

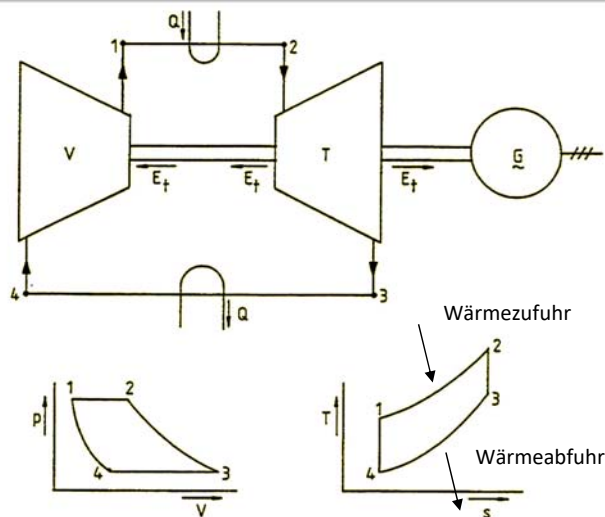
Lösungen zur schriftlichen Prüfung aus VO Kraftwerke am 25.04.2017

**Hinweis:** Bei den Berechnungen wurden alle Zwischenergebnisse in der technischen Notation<sup>1</sup> (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. Gasturbine (25 Punkte)

- a. Skizzieren Sie das **Blockschaltbild** einer Gasturbine und beschriften Sie die relevanten thermodynamischen Punkte.
- b. Welche relevanten thermodynamischen Zustandsänderungen kommen in der Gasturbine vor?
- c. Skizzieren Sie das **pV- und das TS-Diagramm** und beschriften Sie die relevanten Punkte.



- 1-2: isobare Wärmezufuhr („Brennkammer“)
- 2-3: isentrope Entspannung mit Abgabe äußerer Arbeit („Turbine“)
- 3-4: isobare Wärmeabfuhr („Ausstoß ins Freie, neue Frischluft“)
- 4-1: isentrope Verdichtung mit Zufuhr von Kompressionsarbeit („Verdichter“)

d. Wie hoch sind die Temperaturen T3 und T1 (nach dem Verdichter und nach der Turbine)?

$$T_1 = 591.5K \quad (1.1)$$

<sup>1</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Wissenschaftliche\\_Notation](http://de.wikipedia.org/wiki/Wissenschaftliche_Notation)

$$T_3 = 742.5K \quad (1.2)$$

e. Wie groß ist die **spezifische Verdichterarbeit** ( $W_{41}/m$  – die dem Verdichter bei keinerlei Verlusten zugeführt werden muss)?

$$\frac{W_{41}}{m} = 297.779 \text{ kJ/kg} \quad (1.3)$$

f. Wie groß ist die **spezifische Turbinenarbeit**  $W_{23}/m$ ?

$$\frac{W_{23}}{m} = -741.59 \text{ kJ/kg} \quad (1.4)$$

g. Wie groß ist die **spezifische Nutzarbeit**?

$$\frac{W_{Nutz}}{m} = 443.81 \text{ kJ/kg} \quad (1.5)$$

Das negative Vorzeichen gibt die „abgegebene Nutzarbeit“ an

h. Wie groß ist die **spezifische Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr**?

Wärmezufuhr:

$$\frac{W_{12}}{m} = 894.85 \text{ kJ/kg} \quad (1.6)$$

Wärmeabfuhr:

$$\frac{W_{34}}{m} = -451.03 \text{ kJ/kg} \quad (1.7)$$

i. Welcher **Massenstrom** ist für eine abgegebene mechanische Leistung von 2,3 MW erforderlich?

$$P = 5.633 \text{ kg/s} \quad (1.8)$$

j. Wie groß ist der **thermische Wirkungsgrad** und das **Arbeitsverhältnis**?

