

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: *Zustandsänderungen*

15 von 50 Punkten

Kurzfrage: Wie unterscheiden sich ein Otto- und ein Stirling-Motor grundsätzlich in Bezug auf den verwendbaren Brennstoff?

In einem zu untersuchenden rechtslaufenden, abgewandelten Carnotprozess durchläuft Luft (ein ideales Gas) abgesehen von der adiabaten Entspannung alle Zustandsänderungen in idealer Weise: Nach der adiabaten Entspannung, die real mit einem Isentropen-Wirkungsgrad von $\eta_{ST} = 0,9$ verläuft, liegt die Luft bei einer Temperatur von $T_4 = 350\text{ K}$ vor.

Der höchste in dem Kreisprozess auftretende Druck beträgt $p = 10\text{ bar}$. Der niedrigste auftretende Druck beträgt 2 bar . Während der adiabaten Verdichtung verdoppelt sich der Druck.

- Zeichnen Sie den Kreisprozess in ein T-S-Diagramm und tragen Sie alle bekannten Größen ein.
- Bestimmen Sie alle unbekannt Drücke und Temperaturen an den vier Eckpunkten des Prozesses.
- Wie groß ist die spezifische Wärme, die unter isothermen Bedingungen von dem Prozess abgegeben wird? Wie kann diese Wärme im unter a) gezeichneten Diagramm dargestellt werden?
- Zeichnen Sie die technische Verlustarbeit der Turbine in das unter a) erstellte T-S-Diagramm ein.

KF: Da Stirlingmotoren eine äußere Verbrennung haben, kann hier im Gegensatz zum Otto-Prozess jeder beliebige Brennstoff verwendet werden.

a) Siehe Skript. (Carnot: 2 isentrope und 2 isotherme Zustandsänderungen) Die Entspannung ist allerdings nicht senkrecht, da sie nicht isentrop ist, sondern geht leicht nach rechts, also in Richtung höherer Entropie.

b) $T_1 = 350\text{K}$, $T_4 = 350\text{K}$, $p_2 = 10\text{bar}$ und $p_4 = 2\text{ bar}$ ergeben sich direkt aus der Aufgabenstellung.

$p_1=5\text{ bar}$ lässt sich der Aussage entnehmen, dass sich der Druck bei der adiabaten Verdichtung verdoppelt.

$T_2 = 426,65\text{ K}$ kann aus T_1 , p_1 , p_2 und $\kappa = 1,4$ (Luft) berechnet werden, da es sich um eine adiabatisch/isentrope ZÄ eines idealen Gases handelt.

$T_3 = T_2 = 426,65$, da es sich um eine isotherme ZÄ von 2 nach 3 handelt.

Aus T_3 , T_4 und dem Wirkungsgrad der Expansionsmaschine lässt sich $T_4^* = 341,48$ berechnen.

Aus T_3 , T_4^* und p_4 lässt sich über die Gleichung für adiabatisch/isentrope ZÄ idealer Gase $p_3 = 4,36\text{ bar}$ berechnen.

c) Über $q_{41} = p_4 v_4 \ln\left(\frac{p_4}{p_1}\right)$ mit $v_4 = R_{Luft} T_4 / p_4 = 0,502\text{m}^3/\text{kg}$ lässt sich die abgegebene Wärme pro kg ermitteln: $q_{41} = 92,0\text{ kJ/kg}$

Die zu kennzeichnende Fläche ist die Fläche unter der Isothermen von 4 nach 1.

d) Die zu kennzeichnende Fläche ist die Fläche unter der Isobaren von 4* nach 4.

Kurzfrage: Darf das Kältemittel R134a zurzeit innerhalb der europäischen Union in Klimaanlage von neuen PKW-Typen eingesetzt werden? Denken Sie daran, Ihre Antwort zu begründen.

Es wird das 8-atomige Kältemittel R134a (CH_2FCF_3) mit einer Molmasse $M = 102,03 \frac{g}{mol}$ betrachtet, das sich in dieser Aufgabe hinreichend wie ein ideales Gas verhalten soll. Dieses weltweit eingesetzte Kältemittel liegt zunächst in einer Flasche bei einem Druck $p_1 = 3 \text{ bar}$ und einer Temperatur $T_1 = 350 \text{ K}$ vor (Zustand 1). Die Umgebung hat einen Druck $p_U = 1 \text{ bar}$ und eine Temperatur $T_U = 300 \text{ K}$.

