|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Fachhochschule Köln  Cologne University of Applied Sciences  Fakultät 09 für  Anlagen, Energie- und Maschinensysteme | Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik |

**Aufgabensammlung**

**Technische Thermodynamik**

**Erstellt von B. Eng. Hannes Wähler**

Professor: Prof. Dr.-Ing. Frank Rögener

Version vom: 28. Mai 2015

Inhaltsverzeichnis

1. Ideale Gasgleichung 1

2. Erster Hauptsatz der Thermodynamik 2

3. Zustandsänderungen 3

4. Zweiter Hauptsatz & Entropie 2

5. Kreisprozesse 2

6. Feuchte Luft 2

7. Dampfkraft 2

8. Zusatzaufgaben 2

# 1. Ideale Gasgleichung

1. In einem geschlossenen Gasbehälter soll der Druck bestimmt werden, die Temperatur betrage 0°C sowie die Atommasse von Argon rund 40 g/mol und die Dichte von Quecksilber ρHg = 13 550 kg/m3, siehe Abbildung 1.
   1. Welcher Absolutdruck herrscht bei der gegebene Anordnung und Rahmenbedingungen in dem Behälter? **(pAr = 9,6 ∙ 104 Pa, pHg = 3,98 ∙ 104 Pa, pAbs = 1,36 ∙ 105 Pa)**
   2. Der Argonbehälter wird erwärmt, im rechten Schenkel des U-Rohrs wird eine Ausdehnung von 18 mm gemessen, wie hoch ist die Temperatur des Argons? Vernachlässigen Sie die Volumenänderung des Quecksilbers sowie die Druckänderung im Behälter.

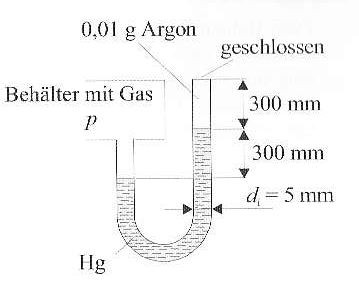


Abb. Quelle: Wilheln, G., Übungsaufgaben Technische Thermodynamik, Hanser Verlag, 5te Auflage, S.17

# 2. Erster Hauptsatz der Thermodynamik

1. Ein Wassertank der eine Masse von 10 t fasst, wird von einem Massenstrom durchströmt. Von außen wird der Tank mit einem Wärmestrom von 4500 W beheizt und mit Hilfe eines Rührers ideal durchmischt. Für den Betrieb des Rührers werden 100 W benötigt. Die spezifische Wärmekapazität beträgt 4,2 kJ / kg K sowie die Temperatur im Zulauf 11 °C. Wie groß muss der Massenstrom sein, damit am Ausgang eine Temperatur von 80 °C erreicht wird. **(15,9 kg/s)**
2. Ein Heimwerker plant, mit Wasser aus dem See an seinem Grundstück, welcher im Jahresdurchschnitt eine Temperatur von 4°C hat, eine Dusche mit Warmwasser zu betreiben. Das Wasser wird mit Hilfe einer Pumpe angesaugt, durch einen Durchlauferhitzer geführt und dort erhitzt. Beim Durchströmen der Anordnung bis hin zum Duschkopf entsteht ein durchschnittlicher Wärmeverlust über der Höhe von 2 J/G. Der Rohrdurchmesser beträgt 25 mm. Unser Heimwerker wünscht sich eine Duschtemperatur von 35 °C. Insgesamt hat die technische Anordnung einen Höhenunterschied von 150 dm zu überwinden.
3. Berechnen Sie die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Volumenstrom und für den Fall dass 10 L/min benötigt werden? **(0,34 m/s)**
4. Skizzieren Sie den Aufbau, zeichnen Sie die Bilanzgrenzen bzw. Systemgrenzen sowie die auftretenden Energieströme ein.
5. Welche elektrische Leistung muss für die Pumpe mindestens zur Verfügung stehen, damit 10 l/min gefördert werden können? **(21,622 kW)**
6. Welcher Volumenstrom steht maximal zur Verfügung wenn die Pumpe mit 220 V und einer Sicherung von 16A betrieben würde? Hinweis: P = U ∙ I. **(1,22 L / min)**

