

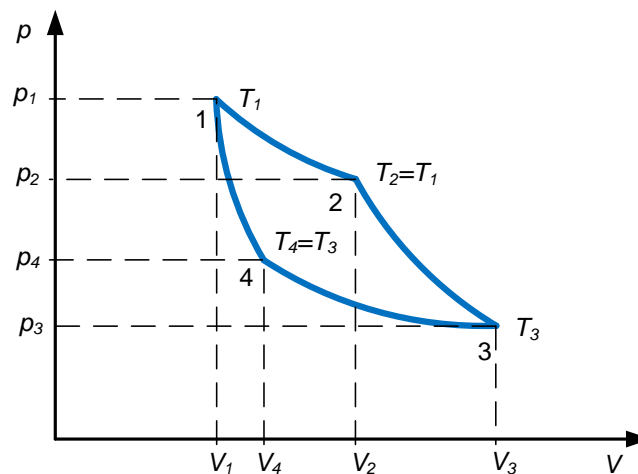
Lösungen zur schriftlichen Prüfung aus VO Kraftwerke am 11.11.2014

Hinweis: Bei den Berechnungen wurden alle Zwischenergebnisse in der technischen Notation¹ (Format ENG) dargestellt und auf drei Nachkommastellen gerundet. Für die weitere Rechnung wurde das gerundete Ergebnis verwendet.

Abhängig vom Rechenweg kann es aber dennoch zu leicht abweichenden Ergebnissen kommen!

1. Rechtsdrehender Carnot-Prozess

a. Skizzieren Sie das pv-Diagramm des Carnot-Prozesses und beschriften Sie alle relevanten thermodynamische Zustandspunkte.



- Isotherme Expansion (1-2)
- Isentrope Expansion (2-3)
- Isotherme Kompression (3-4)
- Isentrope Kompression (4-1)

b. Wie groß ist das Gasvolumen im Punkt 3?

$$V_3 = 0,856 \text{ m}^3 \quad (1.1)$$

c. Wie groß sind Volumen V_4 und Druck p_4 ?

$$V_4 = 0,214 \text{ m}^3 \quad (1.2)$$

$$p_4 = 4 \text{ bar} \quad (1.3)$$

d. Wie groß ist die Wärmeabfuhr Q_{34} ?

$$-W_{34} = Q_{34} = -Q_{ab} = -118,624 \text{ kJ} \quad (1.4)$$

e. Wie groß ist die Verdichtungsarbeit W_{41} ?

$$W_{41} = 238,44 \text{ kJ} \quad (1.5)$$

¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Wissenschaftliche_Notation

f. Wie groß ist der zugeführte Wärmebetrag?

$$-W_{12} = Q_{zu} = 251,392 \text{ kJ} \quad (1.6)$$

g. Wie groß ist die abgegebene Nutzarbeit?

$$W_{id} = 132,768 \text{ kJ} \quad (1.7)$$

h. Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad (Carnot Faktor)?

Bestimmen des Wirkungsgrades aus den Wärmemengen:

$$\eta_c = 0,528 \quad (1.8)$$

Bestimmen des Wirkungsgrades aus den Temperaturen:

$$\eta_c = 0,527 \quad (1.9)$$

2. CO₂ Vergleich

a. Wie groß sind die **stündlichen Kohlendioxidausstöße** beider Kraftwerke?

KW1:

$$m_{\text{CO}_2} = 56,774 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.1)$$

KW2:

$$m_{\text{CO}_2} = 37,044 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.2)$$

b. Wie groß ist die zu deckende **thermische Last**?

$$Q = 92 \text{ MW} \quad (2.3)$$

c. Welche **Brennstoffzufuhr** ist für die elektrische und thermische Energieerzeugung notwendig? Wie groß ist der **Gesamtwirkungsgrad** des Kraftwerks?

$$\dot{m}_{\text{Kohle}} = 9,217 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 33,181 \frac{\text{t}}{\text{h}} \quad (2.4)$$

$$\eta_{\text{ges}} = 0,672 \quad (2.5)$$

Für die Deckung der gleichen energetischen Last (Strom und Wärme) reduziert sich im Punkt c) im Vergleich zu Punkt a) der notwendige Brennstoffeinsatz deutlich, dementsprechend ist auch der Wirkungsgrad in Punkt c) höher als im Punkt a).

d. Wie groß ist jetzt der **stündliche Kohlendioxidausstoß** des Kohlekraftwerks?

