

Grundpraktikum 2: Wärmepumpe

Gregor Weihs

18. Mai 2017

1 Ziel des Versuches

Verstehen thermodynamischer Kreisprozesse und das Erlernen praktischer Aspekte von Wärmepumpen und Kältemaschinen.

2 Aufgaben

1. Temperaturverlauf nach Zeit
2. Anfertigen der Zustandsdiagramme
3. Berechnung und Vergleich der temperaturabhängigen Leistungszahlen aus
 - a) der Energiebilanz (ϵ_E, ϵ'_E)
 - b) den Temperaturen für den idealen Carnot-Prozess (ϵ_C, ϵ'_C)
 - c) den Enthalpien für den Clausius-Rankine Prozess ($\epsilon_{CR}, \epsilon'_{CR}$)

3 Einleitung

Kältemaschinen begegnen uns täglich in Form von Kühlschränken und Klimaanlage. Eine Kältemaschine benutzt mechanische Arbeit um Wärme von einem Reservoir in ein anderes zu transportieren, dabei kühlt sich das erstere ab, das zweitere wird erwärmt. Je nachdem an welchem Effekt man interessiert ist, wird die Maschine als Kältemaschine oder Wärmepumpe bezeichnet. Wärmepumpen werden zur Verringerung des CO₂ Ausstoßes seit einigen Jahren sehr erfolgreich zum Heizen eingesetzt. Sie transportieren dabei die Wärme einer Energiequelle (Grundwasser, Erdreich, Luft,...) in das Haus. Eine entscheidende Frage ist, ob sich dieser Aufwand lohnt, also wieviel Wärme pro eingesetzter Arbeit transportiert wird. Das Verhältnis dieser beiden Größen heißt Leistungszahl. Moderne Grundwasserwärmepumpen zur Heizung von Häusern erzielen eine Leistungszahl von über 6. D.h. für 1 kW elektrische Leistung erzielt man 6 kW Heizleistung. Zum Vergleich, ein typischer Haartrockner verbraucht ebenfalls 1 kW elektrische Leistung. Mit derselben elektrischen Leistung kann durch die Wärmepumpe ein modernes Einfamilienhaus beheizt werden. In unserem Praktikumsversuch ist eine komplette Wärmepumpe offen aufgebaut, so das alle Elemente zugänglich sind. Sie sollen in diesem Versuch ein tieferes Verständnis für Kältemaschinen erlangen, die Leistungszahl der Maschine unter verschiedenen Betriebsbedingungen messen und mit zwei idealisierten Wärmepumpen vergleichen.

4 Geräte

- Wärmepumpe mit Kältemittel: R134a = 1,1,1,2 Tetrafluorethan (FCKW-frei) (siehe Abb. 1)
- Zwei Eimer mit Strömungspumpen zum Temperatenausgleich
- Energiemengenmessgerät für den Kompressor
- Acht Temperatursensoren an USB-Datenerfassungsmodul an PC mit Protokollierungssoftware "TracerDAQ"

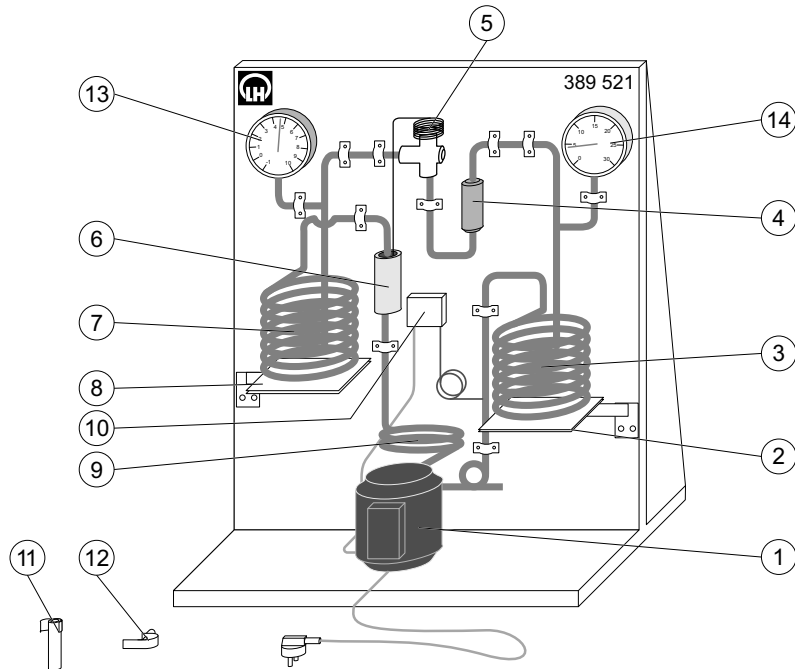


Abbildung 1: Wärmepumpe (Bild übernommen aus [6]) bestehend aus:

1. Kompressor Leistungsaufnahme ca. 130 W.
2. Ausschwenkbare Stellfläche für rot-markierten Warmwasserbehälter
3. Verflüssiger, Innendurchmesser ca. 13 cm
4. Sammler / Reiniger
5. Expansionsventil, thermostatisch geregelt
6. Temperaturfühler des Expansionsventils, thermisch isoliert
7. Verdampfer, Innendurchmesser ca. 13 cm
8. Ausschwenkbare Stellfläche für blau-markierten Kaltwasserbehälter
9. Rohrwindungen als elastische Verbindung zwischen Kompressor und Wärmetauscher
10. Druckwächter
11. Kunststoffhalter (2x) für Thermometer und Temperaturfühler, zum Anklebmen an Kupferrohre, jeweils bestehend aus doppelseitiger Klammer und Kunststoffrohr.
12. Kupfer-Meßschuh (2x) mit Klemmschrauben und Bohrungen, 0 mm bis 2 mm, zum Einstecken von Temperaturfühlern für Temperaturmessungen an den Kupferrohren des Kältemittelkreislaufs.
13. Manometer für die Niederdruckseite; innere Skala für Druckmessung von -1 bar bis 10 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R134a von -60°C bis 40°C .
14. Manometer für die Hochdruckseite; innere Skala: Druck von -1 bar bis 30 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R134a von -60°C bis 85°C . **Achtung: die Druckwerte sind relativ zum Atmosphärendruck. Für die Auswertungen müssen diese in Absolutdrücke umgerechnet werden!**

5 Thermodynamische Grundlagen

5.1 Die Hauptsätze der Thermodynamik

Der gesamte Versuch basiert auf dem Zusammenspiel der Hauptsätze der Thermodynamik:

- **0. Hauptsatz:** Thermisches Gleichgewicht und Konzept der Temperatur.
- **1. Hauptsatz:** Energieerhaltung: Jedes System besitzt eine innere Energie U , die durch den Transport von Energie in Form von **Arbeit** W und/oder **Wärme** Q — in das System oder aus dem System — verändert werden kann. D.h.: $dU = \delta Q + \delta W$
- **2. Hauptsatz:** Wärme geht von selbst nur von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper niedriger Temperatur über. Bei irreversiblen Prozessen erhöht sich die **Entropie** S , während sie bei reversiblen konstant bleibt.
- **3. Hauptsatz:** Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts.

5.2 Das Konzept der Entropie

In der modernen statistischen Physik ist die Entropie ein logarithmisches Maß des statistischen Gewichts des wahrscheinlichsten Makrozustands eines Systems und hängt im allgemeinen von den Zustandsvariablen innere Energie U und Volumen V ab, also $S(U, V)$. Für einige Systeme kann S explizit berechnet werden, für andere, so wie das Arbeitsmedium unserer Wärmepumpe ist S tabelliert. Alle thermodynamischen Größen werden aus der Entropiefunktion definiert, z.B. Temperatur und Druck:

$$T = \left(\frac{\partial S}{\partial U} \right)_V^{-1} \quad \text{und} \quad p = T \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_U. \quad (1)$$

Daraus und über das totale Differenzial $dS = dU/T + p dV/T$ ergibt sich die wichtige thermodynamische Identität

$$dU = T dS - p dV. \quad (2)$$

Für quasistatische (langsam ablaufende) Prozesse ergibt sich durch Vergleich mit dem 1. Hauptsatz, dass die Entropieänderung mit der ausgetauschten Wärme zusammenhängt, also

$$Q = T dS. \quad (3)$$

Es kann allerdings in irreversiblen Prozessen auch Entropie erzeugt werden, ohne dass Wärme fließt, z.B. in der freien Expansion eines Gases in einen vorher leeren Raum oder durch die Mischung zweier Flüssigkeiten, die vorher getrennt waren. Allgemein gilt daher

$$dS \geq \frac{Q}{T}. \quad (4)$$

Ein häufiger irreversibler Prozess mit Wärmeaustausch ist der Wärmefluss von einem heißen (T_H) auf einen kalten Gegenstand (T_K). Die gesamte Entropieänderung (siehe Abb.2) für eine Wärmemenge $|Q|$ ist

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_K = \frac{-|Q|}{T_H} + \frac{|Q|}{T_K} > 0.$$

5.3 Enthalpie

Viele wichtige Prozesse laufen unter konstantem Druck ab, deshalb ist es oft günstiger statt der inneren Energie U die Enthalpie H eines Systems zu verfolgen.

$$H = U + pV \quad (5)$$

Sie beinhaltet die nötige Energie um dem System den Platz V im der Umgebung (mit Druck p) zu verschaffen. Bei chemischen Reaktionen oder Phasenübergängen, die unter einem gewissen Druck (z.B. Atmosphärendruck) ablaufen, ist ΔH die tatsächlich aufgenommene Energie, auch wenn sich bei der Reaktion das Volumen ändert.

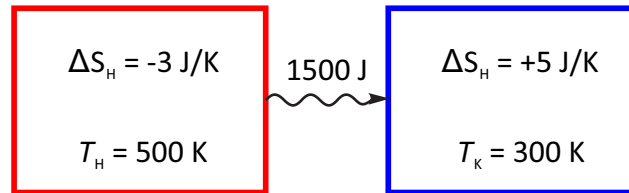


Abbildung 2: Wenn durch einen endlichen Temperaturunterschied Wärme fließt, nimmt die gesamte Entropie zu.

