Thermodynamik I PVK - Tag 2

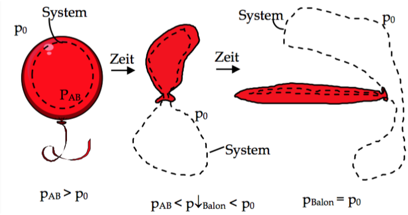
Nicolas Lanzetti

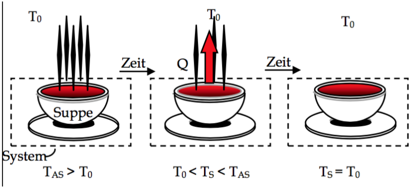
Heutige Themen

- Carnot;
- Wirkungsgrad/Leistungsziffer;
- Entropie;
- Erzeugte Entropie;
- Isentroper Wirkungsgrad;
- Isentrope Prozesse für ideale Gase.

Richtung von Prozessen

Prozesse laufen spontan nur in einer bestimmten Richtung ab.

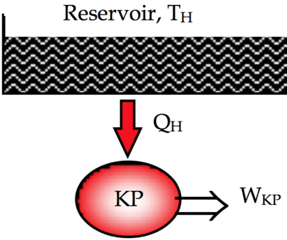




Formulierungen des zweiten Hauptsatz

Kelvin-Plank Formulierung:

Es ist unmöglich eine Maschine zu bauen, welche in einem thermischen Kreisprozess kontinuierlich Arbeit an die Umgebung abgibt und dabei nur in Kontakt mit einem einzigen Wärmereservoir steht, aus welchem diese Wärme bezieht.



Formulierungen des zweiten Hauptsatz

Clausius Formulierung:

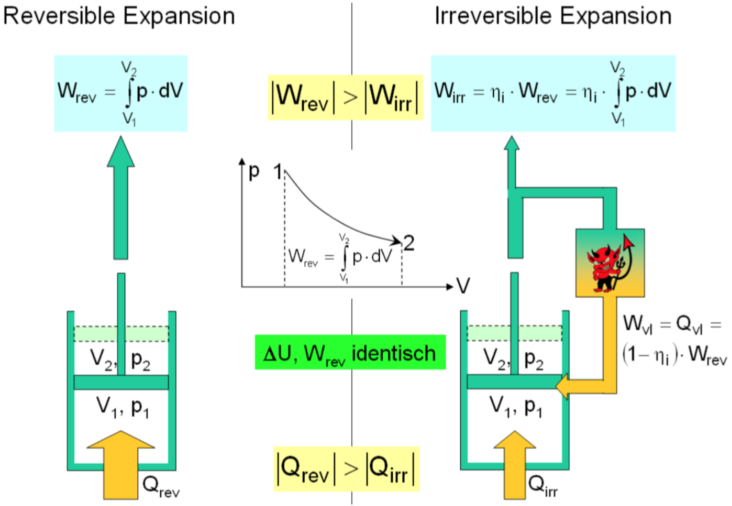
Wärme kann nicht von selbst von einem Körper mit tieferer Temperatur auf einen Körper mit höherer Temperatur übertragen werden.

Kurz: Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden.

Reversible und irreversible

- Reversibel = umkehrbar;
- Ein Prozess ist reversibel, falls der Ausgangszustand im System und allen Teilen der Umgebung wiederhergestellt werden kann, ohne dass eine Veränderung zürückbleibt.
- **Aber** alle reale Prozesse sind irreversibel (Reibung, spontane chemische Reaktion,...).
- Irreversibilitäten verursachen Verluste.

Beispiel: Expansion



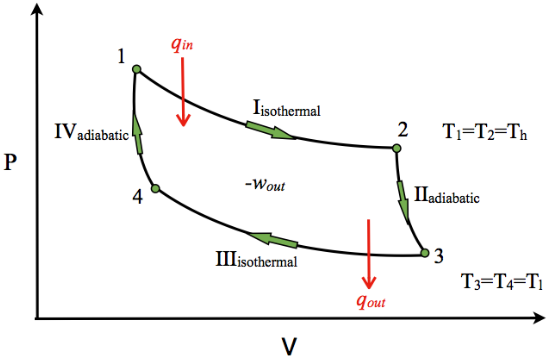
Der Kreisprozess nach Carnot

- Mit dem 2. Hauptsatz haben wir gesehen, dass Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden (Formulierung von Kelvin-Plank).
- Die Frage ist also:

  Welcher Anteil kann maximal in Wärme umgewandelt werden?
- Antwort:

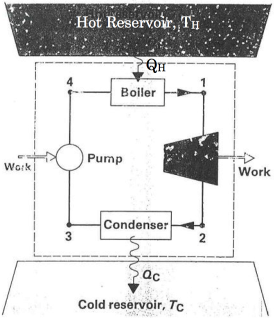
  Betrachte den Carnotprozess.

