

## Klausur zur Vorlesung Thermodynamik 1

Für alle Aufgaben gilt: Der Rechengang muss erkennbar sein!  
Hilfsmittel sind zugelassen, die Bearbeitungszeit beträgt 120 Minuten.

### Aufgabe 1: *Kernkraftwerk 15 von 60 Punkten*

Ein Kernkraftwerk nach Abbildung 1 liefert eine Leistung von  $P = -1200 \text{ MW}$ . Die Temperatur im Reaktor hat einen Wert von  $\vartheta_R = 350^\circ\text{C}$ . Der thermische Wirkungsgrad des realen Kraftwerkprozesses erreicht 60% des theoretischen Carnot-Wirkungsgrades.

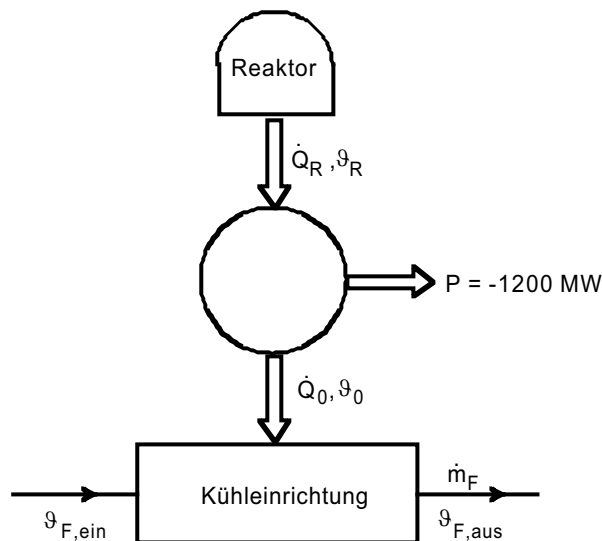


Abbildung 1: *Kernkraftwerk mit Kühleinrichtung*

Im Folgenden sollen in den Teilaufgaben a), b) und c) verschiedene Kühleinrichtungen untersucht werden. Dabei muss zwischen dem unteren Temperaturniveau  $\vartheta_0$  des eigentlichen Kraftwerkprozesses und der Kühlfluidtemperatur  $\vartheta_F$  in der Kühleinrichtung unterschieden werden. Für alle drei Systeme

soll das untere Temperaturniveau  $\vartheta_0$  des Kraftwerkprozesses einen konstanten Wert besitzen, der gleich der maximalen Kühlfluidtemperatur  $\vartheta_{F,aus}$  im Kühlsystem gewählt wird. Es ist zu beachten, dass der Kraftwerkswirkungsgrad und damit die zu- und abgeführten Wärmeströme bei konstanter Kraftwerksleistung  $P = -1200 \text{ MW}$  von  $\vartheta_0$  und damit von der Art des Kühlsystems abhängen!

Fortsetzung siehe nächstes Blatt

## Fortsetzung von Aufgabe 1: Kernkraftwerk

### Hinweise:

**Die Aufgabenteile a) bis d) sind unabhängig voneinander lösbar. Für die Lösung wird die Dampftafel des Skriptes benötigt.**

- a) Zunächst soll ein mit Umgebungsluft gekühltes Kraftwerk untersucht werden. Die Abwärme wird dabei an die Umgebungsluft mit der spezifischen isobaren Wärmekapazität von  $c_p = 1,01 \frac{kJ}{kgK}$  bei  $\vartheta_{F, \text{ein}} = 30^\circ C$  abgegeben. Die Umgebungsluft wird in der Kühleinrichtung isobar um  $20 K$  aufgeheizt. Wie groß ist die abzugebende Wärmeleistung  $\dot{Q}_0$  und wie groß ist der Luftmassenstrom?