5.4 Phasenübergänge

Reale Kältemaschinen benutzen fast immer den Phasenübergang von flüssig zu gasförmig in einem Arbeitsmedium. Grund dafür ist die enorme Energiemenge, die in der latenten Wärme (hier der Verdampfungswärme) gespeichert wird. Für Wasser ist die spezifische Verdampfungswärme 2260 kJ kg^{-1} für das hier verwendete R-134a ca. $h_{fg} = 200 \text{ kJ kg}^{-1}$, wobei der genaue Wert von der Temperatur bzw. vom Druck abhängt.¹

Die gasförmige Phase eines Mediums wird als Dampf bezeichnet, wenn Sie in Verbindung mit der flüssigen Phase steht. Für die Beschreibung des Gleichgewichts ist der sogenannte Sättigungsdampfdruck $p_{\text{sat}}(T)$ maßgeblich. Man könnte das Phasendiagramm in Druck und Temperatur betrachten, günstiger ist aber das Druck-Enthalpie (p - h) Diagramm in Abb. 3, weil damit auch das gemeinsame Vorliegen von flüssiger und gasförmiger Phase quantitativ abgebildet wird. In diesem Diagramm werden wir später das Funktionieren der Wärmepumpe betrachten.

5.5 Der Carnot-Kreisprozess

Der Carnot-Prozess (benannt nach Nicolas Léonard Sadi Carnot 1796-1832) dient zur Beschreibung des idealen Wärmepumpenprozesses und besteht aus folgenden vier Prozessschritten, die in Abb. 4 dargestellt sind.

Isentrope Kompression ($1 \rightarrow 2$) des Arbeitsmediums, welches sich dabei auf die Temperatur $T_2 = T_H$ des heißen Reservoirs aufheizt.

Isotherme Wärmeabgabe ($2 \rightarrow 3$) an das heiße Reservoir $T_H = T_2 = T_3$. Dabei erniedrigt sich die Entropie des Arbeitsmediums um den Betrag von $\Delta S_{32} = S_3 - S_2 = \int_2^3 \delta Q/T = Q_H/T_H (< 0)$.

Isentrope Expansion ($3 \rightarrow 4$) des Arbeitsmediums, welches sich dabei auf die Temperatur des kalten Reservoirs $T_K = T_4 = T_1$ abkühlt.

Isotherme Wärmeaufnahme ($4 \rightarrow 1$) der Wärme Q_K aus dem kalten Reservoir wobei sich die Entropie des Arbeitsmediums um $\Delta S_{41} = S_1 - S_4 = \int_4^1 \delta Q/T = Q_K/T_K$ erhöht und die des Reservoirs um den gleichen Betrag senkt.

Hervorzuheben ist hierbei, dass die Senkung der Entropie während des Prozesses 2-3 ident mit der Hebung der Entropie im Prozess 4-1 ist, weil der Prozess ein geschlossener Kreis ist und in den beiden anderen Schritten die Entropie des Systems jeweils konstant ist. Es gilt also

$$-\Delta S_{41} = -\frac{Q_K}{T_K} = \frac{Q_H}{T_H} = \Delta S_{23} \quad (6)$$

$$\frac{|Q_H|}{|Q_K|} = \frac{T_H}{T_K} \quad (7)$$

¹Achtung, in der Thermodynamik ist es üblich, extensive Größen mit Großbuchstaben und intensive Größen mit Kleinbuchstaben zu bezeichnen. Extensiv bedeutet, dass die Größe proportional zur Stoffmenge ist. Beispiele sind V, U, H . Intensiv bedeutet, dass die Größe unabhängig von der Stoffmenge ist, z.B. p oder h . Dabei können Größen wie die spezifische Enthalpie h auf Volumen, Stoffmenge oder Masse bezogen sein. Leider gibt es Ausnahmen von dieser Schreibungsregel, wie zum Beispiel die Temperatur T , die eine intensive Größe ist.