$$\eta = 0.496 \quad (1.9)$$

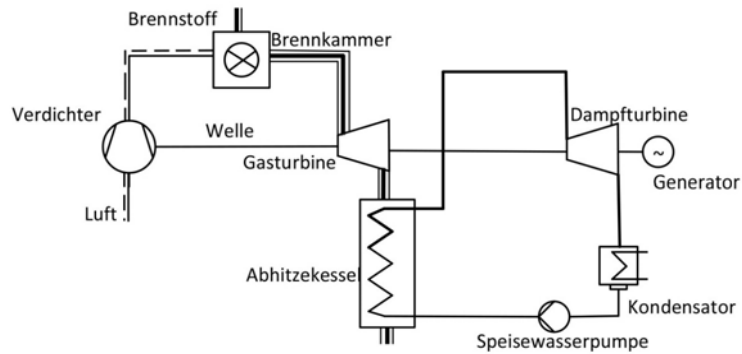
$$r = 0.598 \quad (1.10)$$

k. Wie groß ist der **thermische Wirkungsgrad**, wenn als **Arbeitsmedium Helium** (eiatomiges Gas, 3 Freiheitsgrade) verwendet wird bei sonst gleichen Eckdaten?

$$\eta' = 0.617 \quad (1.11)$$

## 2. GuD-Kraftwerk

- a. Zeichnen Sie das **Ersatzschaltbild** des kombinierten Gas- und Dampfprozesses und **beschriften** Sie die Symbole



- b. Bestimmen Sie den **elektrischen Wirkungsgrad** der **Gasturbine**.

$$\eta_{GT,el} = 0,394 \text{ [39,4\%]} \quad (2.1)$$

- c. Bestimmen Sie den **Wirkungsgrad** der **Dampfturbine** mit und ohne **Fernwärmeauskopplung**.

Wirkungsgrad ohne Fernwärmeauskopplung:

$$\eta_{DT,el} = 0,377 \text{ [37,7\%]} \quad (2.2)$$

Wirkungsgrad mit Fernwärmeauskopplung:

$$\eta_{DT,ther} = 0,627 \text{ [62,7\%]} \quad (2.3)$$

- d. Bestimmen Sie den **Wirkungsgrad** der **gesamten GuD-Anlage** mit und ohne **Fernwärmeauskopplung**.

Wirkungsgrad ohne Fernwärmeauskopplung:

$$\eta_{GUD,el} = 0,551 \text{ [55,1\%]} \quad (2.4)$$

Wirkungsgrad mit Fernwärmeauskopplung:

$$\eta_{GUD,ther} = 0,667 \quad (2.5)$$

- e. Welche **Brennstoffmenge** ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) ist für eine elektrische **Gesamtleistung** (GuD) von **200 MW** nötig?

$$\dot{Q}_{zu} = 363,003 \cdot 10^6 \text{ W} \quad (2.6)$$

$$\dot{m}_{Erdgas} = 36503,095 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (2.7)$$

- f. Welche **Brennstoffmenge** ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) muss bei der Gasturbine erfolgen, um eine **effektive Fernwärmeauskopplung von 65 MW** zu erzielen?

$$\dot{Q}_{zu} = 656,566 \cdot 10^6 \text{ W} \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_{Erdgas} = 66024 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (2.9)$$

**3. Abgasstrom eines Kohlekraftwerks**

a. Welche **Brennstoffzufuhr** ist für das Fahren unter Nennleistung pro Stunde notwendig?

$$\dot{m}_{\text{Brennstoff}} = 18,636 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 67,091 \frac{\text{t}}{\text{h}} \quad (3.1)$$

b. Welcher **Volumenstrom** ergibt sich für Punkt a.?

$$\dot{V}_{\text{Brennstoff}} = 49,697 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (3.2)$$

c. Welcher wasser- und aschefreier **Massen- und Volumenstrom** der Brennstoffkomponenten ergibt sich bei Nennleistung?

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{wasserundaschefrei}} &= 45,423 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \\ \dot{m}_{\text{wasserundaschefrei}} &= 17,034 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

d. Bestimmen Sie die **Massenströme der Abgaskomponenten**.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{CO}_2} &= 52,9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} &= 8,278 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{SO}_2} &= 0,307 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ \frac{\dot{m}_{\text{O}_2}}{32} &= 1,379 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{O}_2\lambda} &= 0 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ \dot{m}_{\text{N}_2\lambda} &= 145,206 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

e. Bestimmen Sie die **Verbrennungstemperatur**.