In b) und c) wird die Kühlung jeweils mit dem Wasser eines benachbarten Flusses durchgeführt, der eine Wassertemperatur von  $\vartheta_{F, \text{ein}} = 10^\circ C$  und eine spezifische Wärmekapazität von  $c_{H_2O} = 4,18 \frac{kJ}{kgK}$  besitzt:

- b) Wie groß ist die abzuführende Wärmeleistung  $\dot{Q}_0$ , wenn das Flusswasser in der Kühleinrichtung um  $3 K$  isobar aufgeheizt wird? Welcher Wassermassenstrom wird benötigt?
- c) Welche abzuführende Wärmeleistung  $\dot{Q}_0$  ergibt sich, wenn das Flusswasser zunächst auf Siedetemperatur isobar aufgeheizt und anschließend bei einem Umgebungsdruck von  $p_u = 1,0133 \text{ bar}$  vollständig verdampft wird? Welcher Wassermassenstrom muss in diesem Fall bereitgestellt werden?
- d) Berechnen Sie die Entropieproduktion für die Kühleinrichtung aus Aufgabenteil a).

**Falls a) nicht gelöst wurde, rechnen sie mit folgenden Ersatzergebnissen:  $\dot{Q}_0 = -3000 \text{ MW}$  und  $\vartheta_0 = 55^\circ C$**

Aufgabe 2: *idealisierten Verbrennungsmotor* 15 von 60 Punkten

Das Arbeitsgas eines Verbrennungsmotors durchläuft einen idealisierten Kreisprozess, in dessen Kolben folgende vier Zustandsänderungen durchlaufen werden:

- 1 → 2 adiabatisch isentrope Verdichtung
- 2 → 3 polytrope Wärmezufuhr mit  $n=8$
- 3 → 4 isotherme Expansion
- 4 → 1 isochore Wärmeabfuhr

Als Arbeitsgas werde ein ideales Gas mit  $M = 32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$  und  $\gamma = 1,4$  verwendet. Das Gas werde ausgehend von einer Temperatur  $\vartheta_1 = 30^\circ\text{C}$ , einem Druck von  $p_1 = 1\text{bar}$  und einer Dichte von  $\rho_1 = 1,270 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  mit einem Verdichtungsverhältnis von  $\epsilon = \frac{V_1}{V_2} = 12$  adiabatisch isentrop verdichtet. Die massenspezifische Wärmemenge  $q_{23}$ , die dem Prozess von 2 nach 3 zugeführt wird beträgt  $q_{23} = 800 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ .

Hinweis:

**Die Aufgabenteile a) bis e) sind unabhängig voneinander lösbar.**

- a) Skizzieren Sie den Prozess im  $p - v$ - und  $T - S$ - Diagramm.
- b) Berechnen Sie die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen  $c_v$  und bei konstantem Druck  $c_p$ .  
(Ersatzergebnis:  $c_v = 0,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ )
- c) Berechnen Sie Druck und Temperatur nach der isentropen Verdichtung von 1 → 2.  
(Ersatzergebnisse:  $p_2 = 33\text{bar}$  und  $T_2 = 820\text{K}$ )
- d) Welche maximalen Werte nehmen Temperatur und Druck im Prozess an?  
Hinweis: Verwenden Sie für die bei der polytropen Zustandsänderung zugeführten spezifischen Wärmemenge folgende Beziehung:  $q_{ab} = c_v \frac{n-\gamma}{n-1} (T_b - T_a)$   
(Ersatzergebnisse:  $p_3 = 100\text{bar}$  und  $T_3 = 2100\text{K}$ )
- e) Bei welchen Zustandsänderungen wird dem Prozess Wärme zu- oder abgeführt?  
Berechnen Sie die spezifische Wärmemenge, die vom Prozess abgegeben wird.

Aufgabe 3: *Energiespeicherung mit Druckgas* 15 von 60 Punkten

Zur Energiespeicherung wird ein unterirdischer Druckgasbehälter mit einem Volumen von  $500.000 \text{ m}^3$  mit komprimiertem Methangas gefüllt. Dazu wird ein Turbokompressor verwendet, der das Gas kontinuierlich verdichtet und in den Druckgasbehälter fördert. Das zur Befüllung verwendete Gas werde einer Gasleitung entnommen, in der eine Temperatur von  $\vartheta_1 = 10^\circ\text{C}$  und ein Druck von  $p_1 = 6 \text{ bar}$  herrscht. Vor Beginn des Befüllungsvorganges soll das Volumen des Druckgasbehälters bereits mit Methan bei Leitungsdruck von  $p_1$  und entsprechend der Leitungstemperatur von  $\vartheta_1$  gefüllt sein. Methan ist als ideales Gas mit  $M = 16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$  und  $c_p = 2,22 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  aufzufassen. Nach der Befüllung soll in dem Behälter ein Druck von  $p_2 = 100 \text{ bar}$  herrschen.