# 3. Zustandsänderungen

* 1. lsobare Zustandsänderungen
     1. Luft mit einem Volumen von 0,5 m3 hat die Temperatur 20 °C und einen Druck von 0,1 MPa.
        1. Welche Arbeit in kJ wird verrichtet, wenn bei gleichbleibendem Druck die Temperatur auf 150 °C erhöht wird? **(-22 kJ)**
        2. Stellen Sie diesen Vorgang in einem p-V-Diagramm dar.
  2. lsotherme Zustandsänderungen
     1. Eine in einem Zylinder eingeschlossenen Luftmenge soll mit einem Verdichtungsprozess von 10L auf 2L komprimiert werden, der Druck soll dabei von 0,1 MPa auf 0,5 MPa steigen und die Temperatur konstant bleiben.
        1. Welche Arbeit ist aufzuwenden, um 12 m3 Druckluft von 12 ∙105 Pa herzustellen, wenn der Anfangsdruck 1,1 bar beträgt und die Temperatur konstant bleibt? **( 34,4 MJ)**
     2. Ein Luftkompressor nimmt eine Leistung von 15 kW auf und verdichtet isotherm stündlich 200 m3 Luft vom Anfangsdruck 1,12 ∙ 105 Pa. Welcher Enddruck wird bei einem Wirkungsgrad von 85 % erreicht? **( 8,69 ∙ 105 Pa)**
  3. lsochore Zustandsänderung
     1. Ein Druckbehälter enthält 1 kmol eines idealen Gases bei einer Temperatur von 20 °C. Der Druck im Behälter beträgt 501,3 kPa.
        1. Wie groß ist das Behältervolumen? **(4,86 m3)**
        2. Wie groß ist das spez. Volumen des Gases? **(0,24 m3/kg)**
        3. Welchen Druck liegt im Innern nach der Temperaturerhöhung um 50 °C durch Wärmezufuhr vor? **(587 kPa)**
     2. Ein mit Kohlenstoffdioxid gefüllter Druckbehälter mit einem Volumen von 0,08 m3 lagert bei 18 °C, auf dem Manometer wird ein Druck von 3,6 bar angezeigt. Die spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur wird durch Gleichung (1) mit den Koeffizienten a, b, c und d aus (2) beschrieben.
        1. Berechnen Sie die Masse des CO2 bei der gegebenen Temperatur von 18 °C. **(0,52 kg)**
        2. Auf wie Viel bar steigt der Druck an, wenn sich die Temperatur des Gases auf 250 °C erhöht? **(6,48 ∙ 105 Pa)**
        3. Wie ist die innere Energie nach der gegebenen Temperaturerhöhung, wenn die spezifische Wärmekapazität dem arithmetischen Mittel der Wärmekapazitäten entspricht? **(112,8 kJ)**

# 5. Kreisprozesse

5.1 Wärme- Kraft—Maschinen

Carnot-Prozess

1. Eine Carnotmaschine arbeite zwischen dem Temperaturniveau von T1 = 600 K und T2 = 300K.
   1. Wie groß ist der Carnot-Wirkungsgrad? **(50%)**
   2. Angenommen der Maschine würde unter den oben genannten Bedingungen eine Wärme von 650 J zugeführt. Wie groß ist die technische Arbeit? **(325 J)**
2. Ein Carnot-Prozess wird mit einem kg Luft als Arbeitsmittel zwischen 27 °C und 500 °C betrieben. Der niedrigste Druck beträgt 0,25 bar, die zugeführte Wärme 250 kJ/kg.

Leiten Sie für die einzelnen Prozessschritte eine Formel zur Berechnung der Arbeit bzw. der Wärme aus der idealen Gasgleichung her.

