

## Klausur zur Vorlesung

### Thermodynamik

Für alle Aufgaben gilt: Der Rechen- bzw. Gedankengang muss stets erkennbar sein!

Interpolationsvorschriften und Stützstellen sind anzugeben.

Hilfsmittel sind zugelassen, die Bearbeitungszeit beträgt 90 Minuten.

Verwenden Sie ausschließlich die im Skript/Buch angegebenen Dampftafeln.

Falls Ersatzergebnisse angegeben sind, müssen diese auf jeden Fall verwendet werden.

#### **Aufgabe 1:** *GuD Kraftwerk*

17 von 50 Punkten

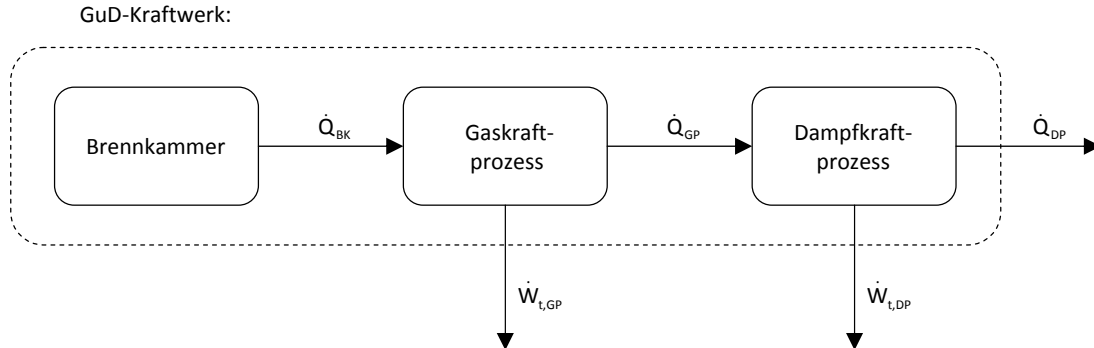
Kurzfrage: Erklären Sie knapp, warum jedes Kraftwerk einen Abwärmestrom an die Umgebung abführen muss und nicht die zugeführte Wärme vollständig in technische Arbeit umwandeln kann.

Die Brennkammer eines GuD Kraftwerks hat eine Temperatur von  $1100\text{ K}$ . Bei dieser Temperatur nimmt ein Gaskraftprozess Wärme von ihr auf. Die Abwärme des Gaskraftprozesses wird wiederum einem Dampfkraftprozess zugeführt, der seine Abwärme an die Umgebung abführt. Dem Dampfkraftprozess steht nur die vom Gaskraftprozess abgegebene Wärme zur Verfügung. Der Gaskraftprozess hat einen thermischen Wirkungsgrad von 30%. Der Dampfkraftprozess einen thermischen Wirkungsgrad von 45%. Die Umgebung hat eine Temperatur von  $20^\circ\text{C}$ .

- Erstellen Sie eine Skizze, die Brennkammer, Gas- und Dampfprozess (jeweils als Blackbox) sowie alle relevanten Prozessgrößen enthält. Wie hoch ist der thermische Gesamtwirkungsgrad des GuD Kraftwerks?
- Dem Dampfprozess wird die Abwärme des Gasprozesses bei  $660\text{ K}$  zugeführt. Wie groß ist das Verhältnis von realem Wirkungsgrad des Dampfprozesses zu dem mit einem idealen Prozess unter diesen Bedingungen erzielbaren Wirkungsgrad? ( $660\text{ K}$  ist die niedrigste Temperatur des Gas- und die höchste des Dampfprozesses)
- Wie groß ist die Entropieproduktion pro Zeit im oben beschriebenen Dampfkraftprozess wenn diesem ein Wärmestrom von  $700\text{ MW}$  bei  $660\text{ K}$  zugeführt wird? Wie hoch wäre sie bei einem thermischen Wirkungsgrad des Dampfkraftprozesses von 70%? Kommentieren Sie Ihr Ergebnis knapp!
- In einem anderen GuD Kraftwerk mit einem thermischen Gesamtwirkungsgrad von 65% wird eine technische Leistung von  $120\text{ MW}$  bereitgestellt. Zum Kühlen verwendetes Flusswasser wird im Kühlturm des Kraftwerks auf  $45^\circ\text{C}$  erwärmt und verdunstet anschließend bei dieser Temperatur. Wie viel Flusswasser, das bei  $20^\circ\text{C}$  zur Verfügung steht, muss pro Tag in einem Kühlturm verdunsten, um die entstehende Abwärme abzuführen?

