Wärmepumpe

Aufgabenstellung

Mit einer Wärmepumpe wird Wärme von einem Wasserbehälter (blau) in einen anderen (rot) gepumpt.

- Messung des Temperaturverlaufes in zwei Wasserbehältern, der von der Pumpe aufgenommenen Leistung und der Drücke nach Kompression bzw. Expansion im Kältemittelkreislauf über 1 std.
- 2. Bestimmung der Leistungszahl und des Gütegrades als Funktion der Temperaturdifferenz.
- 3. Erstellung des p-H-Diagrammes des Kreisprozesses aufgrund der gemessenen Werte zu Beginn und am Ende der Messung.

Versuchsanleitung

- Behälter bis zur 4 Lieter-Markierung mit Wasser füllen, Stellflächen 2 und 8 ausschwenken, Wasserbehälter in Versuchsposition bringen und auf den wieder zurückgeschwenkten Stellflächen abstellen.
- Thermometerhalter an den Kupferrohren oberhalb des Verflüssigers 3 und des Verdampfers 7 festklemmen und Temperaturfühler in die Kunststoffröhrchen der Thermometerhalter einsetzen.
- Wärmepumpe über Leistungsmesser an das Netz anschließen. Meßanschlußkasten und Sicherheitsexperimentierkabel verwenden! Messung des Temperaturabfalls T_1 (t) im blauen Wasserbehälter sowie des Temperaturanstiegs $T_2(t)$ im roten Wasserbehälter sowie der Leistungsaufnahme P des Kompressors. Während des Versuchs das Wasser in beiden Wasserbehältern immer gut umrühren.

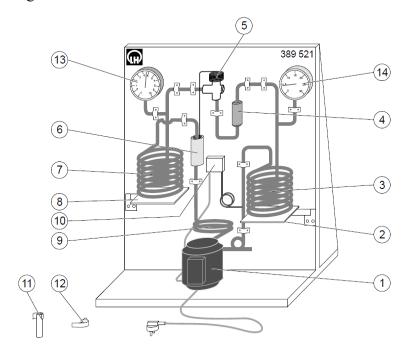


Abbildung 1: Versuchsaufbau. 1: Kompressor 230 V; 50/60 Hz. Leistungsaufnahme ca. 130 W bei 50 Hz; 2: ausschwenkbare Stellfläche für rot-markierten Warmwasserbehälter; 3: Verflüssiger; 4: Sammler/Reiniger; 5: Expansionsventil; 6: Temperaturfühler des Expansionsventils; 7: Verdampfer; 8: ausschwenkbare Stellfläche Kaltwasserbehälter; 9: Rohrwindungen als elastische Verbindung zwischen Kompressor und Wärmetauscher; 10: Druckwächter; 11: Kunststoffhalter (2x) für Thermometer und Temperaturfühler, zum Anklemmen an Kupferrohre; 12: Kupfer-Meßschuh (2x) zum Einstecken von Temperaturfühlern für Temperaturmessungen an den Kupferrohren des Kältemittelkreislaufs; 13: Manometer für die Niederdruckseite; innere Skala für Druckmessung von -1...+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...+30 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R 134a von -60 °C bis + 85°C.

Verwenden Sie die Software Cassy Lab2 zur Aufzeichnung der Messdaten. Das Temperaturmessgerät muss zunächst im Fenster "Einstellungen anzeigen" unter "Anderes Gerät verwenden" hinzugefügt werden (Temperaturmessgerät (666209/666454)). Wählen Sie dafür

"USB" als Schnittstelle ("Schnittstelle für Cassy-Module"). Aktivieren Sie dann die erforderlichen Messparameter in "Messparameter anzeigen", indem Sie die entsprechenden Häkchen setzen: T1 und T2 in "Temperaturmessgerät". Starten Sie den Kompressor. Starten Sie danach umgehend mit der Aufzeichnung der erforderlichen Messparameter, indem Sie "Messung starten" unter dem Reiter "Messung" anklicken. Vergessen Sie nicht, nach erfolgter Messung die Daten zu speichern und den Kompressor zu stoppen. Die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors beträgt ca. 120 W.