Gegeben: Ri = 0,2871 kJ/kg **∙** K, κ = 1,4, cp : 1,005 kJ/kg **∙** K

Berechnen Sie:

* 1. Stellen Sie den Prozess schematisch in einem T-s-Diagramm und in einem pv-Diagramm dar.
  2. Berechnen Sie Druck, spezifisches Volumen, Temperatur und spez. Entropie der charakteristischen Zustandspunkte. (s. Tab. 1)
  3. Berechnen Sie die abgeführte Wärme und die abgeführte Nutzarbeit des Kreisprozesses. **(qab = - 97.1kJ/kg; wNutz : - 159.2kJ/kg)**
  4. Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad. **(61,2 %)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | p [bar] | T [K] | v [m3/kg] | s [J/K  ] |
| 1 | 21,15 | **773,15** | 0,1 | 0,17 |
| 2 | 6,87 | **773,15** | 0,32 | 0,47 |
| 3 | **0,25** | **300,15** | 3,45 | 0,47 |
| 4 | 0,77 | **300,15** | 1,12 | 0,17 |

Tab. : Lösungen der Aufgabe 3

1. Über einem rechtslaufenden Carnotprozess mit einem idealen Gas seien folgenden Daten bekannt:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | p [bar] | V [L] | T [K] |
| A |  | 0,1 | 773,15 |
| B |  |  | 773,15 |
| C | 1 | 10 | 373,15 |
| D |  |  | 373,15 |

Tab. : Gegeben für Aufgabe 3

* 1. Stellen Sie den Carnot-Prozess in einem p-V und in einem T-S-Diagramm dar.
  2. Berechnen Sie die fehlenden Zustandsgrößen der Zustände A, B, C und D.
  3. Wie groß sind die Prozessgrößen Qij und Wij zu den Prozesspunkten A, B, C und D?
  4. Bestimmen Sie die Leistung der Wärmekraftmaschine unter Annahme, dass diese 1000 Durchläufe pro Minute schafft.

Numerische Lösungen:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | p [bar] | v [m3/] | T [K] | U [J] | H [J] | Qij [J] | Wij [J] |
| A | 207,2 | 0,1 | 773,15 | 2009,9 | 4082 | 7275,9 | -7275,9 |
| B | 6,18 | 3,35 | 773,15 | 2009,9 | 4082 | 0 | -1607,9 |
| C | 1 | 10 | 373,15 | 402 | 1402 | -3513,3 | 3513,3 |
| D | 33,53 | 0,298 | 373,15 | 402 | 1401,2 | 0 | 1607,9 |

Tab. : Lösungen von Aufgabe 4

1. Zehn kg Luft sollen in einem Carnot-Prozess von p = 1,5 bar und T = 206 °C in einem Carnotkreisprozess isotherm auf 2,8 m3 komprimiert werden. Daran anschließend wird das Gas reversible adiabat auf 15 bar verdichtet. Danach wird das Gas isotherm auf 8 bar und anschließend adiabat auf 1,5 bar entspannt. Die Luft soll als Ideales Gas betrachtet werden.

Gegeben: Rm : 8,314 J/mol  K , MLuft = 0,0289 kg/mol , κ = 1,4.

Berechnen Sie:

1. Die Zusammenstellung aller Drücke, Temperaturen, spezifischen Volumina und spez. Entropie an den Eckpunkten des Prozesses (siehe Tabelle Tab. 4)
2. Die zu- und abgeführte Wärme sowie die Nutzarbeit.

**(q23 = 140 kJ/kg; q14 = -97 kJ/kg, wNutz = -53,5 kJ/kg)**

1. Den thermischen Wirkungsgrad der Maschine. **(38 %)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | p [bar] | T [K] | v [m3/kg] | s [J/K kg] |
| 1 | **1,5** | 479,15 | 0,92 | 0,27 |
| 2 | 2,81 | 479,15 | 0,49 | 0,27 |
| 3 | **15** | **773,15** | 0,15 | 0,46 |
| 4 | **8** | **773,15** | 0,28 | 0,46 |

Tab. Lösung zur Aufgabe 4

# 4. Zweiter Hauptsatz & Entropie

1. Ludwig Boltzmann hat den folgenden Ansatz für die Definition bzw. die Anwendung der Entropie geprägt:

Dabei steht W für das Thermodynamische Wahrscheinlichkeitsmaß der Ordnung bzw. Anzahl der möglichen Orientierungen von Molekülen in einem thermodynamischen System. Für einen Festkörper welcher aus 20 heteronuklearen Molekülen besteht (z.B. NaCl oder HCl) und wessen Moleküle nur eine Orientierung einnehmen können, sprich einen perfekt sortierten Kristall bilden, sollen folgende Angaben berechnet werden:

Wie groß ist die Entropie bei 0 K (Absoluter Nullpunkt)?