Kompressor und Druckgasbehälter sind wärmeisoliert. Der Befüllungsvorgang soll adiabat und reversibel durchgeführt werden.

Hinweis:

**Die Aufgabenteile a) bis d) sind unabhängig voneinander lösbar.**

- a) Berechnen Sie die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen  $c_v$  und den Isentropenkoeffizienten  $\gamma$  von Methan.  
(Ersatzergebnis:  $c_v = 1,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  und  $\gamma = 1,2$ )
- b) Welche Temperatur  $T_2$  hat das Gas nach der Befüllung?  
Hinweis:  
Betrachten Sie das System im Zustand vor und nach der Befüllung.  
(Ersatzergebnis:  $T_2 = 550 \text{ K}$ )
- c) Welche Gasmasse befindet sich nach dem Füllvorgang im Behälter?  
(Ersatzergebnis:  $m_2 = 2 \cdot 10^7 \text{ kg}$ )
- d) Welche Arbeit muss für den Befüllungsvorgang aufgewendet werden?

Aufgabe 4: *atmosphärische Dampfmaschine nach Papin* 15 von 60  
Punkten

In einem Zylinder mit frei beweglichem massenlosem Kolben nach Abbildung 2 befindet sich eine konstante Masse Wasser im Zustand 1 bei Umgebungsdruck von  $p_u = 1,0133 \text{ bar}$  und einer Umgebungstemperatur von  $\vartheta_u = 20^\circ\text{C}$ . Zur Gewinnung von technischer Arbeit soll nun folgender Dampfkraftprozess durchlaufen werden:

Vom Zustand 1 nach Zustand 2 wird unter Wärmezufuhr das Wasser zunächst isobar bis zur Siedelinie erwärmt und anschließend isobar verdampft, bis der Zylinder vollständig mit Sattdampf gefüllt ist.

Von Zustand 2 nach Zustand 3 soll der Sattdampf adiabat isentrop bis auf Umgebungstemperatur expandiert werden.

Um den Ausgangszustand 1 wieder zu erreichen, wird abschließend eine isotherme Kompression von Zustand 3 nach Zustand 1 durchgeführt.

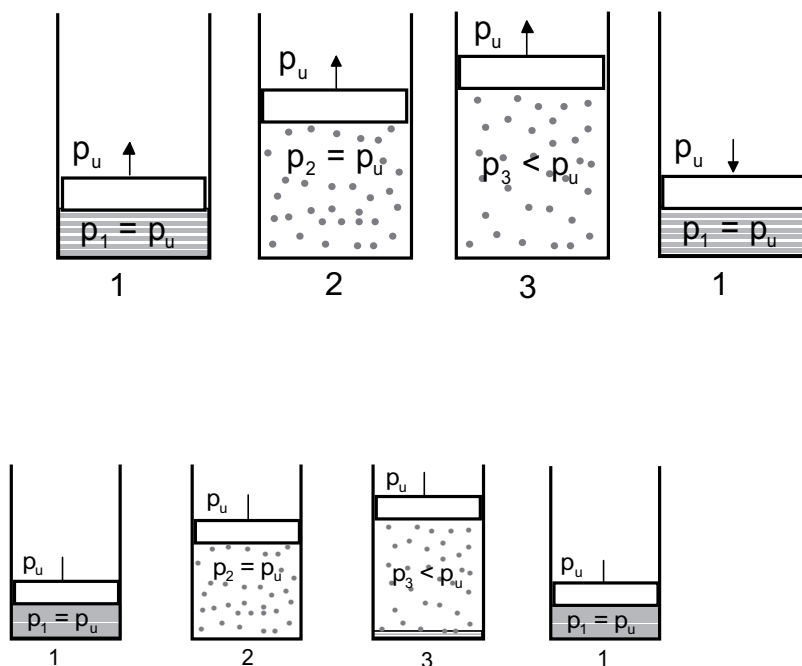


Abbildung 2: *Arbeitszylinder der atmosphärischen Dampfmaschine*

Wichtige Hinweise:

Verwenden Sie die Dampftafel des Skriptes.