Vorbereitung

Demtröder, Experimentalphysik 1, Kapitel 10.3.1. "Zustandsgrößen", 10.3.2. "Der erste Hauptsatz der Thermodynamik" und 10.3.3. "Spezielle Prozesse", S 318 (4. Auflage).

Die Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe "pumpt" mit einem thermodynamischen Kreisporzess unter Aufwendung von Arbeit Wärme von einem Körper niedriger Temperatur zu einem Körper höherer Temperatur. Ein Arbeitsmedium (hier das Kältemittel R134a) wird zunächst mit einer Pumpe vom Druck P₁ auf den Druck P₂ komprimiert. Im idealisierten, verlustfreien Fall geschieht diese Kompression adiabatisch und isentrop. Bei der Kompression erwärmt sich das Areitsmedium auf die Temperatur T_k . Das Arbeitsmedium gibt dann über einen Wärmetauscher isobar Wärme an den Körper höherer Temperatur (Wasserbehälter ,,rot") ab und wird auf annähernd dessen Temperatur T₂ abgekühlt, wobei es kondensiert (Verflüssiger (3)). Das verflüssigte, aber noch mit Gasblasen durchsetzte Kältemittel wird im "Reiniger" gefiltert, der eine blasenfreie Flüssigkeitszufuhr für das Expansionsventil gewährleistet. Anschließend wird das Arbeitsmedim über eine Drossel (Expansionsventil) auf den niedrigeren Druck P₁ entspannt (siehe unten). Das nun kalte, ensptannte Arbeitsmedium nimmt dann über einen zweiten Wärmetauscher isobar Wärme vom Körper niedrigerer Temperatur (Wasserbehälter "blau") auf und erwärmt sich dabei auf annähernd dessen Temperatur T_1 , wobei es wieder verdampft. Danach wird das Arbeitsmedium wieder zur Pumpe geführt und durchläuft den Prozess von neuem. Zusammengefasst besteht der idealisierte Kreisprozess aus einer adiabatischen Kompression, einer isobaren Abkühlung, einer isenthalpen Expansion und einer isobaren Erwärmung.

Man macht sich bei diesem Kreisprozess die großen für die Phasenänderung nötigen Wärmemengen zu nutze. Würde ein ähnlicher Kreisprozess ohne Phasenübergänge stattfinden, wären bei gleichen Temperatur- und Druckunterschieden nur sehr viel geringere Leistungen bzw. Wärmeströme erzielbar.

Der oben schrittweise erklärte Kreisprozess läuft in der gegebenen Wärmepumpe kontinuierlich ab. Die obige Beschreibung gilt auch hier, wenn nur der Kreislauf eines kleinen Teiles des Arbeitsmediums betrachtet wird.

Die Leistungszahl

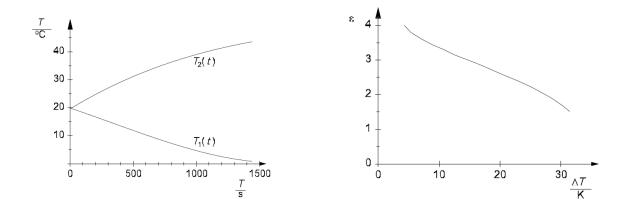
Die Leistungszahl ϵ ist definiert als Verhältnis der Wärmemenge ΔQ , die von der Wärmepumpe pro Zeiteinheit Δt dem Warmwasserreservoir "2" (das höherer Temperatur) zugeführt wird, zur Leistung P des Kompressors:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{P\%} \tag{1}$$