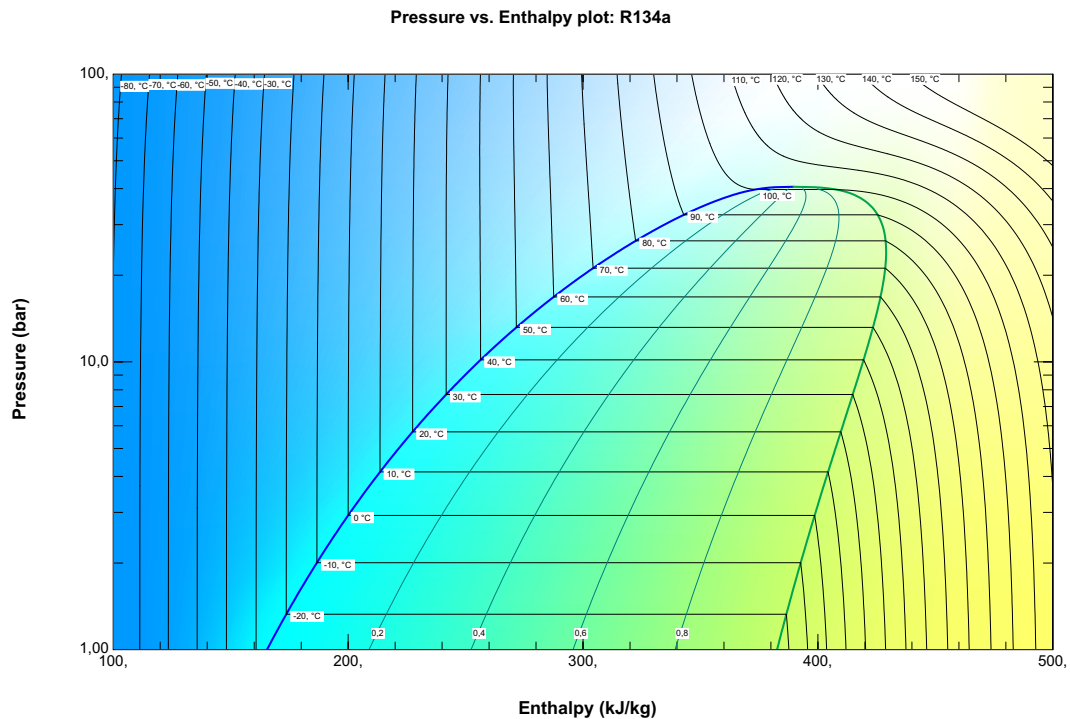


Abbildung 3: Das Druck-Enthalpie ($p-h$, mit der spezifischen Enthalpie h) Diagramm zeigt die verschiedenen Zustände des Arbeitsmediums. Zwei wichtige Kurven enden im kritischen Punkt, an dem man Flüssigkeit und Gas nicht mehr unterscheiden kann. Die linke Kurve ist die Flüssigkeitssättigungskurve. Links davon, also bei niedriger Enthalpie, bzw. niedrige innerer Energie und kleinem Volumen, liegt das Medium als reine Flüssigkeit vor. Ganz rechts, neben der Dampfsättigungslinie liegt das Medium nur als Gas vor. Dass es sich um Flüssigkeit bzw. Gas handelt kann man im $p-h$ Diagramm nicht leicht erkennen. Zwischen den Sättigungslinien koexistieren Flüssigkeit und Gas in dem Verhältnis, dass die Enthalpie bzw. das Volumen (welches bei konstantem Druck linear mit der Enthalpie zusammenhängt!) vorgibt. Der Druck ist in diesem Bereich nur eine Funktion der Temperatur! Der sogenannte Dampfgehalt der Mischung ist links 0 und rechts 1.

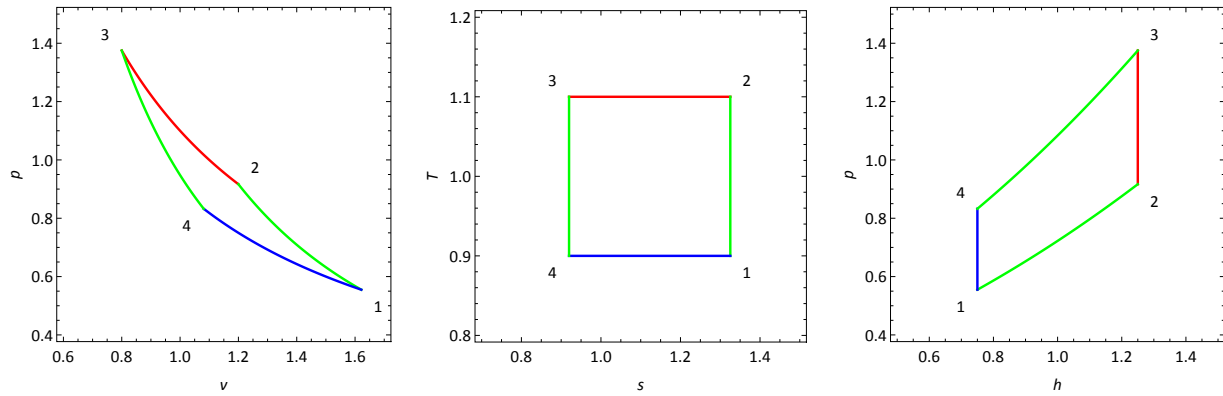


Abbildung 4: Der Carnot-Kreisprozess in verschiedenen Zustandsdiagrammen, Die p-v und p-h Diagramme beziehen sich auf ein ideales Gas, die Einheiten sind alle dimensionslos gehalten.

Zusätzlich gilt der 1. Hauptsatz und die innere Energie des Systems im Kreisprozess muss konstant bleiben also

$$\Delta U = Q + W = Q_K + Q_H + W = 0$$

Die Leistungszahl ϵ_C (coefficient of performance COP) also der Nutzen (abgegebene Wärme $|Q_H|$) pro Kosten (eingesetzte Arbeit $|W|$) der Carnot-Wärmepumpe ist daher

$$\epsilon_C = \frac{|Q_H|}{|W|} = \frac{|Q_H|}{|Q_H + Q_K|} = \frac{|Q_H|}{|Q_H| - |Q_K|} = \frac{1}{1 - |Q_K|/|Q_H|} = \frac{1}{1 - T_K/T_H} \quad (8)$$

Die Leistungszahl liegt zwischen 1 ($T_K = 0\text{ K}$) und ∞ ($T_H = T_K$). Wenn beispielsweise die Umgebung T_H , die erwärmt werden soll 20°C (293K) und die Wärmeenergiequelle $T_L = 0^\circ\text{C}$ (273K) hat, ist $\epsilon_C \approx 15$. D.h., dass, wenn 1000 J in die Umgebung als Wärme abgegeben werden sollen, nur 67 J an Arbeit (Kompressor) aufgebracht werden müssen. In anderen Worten bedeutet dies, dass eine solche Wärmepumpe mit 1 kW Anschlussleistung 15 kW Heizleistung an den Raum abgibt. Im Vergleich dazu würde ein kleiner Elektroofen oder Haartrockner mit 1 kW elektrischer Anschlussleistung auch nur 1 kW Heizleistung abgeben. Gleichzeitig kühlt der Prozess auch das kalte Reservoir und entsprechend können wir eine Leistungszahl für die Kühlleistung ausrechnen, die sich in ganz analoger Weise zu $\epsilon'_C = |Q_K|/|W| = 1/(T_H/T_K - 1)$ ergibt.

