Technische Universität München
Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie
Lehrstuhl für Turbomaschinen und Flugantriebe

Eignungsverfahren Masterstudium Aerospace

Grundlagen der Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. Gümmer / Prof. Dr.-Ing. Haidn

Musterprüfung

Datum der Prüfung	Garching, den 12. Juni 2020
Raum	MW 1250
Beginn der Prüfung	09:00 Uhr
Dauer der Prüfung	60 Minuten
Art der Prüfung	schriftlich
Zugelassene Hilfsmittel	Schreib- und Zeichenutensilien, Taschenrechner, Wörterbuch

Prüfungs-ID: 1

Name, Vorname: ________________________________

Matrikelnummer: ________________________________

Die Prüfungsangabe beinhaltet **15 Seiten** (inkl. Deckblatt). Zusätzlich wird eine Formelsammlung ausgegeben. Bitte überprüfen Sie sofort nach Erhalt der Angabe die Vollständigkeit. Beschriften Sie dieses Deckblatt mit Ihrem Namen, Vornamen und Ihrer Matrikelnummer. Unterschreiben Sie auch dieses Deckblatt. Nach Ende der Prüfung müssen alle Arbeitsblätter und die Formelsammlung abgegeben werden.

Sämtliche Aufgaben sind auf den Aufgabenblättern (nicht auf der Formelsammlung) zu beantworten. Benutzen Sie bitte Vor- und Rückseite der Blätter. Berechnungsergebnisse müssen in die dafür vorgesehenen Felder eingetragen werden und werden nur mit **Lösungsweg** gewertet. Sollten Teilaufgaben nicht gelöst werden können, treffen Sie zur weiteren Berechnung sinnvolle Annahmen für die fehlenden Werte.

Unterschrift: ________________________________

Erreichbare Punkte ______

Aufgabe:	1	2	3	4	5	Summe
Punkte:	10	8	9	11	32	70
Bewertung:						

1. Definitionen und Begriffe

[10]

(a) Wann befindet sich ein System im thermodynamischen Gleichgewicht? [2]

Lösung:

Ein System befindet sich im thermodynamischen Gleichgewicht, falls sich seine Zustandsgrößen nicht ändern.

(b) Definieren Sie den Begriff Phase! [2]

Lösung:

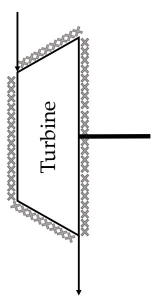
Eine Phase ist ein gegen die Umgebung abgrenzbarer Bereich von Materie (Stoff) mit gleichen thermodynamischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften.

(c) Charakterisieren Sie folgende Systeme nach den Eigenschaften:

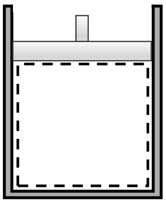
offen – geschlossen
diabat – adiabat
ruhend – bewegt
homogen – heterogen – kontinuierlich

Beachten Sie gegebenenfalls die eingezeichneten Systemgrenzen! [6]

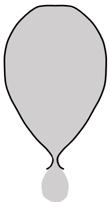
i. Fluid in perfekt isolierter Turbine



ii. Gas in einem wärmedurchlässigen Zylinder



iii. Luft im Ballon mit ausströmendem Gas



Lösung:

i. offen/adiabat/ruhend/kontinuierlich

ii. geschlossen/diabat/ruhend/homogen

iii. offen/diabat/ruhend oder bewegend/homogen

2. Thermischer Zustand und ideales Gas

[8]

(a) Nennen Sie die drei thermischen Zustandsgrößen! [2]

Lösung:

Druck, Temperatur, spezifisches oder molares Volumen.

(b) Nennen Sie die thermische Zustandsgleichung eines idealen Gases in Abhängigkeit der universellen Gaskonstanten R_m und der molaren Masse M. [2]

Lösung:

$$p \cdot v = \frac{R_m}{M} \cdot T$$

(c) In einem Behälter mit dem Volumen $V = 2\,\mathrm{m}^3$ befindet sich die Masse $m = 3\,\mathrm{kg}$ eines idealen Gases ($R_m = 8.314\,\mathrm{J/molK}$). Der Druck beträgt $p = 1.5\,\mathrm{bar}$, die Temperatur $T = 350\,\mathrm{K}$ [4]

i. Wie groß ist die molare Masse M und die Stoffmenge n des Gases.

ii. Der Behälter wird weiter befüllt bis sein Druck $p_2 = 2\,\mathrm{bar}$ beträgt. Wie groß ist die neue Masse des Gases im Behälter? Nehmen Sie an, dass der Füllvorgang isotherm abläuft.