KF) Jeder Wärmestrom enthält immer auch Anergie / Entropie, die nicht über technische Arbeit abgeführt werden kann. Sie wird über den Abwärmestrom abgegeben.

a) Wärme von Brennkammer an GKP. Wärme von GKP an DKP und Arbeit von GKP an Umgebung. Abwärme von DKP an Umgebung. Arbeit von DKP an Umgebung.



Von 100% Wärme werden 30% im GKP in Arbeit gewandelt. Von den restlichen 70% werden wiederum 45% ( $= 0,7 * 0,45 = 0,315 = 31,5\%$ ) in Arbeit umgewandelt. Insgesamt werden also  $30\% + 31,5\% = 61,5\%$  in Arbeit umgewandelt. Das ist der Gesamtwirkungsgrad.

$$\eta_{ges} = \eta_{GP} + \eta_{DP}(1 - \eta_{GP}) = 0,615$$

b) Idealer Wirkungsgrad:  $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_K}{T_H} = 1 - \frac{293,15K}{660K} = 0,56$

Realer Wirkungsgrad laut Aufgabe: 0,45

Verhältnis:  $\frac{\eta_{real}}{\eta_{Carnot}} = 0,81$

c) Die Entropieproduktion kann mit einer Entropiebilanz rund um den DKP ermittelt werden. Zufuhr per Wärmestrom = Produktion + Abfuhr per Wärmestrom.

Entropieproduktion mit  $\eta = 0,45$ :  $1,313 \text{ MW/K} - 1,061 \text{ MW/K} = 0,252 \text{ MW/K}$

Entropieproduktion mit  $\eta = 0,7$ :  $0,716 \text{ MW/K} - 1,061 \text{ MW/K} = -0,344 \text{ MW/K}$

Negative Entropieproduktion: Nicht möglich!

d)

$$\dot{Q}_{zu} = \frac{\dot{W}_t}{\eta}, \quad \dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_{zu} - \dot{W}_t$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{ab} = 64,6 \text{ MW}$$

Mit der Abwärme wird Wasser um 25K erwärmt ( $25 \text{ K} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 104,5 \text{ kJ/kg}$ ) und dann in den dampfförmigen Zustand (Verdampfungsenthalpie:  $h''(45^\circ\text{C}) - h'(45^\circ\text{C}) = 2394 \text{ kJ/kg}$ ) überführt. Der benötigte Massenstrom beträgt also  $\dot{m} = \frac{64,6 \text{ MW}}{104 \text{ kJ/kg} + 2394 \text{ kJ/kg}} = 25,8 \text{ kg/s}$ .

Pro Tag:  $25,8 \text{ kg/s} * (24*60*60)\text{s} = 2233,74\text{t}$

Kurzfrage: Bei einem überkritischen Wechsel von gasförmiger zu flüssiger Phase eines Fluids liegen zu keinem Zeitpunkt zwei Phasen gleichzeitig vor. Bedeutet dies, dass ein schlagartiger Wechsel von gasförmiger zu flüssiger Phase stattfindet? Wenn ja: Bei welchem Druck und welcher Temperatur geschieht dies?

Bei dem Luftverflüssigungsverfahren nach Linde durchläuft Luft aus der Umgebung im Anschluss an eine isotherme Kompression (Zustand 1) einen Gegenstromwärmeübertrager, in dem sie abgekühlt wird (auf Zustand 2). Die folgende adiabate Drosslung führt zu einer weiteren Absenkung der Temperatur, so dass sich die Luft nun im Nassdampfgebiet befindet (Zustand 3). Der flüssige Teil der Luft wird entnommen, der gasförmige Teil (Zustand 3'') strömt isobar durch den oben bereits erwähnten Gegenstromwärmeübertrager und danach im Zustand 4 ( $p_4 = p_u = 1 \text{ bar}$ ) in die Umgebung.

In der betrachteten Anlage verlassen  $0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  Luft den Verdichter mit einer Temperatur  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  und einem Druck  $p_1 = 180 \text{ bar}$ . Die Anlage stellt  $0,0027 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  flüssige Luft bereit.

Achtung: Luft verhält sich bei hohen Drücken und sehr niedrigen Temperaturen nicht mehr wie ein ideales Gas.