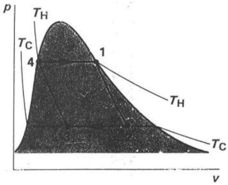
Der Kreisprozess nach Carnot



Der Carnot Prozess ist ein idealisierter reversibler Prozess, der zwischen die Temperaturen T_H und T_C arbeitet.

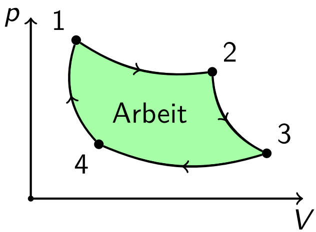
Der Kreisprozess nach Carnot

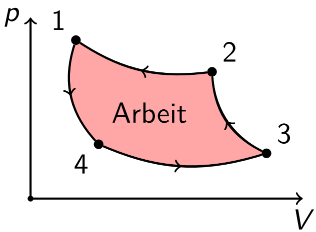




Der Carnot Prozess ist ein idealisierter reversibler Prozess, der zwischen die Temperaturen T_H und T_C arbeitet.

Erinnerung: Kreisprozesse





Wärmekraftmaschine:

$W_{\text{KP}} > 0, \qquad Q_{\text{KP}} > 0.$

Wärmepumpe/Kältemaschine:

$W_{\text{KP}} < 0, \qquad Q_{\text{KP}} < 0.$

Der thermische Wirkungsgrad (bei Wärmekraft.)

Der thermische Wirkungsgrad ist definiert als

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{KP}}}{Q_{\text{zu}}} = \frac{W_{\text{KP}}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}. \tag{1}$$

Bei dem Carnot Prozess gilt:

$$\frac{Q_H}{Q_C} = \frac{T_H}{T_C}. \tag{2}$$

Der thermische Wirkungsgrad eines Carnot Prozesses ist somit:

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H}. \tag{3}$$

Die Leistungsziffer (bei Wärmepumpen/Wärmekalt.)

- Zuerst:
  - Was ist eine Wärmepumpe?
  - Was ist eine Wärmekraftmaschine?
- **Kältemaschine:**
  Nutzen ist dem kalten Reservoir abgefuhrte Warme (z.B. Kühlschrank).
- **Wärmepumpe:**
  Nutzen ist dem warmen Reservoir zugefuhre Wärme (z.B. Heitzung).

Die Leistungsziffer (bei Wärmepumpen/Kälte.)

Der Leistungsziffer ist definiert als:

- Wärmepumpe:

$$\varepsilon_{\text{WP}} = \frac{Q_H}{W_{\text{KP}}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \tag{4}$$

Carnot:

$$\varepsilon_{\text{WP}} = \frac{T_H}{T_H - T_C}. \tag{5}$$

- Wärmekaltmaschine:

$$\varepsilon_{\text{KM}} = \frac{Q_C}{W_{\text{KP}}} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} \tag{6}$$

Carnot:

$$\varepsilon_{\text{KM}} = \frac{T_C}{T_H - T_C}. \tag{7}$$

Bemerkungen zu dem Carnot Prozess

- Es ist unmöglich, Wärme vollständig in Arbeit umzuwandeln.
- Alle reversible Maschinen, die zwischen T_H und T_C arbeiten haben denselben Wirkungsgrad. Das ist der theoretische maximale Wirkungsgrad.
- Der Carnot Prozess sagt also, wie viel Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann.
- Irreversibilitäten verursachen **immer** eine Verkleinerung ders Wirkungsgrades.

Die Entropie

Die Entropie ist ein Mass für:

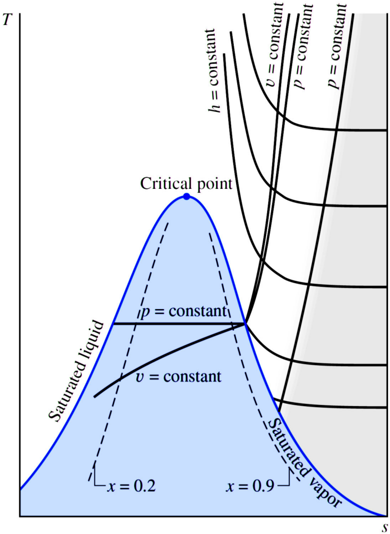
- Irreversibilität;
- Richtung eines Prozesses.