Betrachten Sie das Wasser im Flüssigkeitsgebiet als inkompressibel und rech-

nen Sie mit einer konstanten temperatur- und druckunabhängigen spezifischen Wärmekapazität von  $c_{H_2O} = 4,18 \frac{kJ}{kgK}$ . Verwenden Sie für die Zustandsgrößen  $h_1$ ,  $v_1$  und  $s_1$  im Flüssigkeitsgebiet die der Temperatur entsprechenden Gleichgewichtswerte auf der Siedelinie.

Beachten Sie, dass der Kolben von außen mit Umgebungsdruck beaufschlagt ist und entsprechend Arbeit gegen den Umgebungsdruck geleistet werden muss.

- a) Zeichnen Sie den Dampfkraftprozess im  $T - s$ - und  $p - v$ -Diagramm.
- b) Berechnen Sie für alle 3 Zustandsänderungen die zu- bzw. abgeführten spezifischen Wärmen und Arbeiten unter der Voraussetzung, dass  $w_{t,12} = 0$  und  $w_{t,31} = -4760,11 \frac{kJ}{kg}$ .
- c) Berechnen Sie die spezifische Nutzarbeit des Prozesses.  
Welcher Wirkungsgrad  $\eta = \frac{|w_{nutz}|}{q_{zu}}$  ergibt sich?

## Lösungsblatt zu Klausur Thermodynamik 1

### Lösung zu Aufgabe 1: *Kernkraftwerk*

- a) Die Luft verlässt mit einer Temperatur von  $\vartheta_{F,aus} = 50^\circ C$  die Kühleinrichtung.

$$\begin{aligned}\eta_c &= 1 - \frac{T_0}{T_R} = 1 - \frac{323,15 K}{623,15 K} = 0,4814 \\ \eta &= 0,6 \cdot \eta_c = 0,2889 = \frac{|P|}{\dot{Q}_R} \\ \Rightarrow \dot{Q}_R &= \frac{1200 MW}{0,2889} = 4154,33 MW \\ \dot{Q}_0 &= -P - \dot{Q}_R = 1200 MW - 4154 MW = \underline{-2954 MW} \\ \dot{Q}_0 &= -\dot{Q}_F \\ \Rightarrow \dot{Q}_F &= 2954 MW = \dot{m}_F c_p \Delta T_F \\ \Rightarrow \dot{m}_F &= \frac{2954 MW}{1,01 \frac{kJ}{kgK} \cdot 20 K} = \underline{146254 \frac{kg}{s}}\end{aligned}$$

- b) Das Flusswasser verlässt mit einer Temperatur von  $\vartheta_{F,aus} = 13^\circ C$  die Kühleinrichtung.

$$\begin{aligned}\eta_c &= 1 - \frac{286,15 K}{623,15 K} = 0,5408 \\ \eta &= 0,6 \cdot \eta_c = 0,3245 \\ \dot{Q}_R &= \frac{1200 MW}{0,3245} = 3698,22 MW \\ \dot{Q}_0 &= 1200 MW - 3698 MW = \underline{-2498 MW} \\ \dot{m}_F &= \frac{2498 MW}{4,18 \frac{kJ}{kgK} \cdot 3 K} = \underline{199220 \frac{kg}{s}}\end{aligned}$$

- c) Die Siedetemperatur von Wasser bei  $p_u = 1,0133 bar$  beträgt nach der Dampftafel  $100^\circ C$ .

$$\eta = \frac{350 - 50}{623,15} \cdot 0,6 = 0,2407$$

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_R &= \frac{1200 \text{ MW}}{0,2407} = 4985,2 \text{ MW} \\
\dot{Q}_0 &= 1200 \text{ MW} - 4985 \text{ MW} = \underline{-3785 \text{ MW}} \\
&= -\dot{m}_F (h_{F,aus} - h_{F,ein}) \\
&= h'' - h' + \underbrace{h' - h_{F,ein}}_{c_p(\vartheta_0 - \vartheta_{F,ein})} \\
\dot{m}_F &= \frac{|\dot{Q}_0|}{c_p(\vartheta_0 - \vartheta_{F,ein}) + h'' - h'} = \underline{1438,28 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}
\end{aligned}$$

d) stationäre Entropiebilanz mit Kontrollraum um die Kühleinrichtung:

$$\begin{aligned}
0 &= \dot{m}_F \underbrace{(s_{F,ein} - s_{F,aus})}_{=c_{p,F} \ln \frac{T_{F,ein}}{T_{F,aus}}} + \frac{\dot{Q}_F}{T_0} + \dot{S}_{prod} \\
\Rightarrow \dot{S}_{prod} &= -\dot{m}_F c_{p,F} \ln \frac{T_{F,ein}}{T_{F,aus}} - \frac{\dot{Q}_F}{T_0} \\
&= -146254 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \ln \left( \frac{303,15 \text{ K}}{323,15 \text{ K}} \right) - \frac{2954,3 \text{ MW}}{323,15 \text{ K}} \\
&= \underline{294,99 \frac{\text{kW}}{\text{K}}}
\end{aligned}$$

Lösung zu Aufgabe 2: idealisierter Verbrennungsmotor

a)

- 1 → 2    isentrope Verdichtung mit  $n = \gamma$
- 2 → 3    polytrope Verbrennung mit  $n = 8$
- 3 → 4    isotherme Expansion unter Wärmezufuhr mit  $n = 1$
- 4 → 1    isochore Expansion mit  $n = \infty$

b)

$$c_v = \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{R}{M} = \frac{1}{0,4} \cdot \frac{8,3143 \frac{kJ}{kmolK}}{32 \frac{kg}{kmol}} = \underline{0,6496 \frac{kJ}{kgK}}$$

$$c_p = \frac{R}{M} + c_v = \underline{0,9094 \frac{kJ}{kgK}}$$

c)

- 1 → 2    isentrope Verdichtung mit  $n = \gamma$ :

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^\gamma = \epsilon^\gamma \Rightarrow p_2 = p_1 \cdot \epsilon^\gamma = \underline{32,423 \text{ bar}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \epsilon^{\gamma-1} = \underline{819,09 \text{ K}}$$

- d) 2 → 3    polytrope Verdichtung mit  $n = 8$ :

$$q_{23} = c_v \frac{n - \gamma}{n - 1} (T_3 - T_2)$$

$$\Rightarrow T_3 = q_{23} \cdot \frac{1}{c_v} \cdot \frac{n - 1}{n - \gamma} + T_2$$

$$= 800 \frac{kJ}{kg} \cdot \frac{1}{0,6496 \frac{kJ}{kgK}} \cdot \frac{8 - 1}{8 - 1,4} + 819,09 \text{ K} = \underline{2125,25 \text{ K}} \quad (\vartheta_3 = 1852,1^\circ\text{C})$$

$$\frac{p_3}{p_2} = \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$\Rightarrow p_3 = p_2 \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 32,423 \text{ bar} \left( \frac{2125,25 \text{ K}}{819,087 \text{ K}} \right)^{\frac{8}{7}} = \underline{96,4 \text{ bar}}$$

- e) Wärme wird jeweils von  $2 \rightarrow 3$  (polytrope Zustandsänderung) und von  $3 \rightarrow 4$  (isotherme Zustandsänderung) zugeführt und von  $4 \rightarrow 1$  (isochore Zustandsänderung) abgeführt.

Für die isochor abgeführte spezifische Wärmemenge gilt:

$$|q_{ab}| = q_{41} = c_v \cdot (T_4 - T_1) = 0,6496 \frac{kJ}{kgK} \cdot (2125,26 K - 303,15 K) = \underline{\underline{1183,64 \frac{kJ}{kg}}}$$

Lösung zu Aufgabe 3: Energiespeicherung mit Druckgas

a)

$$c_v = c_p - \frac{R}{M_i} = 2,22 \frac{kJ}{kgK} - \frac{8,3143 \frac{kJ}{kmolK}}{16 \frac{kg}{kmol}} = 1,7 \frac{kJ}{kgK}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{2,22}{1,7} = 1,306$$

b)

Die Befüllung erfolgt adiabat reversibel:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 283,15 K \cdot \left(\frac{100 \text{ bar}}{6 \text{ bar}}\right)^{\frac{1,306-1}{1,306}} = \underline{547,39 K}$$

c)

$$m_2 = \frac{p_2 V_2 M_i}{R T_2} = \frac{100 \cdot 10^2 \frac{kN}{m^2} 500000 m^3 16 \frac{kg}{kmol}}{8,3143 \frac{kJ}{kmolK} 547,39 K} = \underline{1,7578 \cdot 10^7 kg}$$

d)