- Bestimmen Sie Temperatur und die spezifische Enthalpie der gasförmigen Phase hinter der Drossel!
- Bestimmen Sie die spezifische Enthalpie des Phasengemischs hinter der Drossel!
- Bestimmen Sie die Temperatur direkt vor der Drossel (Zustand 2)!
- Wie groß ist der spezifische Wärmestrom, den die Luft im Wärmeübertrager bei der Zustandsänderung 1-2 abgibt? Wie groß ist der spezifische Wärmestrom, den die Luft im Wärmeübertrager bei der Zustandsänderung 3''-4 aufnimmt? Wie groß ist die Luftaustrittsenthalpie  $h_4$  und die Luftaustrittstemperatur  $T_4$ ?
- Erläutern Sie knapp, welche Auswirkung eine Vergrößerung des internen Wärmeübertragers auf die Ausbeute an flüssiger Luft hätte!
- Wie groß ist die Differenz zwischen aufgenommener elektrischer Antriebsleistung und an die Umgebung abgegebenem Wärmestrom des Verdichters?

Stoffwerte für Luft (gasförmig)

Spezifische Enthalpie [ $\text{kJ/kg}$ ] in Abhängigkeit von Druck und Temperatur:

	293,15 K	273,15 K	190 K	170 K	150 K	130 K	110 K
1 bar	?	273,3	-	-	-	-	-
180 bar	259,4	233,4	104,5	62,5	21,3	-18,3	-56,3
200 bar	257,0	230,6	100,1	60,3	20,7	-17,9	-55,2

Fortsetzung Aufgabe 2

Stoffwerte für *Luft* (2-phasen-Gebiet flüssig/dampfförmig)

p [bar]	T[K]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]	v' [ $m^3/kg$ ]	v'' [ $m^3/kg$ ]
1,0	81	-126,5	79,0	0,226	0,00114
1,1	82	-124,9	79,6	0,207	0,00114
1,5	84	-119,2	81,6	0,155	0,00116

Kurzfrage:

Nein, es kommt zu einem fließenden und damit nicht eindeutig bestimmbar Übergang zwischen einem sehr „dicken“ Gas und einer sehr „dünnen“ Flüssigkeit.

a)

Druck: 1 bar, da nach der Drossel => Stoffwerte aus der Tabelle für Zweiphasengebiet entnehmen

Temperatur:  $T = 81\text{K}$

Enthalpie:  $h'' = 79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

b)

Berechnung über  $h = h' + x(h'' - h')$

$h'$  und  $h''$  jeweils bei 1 bar im Zweiphasengebiet =>  $h' = -126,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  und  $h'' = 79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$x$  berechnet sich aus dem Verhältnis der Massenströme:  $(1-x) = \frac{\dot{m}_{fL}}{\dot{m}_L} \Rightarrow x = 1 - (1-x)$

$1-x = 0,054 \Rightarrow x = 0,946$

Eingesetzt ergibt sich ein  $h$  von  $67,903 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

c)

es handelt sich um eine isenthalpe Drosselung, daher  $h_2 = h_3 = 67,903 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

damit Interpolation der gesuchten Temperatur mit Hilfe der gegebenen Tabelle für gasförmige Luft bei 180 bar zwischen 190 K und 170 K =>  $T = 172,57\text{ K}$

d)

Zustandsänderung 1 => 2: isobar =>  $\dot{q}_{12} = h_1 - h_2$  mit  $h_1 = 259,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$|\dot{q}_{12}| = 191,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Zustandsänderung 3'' => 4: abgegebener und aufgenommener Wärmestrom müssen gleich groß sein  
=>  $Q_{12} = Q_{3''4}$

$Q_{12} = \dot{q}_{12} * \dot{m}_L$

$\dot{q}_{3''4} = \dot{q}_{12} * \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{Gas}} = 191,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \frac{0,05 \text{ kg}}{0,0473 \text{ s}} = 202,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_4 = \dot{q}_{3''4} + h_3 = 281,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$T_4 = T_0 + (h_4 - h(273,15 \text{ K})) / c_{p\text{Luft}} = 273,15 \text{ K} + \frac{(281,43 - 273,3) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 281,23 \text{ K}$$

e)