In anderen Worten stellt die Entropie ein Mass für die verlorenen Arbeitsmöglichkeiten einer thermischen Energiemenge dar.

Die Entropie

- Die Entropie ist eine Zustandsgrösse.
- Die Entropie wird
$$S$$
genannt und hat Einheit:
$$\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}\right].$$
- Die ist definiert als
$$\mathrm{d}S = \frac{\delta Q_{\mathrm{rev}}}{T}. \tag{8}$$
- Analog zu u und h kann man auch die massenspezifische Entropie und die molenspezifische Entropie.

Das $T - s$ Diagramm



Die $T\mathrm{d}S$ Gleichungen

Die $T\mathrm{d}S$ Gleichungen lauten:

$$T \cdot \mathrm{d}S = \mathrm{d}U + p \cdot \mathrm{d}V, \qquad T \cdot \mathrm{d}S = \mathrm{d}H - V \cdot \mathrm{d}p, \tag{9}$$

$$T \cdot \mathrm{d}s = \mathrm{d}u + p \cdot \mathrm{d}v, \qquad T \cdot \mathrm{d}s = \mathrm{d}h - v \cdot \mathrm{d}p, \tag{10}$$

$$T \cdot \mathrm{d}\bar{s} = \mathrm{d}\bar{u} + p \cdot \mathrm{d}\bar{v}, \qquad T \cdot \mathrm{d}\bar{u} = \mathrm{d}\bar{h} - \bar{v} \cdot \mathrm{d}p. \tag{11}$$

Wichtig: Die $T\mathrm{d}S$ Gleichungen werden im Skript (Kapitel 6.10.3) für einen reversiblen Prozess hergeleitet. Die gelten aber auch für irreversible Prozesse.

Bestimmen von Entropiedifferenzen

Wie bestimmt man

$$\Delta S = S_2 - S_1 \tag{12}$$

d.h. die Entropiedifferenz zwischen Zustand 1 und 2?

Drei Möglichkeiten:

- Wenn möglich: Tabellen;
- Ideale Gase: Siehe Formeln (nächste Folie);
- Mit den $T\mathrm{d}S$ Gleichung, aber aufpassen.

Entropiedifferenzen bei idealen Gasen

Im Allgemeinen benutzt man auch für ideale Gasen die Tabellen:

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right), \qquad (13)$$

$$\bar{s}(T_2, p_2) - \bar{s}(T_1, p_1) = \bar{s}^0(T_2) - \bar{s}^0(T_1) - R_0 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right). \qquad (14)$$

Bei perfekten Gasen (c_p und c_v konstant) gilt:

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right), \qquad (15)$$

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right). \qquad (16)$$

Achtung: Einheit von R muss mit der Einheit von s^0,c_v oder c_p übereinstimmen!

Beispiel mit einer TdS Gleichung

Aus

$$T \cdot \mathrm{d}s = \mathrm{d}h - v \cdot \mathrm{d}p \tag{17}$$

folgt

$$\int T \cdot \mathrm{d}s = \int \mathrm{d}h - \int v \cdot \mathrm{d}p. \tag{18}$$

Sind T und v konstant bekommt man

$$T \cdot \int \mathrm{d}s = \int \mathrm{d}h - v \cdot \int \mathrm{d}p \tag{19}$$

$$T \cdot \Delta s = \Delta h - v \cdot \Delta p. \tag{20}$$

Erzeugte Entropie

Die erzeugte Entropie

$$S_{\text{erz}}$$

ist ein Mass dafür, wie irreversibel/verlustsreich ein Prozess ist.
Es gilt

$$S_{\text{erz}} \geq 0. \tag{21}$$

Achtung: S_{erz} und S nicht vermischen:

- S ist eine Zustandsgrösse: Jeder Zustand hat eine Entropie;
- S_{erz} ist keine Zustandsgrösse: Sie ist mit dem Prozess verbunden!

Erzeugte Entropie für geschlossene Systeme

$$S_{\text{erz}} = S_2 - S_1 - \sum_i \frac{Q_i}{T_{G,i}} \tag{22}$$

mit T_G Temperatur am Systemgrenze.