1. HS für instationäre Prozesse verwenden. Die Kontrollraumgrenze kann um den Druckbehälter gelegt werden.

$$U_2 - U_1 = W_{t,12} + \Delta m \cdot h_1$$

$$\Leftrightarrow W_{t,12} = m_2 u_2 - m_1 u_1 - u_1 (m_2 - m_1) - p_1 v_1 (m_2 - m_1)$$

$$\Leftrightarrow W_{t,12} = m_2 (u_2 - u_1) - p_1 v_1 (m_2 - m_1)$$

$$\Leftrightarrow W_{t,12} = m_2 (c_v (T_2 - T_1)) - p_1 v_1 (m_2 - m_1)$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1 M_i} = \frac{8,3143 \frac{kJ}{kmolK} \cdot 283,15 K}{6 \cdot 10^2 \frac{kN}{m^2} \cdot 16 \frac{kg}{kmol}} = 0,2452 \frac{m^3}{kg}$$

$$\Rightarrow m_1 = \frac{V_1}{v_1} = \frac{500000 m^3}{0,2452 \frac{m^3}{kg}} = 2,0389 \cdot 10^6 kg$$

$$W_{t,12} = 1,7578 \cdot 10^7 kg \left(1,7 \frac{kJ}{kgK} \cdot (547,39 K - 283,15 K)\right)$$

$$- 6 \cdot 10^2 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,2452 \frac{m^2}{kg} (1,7578 \cdot 10^7 kg - 2,0389 \cdot 10^6 kg)$$

$$= \underline{5,61 \cdot 10^9 kJ} = \underline{1558 MWh}$$

Lösung zu Aufgabe 4: *atmosphärische Dampfmaschine nach Papin*

a)

b)

1  $\Rightarrow$  2 isobare Erwärmung und Verdampfung bei  $\vartheta(1,0133 \text{ bar}) = 100^\circ\text{C}$ :  
Aus dem 1. HS folgt

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= Q_{12} - p_1(V_2 - V_1) \\ \Leftrightarrow Q_{12} &= U_2 + p_2V_2 - (U_1 + p_1V_1) = H_2 - H_1 \\ \Leftrightarrow q_{12} &= h_2 - h_1 \end{aligned}$$

$$1. \quad h_1 = h'(20^\circ\text{C}) = 83,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$2. \quad h_2 = h'(100^\circ\text{C}) = 2674,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{12} = h_2 - h_1 = \underline{2590,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad \text{und} \quad w_{t,12} = \underline{0}$$

2  $\Rightarrow$  3 adiabat isentrope Expansion:

$$\begin{aligned} q_{23} &= \underline{0} \\ w_{t,23} &= u_3 - u_2 + p_u(v_3 - v_2) \\ &= h_3 - p_3v_3 - h_2 + p_2v_2 + p_u(v_3 - v_2) \\ &= h_3 - h_2 + v_3(p_u - p_3) \end{aligned}$$

Da die Entropie konstant bleibt gilt:

$$s_3 = s_2 = s_2'' = 7,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$s_3 = x_3 s_3'' + (1 - x_3) s_3' \Rightarrow x_3 = \frac{s_2'' - s_3'}{s_3'' - s_3'} = \frac{7,35 - 0,2963}{8,6652 - 0,2963} = 0,8428$$

$$h_3 = x_3 h_3'' + (1 - x_3) h_3' = 2151,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$v_3 = x_3 v_3'' + (1 - x_3) v_3' = 48,749 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$w_{t,23} = 2151,74 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2674,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 48,749 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \left( 1 \cdot 10^2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} - 0,0234 \cdot 10^2 \frac{\text{kN}}{\text{kg}} \right) = \underline{4238,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

3  $\Rightarrow$  1 isotherme Kompression:

Der Umgebungsdruck verrichtet Arbeit an dem Kolben, d.h. in diesem Prozessschritt wird technische Arbeit frei. Gleichzeitig muss Wärme abgeführt werden.