Wie groß ist die Entropie, wenn jedes Molekül zwei Orientierungen haben kann?

# 

# 6. Feuchte Luft

1. In einem Wäschetrockner wird Feuchte Luft mit Hilfe eines Kondensators aus der Maschine als Kondensat bzw. flüssiges Wasser herausgeführt. Der Trocknungsvorgand wird bei p = 1.013 bar durchgeführt. Die Feuchte Luft wird im Kondensator von 75 °C auf 25°C herabgekühlt. Berechnen Sie die Masse Wasser die pro kg Luft auskondensiert unter der Annahme das der restfeuchte Luftstrom den Kondensator im Sättigungsszustand verlässt. **(0,277 kg Wasser/kg Luft)**
2. Betrachtet werde eine ideale Trocknung: Ein Massenstrom von 840 kg/h Stärke soll von einer Feuchte von 48% auf 5% getrocknet werden. Die für die Trocknung benötigte Frischuft wird dem Vorwärmer mit einer Feuchte von 70% bei 20°C zugeführt wird und so lange aufgeheizt wird, bis eine feuchte von 1% erreicht ist. In diesem Zustand wird die Luft dem Trockner zugeführt und und verlässt diesen bei ca. 45 °C und eine Feuchte von 60%.
   1. Zeichnen Sie den Prozess in einem h,X-Diagramm ein.
   2. Wie groß ist die Temperatur des aufgeheizten Luftstroms bei erreichen der gegebenen Feuchte an der Einspeisung zum Trockner? **(ca. 110°C)**
   3. Wie groß ist der stündlich benötige Wärmebedarf für die Trocknung? **(1,4 MJ/h)**
   4. Wie groß ist der stündlich benötigte Wärmebedarf, bei einer realen Trocknung, wenn bei gleicher Feuchte die Temperatur um 10 K höher ist? **(1,4 GJ/h)**
3. Mit einem Kompressor sollen für einen technischen Prozess, 60.000 m3/h feuchte Luft der Temperatur 15°C und φ = 0,55 von 1 bar auf 3,7 bar verdichtet werden. Über einen dem Kompressor nachgeschalteten Rippenkühler wird die komprimierte Luft auf 25 °C abgekühlt.
   1. Berechnen Sie die relative Feuchte der Luft die aus dem Kompressor in den Rippenkühler strömt. **(0,94 %)**
   2. Wie groß muss die Kompressorleistung sein? **(2637 kW)**
   3. Berechnen Sie die sekündlich anfallende Masse Kondensat. **(0,011 kg/s)**