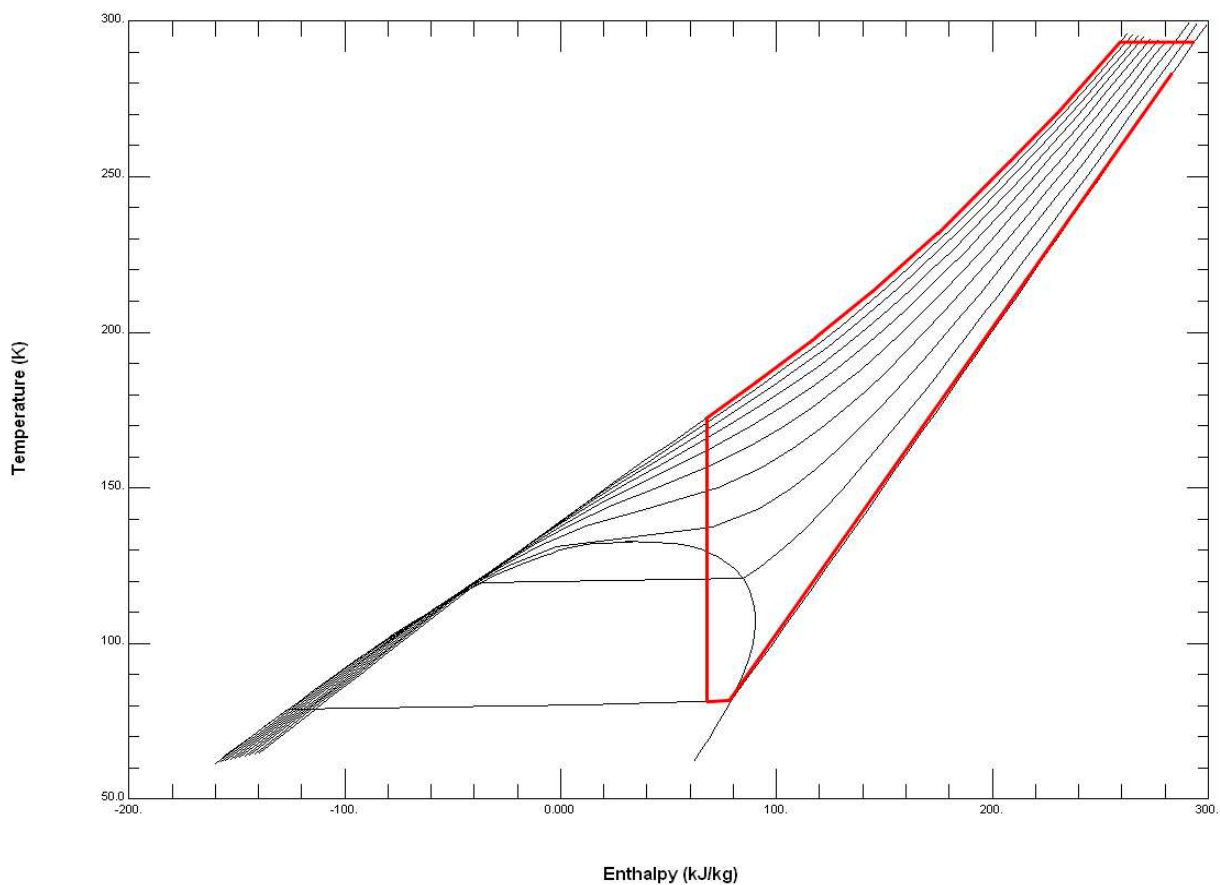
Bei Vergrößerung des internen Wärmeübertragers kann mehr Wärme übertragen werden, was zu einer Absenkung der Temperatur und damit der Enthalpie der Luft vor der Drossel führt. Nach der isenthalpen Drosselung liegt der Wert von  $h_3$  nun näher am Wert von  $h'$  und damit ist das  $x$  kleiner geworden. Dies wiederum ist gleichbedeutend mit einer erhöhten Ausbeute an flüssiger Luft.

f)

Die Differenz zwischen aufgenommener Antriebsleistung und abgegebenem Wärmestrom ist identisch zur Differenz der Enthalpien zwischen Umgebungsluft und verdichteter Luft multipliziert mit dem Massenstrom.

$$W_t - Q = \dot{m} * (h_{\text{Umgebung}} - h_1) \text{ mit } h_{\text{Umgebung}} = c_{p\text{Luft}} * \Delta T + h_0$$

$$= 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (293,42 - 259,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1,701 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \approx 1,7 \text{ kW}$$



Kurzfrage: Wie verändert sich der Isentropenexponent  $\kappa$  qualitativ, wenn Wasserstoff von Raumtemperatur auf  $1500^\circ\text{C}$  erhitzt wird? Steigt er? Sinkt er?

(Diese Kurzfrage hat keinen Bezug zu feuchter Luft. Für eine korrekte und begründete Antwort erhalten Sie 2 Punkte)

In einem Schlafzimmer, das luftdicht verschlossen und adiabatisch ist, gibt ein Schlafender insgesamt einen Wärmestrom  $\dot{Q} = 45\text{ W}$  ab und schwitzt während des Schlafs  $50\text{ g}$  flüssiges Wasser pro Stunde aus, das  $37^\circ\text{C}$  warm ist. Dieses Wasser verdunstet kurz nachdem es den Körper verlassen hat. Für den Verdunstungsvorgang wird ein Teil des oben genannten Wärmestroms  $\dot{Q}$  benötigt.