Dabei gilt

$$\dot{Q} = cm \frac{dT_2}{dt} \tag{2}$$

wobei c die spezifische Wärmekapazität von Wasser $c=4,19\cdot10^3$ Ws kg⁻¹ K⁻¹ und m die Masse des Wassers ist. Wenn Wärmeverluste in die Umgebung vernachlässigt werden, ist die Steigung dT_2/dt einer Tangente an das gemäß Aufgabenstellung gemessene $T_2(t)$ -Diagramm der thermischen Leistung \dot{Q} der Wärmepumpe proportional. Den unter dieser Annahme bestimmten Verlauf der Leistungszahl $\epsilon(\Delta T)$ als Funktion der Temperaturdifferenz $\Delta T=T_2-T_1$ zeigt qualitativ Abbildung 2. Die Leistungszahl nimmt mit wachsender Temperaturdifferenz zwischen Verflüssiger und Verdampfer ab, weil das $T_2(t)$ -Diagramm bei wachsender Temperaturdifferenz abflacht. Das ansteigende T_2 und sinkende T_I führen dazu, dass die Enthalpiedifferenzen der isobaren Abkühlung bzw. Erwärmung und somit die aufgenommene bzw. abgegebene Wärme immer geringer wird (bei isobaren Prozessen gilt $\Delta H_p = \Delta Q$). Zu dieser Abflachung tragen zusätzlich bei hohen Temperaturen die Wärmeverluste durch Verdunsten des Wassers, Wärmeabstrahlung und -leitung des Kompressors und der Rohre zwischen Kompressor und Verflüssiger bei, deren Einfluss sich hier nicht quantitativ erfassen lässt.



Abbilung 2: Schematischer Temperaturverlauf der Wasserbehälter (links) und daraus berechnete Leistungszahl (rechts).

Der Gütegrad

Dr Gütegrad einer Wärmepumpe ist als das Verhältnis von der Leistungszahl der Wärmepumpe zu der theoretisch erreichbaren, maximalen Leistungszahl gegeben.

$$\eta = \epsilon/\epsilon_{max} \tag{3}$$

Letztere tritt bei gegebenen Temperaturniveaus wie bei Wärmekraftmaschienen beim (hier linksläufigen) Carnot-Prozess auf.

$$\epsilon_{max} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{1}{\eta_C} \tag{4}$$

Drosselprozesse

Bei der Drosselung strömt das Arbeitsmedium über eine kleine Öffnung von einem Behälter mit hohem Druck in einen Behälter mit niedrigem Druck. Es wird keine mechanische Arbeit verrichtet und

idealisiert findet kein Energieaustausch mit der Umgebung statt: Es wird keine technische Arbeit verrichtet ($dW_t = Vdp = 0$) und es findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. (dQ = 0). Die Energie eines betrachteten Teils des durch die Öffnung strömenden Arbeitsmediums vor bzw. nach der Drosselung muss gleich sein. Die auftretende Volumsändernugsarbeit $dW_v = pdV$ muss daher eine Änderung der inneren Energie dUzur Folge haben.

$$dU + pdV = dU + pdV + Vdp = d(U + pV) = dH = 0$$
 [5]

Dabei wurde pV + Udefinitionsgemäß der Enthalpie H gleichgesetzt. Der Drosselprozess entspricht also einer *isenthalpen Zustandsänderung H*=const. Bei idealen Gasen lässt sich zeigen, dass sich bei einem Drosselprozess die Temperatur nicht ändert, was dadruch bedingt ist, dass die Gasteilchen ja per Definition keine Wecheslwirkungsenergie haben. Bei realen Gasen kann es zu einer Abkühlung oder Erwärmung kommen (Joule-Thomson Effekt). Bei (beinahe) inkompressiblen Flüssigkeiten ist die Temperaturänderung ebenfalls sehr gering, da $dV \simeq 0$. Bei dem für dieses Experiment relevanten Fall kommt es zu einer Abkühlung, da der Drosselprozess im Nassdampfbereich verläuft. Ein Teil des Kühlmittels verdunstet, die dazu nötige Verdunstungswärme führt zur Abkühlung.

Das p-H Diagramm von R134a

Aufgrund der Tatsache, dass der oben beschriebene Kreisprozess der Wärmepumpe idealisiert aus zwei isobaren und einer isenthalpen (und einer adiabatischen) Zustandsänderung besteht, lässt er sich am einfachsten in einem p-H Diagramm darstellen (Abb. 3).