# 7. Dampfkraft

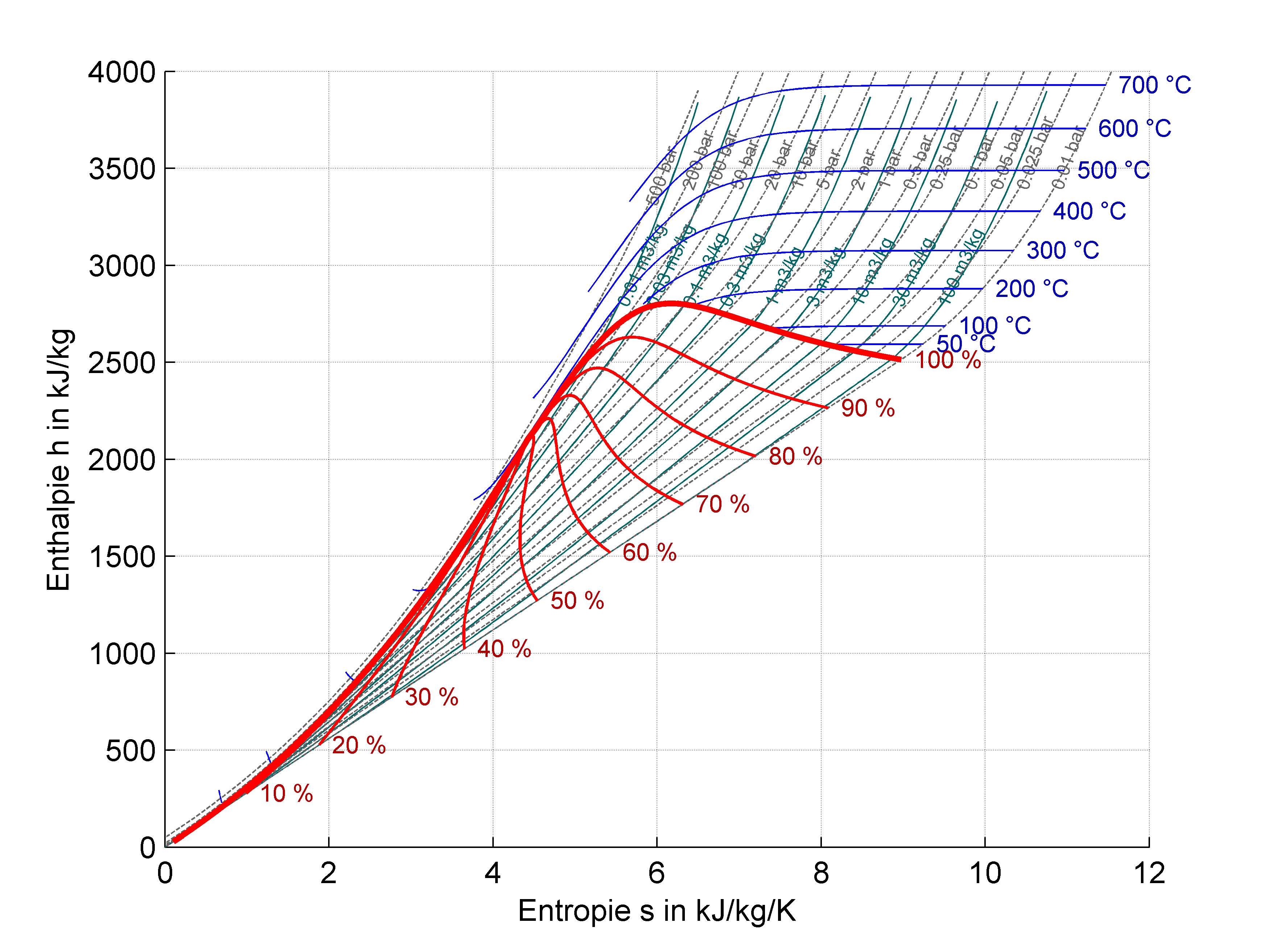


Abb. h-s-Diagramm, http://www.outpost-omega.net/wp-content/uploads/2015/03/h-s-Diagramm.png