Es gilt:

- $S_{\text{erz}} = 0$: Reversibel;
- $Q = 0$: Adiabat;
- $S_2 - S_1 = 0$: Isentrop;
- Kreisprozesse: $S_2 - S_1 = 0$.

Adiabat $+$ Reversibel $\Rightarrow$ **Isentrop.**

Erzeugte Entropie für offene Systeme

$$\dot{S}_{\text{erz}} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}S - \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_{G,i}} + \sum_i \dot{m}_{i,a} \cdot s_{i,a} - \sum_i \dot{m}_{i,e} \cdot s_{i,e} \tag{23}$$

mit T_G Temperatur am Systemgrenze.

Es gilt:

- $\dot{S}_{\text{erz}} = 0$: Reversibel;
- $\dot{Q} = 0$: Adiabat;
- $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}S = 0$: Stationär.

Spezialfall: Stationär mit einem Massenstrom:

$$\dot{S}_{\text{erz}} = -\sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_{G,i}} + \dot{m} \cdot (s_a - s_e). \tag{24}$$

Erzeugte Entropie für halboffene Systeme

$$S_{\text{erz}} = S_2 - S_1 - \sum_i \frac{Q_i}{T_{G,i}} + \sum_i \Delta m_{i,a} \cdot s_{i,a} - \sum_i \Delta m_{i,e} \cdot s_{i,e} \quad (25)$$

mit T_G Temperatur am Systemgrenze.

Es gilt:

- $S_{\text{erz}} = 0$: Reversibel;
- $Q = 0$: Adiabat;
- $S_2 - S_1 = 0$: Isentrop.

Spezialfall: Stationär mit einem Massenstrom:

$$\dot{S}_{\text{erz}} = -\sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_{G,i}} + \dot{m} \cdot (s_a - s_e). \quad (26)$$

Aufgabe (Sommer 09, Aufgabe 4)

Ein Raum wird mit Hilfe einer Wärmepumpenanlage auf eine konstante Temperatur (T = 25°C) beheizt. Dies wird erreicht, indem das Kältemittel R-134a in einem isobar arbeitenden Kondensator Wärme abgibt bis das Kältemittel einen gesättigt flüssigen Zustand erreicht hat.

Zuvor wird einem geothermisch aufgeheizten Wasserstrom ($\dot{m}_W$ = 0.065 kg/s, $c_{p,W}$ = 4.180 (kJ/kg·K)) in einem Verdampfer Wärme entzogen (Eintrittstemperatur $T_{W,ein}$ = 50°C, Austrittstemperatur $T_{W,aus}$ = 40°C). Gleichzeitig tritt das Kältemittel bei einer Temperatur von T_4 = 20°C und einem Dampfgehalt von x = 26.5% in den isobar arbeitenden Verdampfer ein und verlässt ihn wieder als gesättigter Dampf (idealer Wärmetauscher ohne Verluste). Im nachfolgenden isentrop arbeitenden Kompressor verliert das Kältemittel $\dot{Q}_{Verlust}$ = 300 W Wärmemenge an die Umgebung und verlässt den Kompressor bei einem Druck von p_2= 1.4 MPa. Das Expansionsventil arbeitet isenthalp.

a) Zeichnen Sie das T-s Diagramm für die Wärmepumpe.

b) Bestimmen Sie den stattfindenden Wärmetausch vom geothermisch aufgeheizten Wasser zum Kältemittel im Verdampfer.

c) Bestimmen Sie den Massenstrom $\dot{m}_K$ des Kältemittels.

d) Bestimmen Sie die Temperaturdifferenz ΔT_{23} zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Kältemittels im isobar arbeitenden Kondensator.

e) Bestimmen Sie die abgegebene Wärme $\dot{Q}_H$ im Kondensator und geleistete Arbeit $\dot{W}$ im Kompressor.

f) Bestimmen Sie die Leistungszahl ε_w der Wärmepumpe.

g) Bestimmen Sie die theoretisch maximale Leistungszahl $\varepsilon_{w,\max}$ der Wärmepumpe unter der Annahme, dass alle Prozesse reversibel arbeiten und die Zustandsbedingungen 1, 2, 3 und 4 gleich bleiben.

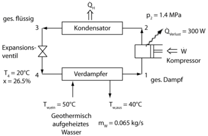


Abb. 3: Geothermische Wärmepumpe.