$$q_{31} = \int_3^1 T ds = T_3(s_1 - s_3)$$

$$s_3 = 7,35 \frac{kJ}{kgK}$$

$$s_1 = s'_3 = 0,2963 \frac{kJ}{kgK}$$

$$q_{31} = 293,15 K \cdot (0,2963 \frac{kJ}{kgK} - 7,3496 \frac{kJ}{kgK}) = \underline{\underline{-2067,7 \frac{kJ}{kg}}}$$

c)

Die Nutzarbeit ergibt sich als Summe der zu- und abgeführten Arbeiten:

$$w_{nutz} = w_{t,31} + w_{t,23} = \underline{\underline{-521,95 \frac{kJ}{kg}}}$$

$$\eta = \frac{|w_{nutz}|}{q_{zu}} = \frac{|w_{nutz}|}{q_{12}} = \frac{521,95 \frac{kJ}{kg}}{2590,5 \frac{kJ}{kg}} = \underline{\underline{0,2015}}$$

## Aufgabe 2

- |       |                           |              |
|-------|---------------------------|--------------|
| 1 → 2 | isentropische Verdichtung | $n = \gamma$ |
| 2 → 3 | polytrope Verdichtung     | $n = 8$      |
| 3 → 4 | isotherme Expansion       | $n = 1$      |
| 4 → 1 | isochore Wärmeabfuhr      | $n = \infty$ |

2a)

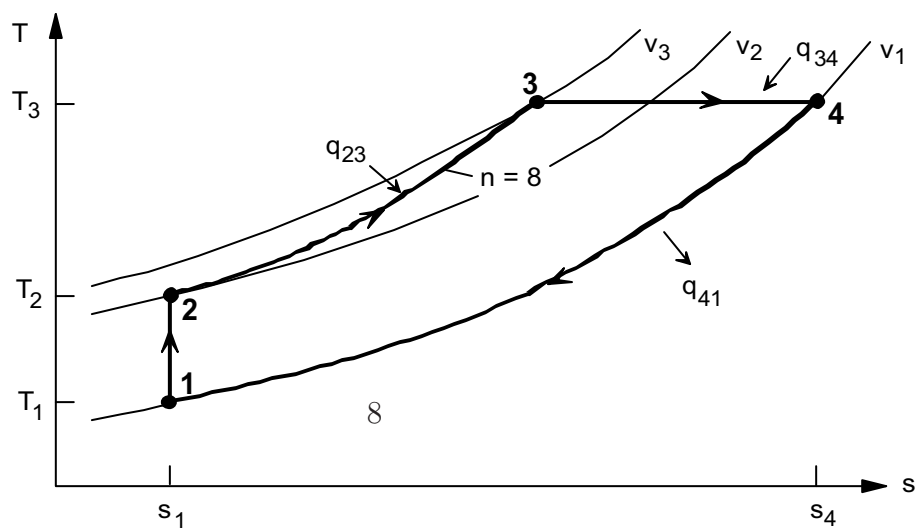
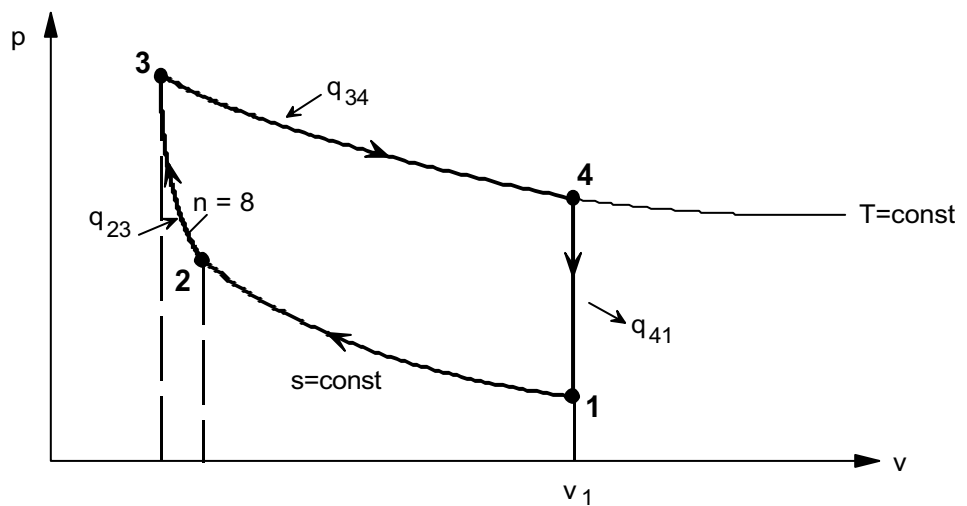