5.6 Der Clausius Rankine-Kreisprozess

Auch wenn die Carnot-Leistungszahl die höchstmögliche ist, die eine Maschine theoretisch erreichen kann, wäre eine Carnot-Maschine sehr unpraktisch. Die isothermen Prozesse müssen im Idealfall (keine Temperaturdifferenz zwischen Reservoir und Arbeitsmedium) unendlich langsam ablaufen, die tatsächliche Leistung so einer Maschine geht daher gegen Null. Reale Wärmepumpen arbeiten daher mit endlicher Temperaturdifferenz zwischen Maschine und Reservoirs und auch mit einem etwas anderen Kreisprozess, der am besten durch den Clausius-Rankine-Kreisprozess beschrieben wird, welcher auch für Dampfmaschinen gilt. Abb. 5 zeigt diesen Prozess in drei Zustandsdiagrammen.

Isentrope Kompression ($1 \rightarrow 2$): Im Kompressor wird das gasförmige Arbeitsmedium (R 134a) adiabatisch stark komprimiert, wodurch sich das Gas stark erwärmt (Heißgas). Idealerweise geht die gesamte Kompressionsarbeit in die Enthalpie des Mediums über $W_{12} = H_2 - H_1$.

Isobare Wärmeabgabe ($2 \rightarrow 3$): Im Kondensator kondensiert nun dieses komprimierte, heiße Gas und gibt seine Kondensationswärme an das heiße Reservoir ab. Die abgegebene Wärme ist dabei $Q_{23} = H_3 - H_2$ ($< 0!$)

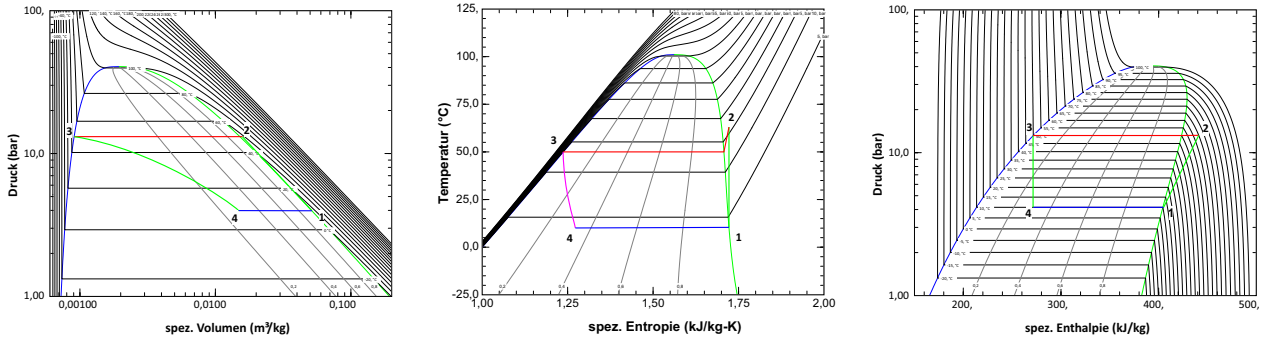


Abbildung 5: Die Zustandsdiagramme für den Clausius-Rankine Dampf Kühlkreisprozess zeigen, dass der Phasenübergang des Arbeitsmediums sehr viel Energie speichern kann während die Prozessparameter technisch beherrschbar bleiben.

Isenthalpe Expansion (3 → 4): Das Expansionsventil bzw. Drosselventil erzeugt durch eine lokale Verengung einen starken Druckabfall in der Strömung und damit auch eine Volumszunahme (Expansion) des flüssigen Arbeitsmediums, wodurch sich die meisten realen Fluide stark abkühlen.² Durch den starken Druckabfall verdampft auch schon ein Teil der Flüssigkeit. Dieser Prozess läuft in guter Näherung mit konstanter Enthalpie ab, also ist $H_{34} = H_4 - H_3 = 0$ was eine vertikale Linie im p - h Diagramm ergibt. Der Prozess ist allerdings nicht reversibel, die Entropie des Mediums nimmt zu, ohne dass dabei nützliche Wärme aufgenommen wird.³

Isobare Wärmaufnahme (4 → 1): Im Verdampfer werden jetzt diese sehr feinen Tröpfchen unter Aufnahme von Wärme aus dem kalten Reservoir vollständig verdampft (Sattdampf). Dabei erhöht sich die Entropie des Arbeitsmediums. Um sicherzugehen, dass keine Flüssigkeit mehr übrig bleibt wird der Kreislauf (durch das Expansionsventil) so geregelt, dass beim Verdampfen sogar eine gewisse *Überhitzung* über die Siedetemperatur hinaus erzielt wird. $H_{41} = H_1 - H_4$.

Nun wird das gasförmige Arbeitsmedium wieder vom Kompressor angesaugt und verdichtet. Somit ist der Kreislauf geschlossen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Wärmaufnahme aus der Wärmequelle bei niedriger Temperatur und auf der Niederdruckseite des Systems geschieht. Im Vergleich dazu geschieht die Wärmeabgabe bei hoher Temperatur auf der Hochdruckseite. Das Pumpen der Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau stimmt auch mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik überein, da zur Verdichtung (Kompressor) Energie zugeführt werden muss.