- a) Welche Zustandsänderungen müssten durchlaufen werden, damit das Gas (einmalig) die maximale Arbeit leistet? Bestimmen Sie Druck und Temperatur der Zwischenzustände zwischen den verschiedenen Zustandsänderungen.
- b) Zeichnen Sie die Zustandsänderungen qualitativ korrekt in ein p-V-Diagramm.
- c) Zeichnen Sie das Diagramm ein zweites Mal (Eine Kopie Ihrer Antwort wie unter b) und erklären Sie mithilfe dieses Diagramms und eines kurzen Texts, welche Fläche in dem Diagramm der maximal gewinnbaren Arbeit entspricht.
Hinweis: Kennzeichnen Sie dabei in dem Diagramm die einzelnen auftretenden Arbeiten. Verwenden Sie dafür verschiedene Farben oder Schraffuren.
- d) Berechnen Sie die Differenz der spezifischen inneren Energie u des R134a zwischen den beiden Zuständen 1 und U?
- e) Bestimmen Sie die maximale Arbeit, die 1 kg des R134a im Zustand 1 maximal leisten kann.

KF: Seit dem 01.01.2011 dürfen in neuen PKW Typen in der EU keine Kältemittel mit einem GWP von mehr als 150 verwendet werden. Also auch kein R134a mit einem GWP von 1430.

a) Adiabatisch/Isentrop bis zur Umgebungstemperatur und dann isotherm bis zum Umgebungsdruck. Der Zwischenzustand hat damit eine Temperatur $T = T_u = 300\text{K}$. Der Druck lässt sich über die Beziehung adiabatisch/isentrope ZÄ idealer Gase aus p_1 , T_1 , T_u und $k=1,33$ (siehe Teil d) zu $p=1,62$ bar bestimmen.

b) Von Punkt 1 steil nach rechts unten zum Zwischenzustand und dann weniger steil nach rechts unten zum Umgebungszustand.

c) Fläche unter der Kurve von Zustand 1 bis Zustand U ist die Arbeit, die das eingeschlossene R134a leisten kann. Das Rechteck, dessen eine Seite die Länge p_u und dessen andere Seite die Länge $v_u - v_1$ hat, beschreibt die Arbeit, die an der Umgebung geleistet werden muss. Die Differenz ist die maximal gewinnbare Arbeit.

d) Zunächst wird c_v benötigt. Dies kann aus folgender Überlegung gewonnen werden: Für das Molekül existieren 3 translatorische Freiheitsgrade und 3 rotatorische Freiheitsgrade. Bei den moderaten Temperaturen kann davon ausgegangen werden, dass die vibratorischen Freiheitsgrade noch nicht effektiv sind.

Mit $R_i = R/M = 0,0815 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ ergibt sich: $c_v = 244,5 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

Aus $c_p - c_v = R_i$ und $k = c_p/c_v$ ergibt sich: $c_p = 325,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ und $k = 1,333$

Nun kann $u_1 - u_u = c_v \Delta T = 12,22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

e) Die Exergie eines geschlossenen Systems, das keine potentielle oder kinetische Energie enthält, berechnet sich wie folgt:

$$-W_{ex} = U_1 - U_u + p_u(V_1 - V_u) - T_u(S_1 - S_u)$$

Weiterhin gilt für ein ideales Gas:

$$1) V = \frac{mR_i T}{p} = -0,1494 \text{ m}^3$$

$$2) s_2 - s_1 = R_i \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = -39,28 \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$$

Daraus ergibt sich:

$$-W_{ex} = 9,07 \text{ kJ}$$

Kurzfrage: Warum handelt es sich bei allen Automotoren immer um rechtslaufende und niemals um linkslaufende Kreisprozesse?