Lösung:

i.

$$p \cdot V = m \cdot \frac{R_m}{M} \cdot T$$

$$M = m \cdot \frac{R_m}{p \cdot V} \cdot T = 29.1\,\mathrm{kg/kmol}$$

$$n = \frac{m}{M} = 0.103\,\mathrm{kmol}$$

ii.

$$m_2 = \frac{p_2 \cdot V \cdot M}{R_m \cdot T} = 4\,\mathrm{kg}$$

3. Erster Hauptsatz

[9]

(a) Beschreiben Sie in eigenen Worten die Aussage des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik! [2]

Lösung:

Die Energie eines Systems kann in Form von Wärme, Arbeit, sowie durch den Zu- und Abfluss von Enthalpie, kinetischer Energie und potentieller Energie verändert werden.

(b) Schreiben den 1. Hauptsatz der Thermodynamik in allgemeiner Form als Leistungsbilanz an! [2]

Lösung:

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i(t) + \sum_j \dot{W}_j(t) +$$
$$\sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_e - \sum_i \dot{m}_i \left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_i$$

(c) In einem Dampfkessel werden stündlich $\dot{m} = 10^5\,\mathrm{kg/h}$ Wasser verdampft und der Dampf in einer wärmeisolierten Turbine entspannt. Die spezifische Enthalpie des Wassers beträgt am Kesseleintritt $h_1 = 128\,\mathrm{kJ/kg}$, die des Dampfes beträgt am Kesselaustritt und Turbineneintritt $h_2 = 3150\,\mathrm{kJ/kg}$ und am Turbinenaustritt $h_3 = 2350\,\mathrm{kJ/kg}$.

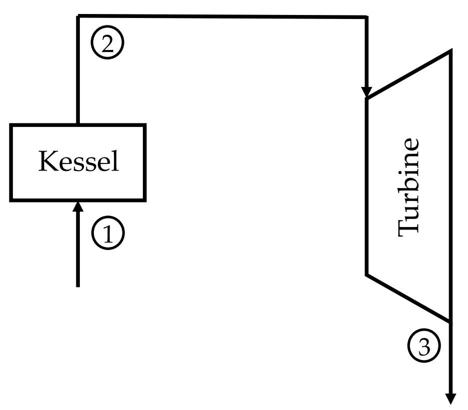


Abbildung 1: Skizze des Systems

[5]

i. Wie groß ist der im Kessel zugeführte Wärmestrom $\dot{Q}_K$?

ii. Welchen Wirkungsgrad hat die gesamte Anlage?

Lösung:

i. System Kessel (stationär betrieben):

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i(t) + \sum_j \dot{W}_j(t) + \sum_l \dot{m}_e \left(h_l + \frac{c_l^2}{2} + g \cdot z_l \right)$$

$$0 = \dot{Q}_K + \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{Q}_K = -\dot{m}(h_1 - h_2) = 83.9\,\mathrm{MW}$$

ii. System Turbine (stationär betrieben):

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i(t) + \sum_j \dot{W}_j(t) + \sum_l \dot{m}_e \left(h_l + \frac{c_l^2}{2} + g \cdot z_l \right)$$

$$0 = \dot{W}_T + \dot{m}(h_2 - h_3)$$

$$\dot{W}_T = P_T = -22.2\,\mathrm{MW}$$

Somit ergibt sich für den Wirkungsgrad:

$$\eta_{ges} = \frac{|P_T|}{\dot{Q}_K} = 0.265$$

4. Zustandsänderung und zweiter Haupsatz

[11]

(a) Kompression von Luft: 10 kg Luft (ideales Gas, $\kappa = 1.4$, $R_{Luft} = 287\,\mathrm{J/kgK}$ werden von $T_1 = 293$ K und $p_1 = 0.95$ bar auf $p_2 = 10$ bar verdichtet. Dies soll