Die Leistungszahlen der Wärmepumpe für das Erwärmen des heißen Reservoirs bzw. Kühlen des kalten Reservoirs berechnet sich aus Nutzen/Kosten also

$$\epsilon_{\text{CR}} = \frac{|Q_{23}|}{W_{12}} = \frac{H_2 - H_3}{H_2 - H_1} \quad (9)$$

$$\epsilon'_{\text{CR}} = \frac{|Q_{41}|}{W_{12}} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1}. \quad (10)$$

²Ein ideales Gas würde in dieser adiabatischen, freien Expansion seine Temperatur nicht ändern ($pV = nRT$ und $p_3V_3 = p_4V_4$), weil weder Arbeit verrichtet noch Wärme ausgetauscht wird. Reale Gase und Flüssigkeiten haben aber (bei niedrigen Dichten und üblichen Temperaturen) anziehende Kräfte zwischen den Molekülen. Die Senkung des Drucks bewirkt eine niedrigere Dichte und damit größeren Teilchenabstand, wodurch die potentielle Energie steigt und die kinetische Energie sinkt. Nachdem die Temperatur ein Maß für die kinetische Energie ist, sinkt damit auch die Temperatur. Dieser Effekt heißt Joule-Thomson Effekt und wird auch bei der Verflüssigung von Gasen eingesetzt.

³Im Endeffekt wird hier ein Teil der Arbeit des Kompressors in innere Energie umgewandelt, wodurch sich die mögliche Wärmaufnahme aus dem kalten Reservoir (die Kühlleistung) reduziert. Besser wäre das Fluid bei der Expansion Arbeit verrichten zu lassen, die man prinzipiell wieder für die Kompression nutzen könnte. In der Praxis ist das allerdings nur schwer zu arrangieren.

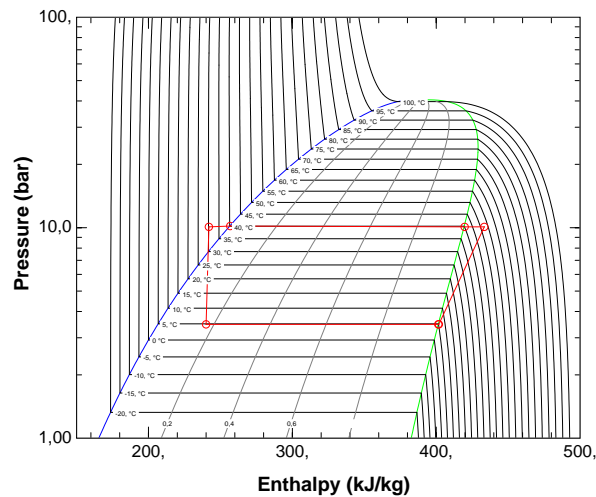


Abbildung 6: Realistischerer Kreisprozess einer realen Wärmepumpe mit Überhitzung nach Verdampfung und Unterkühlung nach Kondensation. Die zusätzliche bzw. fehlende Energie kann auch über Rohrleitungswände abgegeben aufgenommen werden, statt an das warme Reservoir oder aus dem kalten Reservoir.

5.7 Die reale Wärmepumpe

Eine reale Wärmepumpe und besonders unsere weicht in einigen Punkten vom oben genannten Kreisprozess ab, denn es gibt ein paar wichtige technische Einschränkungen:

- Das Arbeitsmedium strömt kontinuierlich im Kreis, wir müssen also alle Berechnungen mit Massenströmen und Leistungen statt Massen und Energien machen.
- In den Rohrleitungen tritt beim gegebenen Fluss ein Druckverlust auf, den wir hier im Experiment leider nicht messen, sondern nur schätzen können.
- Die Rohrleitungen unserer Wärmepumpe sind nicht isoliert, es gibt daher Wärmeverluste bzw. Einträge.
- Der Kompressor darf keinesfalls flüssiges Arbeitsmedium ansaugen. Deshalb ist der Kreislauf und die Regelung des Drosselventils so ausgelegt, dass das Medium nach dem Verdampfer ein Stück weit über den Siedepunkt erhitzt wird (Überhitzung).
- Der Kompressor selbst hat einen endlichen Wirkungsgrad in der Umsetzung elektrischer Arbeit auf Kompressionsarbeit. Ein Teil der überschüssigen Arbeit erhitzt das Arbeitsmedium, ist also nützlich, ein anderer Teil wird an die Umgebung abgegeben.
- Die Kondensation je nach aktuellen Arbeitsbedingungen unvollständig oder aber auch übervollständig sein, im letzteren Fall wird das Arbeitsmedium auf der heißen Seite sogar unter die Kondensationstemperatur abgekühlt (Unterkühlung).
- Gasförmiges Arbeitsmedium würde durch das Drosselventil nur wenig abgekühlt werden. Damit nur Flüssigkeit dorthin gelangt braucht es einen Sammler/Filter, der durch seine senkrechte Anordnung bewirkt, dass nur Flüssigkeit am unteren Ende austritt.
- Die Kupferspiralen sind unvollkommene Wärmetauscher, es wird immer eine endliche Temperaturdifferenz zwischen dem zu erwärmenden/kühlenden Wasser und dem Arbeitsmedium bleiben. Insbesondere unterscheiden sich Eintritts- und Austrittstemperatur des Arbeitsmediums aus den Spiralen. Das muss in der Berechnung des Kreises berücksichtigt werden.
- Die Drücke müssen insgesamt beherrschbar bleiben, deshalb gibt es Sicherheitsmechanismen die bei Überdruck oder zu großer Druckdifferenz abschalten.