Zu Beginn herrschen in dem Raum  $1\text{ bar}$  Luftdruck,  $20^\circ\text{C}$  und eine relative Feuchte von  $40\%$ . Der Raum enthält  $25\text{ kg}$  trockene Luft.

- a) Wie hoch ist die Wasserbeladung  $x$  der Luft zu Beginn?
- b) Wie hoch ist die Wasserbeladung der Luft nach 6 Stunden Schlaf?
- c) Bestimmen Sie analytisch (NICHT grafisch) die Temperatur und die relative Feuchte im Schlafzimmer nach 6 Stunden Schlaf. Überlegen Sie sich dazu zunächst, wie groß die Enthalpie der feuchten Luft zu Beginn und am Ende der Nacht ist. Skizzieren Sie die Änderung der feuchten Luft qualitativ in einem selbst gezeichneten schiefwinkligen  $h$ - $x$ -Diagramm. Tragen Sie dort die zusätzliche Wasserbeladung und die vom Schlafenden abgegebene Wärme ein.

Unter c) genügt eine einfache Skizze des  $h$ - $x$ -Diagramms. Verwenden Sie nicht zu viel Zeit auf das Diagramm. Es sollte erkennbar sein, wie Sie vom Ursprungszustand zum Zustand nach 6 Stunden Schlaf gelangen.

Gehen Sie in allen Aufgabenteilen vereinfachend davon aus, dass sich der Druck im Schlafzimmer nicht verändert und konstant  $1\text{ bar}$  beträgt. Das bedeutet, dass der Raum sein Volumen verändern kann. Für die Rechnung ist allerdings nur relevant, dass der Druck konstant bleibt.

KF: Der Isentropenexponent lässt sich über  $\frac{c_p}{c_v}$  berechnen. Die Differenz zwischen  $c_p$  und  $c_v$  ist konstant:  $c_p - c_v = R$ . Aufgrund der Freischaltung der vibratorischen Freiheitsgrade bei der genannten Temperaturerhöhung, steigen die Werte für  $c_p$  und  $c_v$ . Bei steigenden Werten aber gleicher Differenz wird  $\frac{c_p}{c_v}$  und damit der Isentropenexponent kleiner.

a)  $p_D = 0,4 * p_s$  und  $p_s(20^\circ C) = 2340 \frac{N}{m^2} \Rightarrow p_D = 936 \frac{N}{m^2}$

$x = 0,622 * \frac{p_D}{p_U - p_D} = 0,00588$

b) In 6 Stunden werden 0,3 kg Wasser abgegeben (6h\*0,05 kg/h), die sich auf die 25kg Raumluft verteilen. Die Wasserbeladung der Raumluft steigt also um  $\frac{0,3 kg}{25 kg} = 0,012$ . Damit ist die Wasserbeladung nach den 6 Stunden also  $0,00588 + 0,012 = 0,0179$ .

c) Spezifische Enthalpie der feuchten Luft zu Beginn: 35038 J. Absolute Enthalpie der gesamten Raumluft:  $35038 \text{ J/kg} * 25 \text{ kg} = 875950 \text{ J}$

Wärmezufuhr in den 6 Stunden: 972000 J

Zugeführte Enthalpie des Schwitzwassers:  $0,3 \text{ kg} * 37^\circ C * 4182 \text{ J/kgK} = 46420 \text{ J}$

Gesamtenthalpie im Raum nach 6 Stunden:  $875950 \text{ J} + 972000 \text{ J} + 46420 \text{ J} = 1894370 \text{ J}$

spezifische Enthalpie der feuchten Luft nach 6 Stunden: 75775 J/kg

Bei bekannter spezifischer Enthalpie kann aus der Gleichung zur Bestimmung der spezifischen Enthalpie feuchter Luft bei bekannter Wasserbeladung (siehe b) die Temperatur der feuchten ermittelt werden:  $T = 29,87^\circ C$ .

Aus der bekannten Wasserbeladung kann  $p_D = 2793 \frac{N}{m^2}$  bestimmt werden.

Aus  $p_D$  und  $p_s(29,87) = 4213 \frac{N}{m^2}$  kann die relative Luftfeuchte  $\varphi = 66,3\%$  bestimmt werden.

Skizze: Wassereinspritzung von flüssigem Wasser mit  $37^\circ C$  (schräg nach rechts unten) und dann Wärmezufuhr (senkrecht nach oben).