1. isochor
2. isotherm
3. reversibel adiabat und
4. polytrop mit $n = 1.3$

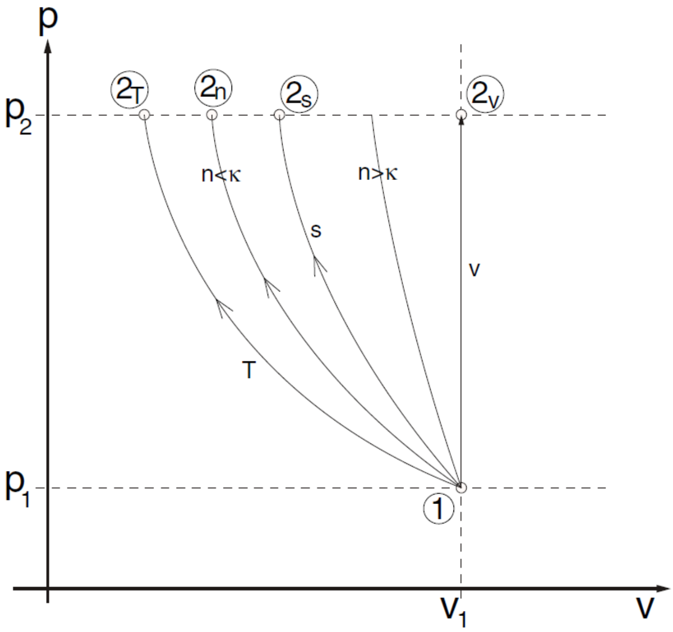
geschehen.

i. Skizzieren Sie die jeweilige Zusatndsänderung im $p - v$ Diagram!

ii. Berechnen Sie die Endtemperatur T_2, das Endvolumen V_2 und die übertragene Wärme Q für den reversiblen adiabaten Fall!

[6]

Lösung:



i.

ii.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 572.33\,\mathrm{K}$$

$$V_2 = \frac{m \cdot R \cdot T_2}{p_2} = 1.64\,\mathrm{m}^3$$

Für die Wärme gilt $Q = 0$, da es sich um eine adiabate Zustandsänderung handelt.

(b) Kreuzen Sie an, ob die folgenden Aussagen zur Entropie richtig oder falsch sind. Nicht korrekte Antworten führen zu Punkteabzug innerhalb der Aufgabe. Die minimale Punktezahl der Aufgabe ist 0.

i. Die Entropie S ist eine Zustandsgröße.

ii. Die Entropie S ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zustand eintritt.

iii. Die Entropie eines Systems kann niemals abnehmen.

iv. Auch in reversiblen Systemen kann Entropie erzeugt werden.

v. Systeme können Entropie mit der Umgebung durch die Übertragung von Wärme über die Systemgrenze hinweg austauschen.

[5]

Lösung:

i. Richtig

ii. Richtig

iii. Falsch

iv. Falsch

v. Richtig

5. Dampfkraftwerk [32]

Ein großes Kohlekraftwerk arbeitet vereinfacht nach dem folgenden Prozess:

- Im Speisewasserbehälter liegt gesättigtes Wasser bei einem Druck von $p_1 = 0,1\,\mathrm{MPa}$ vor (Zustand 1).
- Von der isentropen Speisewasserpumpe (1$\rightarrow$ 2) wird das flüssige Wasser auf den Druck $p_2 = 7\,\mathrm{MPa}$ gebracht.
- Im Kessel wird das Wasser durch die bei der Verbrennung der Kohle abgegebene Wärme bis zur Siedelinie vorgewärmt (2 $\rightarrow$ 3), vollständig verdampft (3 $\rightarrow$ 4) und überhitzt (4 $\rightarrow$ 5). Dabei wird vom Kessel ein Wärmestrom von $\dot{Q}_{th,2-5} = 1,3\,\mathrm{GW}$ an das Arbeitsmedium übertragen. Während Vorwärmung und Verdampfung isobar erfolgen, tritt bei der Überhitzung ein Druckverlust von $\Delta p_{4-5} = 0,5\,\mathrm{MPa}$ auf.
- In der adiabaten Hochdruckturbine (5 $\rightarrow$ 6) wird das Wasser bis zu einem Druck von $p_6 = 1\,\mathrm{MPa}$ polytrop entspannt. Der isentrope Wirkungsgrad der Hochdruckturbine beträgt $\eta_{is} = 0,8$
- Im isobaren Zwischenüberhitzer (6 $\rightarrow$ 7) wird das Waser wieder bis zur Temperatur $T_7 = T_5$ aufgeheizt.
- In der adiabaten Niederdruckturbine (7 $\rightarrow$ 8) wird das Wasser schließlich bis zum Druck $p_8 = 5\,\mathrm{kPa}$ entspannt. Dabei liegt zum Zustand 8 Nassdampf vor. Durch Verluste entsteht in der Niederdruckturbine ein Entropiestrom von $\dot{S}_{irr,7-8} = 51\,\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$.
- Im Kondensator (8$\rightarrow$9) wird der Nassdampf vollständig kondensiert. Die dabei entstehende Wärme wird duch Kühlwasser, welches aus dem benachbarten Fluss entnommen wird, abgeführt.
- Mittels einer Hilfspumpe und der Nutzung von Abwärme im Kraftwerk wird das Wasser schließlich wieder auf den Zustand des Behälters gebracht (Zustand 1).