1. Wasser der Menge m = 15 kg soll bei konstantem Umgebungsdruck (1,013 bar) und einer Temperatur von T1 = 20 °C in überhitzten Dampf der Temperatur T2 = 200 °C überführt werden.
   1. Stellen Sie die Zustandsänderung in einem h,s-Diagramm dar.
   2. Welche Wärmemenge ist notwendig um diese Zustandsänderung zu vollbringen? **(56,328 MJ)**
2. In einem Gefäß mit konstantem Volumen sind Wasser der Menge mW = 0,5 kg und Dampf der Menge mD = 0,13 kg bei einem Druck von einem bar im Gleichgewicht.
   1. Wie viel Wärme ist dem System zuzuführen so dass der Systemdruck auf 10 bar steigt? **(1450 kJ)**
   2. Stellen Sie die Zustandsänderung in einem h,s-Diagramm dar.
   3. Welche Temperatur herrscht in dem System bei vollzogener Zustandsänderung? **(ca. 500 °C)**
3. Innerhalb einer Dampfturbine wird überhitzter Dampf (p1 = 50 bar, T1 = 500 °C) adiabat auf Kondensationsdruck, p2 =0,05 bar bei einem Dampfgehalt von x2 = 0,85 entspannt.
   1. Berechnen Sie den isentropen Wirkungsgrad ηs.**(0,985)**
   2. Wie groß ist die Masse an Dampf über der Zeit bei einer Turbinenleistung von P = -35 MW? **(25,8 kg/s)**
   3. Berechnen Sie die Turbinenleistung für den Fall, dass der Dampf vor Eintritt in die Turbine auf einen Druck von p1\* = 40 bar adiabat gedrosselt wird? Hinweis: Nehmen Sie an das sich der Durchsatz an Dampfmenge um 25% verringert und der Wirkungsgrad unverändert bleibt. **(-27,2 MW)**
4. Überhitzter Wasserdampf (p1 = 5 bar, T1 = 400 °C) wird in einem Turboverdichter umkehrbar adiabat auf p2 = 20 bar verdichtet. Anschließend wird der Hochdruckdampf über einen Wärmeübertrager isobar auf T1 = 400 °C rückgekühlt. Vergleichen Sie den Prozess mit einer isothermen Kompression bei gleichem Enddruck.
   1. Stellen Sie die beiden Prozesse grafisch in einem h,s-Diagramm dar.
   2. Wieviel spezifische Arbeit ist in beiden Fällen für die Kompression pro kg Dampf aufzubringen? **(Adiabat: 547,7 kJ/kg, Isotherm: 494,4 kJ/kg)**
   3. Welche spezifische Wärmemenge ist über den Wärmeübertrager bezogen pro kg Dampf im isobaren bzw. im isothermen Fall abzuführen?

**(isobar: -591,7 kJ/kg , isotherm: -538,4 kJ/kg)**

* 1. Wie groß ist der relative Fehler, wenn man in bei Fällen der Kompression den Dampf als ideales Gas annimmt. ( R = 0,461 kJ/kg K; κ = 1,3) betrachtet?

**(isentrop: 7,5%, isotherm: 13%)**

1. Berechnen bzw. bestimmen Sie für den folgenden Dampfkraftprozess, den idealen Vergleichsprozess, dessen thermischer Wirkungsgrad mit ηth,real = 38 % gemessen wurde: Die Speisepumpe einer Turbine saugt siedendes Kondensat bei eine Druck von p1 = 0,05 bar an. Der anschließend überhitzte Dampf tritt mit der Temperatur von 500 °C bei einem Druck von 120 bar in die Turbine ein und wird nach dieser auf einen Druck von 15 bar entspannt. Bei der anschließenden Zwischenüberhitzung wird der Dampf wieder auf 550 °C gebracht um darauf in einer Niederdruckturbine auf Kondensationsdruck entspannt zu werden.
   1. Stellen Sie den idealen Vergleichsprozess im h,s-Diagramm dar.

**(Clasius-Rankine Prozess mit Zwischenüberhitzung)**

* 1. Wie groß ist der relative Abweichung von ηth,ideal zu ηth,real = 38 %?

**(-7,23 %)**

* 1. Um welchen Betrag ist ηth,ideal kleiner, wenn der Dampf isentrop ohne Zwischenüberhitzung isentrop auf Kondensationsdruck entspannt würde?

