



# Thermodynamik I HS 17

## Prüfung

27. Januar 2018  
9:00 – 11:00 Uhr

Name: \_\_\_\_\_ Vorname: \_\_\_\_\_

Legi-Nr.: \_\_\_\_\_

Anzahl abgegebener Blätter: \_\_\_\_\_

### Hinweise:

- Verwenden Sie für jede Aufgabe ein neues Blatt.
- Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.
- Legen Sie nach der Prüfung alle Lösungen in die Aufgabenstellung.
- Schreiben Sie NICHT mit Bleistift oder roten und grünen Farben.
- Schreiben Sie jeden Zwischenschritt und jedes Zwischenresultat auf.
- Runden Sie die Ergebnisse sinnvoll.
- Geben Sie bei Tabellenwerten immer an, aus welcher Tabelle sie stammen.
- Mehrfache Lösungsvarianten werden nicht bewertet.
- Unmotivierte Lösungsversuche bekommen keine Punkte.

Erlaubte Hilfsmittel: 4 A4-Blätter eigene Zusammenfassung, Taschenrechner (gemäss Einschränkungen), Tabellen, Zusammenfassung LTNT, keine Musterlösungen

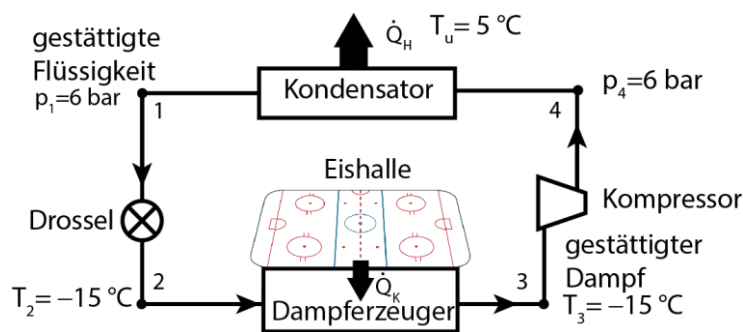
Aufg.	Punkte	Max.	1. Korrektur	2. Korrektur
1		23		
2		20		
3		15		
4		21		
Total		79		

**Aufgabe 1 – Eishalle** (~ 30% der Punkte)

Um das Eisfeld in einer Eishalle zu kühlen, wurde ein stationär arbeitender Kühlzyklus ausgelegt. Damit das Eisfeld nicht schmilzt, wird eine Kühlleistung von  $\dot{Q}_k = 10 \text{ kW}$  durch die Kühlflüssigkeit R134a abgeführt und an die Umgebung bei einer Temperatur  $T_u = 5 \text{ °C}$  abgegeben. Der Kühlzyklus besteht aus den folgenden Prozessschritten:

- 1-2: Isenthalpe Expansion
- 2-3: Isobare Wärmeaufnahme vom Eisfeld bis zu  $x_3 = 1$
- 3-4: Adiabate Kompression mit isentropen Wirkungsgrad  $\eta_c = 0.9$
- 4-1: Isobare Wärmeabgabe an die Umgebung bei  $p_4 = 6 \text{ bar}$  bis  $x_1 = 0$

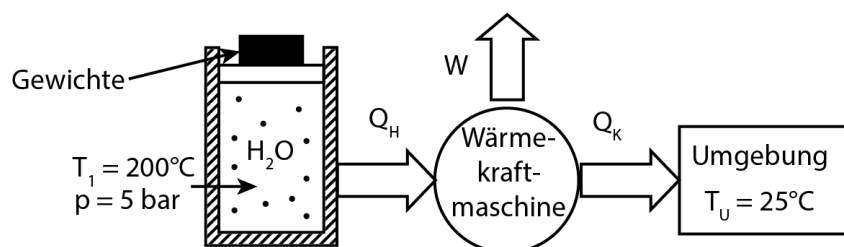
Entnehmen Sie der Skizze weitere Angaben zu den Zuständen.



- a) (7 Punkte) Geben Sie die massenspezifische Enthalpie in allen Zuständen an.
- b) (2 Punkte) Berechnen Sie den benötigten Massenfluss der Kühlflüssigkeit.
- c) (3 Punkte) Berechnen Sie die Leistungszahl des Kühlzyklus.
- d) (5 Punkte) Skizzieren Sie den Prozess qualitativ in einem T-s Diagramm.

Sie schlagen einen neuen Kühlprozess vor, welcher reversibel verläuft und dieselbe Kühlleistung mit demselben Arbeitsaufwand erbringt (verwenden Sie  $\dot{W}_{tot} = 1800 \text{ W}$  falls Sie Teilaufgaben a) – d) nicht gelöst haben).