$$m_{\text{CO}_2} = 116,795 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 116,795 \frac{\text{t}}{\text{h}} \quad (2.6)$$

e. Welche **stündliche Gipsmenge** und **Volumen** ($\rho_{\text{Gips}} = 2,3 \text{ t/m}^3$) fallen bei dem Nassentschwefelungsverfahren mit 90 % Schwefeldioxid-Abscheidegrad des Kohlekraftwerks unter gegebener thermischer und elektrischer Last an?

$$\dot{m}_{\text{gips}} = 1605,140 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (2.7)$$

$$\dot{V}_{\text{gips}} = 0,698 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (2.8)$$

3. Auslegung eines Wasserkraftwerks

a. Welche **Wassermenge** Q in $[\text{m}^3/\text{s}]$ ist für eine elektrische Leistung von 50 MW erforderlich, wenn die folgenden Wirkungsgrade vorgegeben sind:

$$Q = 10,002 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (3.1)$$

b. Welche **Polpaarzahl** müsste ein Synchrongenerator aufweisen, damit die Turbine, deren Kennfeld unten gegeben ist, verwendet werden kann?

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die spezifische Drehzahl der verwendeten Turbine $n_q = 16 \text{ min}^{-1}$ beträgt. Daraus lässt sich auf die erforderliche Drehzahl der Turbine schließen und Polpaarzahl schließen:

$$p_n = 3,115 \quad (3.2)$$

Somit wird die nächstgelegene Polpaarzahl von $p = 3$ gewählt.

c. Welchen **Durchmesser** hat diese Turbine für einen optimalen Betrieb?

Aus der Abbildung ergibt sich ein maximaler Wirkungsgrad z.B. beim Einheitsvolumenstrom $Q'_1 = 0,125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. Mit diesem Wert ergibt sich für den Durchmesser der Turbine

$$D = 1,555 \text{ m} \quad (3.3)$$

Alternativ kann auch über die Einheits-Drehzahl mit maximalen Wirkungsgrad bei $n'_1 = 46 \text{ min}^{-1}$ gerechnet werden: mit der synchronen Drehzahl der ausgewählten Polpaarzahl des Generators ($p = 3$) von 1.000 min^{-1} ergibt sich dann

$$D = 1,522 \text{ m} \quad (3.4)$$

und damit ein vergleichbarer Wert wie zuvor.

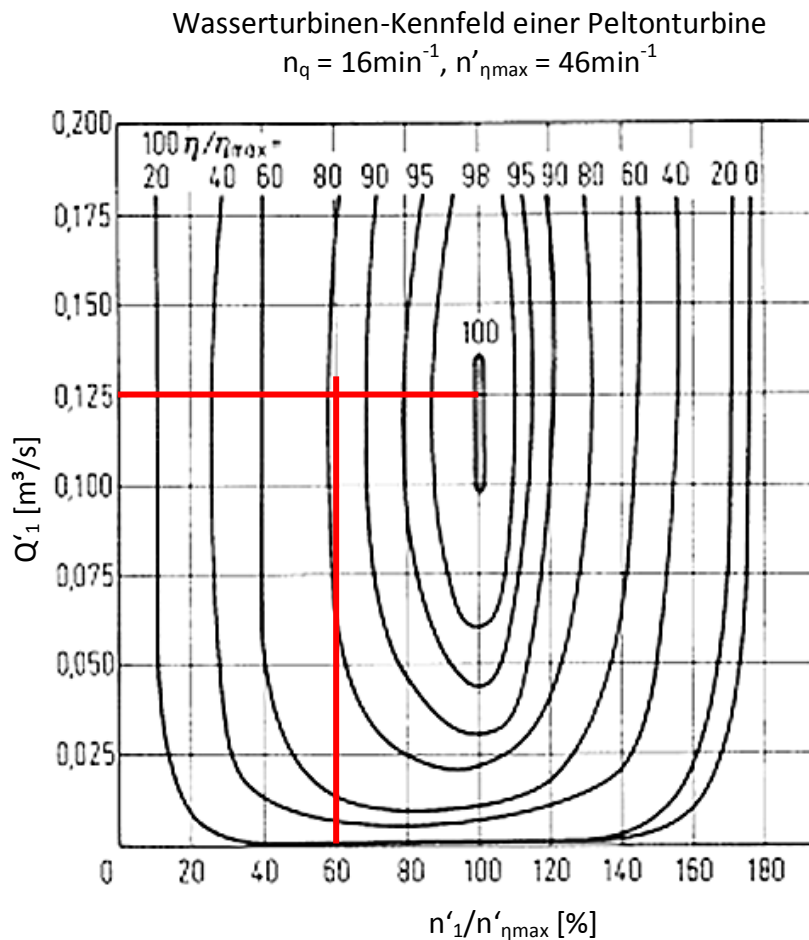
d. Welche **Drehzahl** wäre für diese Turbine optimal?

$$n = 978,891 \text{ min}^{-1} \quad (3.5)$$

Wie sich aus den Berechnungen von Punkt e) zeigt, ist die Drehzahl von 1.000 min^{-1} der Turbine nahe am idealen Wert, wenn der spezifische Durchfluss sich im Bereich von $Q'_1 = 0,125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ bewegt!