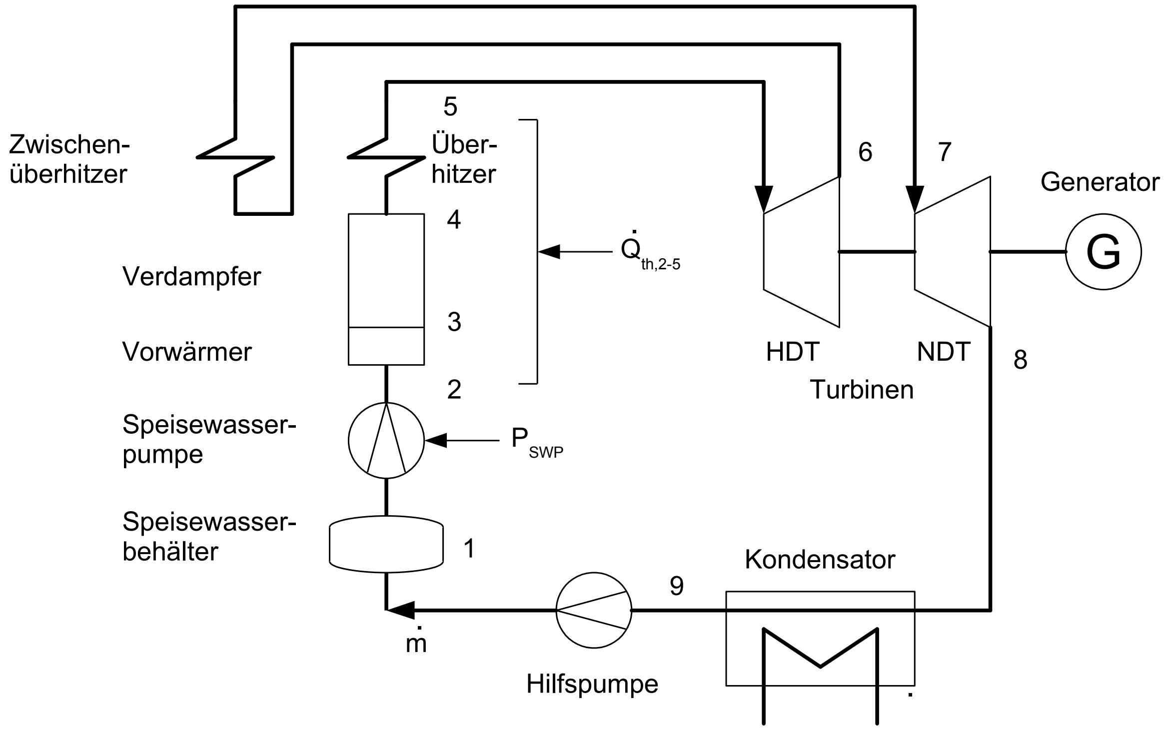


Abbildung 2: Skizze des Kraftwerkprozesses

Gegebene Größen:
Massenstrom des Prozesses: $\dot{m} = 420\,\mathrm{kg/s}$
Speicher: $p_1 = 0,1\,\mathrm{MPa}$, $v_1 = 0,001\,\mathrm{m^3/kg}$
Speisewasserpumpe: $p_2 = 7\,\mathrm{MPa}$
Hauptkessel: $\dot{Q}_{th,2-5} = 1,3\,\mathrm{GW}$, $\Delta p_{4-5} = 0,5\,\mathrm{MPa}$
Hochdruckturbine: $p_6 = 1\,\mathrm{MPa}$, $\eta_{is} = 0,8$, $\bar{c}_p|_5^6 = 1909,25\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}$, κ = 1,28
Niederdruckturbine: $p_8 = 5\,\mathrm{kPa}$, $\dot{S}_{irr,7-8} = 51\,\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$

Hinweise:

- Alle Drücke sind Absolutdrücke.
- Flüssiges Wasser kann als inkompressible Flüssigkeit, überhitzter Dampf als ideales Gas betrachtet werden.
- Strömungsgeschwindigkeiten und Höhenunterschiede können in allen Teilaufgaben vernachlässigt werden.
- Falls Zwischenwerte aus den Dampftafeln benötigt werden, ist zwischen zwei benachbarten Werten linear zu interpolieren. Eine Extrapolation der Werte ist nicht zulässig.