Aufgabe (Sommer 10, Aufgabe 2)

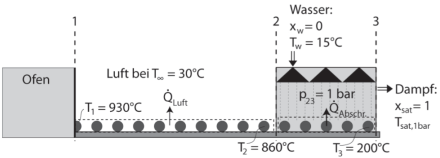


Abb. 1: Transport von Wälzkörpern für Kugellager

In einem Härtungprozess werden 1200 Kugeln pro Minute zuerst zwischen dem Ofen und dem Abschrecken (1→ 2) in 30°C warmer Luft auf einem Förderband transportiert (siehe Abb.1). Die Kugeln aus Edelstahl (ρ= 8085 kg/m³ und c= 0.480 kJ/(kgK)) haben einen Durchmesser von D= 1.1 cm und verlassen den Ofen mit einer uniformen Temperatur T_1= 930°C. Für den Fall, dass die Kugeln vor dem Abschrecken auf T_2= 860°C abkühlen, berechnen Sie:

a) Den Anteil der Wärme $\dot{Q}_{Luft}$, der von den Kugeln an die Umgebungsluft abgegeben wird,

Nach dem Förderband (2→ 3) werden die Kugeln auf T_3= 200°C abgeschreckt (Abb. 1). Dabei wird flüssiges, gesättigtes Wasser, T_w= 15°C (x_w=0) auf die Kugeln gesprayt und als trockener, gesättigter Wasserdampf (x_{sat}=1) bei Sättigungstemperatur (T_{sat}) abtransportiert. Der Druck in der Kühlkammer sei konstant p_{23}= 1 bar.

c) Berechnen Sie die Wassermenge $\dot{m}_w$ in kg/s, die benötigt wird um die Kugeln im kontinuierlichen Prozess von T_2= 860°C auf T_3=200°C zu kühlen.

Hinweis: Die Entropieänderung eines Festkörpers kann analog zur Entropieänderung einer idealen Flüssigkeit (inkompressiblen) berechnet werden.
Der Prozess ist stationär und die kinetische Energie kann vernachlässigt werden.

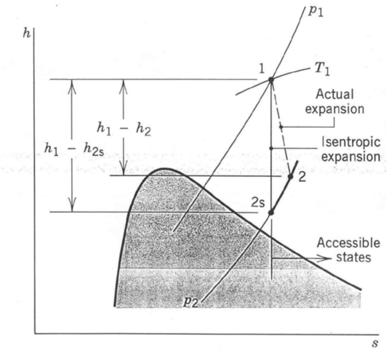
Isentroper Wirkungsgrad

Der isentrope Wirkungsgrad vergleicht die reale Leistungsfähigkeit eines Elements (Turbine, Pumpe,...) zur Leistungsfähigkeit desselben Elements, falls es ideal/verlustfrei (bei den selben Ein- und Austrittsbedingungen) arbeiten würde.

Isentroper Wirkungsgrad einer Turbine

Für eine stationäre und adiabate Turbine gilt:

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1), \qquad \dot{S}_{\text{erz}} = \dot{m} \cdot (s_2 - s_1). \tag{27}$$



Isentroper Wirkungsgrad einer Turbine

- Ideale Turbine:

$$s_1 = s_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_{rev} = \dot{m} \cdot (h_{2,s} - h_1). \tag{28}$$

- Reale Turbine:

$$s_2 > s_1 \quad \Rightarrow \quad \dot{W} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1). \tag{29}$$

Da $h_{2,s} > h_2$ ist (wie erwartet)

$$W_{rev} = W_{max} > W. \tag{30}$$

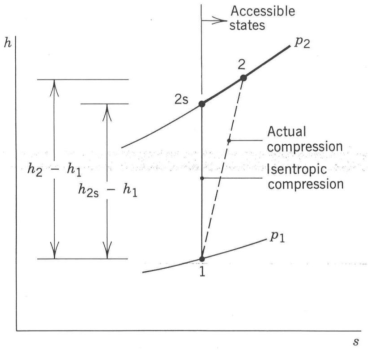
Der isentrope Wirkungsgrad für eine Turbine ist also definiert als

$$\eta_{T,s} = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{rev}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2,s} - h_1}. \tag{31}$$

Isentroper Wirkungsgrad eines Kompressors

Für eine stationäre und adiabate Turbine gilt:

$$-\dot{W} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1), \qquad \dot{S}_{erz} = \dot{m} \cdot (s_2 - s_1). \qquad (32)$$



Isentroper Wirkungsgrad eines Kompressors

- Idealer Kompressor:

$$s_1 = s_2 \quad \Rightarrow \quad -\dot{W}_{\text{rev}} = \dot{m} \cdot (h_{2,s} - h_1). \tag{33}$$