- e) (6 Punkte) Kann dieser Prozess an einem warmen Frühlingstag ( $T_u = 25 \text{ °C}$ ) die Temperatur des Eises unter  $T_{Eis} = 0 \text{ °C}$  halten?

**Aufgabe 2 – Wärmekraftmaschine** (~ 25% der Punkte)

Eine Wärmekraftmaschine wird mit Wärme von einem Zylinder gespeist, der mit 5 kg Wasserdampf (Anfangszustand  $T_1 = 200 \text{ °C}$ ) gefüllt ist und durch einen Kolben mit Gewichten bei einem konstanten Druck von  $p = 5 \text{ bar}$  gehalten wird. Dabei gibt die Wärmekraftmaschine Wärme an die Umgebung ( $T_u = 25 \text{ °C}$ ) ab. Vernachlässigen Sie die Reibung des Kolbens sowie die Wärmekapazität von Zylinder und Kolben.

a) (10 Punkte) Bestimmen Sie die maximale Wärme  $Q_H$ , welche dem Zylinder entnommen werden kann, sowie die Temperatur  $T_2$  und spezifische innere Energie  $u_2$  im Endzustand.

b) (8 Punkte) Bestimmen Sie die maximale Arbeit  $W$  welche von der Wärmekraftmaschine geleistet werden kann. Hinweis: Wenden Sie eine Entropiebilanz an.

Das Wasser hat sich direkt (ohne Maschine) auf die Umgebungstemperatur  $T_U$  abgekühlt und sämtliche Wärme wurde an die Umgebung abgegeben.

c) (2 Punkte) Bestimmen Sie die bei diesem Abkühlungsprozess erzeugte Entropie.

### Aufgabe 3 – Erdgas Verflüssigung (~ 20% der Punkte)

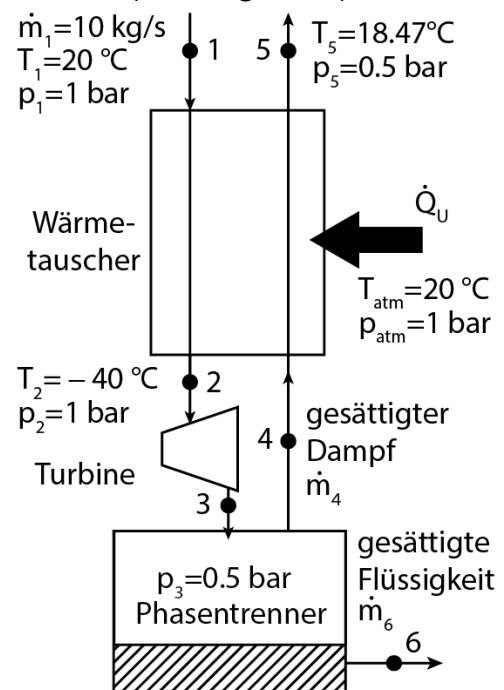
Eine Anlage zur Verflüssigung von Propan besteht aus einem Wärmetauscher, einer adiabat-reversiblen Turbine und einem Phasen-trenner. Dampfförmiges Propan wird in den Wärmetauscher eingespeist ( $\dot{m}_1 = 10 \text{ kg/s}$ ) und im Phasentrenner wird flüssiges von dampfförmigen Propan getrennt. Das dampfförmige Propan wird zur Vorkühlung des eintretenden Propans im Wärmetauscher verwendet. Da der Wärmetauscher nicht perfekt isoliert ist, findet ein Wärmeübergang von der Umgebung statt. Entnehmen Sie weitere Informationen der Skizze.

a) (4 Punkte) Bestimmen Sie die massenspezifische Enthalpie und massenspezifische Entropie in Zustand 1, 2, 4 und 5.

b) (5 Punkte) Bestimmen Sie den Wärmestrom  $\dot{Q}_U$  von der Umgebung an den Wärmetauscher.

c) (4 Punkte) Geben Sie die Änderung der Exergieströme  $\dot{E}_{x,2} - \dot{E}_{x,1}$  und  $\dot{E}_{x,5} - \dot{E}_{x,4}$  des Propans im Wärmetauscher an.

d) (2 Punkte) Berechnen Sie die Exergieverlustrate im Wärmetauscher.