Dampftafeln:

Sättigungszustand:

p MPa	T °C	h' $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$	h'' $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$	s' $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg \cdot K}}$	s'' $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg \cdot K}}$
0,005	32,88	137,72	2560,5	0,476	8,393
0,1	99,63	417,51	2675,1	1,303	7,359
7	285,86	1267,9	2771,8	3,121	5,813

Überhitzter Dampf:

p MPa	T °C	h $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$	s $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg \cdot K}}$
1	450	3370,8	7,6190
1	500	3478,3	7,7627
1	550	3587,1	7,8991
1	600	3697,4	8,0292
6,5	450	3296,3	6,680
6,5	500	3416,4	6,841
6,5	550	3534,6	6,989
6,5	600	3652,1	7,127
7	450	3289,1	6,637
7	500	3410,6	6,799
7	550	3529,6	6,948
7	600	3647,9	7,088

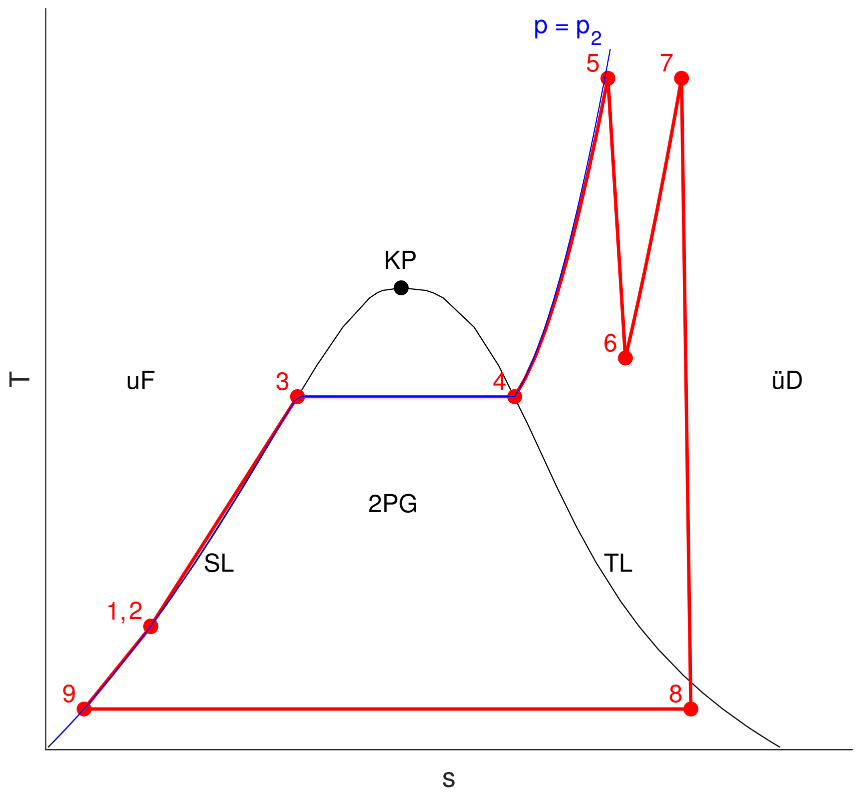
Aufgaben:

(a) [13]

Zeichnen Sie qualitativ das T-s-Diagramm des Kraftwerksprozesses. Zeichnen Sie dabei folgende Größen ein und beschriften Sie diese:

- Siedelinie (SL), Taulinie (TL) und kritischer Punkt (KP). Beschriften Sie die Bereiche „unterkühlte Flüssigkeit " (uF), „Zweiphasengebiet " (2PG) und „überhitzter Dampf" (üD).
- Die Zustände 1-9 des Prozesses als Punkte.
- Die Zustandsänderungen zwischen den Punkten. Achten Sie auf den charakteristischen Verlauf der jeweiligen Zustandsänderung.
- Die Isobare für $p = p_2$. Die Linie muss durch alle drei Gebiete (unterkühlte Flüssigkeit, Nassdampfgebiet, überhitzter Dampf) gehen.

Lösung:



(b) [2]

Geben Sie die Temperatur T_1 und die spezifische Enthalpie h_1 im Speisewasserbehälter an.