- Realer Kompressor:

$$s_2 > s_1 \quad \Rightarrow \quad -\dot{W} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1). \tag{34}$$

Jetzt ist $h_2 > h_{2,s}$, also ist

$$|\dot{W}| > |W_{\text{rev}}| = |W_{\text{min}}|. \tag{35}$$

Der isentrope Wirkungsgrad eines Kompressors ist also definiert als

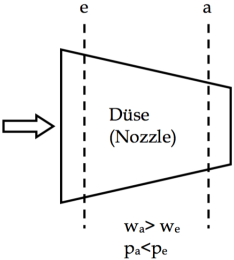
$$\eta_{K,s} = \frac{\dot{W}_{\text{rev}}}{\dot{W}} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1}. \tag{36}$$

Düsenwirkungsgrad

Analog zu der Turbine und dem Kompressor kann man auch den Wirkungsgrad einer (adiabaten) Düse definieren:

$$\eta_{D,s} = \frac{w^2}{w_{\text{max}}^2} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2,s} - h_1}, \tag{37}$$

wobei w eine Geschwindigkeit ist.



Aufgabe (Winter 11, Aufgabe 2)

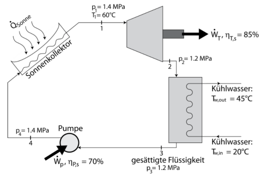


Abb. 2: Solarkraftwerk

Ein neues Solarkraftwerk soll gemäss Abbildung 2 dimensioniert werden um im stationären Zustand eine Nettoleistung (Gesamtkraftwerk) $\dot{W}_{tot}$ von *10 MW* zu liefern. Kühlmittel R-22 soll durch den Sonnenkollektor auf p_1= *1.4 MPa* und T_1= *60°C* erhitzt werden um durch eine gut isolierte Turbine mit $\eta_{T,s}$ (isentroper Wirkungsgrad) von *85%* auf p_2= *1.2 MPa* zu expandieren. Anschliessend soll der R-22 – Strom durch einen Wärmetauscher isobar bis zur Sättigungstemperatur (*x=0*) abgekühlt werden und dabei einen $T_{w,in}$= *20°C* kalten *Wasserstrom* auf $T_{w,out}$= *45°C* erhitzen. Danach soll das *inkompressible*, flüssige R-22 über eine Pumpe mit $\eta_{P,s}$ (isentroper Wirkungsgrad) von *70%* auf p_4= *1.4 MPa* gebracht werden (im Flüssigzustand), bevor es wieder via Sonnenkollektor auf den Anfangszustand verdampft wird.

Das Kraftwerk arbeitet im stationären Zustand, alle Komponenten (Turbine, Pumpe, Wärmetauscher, Sonnenkollektor) sind gegen aussen gut isoliert, kinetische und potentielle Energieeffekte können vernachlässigt werden.

Bestimmen Sie:

a) Die spezifischen Arbeiten $\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{R22}}$ der Turbine, sowie $\frac{\dot{W}_P}{\dot{m}_{R22}}$, die der Pumpe zugeführt werden muss,

b) Den Massenstrom $\dot{m}_{R22}$ des Kühlmittels, sowie den Wärmefluss $\dot{Q}_{Sonne}$, der durch Sonnenstrahlen auf den Kühlmittelstrom übertragen wird,

c) Den Wärmefluss $\dot{Q}_{Wärmetauscher}$, der an das Kühlwasser abgegeben wird, sowie den Kühlwassermassenstrom $\dot{m}_W$,

d) Den thermischen Wirkungsgrad des gesamten Kraftwerks. Wie könnte man diesen erhöhen, bei gleichbleibendem Kühlmittel sowie Komponenten?

Isentrope Prozesse für ideale Gase

- Polytrope Zustandsänderung:

$$p \cdot V^n = \text{konst.} \tag{38}$$

- Bei isentropen Prozessen gilt:

$$n = \kappa = \frac{c_p}{c_v}, \tag{39}$$

κ wird auch Isentropenkoeffizient genannt.