Propan im Sättigungszustand:  $p_s = 0.5 \text{ bar}$ ,  $T_s = -56.93 \text{ °C}$

$h' = h_f$ [kJ/kg]	-37.6
$h'' = h_g$ [kJ/kg]	402.9

$s' = s_f$ [kJ/(kgK)]	-0.167
$s'' = s_g$ [kJ/(kgK)]	1.871

Propan bei  $p = 0.5 \text{ bar}$

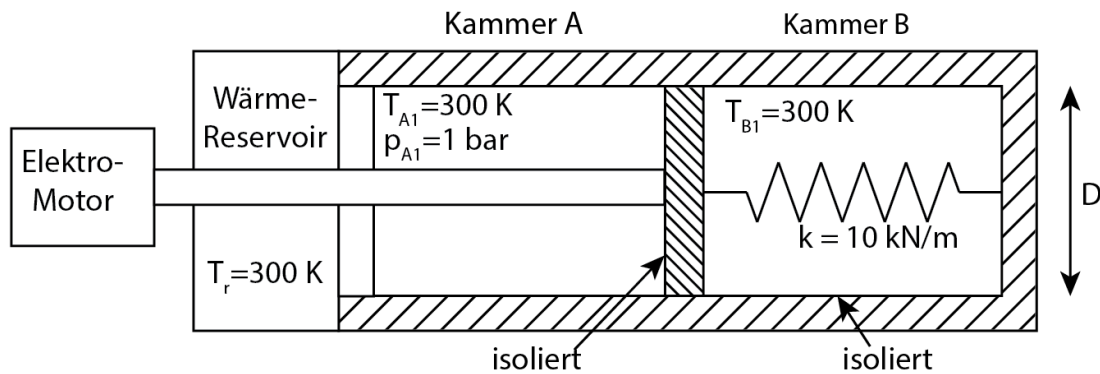
T [°C]	-40	-30	-20	-10	0	10	20
h [kJ/kg]	426.6	441.1	455.9	471.1	486.7	502.7	519.1
s [kJ/(kgK)]	1.976	2.037	2.096	2.155	2.213	2.271	2.328

Propan bei  $p = 1 \text{ bar}$

T [°C]	-40	-30	-20	-10	0	10	20
h [kJ/kg]	423.8	438.6	453.7	469.1	484.8	501	517.6
s [kJ/(kgK)]	1.837	1.899	1.96	2.019	2.078	2.136	2.194

**Aufgabe 4 – Zylinder-Kolben System** (~ 25% der Punkte)

In einem mit Luft (ideales Gas,  $R = 287 \text{ J}/(\text{kgK})$ ,  $c_v = 716 \text{ J}/(\text{kgK})$ ) gefüllten, geschlossenen Zylinder (Durchmesser  $D = 0.5 \text{ m}$ ) bewegt sich reibungsfrei ein Kolben, welcher den Zylinder in Kammer A und Kammer B aufteilt. Der Kolben ist mit einem Elektromotor verbunden und lässt weder Massenaustausch noch Wärmeübergang zwischen den beiden Kammern zu. Der Kolben und die Verbindung zum Elektromotor können als masselos angenommen werden, mit einer vernachlässigbaren Wärmekapazität. Eine Feder ( $k = 10 \text{ kN/m}$ ) ist mit dem Kolben und der Zylinderwand verbunden und ist in Zustand 1 unbelastet. In Zustand 1 sind die Kammern A und B gleich gross, d.h.  $V_{A1} = V_{B1}$ , und enthalten  $m_A = m_B = 1 \text{ kg}$  Luft. Die Kammer A ist in ständigem Wärmeaustausch mit einem Wärmereservoir welches eine Temperatur  $T_r = 300 \text{ K}$  besitzt. Abgesehen davon ist der Zylinder nach aussen perfekt isoliert. Von Zustand 1 zu 2 wird der Kolben vom Elektromotor nach links bewegt, sodass  $V_{A2} = V_{A1} / 2$ ; dabei leistet der Elektromotor  $|W_{12}| = 72 \text{ kJ}$  Arbeit. Hinweis: Eine um  $\Delta x$  ausgelenkte Feder nimmt eine Energie von  $\Delta E = \Delta x^2 k / 2$  auf.



- (3 Punkte) Berechnen Sie  $V_{A1}$  sowie den Druck  $p_{B1}$  in Zustand 1.
- (3 Punkte) Skizzieren Sie die Zustandsänderung von 1 nach 2 in Kammer A und Kammer B im einem p-v Diagramm. (Beide in nur einem Diagramm)
- (4 Punkte) Bestimmen Sie für Kammer A die Temperatur  $T_{A2}$  und den Druck  $p_{A2}$  in Zustand 2 und die Arbeit  $W_{A1-A2}$ .
- (8 Punkte) Bestimmen Sie für Kammer B die Temperatur  $T_{B2}$  und den Druck  $p_{B2}$  in Zustand 2 und die Arbeit  $W_{B1-B2}$ .
- (3 Punkte) Berechnen Sie die Entropieproduktion  $S_{erz,B}$  der Luft in Kammer B für die Zustandsänderung von 1 nach 2.