Ein etwas erweiterter Clausius-Rankine Zyklus ist in Abb. 6 gezeigt. An unserer Praktikums-Wärmepumpe befinden sich acht Temperaturmesspunkte, welche zusätzlichen Prozesspunkten im Diagramm entsprechen. Die Leistungszahlen so eines realen Prozesses sind immer schlechter als die des idealen.

6 Durchführung des Versuchs

6.1 Wichtige Hinweise vor Beginn des Versuches

1. Während des Versuchs Lauf der Strömungspumpen in den Behältern überprüfen.
2. Temperatur auf der kalten Seite beobachten und unter 1 °C Versuch abschalten, **Frostgefahr!**

6.2 Vorbereitung

1. Zuerst müssen Sie in die beiden Eimer jeweils ca. 4 l frisches Wasser einfüllen, wobei Sie die genaue Menge vor oder nach dem Versuch mit einer Waage messen sollen.
2. Die Eimer danach von unten über die jeweiligen Kupferwendeln heben (blau links, rot rechts) und auf der schwenkbaren Auflageplatte abstellen. Darauf achten, ob der Wasserstand die Kupferwendeln gut bedeckt (min. 1 cm).
3. Die Strömungspumpen unter Wasser in der Mitte des Eimerbodens mit dem Saugnapf fixieren.
4. Den Energiemengenzähler in die Steckdose einstecken.
5. Die Verkabelung überprüfen, Kompressor und Strömungspumpen in den Verteiler einstecken, Schalter am Verteiler auf aus, dann in Energiemengenzähler einstecken.
6. Temperaturprotokollierungssoftware „TracerDAQ“ am PC starten. Aufnahmeintervall z.B. auf 10 s oder kürzer stellen und kurz testen. Die Praktikumswärmepumpe hat acht (0-7) Temperaturmesspunkte. Machen Sie ein Diagramm, dass jede Nummer der Stelle im Aufbau zuordnet.
7. Im Laborbuch eine Tabelle für die Drücke und aufgenommene elektrische Energie (in kWh) vorbereiten und vor dem Einschalten die ersten Druckwerte protokollieren.

6.3 Messdaten aufnehmen

Wenn alles vorbereitet ist, den Schalter am Verteiler einschalten. Der Kompressor ist sehr leise aber hörbar. Bis sich das Wasser im blauen Eimer auf den Gefrierpunkt abgekühlt hat, dauert es nur ca. 30 min. Währenddessen die Druckwerte an den beiden Manometern und die aufgenommene Energie im Minutenabstand protokollieren.

Sie sollten diese Zeit außerdem nutzen, um sich mit der Wärmepumpe und ihren Elementen vertraut zu machen. Fühlen Sie mit der Hand ab und zu die Temperaturen an verschiedenen Stellen der Rohrleitungen. Falls die Wärmebildkamera verfügbar ist, fertigen Sie damit ein Bild des Aufbaus im Betrieb an.

Solange Sie nach Ende der Laufzeit noch da sind, ist es interessant den Temperaturverlauf der Wassermengen noch ein wenig weiter zu protokollieren (alle paar Minuten). Versuchen Sie daraus den Wärmeverlust an die Umgebung abzuschätzen.

6.4 Auswertung

Sie sollten die Zeit des Praktikums nutzen um eine erste einfache Auswertung der Leistungszahlen vorzunehmen, z.B. aus der reinen Energiebilanz. Sie finden auf den Praktikumscomputern außerdem zwei Programme, deren Benutzung sehr hilfreich sein kann. Beide Programme finden Sie frei verfügbar im Internet.

Eines der Programme heißt „Chemours Refrigerant Expert (DUPREX)“ (Chemours, https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/DUPREX/DUPREX.html) und simuliert den gesamten Wärmepumpenprozess. Das Kältemittel „Freon 134a“ ist der Handelsname von Chemours für das Kältemittel in unserer Wärmepumpe. Insbesondere kann man bei diesem Programm Druckverluste und die Eigenschaften des Kompressors ändern und damit diese möglichen Verluste abschätzen.

Das andere Programm heißt „RefPropMini“ (NIST, <http://www.boulder.nist.gov/div838/theory/refprop/MINIREF/MINIREF.HTM>) und kann Stoffdaten berechnen, tabellieren und die benötigten Diagramme erstellen. Alternativ können Sie die Diagramme und Tabellen im Anhang benutzen.

1. Zeichnen Sie die aufgenommene bzw. abgegebene (negativ) Wärme der beiden Wassermengen (spezifische Wärmekapazität $c = 4182 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}$) gegen die vom Kompressor aufgenommene Energie, und dazu eine Gerade mit der Steigung 1. Das entspricht dem Fall, wenn man mit der aufgenommenen elektrischen Energie das Wasser im zu erwärmenden Reservoir direkt heizen würde.