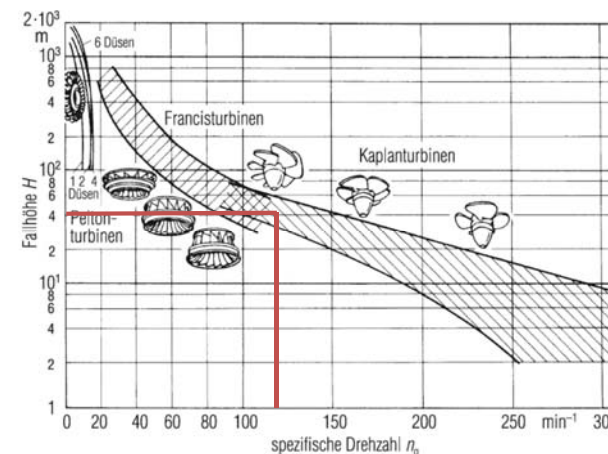
$$\Delta T = 2627,777 \text{ K} \quad (3.7)$$

**4. Auslegung einer Turbine für ein Wasserkraftwerk**

a. Wie groß ist die **spezifische Drehzahl** der Turbine?

$$n_q \approx 120 \text{ min}^{-1}$$

b. Welcher **Turbinentyp** soll für das Kraftwerk verwendet werden? Benutzen Sie die untere Abbildung und das Ergebnis von Unterpunkt a. für Ihre Argumentation. **Zeichnen** Sie ihre Auswahl **in die Abbildung** ein:



→ Auswahl: Kaplan turbine

c. Wie groß ist der **Turbinenwirkungsgrad** bei einer mechanischen Turbinenleistung  $P_t = 34,782 \text{ MW}$ , wenn der hydraulische Wirkungsgrad  $\eta_H = 94\%$  beträgt?

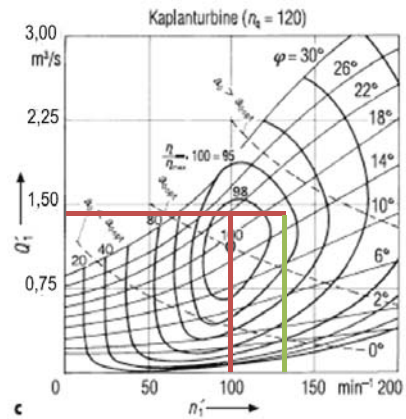
$$\eta_t = 91\% \quad (4.1)$$

d. Welche **elektrische Leistung** weist der Turbinen-Generatorsatz auf, wenn die folgenden Wirkungsgrade gegeben sind:

$$\begin{aligned} \text{Generatorwirkungsgrad} & \quad \eta_G = 97\% \\ \text{Eigenbedarf} & \quad \epsilon = 2\% \end{aligned}$$

$$P_{el} = 33,064 \text{ MW} \quad (4.2)$$

e. Wie groß ist der **Durchmesser** der Turbine für **einen optimalen Betrieb bei Nennleistung** und gegebener Drehzahl (d.h. Auslegung über  $n_1'$ )?



Aus Diagramm:  $n_1' \approx 100 \text{ min}^{-1}$  (= Punkt mit maximal möglichem Wirkungsgrad)

$$\frac{D}{m} = 3,373 \quad (4.3)$$

$$Q_i = 1,44 \quad (4.4)$$

Es ergibt sich bei dieser Drehzahl ein Wirkungsgrad von ca. 98,5% des maximal möglichen Wirkungsgrades (rote Linien in Muschediagramm)!

f. Aufgrund eines Bestellfehlers wird ein Generator mit  $3/4$  der ursprünglichen Polpaarzahl geliefert. Um welchen **Faktor** ändert sich der **Turbinenwirkungsgrad** bei sonst gleichen Parametern?

Der Turbinenwirkungsgrad nimmt um 2,54% ab!

Kleine Abweichungen im Endergebnis aufgrund von Ablesefehler sind in diesem Beispiel möglich.