Abbildung 1: Vergleichsprozess im  $p$ - $v$ - und  $T$ - $S$ -Diagramm

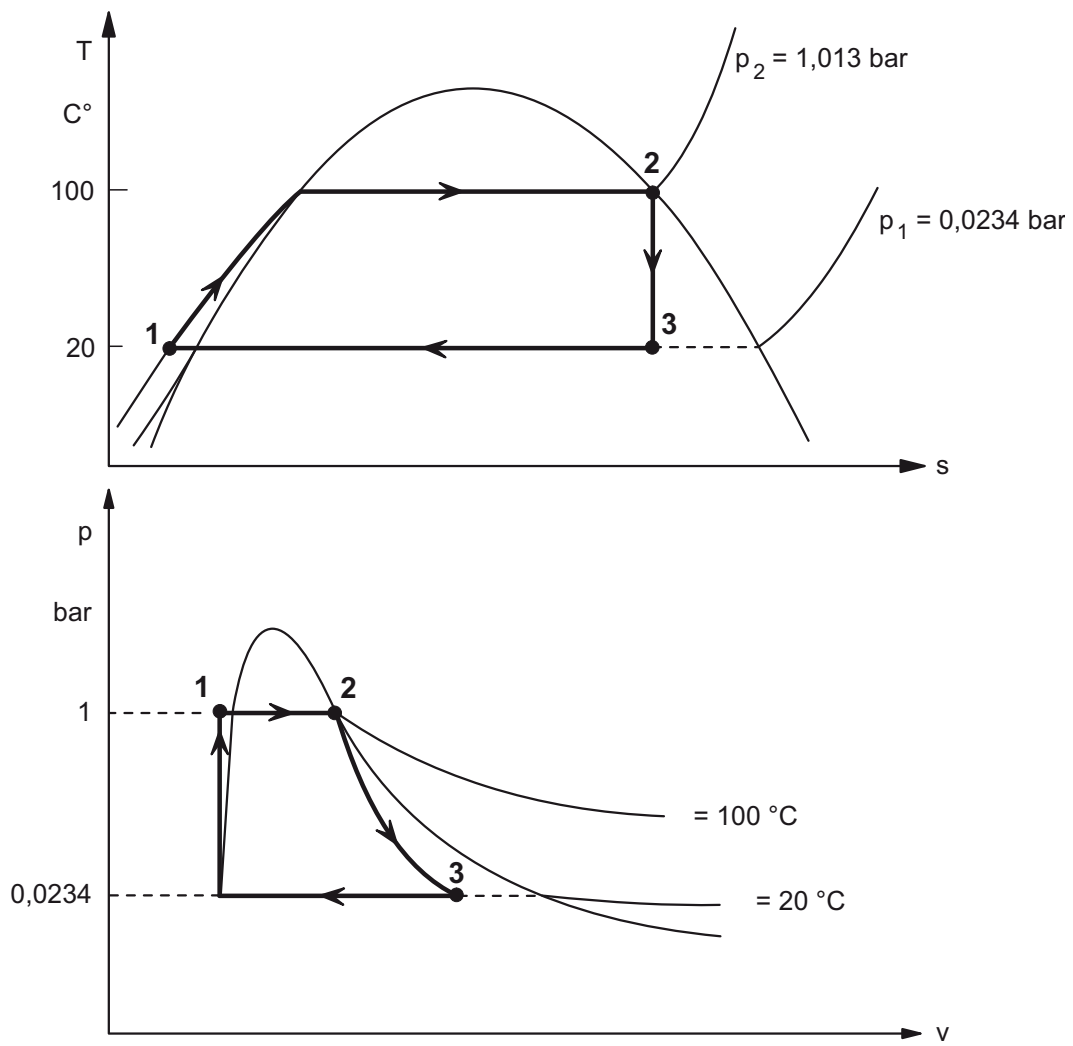


Abbildung 2: Vergleichsprozess im  $T$ - $s$ - und  $p$ - $v$ -Diagramm