**(-6,5 %)**

1. Für die Vorwärmung des Speisewassers einer Dampfkraftanlage, wird aus der Turbine Dampf vom Druck p1D = 18 bar und Temperatur T1D = 300 °C entnommen und im für die Vorwärmung verwendeten Wärmeübertrager isobar abgekühlt und vollständig kondensiert. Das Kondensat wird dem Speisewasserkessel wieder zugeführt. Das aufzuwärmende Speisewasser verlässt den Kondensator, welcher zwischen Turbine und Wärmeübertrager eingebaut ist, mit einem Druck von p1W = 0,05 bar und Siedetemperatur. Eine Speisepumpe verdichtet das Kondensat isentrop auf 100 bar und erwärmt das Kondensat isobar auf die Temperatur des kondensiertes Dampfes welcher der Turbine entnommen wurde.
   1. Welcher prozentuale Anteil des der Turbine zugeführtem Frischdampfes müsste der Turbine entnommen werden, damit das Speisewasser die Temperatur des kondensierten Dampfes annimmt?
   2. Wie groß ist die spezifische Entropie die je kg Speisewasser im Vorwärmer erzeugt wird?
2. Innerhalb einer adiabat betriebenen Mischkammer wird ein unter Druck stehender (pD = 10 bar) Massenstrom trockenen gesättigten Dampfes auf Atmosphärendruck entspannt und einem Massenstrom von H20 von 5 kg/s isobar zugeführt, die Temperatur betrage 20 °C.
   1. Stellen Sie den Mischvorgang im h,s-Diagramm dar.
   2. Wie groß ist der Massenstrom an Dampf zu wählen, damit das Wasser siedend aus der Mischkammer tritt? **(1,05 kg/s)**
   3. Wie groß ist die beim Mischvorgang entstehende Entropie bezogen auf ein kg siedendem Wasser? **(0,27 kJ/K)**

# 

# 8. Zusatzaufgaben

1. In einem U-Rohr befindet sich ein Stoff A der Dichte 2133 kg/m5. In den linken und rechten Schenkel des U-Rohrs wird ein Stoff B eingefüllt. Die Stoffe sind nicht mischbar, inert zueinander und haben ein vernachlässigbar dünne aber deutlich sichtbare Abgrenzung zueinander. Im rechten Schenkel beträgt die Höhe des aufgefüllten Stoffes B 80 mm und im linken Schenkel 40 mm, der Höhenunterschied zwischen den freien Menisken beträgt 10 mm. Bestimmen Sie die Dichte von Stoff B.
2. Im Weltall bewegen sich zwei Objekte auf Kollisionskurs horizontal aufeinander zu. Das erste Objekt besitzt die Masse 1000 kg und bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 1000 m/s. Nach einer Kollision mit zweiten einem Objekt, welches sich vor der Kollision mit einer Geschwindigkeit von 600 m/s bewegte, entsteht ein Schrotthaufen der sich mit einer Geschwindigkeit von 200 m/s bewegt. Nehmen Sie an, dass der Schrott nach der Kollision eine homogene Masse bildet!
   1. Welche Masse hatte das zweite Objekt? **(1000 kg)**
   2. Wie viel Energie wurde bei der Kollision, in nicht kinetischen Energieformen umgesetzt? **(6.4 ∙ 1015 J)**
   3. Welche Energie wird umgewandelt?
   4. Welche Geschwindigkeit erreicht der Schrotthaufen, wenn sich das zweite Objekt mit der gleichen Geschwindigkeit wie Objekt 1 in a) bewegt? **(1000 m/s)**
3. Für eine Simulation eines Fallschirmsprungs aus extremer Höhe wird eine Näherung benötigt, welche die Zunahme der Luftdichte über der Fallhöhe wiedergibt. Der atmosphärische Luftdruck entspricht der Gewichtskraft der über dem Boden stehenden Luftsäule. Leider kann für seine Berechnung nicht die Formel (1) angewendet werden, da Luft über der Höhe einen wesentlich größeren Druckeinfluss besitzt. Der o.g. Zusammenhang ist für kleine Höhendifferenzen d.h. gültig ist, weil die Dichte dann als konstant angenommen werden darf. Also entspricht eine Höhenabnahme d.h. Einer Zunahme von Druck (2) und somit auch einer Zunahme der Luftdichte.
   1. Leiten sie eine Höhenformel her, die den Luftdruck als Funktion der Höhe p:f(h) über dem Meeresspiegel abbildet. Die Werte ρ0, p0, T0 entsprechen der Dichte, dem Luftdruck und der Temperatur auf Höhe des Meeresspiegels. Daraus folgt für h = 0 (3) und (4)