2. Wählen Sie drei Zeitpunkte aus, zu denen sie die Leistungszahlen auswerten wollen, jeweils in der Nähe von Anfang, Mitte und Ende der Messungen. Werten Sie aus dem obigen Diagramm die Leistungszahlen ϵ_E und ϵ'_E aus der Energiebilanz aus, indem Sie entweder durch einige Datenpunkte um den jeweiligen Zeitpunkt eine Gerade legen oder alternativ die beiden Kurven mit einem Polynom 2. oder 3. Grades fitten und dann die Steigung der Fitkurve für die drei Punkte berechnen.
3. Die Clausius-Rankine Leistungszahlen ϵ_{CR} und ϵ'_{CR} erfordern, dass Sie die Enthalpien der Prozesspunkte mithilfe von miniREFPROP oder Mathematica berechnen, bzw. aus dem $p - h$ Diagramm im Anhang auslesen.
4. Zeichnen Sie ein logarithmisches $p - h$ Diagramm mit ihren Prozesspunkten aus Drücken und Temperaturen des Mediums mindestens für den mittleren Zeitpunkt, z. B. mit miniREFPROP. Wählen Sie einen vernünftigen Ausschnitt und achten Sie auf lesbar große Beschriftungen. Zeichnen Sie dazu ebenso den Carnotprozess mit folgenden Randbedingungen ein:
 - a) Wassertemperaturen für die isothermen Prozesse
 - b) adiabatische Kompression von der Phasengrenze
 - c) Beginn der adiabatischen Expansion von der Phasengrenze
5. Werten Sie die Carnot-Leistungszahlen ϵ_C und ϵ'_C für dieselben drei Zeitpunkte aus den *Wassertemperaturen* aus. Sie können zur Kontrolle die Carnot-Leistungszahlen aus Ihrem vorigen Diagramm berechnen.
6. Fertigen Sie eine Tabelle an, in welcher für die drei gewählten Zeitpunkte jeweils die Wassertemperaturen und alle sechs berechneten Leistungszahlen ($\epsilon_C, \epsilon'_C, \epsilon_{CR}, \epsilon'_{CR}, \epsilon_E, \epsilon'_E$) angegeben werden. Vergessen Sie nicht die Messunsicherheiten für alle diese Größen!
7. Versuchen Sie zu berechnen, wieviel Kältemittel pro Sekunde jeweils durch Verdampfer und Verflüssiger fließen. Dazu sollten sie aus die jeweiligen Kühl- bzw. Heizleistung der Wassermengen für die drei Zeitpunkte berechnen. Mit der spezifischen Enthalpieänderung des Mediums vor und hinter den Wärmetauschern ergibt sich daraus der Massenstrom. Dieser sollte auf der kalten und warmen Seite gleich sein. Aus dem Massenstrom, der spezifischen Enthalpieänderung vor und hinter dem Kompressor und der Leistungsaufnahme des Kompressors können Sie dessen Effizienz abschätzen.

7 Hinweise zum Bericht

Ihr Bericht soll die üblichen Formatierungsregeln beachten. Sie müssen nicht die Grundlagen der Thermodynamik wiederholen, eine Erklärung bzw. Darstellung des Clausius-Rankine Prozesses ist aber angebracht, alleine schon um die nötigen Größen für die Auswertung zu definieren. Diskutieren Sie die Verluste, warum ist unsere Wärmepumpe viel weniger effizient als die Berechnung aus dem CR-Prozess?

8 Fragen zur Vorbereitung

1. Erklären Sie die Begriffe Entropie und Enthalpie.
2. Was ist Arbeit, was Wärme, was innere Energie?
3. Wie lauten die Hauptsätze der Thermodynamik?
4. Was macht eine Kältemaschine, was ist ihr Wirkungsgrad?
5. Beschreiben Sie den Carnot-Prozess.
6. Welchen Kreisprozess benutzen die meisten Wärmepumpen?
7. Warum erreicht eine reale Wärmepumpe nicht die ideale Leistungszahl? Welche Verluste können auftreten?
8. Die Enthalpien werden aus einer Tabelle bzw. mithilfe einer Software aus den (mit Unsicherheiten behafteten) gemessenen Werten für Temperatur und Druck ermittelt. Wie kann man in diesem Fall die Unsicherheit der Enthalpie abschätzen?

9 Literatur

Literatur

- [1] Peter Atkins. *The Laws of Thermodynamics: A Very Short Introduction*. Oxford University Press, 2010.
- [2] Michael Baumann, Hans-Jürgen Laue, and Peter Müller. *Wärmepumpen: Heizen mit Umweltenergie*. Solarpraxis, 2007.
- [3] Fritz Bukau. *Wärmepumpen-Technik: Wärmequellen - Wärmepumpen - Verbraucher - Grundlagen und Berechnungen*. R. Oldenbourg, 1983.
- [4] Heinz Gabernig. *Energie- und Klimatechnik*. Jugend & Volk, 2000.
- [5] J.M. Honig. *Thermodynamics: Principles Characterizing Physical and Chemical Processes*. Elsevier, 1982.
- [6] LD Didactic GmbH. *Gebrauchsanweisung 389 521: Wärmepumpe pT*, 1995.
- [7] Klaus Lüders and Gebhard von Oppen. *Mechanik, Akustik, Wärme*. Walter de Gruyter, 2008.
- [8] Karl Ochsner. *Wärmepumpen in der Heizungstechnik*. C.F Müller, 2007.
- [9] Michel A. Saad. *Thermodynamics Principles and Practice*. Prentice Hall, 1997.

