100 \text{ MVA}}{21 \text{ kV} * \sqrt{3}} = 2749 \text{ A}$$

- b) Berechnen Sie den Spannungsfall über der Generatorreaktanz und den maximal zulässigen Spannungsfall über der Leitungsreaktanz bei reinem Nennwirkstrom ( $\cos \varphi = 0$ ), wenn der Gesamtwinkel (Maschine+Netz) maximal 80° betragen darf.

Ergebnis: 1,21 kV 68,76 kV

- c) Berechnen Sie maximal zulässige Länge der Freileitung.

Ergebnis: 81,8 km

## 10 Alternative Technologien zur Stromerzeugung

### 10.1 ORC-Prozeß mit Kältemittel R 134a

In einer ORC-Anlage werden 10 t/h Kältemittel in einer Expansionsmaschine isentrop von 100°C, 28 bar auf 10 bar entspannt. Anschließend wird der Kältemitteldampf isobar bis zur Sättigungstemperatur abgekühlt und mit dieser Wärme das flüssige Kältemittel vorgewärmt. Nach der Kondensation des Kältemitteldampfes erhöht eine Pumpe den Druck der Flüssigkeit auf das obere Niveau, bevor es wie beschrieben vorgewärmt wird. Die Energiezufuhr erfolgt aus einer Geothermiequelle ( $c_{\text{Wasser}} = 4,19 \text{ kJ/kg/K}$ ). Pumparbeit und Strömungsverluste sind zu vernachlässigen.

- a) Zeichnen Sie in das Diagramm R 134a alle wesentlichen Zustände des Kältemittels ein.  
Ergebnis:  $h_1 = 436 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_2 = 418 \text{ J/kg}$ ,  $h_{3,4} = 255 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_5 = 273 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_6 = 458 \text{ kJ/kg}$

Zeichne als erstes  $h_6$  ein und dann die anderen punkte ergeben sich daraus. Siehe Diagram Seite 81

- b) Berechnen Sie die spezifische Nutzarbeit an der Expansionsmaschine in kJ/kg.  
Ergebnis: 22 kJ/kg

Unterschied zwischen  $h_1$  und  $h_6$  (mechanisch)

- c) Berechnen Sie die äussere spezifische Wärmezufuhr in kJ/kg.  
Ergebnis: 185 kJ/kg

Unterschied zwischen  $h_5$  und  $h_6$

- d) Berechnen Sie den thermodynamischen Wirkungsgrad des ORC-Prozesses.  
Ergebnis: 11,89 %

$$\eta_{td} = \frac{\Delta h_{\text{mechanisch}}(h_{h6} \text{ und } h_{h1})}{\Delta h_{h5 \text{ und } h6}}$$

- e) Berechnen Sie die Nutzleistung der Expansionsmaschine.  
Ergebnis: 61 kW

$$\dot{m} = 10 \frac{\text{t}}{\text{h}} = \frac{10}{3600} \frac{\text{g}}{\text{s}} = 2,77 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{mech}} = \dot{m} * \Delta h_{61} = \dot{m} * \Delta h_{\text{mech}} = 55,4 \text{ kW}$$

- f) Berechnen Sie den thermodynamischen Wirkungsgrad, wenn aufgrund einer Fehleinschätzung bei der Evaluation der Geothermiebohrung lediglich Wärme vom maximal 80°C zur Verfügung steht. Beachten Sie dabei das obere Druckniveau und die Problematik der Kältemittelvorwärmung.  
Ergebnis:  $p_{\text{oben}} = 26 \text{ bar}$ ,  $h_{1,2\text{neu}} = 415 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_{3,4,5\text{neu}} = 255 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_{6\text{neu}} = 430 \text{ kJ/kg}$ , 8,57 %

- g) Die Schüttung der Bohrung beträgt nun 80 l/s bei 80°C. Welche Temperatur hat das Wasser nach dem ORC-Wärmetauscher?  
Ergebnis: 78,5 °C

$$\Delta h_{56} = 175 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad Q_{\text{zu}} = \dot{m} * \Delta h_{56} = 2,77 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 175 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{zu}} = Q_{\text{TH}} = \dot{m}_{\text{TW}} * c_{\text{H}_2\text{O}} * \Delta T_{\text{W}}$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,19$$

### 10.2 Brennstoffzelle

Wasserstoff für ein Brennstoffzellen-Heizgerät wird mit einem Reformer aus Erdgas erzeugt. Die Wirkungsgrade des BZH betragen 37% für Strom und 40 %für Wärme jeweils bezogen auf die zugeführte Wasserstoffmenge.

- a) An einem Betriebstag werden durch das BZH 12,0 kWh an elektrischer Energie erzeugt. Berechnen Sie die in Form von Wasserstoff zuzuführende Energie.  
Ergebnis: 32,43 kWh
- b) Wie viel Wärmeenergie wird dabei erzeugt?  
Ergebnis: 12,97 kWh
- c) Bestimmen Sie das erforderliche Wasserstoffvolumen. Der spezifische Energieinhalt von Wasserstoff ist  $H_U = 3,0 \text{ kWh/m}^3$ .  
Ergebnis: 10,81 m<sup>3</sup>

a)

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \rightarrow P_{zu} = \frac{P_{ab}}{\eta} \quad P_{zu} = \frac{12 \text{ kWh}}{0,37} = 32,43 \text{ kWh}$$

b)

$$P_{ab} * \eta = \text{Wärmeenergie} \quad 32,43 \text{ kWh} * 0,4 = 12,97 \text{ kWh}$$

c)

$$\frac{\text{Gesamte zugeführte Leistung}}{H_U} = \frac{32,43 \text{ kWh}}{3,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 10,81 \text{ m}^3$$