Bearbeiten Sie zunächst die folgenden drei, voneinander unabhängigen, kurzen Aufgaben:

- a) Im AudiMax beträgt die Temperatur der Raumluft 20°C . Die Glasscheiben an der Nordseite haben auf ihrer Innenseite eine Temperatur von 15°C . Ab welcher relativen Luftfeuchte im Raum bildet sich Kondenswasser auf der Scheibe?
Wie hoch ist dann der Wassergehalt x der Luft mitten im Raum und wie hoch ist der Wassergehalt direkt an der Scheibe?
- b) Gegeben sei eine Gleichung für die innere Energie $U = U(S, V)$ in Abhängigkeit von der Entropie S und dem Volumen V .
Wie kann mithilfe dieser Gleichung eine Beziehung $F = F(S, V)$ für die freie Energie F in Abhängigkeit von S und V gefunden werden?
- c) In einem Kraftwerk stellt die Brennkammer einen Wärmestrom $\dot{Q} = 800 \text{ MW}$ bei einer Temperatur $T = 1000 \text{ K}$ bereit. Die Umgebung hat eine Temperatur $T_U = 20^{\circ}\text{C}$. Der Generator, der die von der Turbine des Wärmekraftprozesses bereitgestellte mechanische Wellenleistung $\dot{W}_{t,mech}$ in elektrischen Strom umwandelt, hat einen Wirkungsgrad von 90%.
Welche elektrische Leistung $\dot{W}_{t,el}$ kann das Kraftwerk maximal bereitstellen?

In den folgenden beiden Aufgabenteilen wird Wasser bei einem Druck von $p_1 = 10 \text{ bar}$ betrachtet. Die spezifische Enthalpie des Wassers beträgt $h_1 = 758 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

- d1) In welchem Aggregatzustand befindet sich das Wasser?
- d2) Das Wasser wird vom beschriebenen Zustand aus gedrosselt und hat nach dem Passieren der Drossel eine Temperatur von $T_2 = 373 \text{ K}$. Bestimmen Sie das spezifische Volumen v_2 nach der Drosselung.

KF: Ein Motor soll Arbeit bereitstellen. Nur rechtslaufende Prozesse leisten Arbeit. Links-
laufende Prozesse (Kälte bzw. WP Prozesse) konsumieren Arbeit.

a) $p_s(20^\circ\text{C}) = 0,0234\text{ bar}$ und $p_s(15^\circ\text{C}) = 0,017\text{ bar}$. Ein Beschlag bei 15°C bedeutet,
dass ein Dampfdruck von $p_D = p_s(15^\circ\text{C}) = 0,017\text{ bar}$ vorliegt.

Bezogen auf den Sättigungsdampfdruck im Raum bei 20°C sind das $\varphi = \frac{p_s(15^\circ\text{C})}{p_s(20^\circ\text{C})} = 72,6\%$

Die Wasserbeladung ergibt sich zu $x = 0,622 \frac{p_D}{1-p_D} = 0,0108$

b) $F = U - TS$

U ist bereits in Abhängigkeit von S und V bekannt. Es muss also nur eine Abhängigkeit
T (S, V) gefunden werden.

Es gilt: $\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T$

Also: $F = U(S, V) - S\left(\frac{\partial U(S, V)}{\partial S}\right)_V = F(S, V)$

c) Das Kraftwerk kann maximal den Carnotwirkungsgrad beim Umwandeln von Wärme
in Arbeit leisten: $\eta_C = 1 - \frac{293,15\text{K}}{1000\text{K}} = 0,707$.

Um auch noch die wirkungsgradbehafte, reale Umwandlung von mechanischer Arbeit
in elektrische Arbeit zu berücksichtigen, müssen die beiden Wirkungsgrade multipliziert
werden:

$$\eta_{ges} = 0,707 * 0,9 = 63,6\%$$

$$W_{el} = \dot{Q} * \eta_{ges} = 508,9\text{ MW}$$

d1) Da $h_1 < h'(10\text{ bar})$ muss das Wasser flüssig sein.

d2) Es gilt $h_1 = h_2$. Zustand 2 befindet sich im ND-Gebiet bei 273K , also bei 1 bar . Mit
den Werten aus der Dampftafel ergibt sich ein Dampfgehalt von $x = 0,1509$.

Mit diesem Dampfgehalt ergibt sich $v_2 = 0,275\text{ m}^3/\text{kg}$