Lösung:

Aus der Dampftafel für den Sättigungszustand:

$$T_1 = 99,63\,^\circ\mathrm{C}$$
$$h_1 = h' = 417,51\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$$

(c) [2]

Berechnen Sie die von der Speisewasserpumpe an das Arbeitsmedium abgegebene Leistung P_{SWP}. Geben Sie außerdem die Temperatur T_2 am Austritt der Pumpe an.

Lösung:

Druckänderungsarbeit für eine inkompressible Flüssigkeit:

$$P_{SWP} = \dot{W}_{T,SWP} = \dot{m} \cdot w_{T,SWP} =$$
$$= \dot{m} \cdot v_1 \cdot (p_2 - p_1) = 2,898\,\mathrm{MW}$$
$$T_2 = T_1 = 99,63\,^\circ\mathrm{C}$$

(d) [5]

Berechnen Sie die Temperatur T_5 am Eintritt der Hochdruckturbine.

Lösung:

Erster Hauptsatz der Thermodynamik (Leistungsbilanz):

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \dot{m}_2 \cdot h_2 - \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{Q}_{th,2-5} = 0$$

Darin sind:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 = \dot{m}$$
$$h_2 = h_1 + v_1 \cdot (p_2 - p_1) = 424,41\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$$

Schließlich ergibt sich für h_5:

$$h_5 = h_2 + \frac{\dot{Q}_{th,2-5}}{\dot{m}} = 3519,65\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$$

Berechnung des Drucks p_5:

$$p_5 = p_2 - \Delta p_{4-5} = 6,5\,\mathrm{MPa}$$

Aus der Dampftafel ergibt sich mit linearer Interpolation:

$$T_5 = 543,68\,^\circ\mathrm{C} = 816,83\,\mathrm{K}$$

(e) [5]

Berechnen Sie die Temperatur T_6 am Austritt der Hochdruckturbine, sowie den Betrag der von der Hochdruckturbine abgegebene Leistung $|P_{HDT}|$.

Lösung:

Definition des isentropen Wirkungsgrades einer Turbine bei idealem Gas als Arbeitsmedium:

$$\eta_{is,T} = \frac{|w_t|}{|w_{t,is}|} = \frac{h_a - h_e}{h_{a,is} - h_e} = \frac{T_a - T_e}{T_{a,is} - T_e}$$

Mit $T_e = T_5$ und $T_a = T_6$.
Isentrope Zustandsänderung:

$$\frac{T_{6,is}}{T_5} = \left(\frac{p_6}{p_5}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_{6,is} = T_5 \cdot \left(\frac{p_6}{p_5}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 542,38\,\mathrm{K}$$

Damit sind:

$$T_6 = T_5 + \eta_{is,T} \cdot (T_{6,is} - T_5) = 597,27\,\mathrm{K}$$
$$|P_{HDT}| = |\dot{m} \cdot \bar{c}_p|_5^6 \cdot (T_6 - T_5)| = 176,06\,\mathrm{MW}$$

(f) [5]

Wie groß ist der Dampfgehalt x_8 (bzw. die Nässe $(1 - x_8)$ am Austritt der Niederdruckturbine? Warum ist eine zu hohe Nässe in der Niederdruckturbine problematisch?

Lösung:

Zustandsgrößen am Eintritt der Turbine:

$$T_7 = T_5 = 816,83\,\mathrm{K}$$
$$p_7 = p_6 = 1\,\mathrm{MPa}$$
$$s_7 = 7,8819\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}$$

Zweiter Hauptsatz der Thermodynmaik (Entropiestrombilanz):

$$\frac{dS_{sys}}{dt} = \dot{m}_7 \cdot s_7 - \dot{m}_8 \cdot s_8 + \dot{S}_{irr,7-8} = 0$$

Darin ist:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}$$

Schließlich ergibt sich für s_8:

$$s_8 = s_7 + \frac{\dot{S}_{irr,7-8}}{\dot{m}} = 8,0033\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}$$

Für jede Zustandsgröße z im 2-Phasen-Gebiet gilt:

$$z = (1-x)\cdot z' + x \cdot z'' = z' + x\dot{(}z'' - z')$$

Damit ergibt sich für den Dampfgehalt bzw. die Nässe:

$$x_8 = \frac{s_8 - s'}{s'' - s'} = 0,95$$
$$(1 - x_8) = 0,05$$

Die Werte für s' und s'' sind der Dampftafel für $p = p_8$ entnommen.
Eine zu hohe Nässe in der Niederdruckturbine führt zu Erosion der Turbinenbeschaufelung und ist daher zu vermeiden.