Wurden hier andere Werte gewählt und basierend darauf andere Durchmesser ermittelt, ergeben sich entsprechend leicht andere Werte für die Drehzahl.

e. Welcher **Turbinenwirkungsgrad** würde sich bei sonst gleichen Parametern einstellen? (in das Kennfeld einzeichnen!)



Daraus folgt:

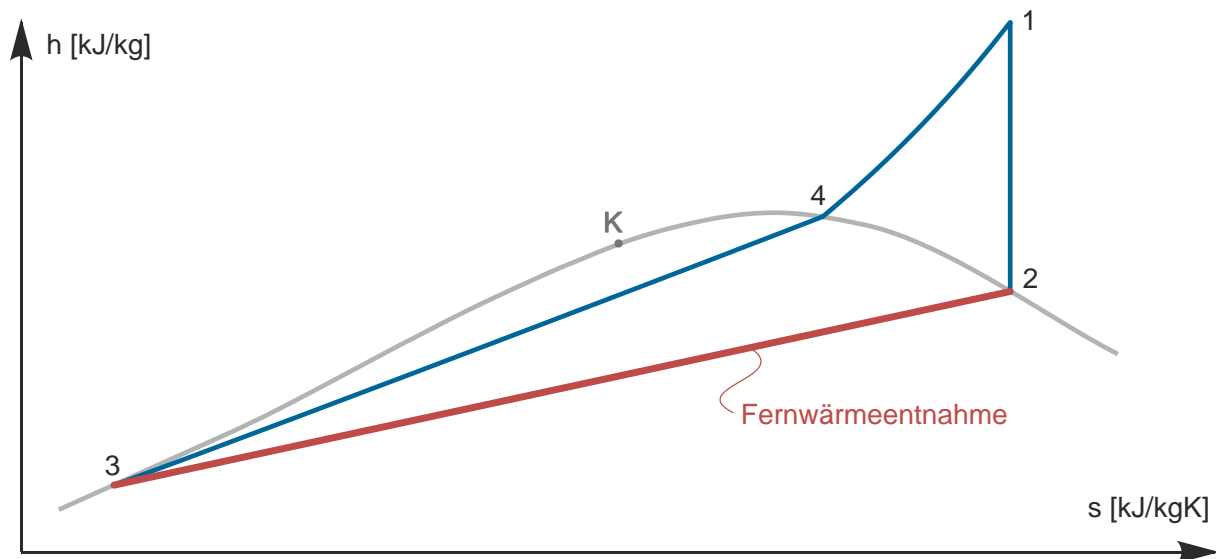
$$\eta_T = 0,729 = 72,9\% \tag{3.6}$$

f. Welche **elektrische Leistung** würde sich mit diesem Wirkungsgrad ergeben?

$$P_{el} = 68,838 \text{ MW} \tag{3.7}$$

4. Heizkraftwerk

- a. Zeichnen Sie das **h-s Diagramm** von diesem Dampfkreisprozess und **kennzeichnen** Sie jeweils den **Bereich der Fernwärmeentnahme**.



- b. Bestimmen Sie **Enthalpie, Druck, und Temperatur** am Turbinenausgang.

$$\begin{aligned}
 p_2 &= 1,2 \text{ bar} \\
 T_2 &= 377,93 \text{ K} \\
 h_2 &= 2683,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 s_2 &= 7,2918 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

- c. Bestimmen Sie den **Gesamtwirkungsgrad** der Anlage (inkl. Fernwärmeauskopplung).

$$\eta_{HKW} = 0,714 \tag{3.9}$$

- d. Welcher **Massestrom im Fernheizkreis** ist erforderlich, damit bei einer Vorlauftemperatur von 100°C und einer Rücklauftemperatur von 60°C eine thermische Leistung von 250 MW ausgekoppelt werden kann.

$$\dot{m} = 1488,095 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \tag{3.10}$$

- e. Bestimmen Sie für diesen Betrieb den **Gesamtwirkungsgrad** der Anlage.

$$\eta_{KW} = 0,342 \tag{3.11}$$