- Es gilt (nur bei idealen Gasen):

$$\text{Isentrop} \Rightarrow \text{Adiabat} \ + \ \text{Reversibel.}$$

Isentrope Prozesse für ideale Gase

Die Entropieänderung eines idealen Gases ist gegeben durch

$$\Delta s = s_2^0 - s_1^0 - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right). \tag{40}$$

Für isentrope Prozesse ist $\Delta s = 0$, d.h.

$$s_2^0 - s_1^0 = R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \tag{41}$$

und, nach $\frac{p_2}{p_1}$ aufgelöst,

$$\frac{p_2}{p_1} = \exp\left(\frac{s_2^0 - s_1^0}{R}\right) = \frac{\exp(s_2^0/R)}{\exp(s_1^0/R)} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}. \tag{42}$$

Isentrope Prozesse für ideale Gase

Analog kann man auch eine Formel für die Volumina herleiten:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}. \tag{43}$$

Wichtig: p_r und v_r sind **nur** für die Luft tabelliert (A-22).

Also wenn der $\frac{v_2}{v_1}$, v_{r1} bekannt sind und **der Prozess isentrop ist**, kann man v_{r2} bestimmen, und daraus (Tabelle A-22) alle Zustandsgrössen (h, T, u, p_r).

Isentrope Prozesse für ideale Gase

TABLE A-22 *(Continued)*

T(K), h and u(kJ/kg), $s°$(kJ/kg·K)

T	h	p_r	u	v_r	$s°$
750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
770	789.11	41.31	568.07	53.39	2.67595
780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
790	810.99	45.55	584.21	49.86	2.70400
800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344

Isentrope Prozesse für perfekte Gase

Was passiert wenn das Gas konstante c_p und c_v hat?

$$\Delta s = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \tag{44}$$

Für isentrope Prozesse ($\Delta s = 0, c_p = \frac{R \cdot \kappa}{\kappa - 1}$) gilt:

$$\frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 0 \tag{45}$$

bekommt man nicht anders als die isentrope Beziehung:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}. \tag{46}$$

Isentrope Prozesse für perfekte Gase

Was passiert wenn das Gas konstante c_p und c_v hat?

$$\Delta s = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \tag{47}$$

Für isentrope Prozesse ($\Delta s = 0, c_v = \frac{R}{\kappa - 1}$) gilt:

$$\frac{R}{\kappa - 1} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = 0 \tag{48}$$

bekommt man nicht anders als die isentrope Beziehung:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa - 1}. \tag{49}$$

Aufgabe (Serie 10, Aufgabe 4)

Der vereinfachte Zyklus eines 4 Zylinder 4-Takt Benzinmotors eines Autos besteht aus folgenden reversiblen Prozessschritten:

1 – 2: Isentrope Kompression mit Kompressionsrate $r = \frac{V_1}{V_2} = 9$, ausgehend von $T_1 = 27°C$ und $p_1 = 1\ bar$

2 – 3: Isochores Aufheizen mit $q_{23} = 1.2\ \frac{MJ}{kg}$

3 – 4: Isentrope Expansion

4 – 1: Isochore Abkühlung

Das Arbeitsmittel ist Luft. Benützen Sie die Tabelle A-22 und die Beziehung für relative Volumina **bei isentropen Prozessen von Luft**:

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{v_{r_A}}{v_{r_B}}$$

Das Volumen eines Zylinders vor der Kompression ist $V_1 = 0.00047\ m^3$.

a) Skizzieren Sie den Prozess im p-v-Diagramm. Zeichnen Sie die Isotherme bei der maximalen Temperatur ebenfalls ein.

b) Berechnen Sie die spezifische innere Energie in jedem Zustand.

c) Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad des Motors.

d) Bonus-Aufgabe (4 Punkte extra)
Berechnen Sie die Leistung des Motors in PS (1 PS = 0.735 kW), wenn die Drehzahl des Motors bei 3200 Umdrehungen pro Minute liegt. Bedenken Sie, dass ein 4-Takt Motor für den obigen Kreisprozess 2 Umdrehungen benötigt. (Da für das Ausschieben des Abgases und das Ansaugen des neues Kraftstoffgemisches eine zweite Umdrehung benötigt wird.)

Aufgabe (Klausur 13, Aufgabe 1)

In einem geschlossenen System durchläuft Wasser den folgenden, stationären Kreisprozess:

1-2: Isobares Aufheizen von T_1=100°C und x_1=40%

2-3: Isochores Aufheizen auf T_3=320°C und p_3=1.5bar

3-4: Isotherme, reversible Zustandsänderung

4-1: Isentrope Expansion mit dem Polytropenkoeffizienten n=1.15 zum Anfangszustand

a) Zeichnen Sie die Prozesse 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 qualitativ in ein T-s-Diagramm ein.

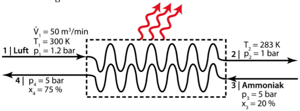
b) Berechnen Sie für jeden Teilprozess die spezifische Arbeit sowie die spezifische Wärme in kJ/kg.

c) Begründen Sie, warum es bei diesem Kreisprozess keinen Sinn macht, den thermischen Wirkungsgrad zu berechnen. Berechnen Sie stattdessen die Leistungszahl für den Fall, dass es sich um eine Kältemaschine handelt.

Hinweis: Für den Prozesspunkt bei 1.014 bar dürfen die Tabellenwerte von 1 bar verwendet werden.

Aufgabe (Klausur 15, Aufgabe 2)

Betrachten Sie einen stationären Wärmetauscher, in dem Wärme von einem Luftstrom an einen Kühlmittelstrom (Ammoniak) übertragen wird. Die Ein- und Ausströmungsbedingungen sind in der untenstehenden Abbildung gegeben. Der Wärmetauscher arbeitet nicht adiabat, 10 % der von der Luft abgegebenen Wärme wird über das Gehäuse des Wärmetauschers verloren. Kinetische und potentielle Energieänderungen können vernachlässigt werden.



Hinweis: Die Luft kann als ideales Gas betrachtet werden. Bitte benutzen Sie für Luft in b) die Tabelle A-22.

Berechnen Sie

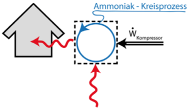
a) den Luftmassenstrom (in kg/s).

b) den Kühlmittelmassenstrom (in kg/s)

Wie in der Abbildung angegeben ist der Luftdruck durch den Wärmetauscher nicht konstant.

c) Bisher wurden Tabellenwerte für die Berechnung verwendet. Wäre es grundsätzlich auch richtig, für die Berechnung des Wärmeüberganges bei der Luft c_p in dieser Aufgabe zu verwenden? Begründen Sie mit einer kurzen Herleitung.

Stellen Sie sich vor, derselbe Ammoniakmassenstrom sei das Kühlmittel einer Wärmepumpe, die ein Haus bei einer Temperatur von 23°C beheizen soll. Den Luftmassenstrom müssen Sie nicht mehr beachten. Wie gross ist

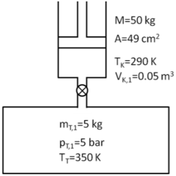


d) die theoretisch maximal mögliche Leistungszahl der Wärmepumpe?

e) die theoretisch maximal mögliche Heizleistung der Wärmepumpe und die dafür aufzuwendende Kompressorleistung (beides in kW)?

Aufgabe (Serie 11, Aufgabe 2)

Ein Tank mit $m_{T,1} = 5kg$ Stickstoff hat im Anfangszustand einen Druck $p_{T,1} = 5bar$ und eine Temperatur $T_T = 350K$. Der Tank ist über ein Ventil mit einem Kolbensystem verbunden. Der Kolben hat eine Masse $M = 50kg$ und eine Querschnittsfläche $A = 49cm^2$. Der Kolben ist frei beweglich, so dass sein Gewicht für einen konstanten Druck sorgt. Der Stickstoff im Kolbensystem hat eine Temperatur $T_K = 290K$ und ein Anfangsvolumen von $V_{K,1} = 0.05m^3$. Das Ventil wird geöffnet, so dass ein Teil des Inhaltes des Tanks langsam bei einer Eintrittstemperatur von 350K ins Kolbensystem fliessen kann. Der Vorgang verläuft so langsam, dass sowohl der Tank als auch das Kolbensystems während des Fliessvorgangs eine konstante Temperatur haben. Das Ventil wird geschlossen, sobald der Tank den Druck $p_{T,2} = 3bar$ erreicht. Der Umgebungsdruck beträgt $p_0 = 1bar$. Die Masse des Stickstoffs



und der Wärmetransfer in der Verbindung zwischen Kolben und Tank können vernachlässigt werden. Stickstoff kann als ideales Gas betrachtet werden. Kinetische und potentielle Effekte können vernachlässigt werden.

a) Bestimmen Sie die Masse des Gases welche vom Tank ins Kolbensystem fliesst

b) Berechnen Sie die Richtung und Menge der Wärme, welche das Kolbensystem (ohne Tank) während des Fliessvorgang verlässt oder zugeführt wird

c) Bestimmen Sie die erzeugte Entropie des Gesamtsystems zwischen Anfangs- und Endzustand.

Fragen?