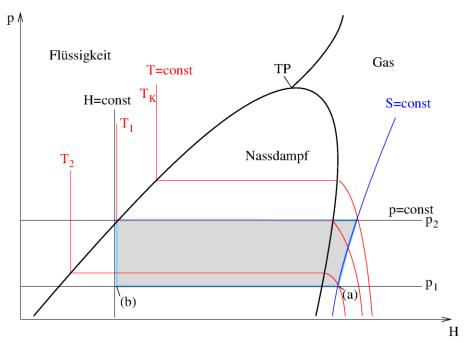


Abbildung 3. Skizze des p-H Diagrammes des Kreisprozesses einer Wärmepumpe

Der Kreisprozess beginnt entsprechend obiger Beschreibung bei (a) mit einer isentropen Kompression auf Druck p_2 . Dann erfolgt die isobare Abkühlung (mit Kondensation) auf die Temperatur T_1 . und die anschließende Drosselung (isenthalpe) auf Druck p_1 . Bei der folgenden isobaren Erwärmung (mit Verdunstung) bis zur Temperatur T_2 nimmt das Kühlmittel Wärme auf. Die schwarze, gebogene Linie markiert den Übergang vom flüssigen Zustand zum Nassdampfbereich (wo Flüssigkeit und Gasphase gleichzeitig vorliegen) und die Grenze zwischen Nassdampf und Gasphase. TP ist der Trippelpunkt. Im Flüssigkeits-Bereich verlaufen die Isothermen in sehr guter Nähernug parallel zu den Isenthalpen, also vertikal.

Theoretisch könnte Körper 1 solange Wärme entzogen werden, bis Punkt (b) und Punkt (a) im p-H-Diagramm zusammenfallen. Praktisch muss aus technischen Gründen zum Schutz des Verdichters vor Flüssigkeitsschlägen der Prozess unterbrochen werden bevor (a) in den Nassdampfbereich kommt. Dies wird bei diesem Aufbau durch ein temperaturgesteutertes Expansionsventil realisiert. Ist die Temperaturänderung des Kühlmittels im Verdampfer zu niedrig, wird die Kühlmittelzufuhr reduziert.

Kontrollfragen

- Beschreiben Sie adiabatische, isotherme, isentrope, isobare und isochore Zustandsänderungen
- Was ist Enthalpie, Entropie, Druck, Temperatur, innere Energie incl. Einheiten?
- Beschreiben Sie den Kreisprozess einer Wärmepumpe
- Wie kann im vorliegenden Experiment die Leistungszahl bestimmt werden und wie ist sie definiert?
- Wie kann ausgehend von den Messgrößen T_1 , p_1 , T_2 , p_2 der Kreisprozess in das p-H-Diagramm eingezeichnet werden?
- Wie würde qualitativ der reale Kreisprozess im p-H-Diagramm aussehen?

Hinweise zur Erstellung des Laborprotokolles

- 1. Aufgabenstellung:
- 2. Voraussetzungen und Grundlagen: Wie soll kann die Aufgabenstellung hier erfült werden. Beschreiben Sie kurz die zum qualitativen Verständnis des Versuches erforderlichen Grundlagen und Formeln (Zitate!). Definieren Sie alle in den Formeln verwendeten Symbole. Fassen Sie sich kurz (insgesamt maximal 2 Seiten)!
- 3. Beschreibung der Versuchsanordnung: Skizze des Aufbaues und der elektrischen Verbindungen mit Kennzeichnung aller Teile und Beschreibung ihrer Funktion. Welche Thermometer kamen zum Einsatz, wie wurden die Daten aufgenommen.
- 4. Geräteliste
- 5. Versuchsdurchführung/Messergebnisse:
- 6. Auswertung: Erstellen und Erklären Sie alle in der Versuchsanleitung beschriebenen Diagramme mit deutlicher Kennzeichnung der Messpunkte und deren Unsicherheiten;
 - Zu 1. Erstellen Sie ein Diagramm der Temperaturen und der Leistung bzw. Drücke als Funktion der Zeit. Diskutieren Sie wodurch der Verlauf der Temperaturen anfänglich und gegen Ende hin dominiert wird.
 - Zu 2. Berechnen Sie aus den Daten zunächst die Leistungsziffer und die Temperturdifferenz als Funktion der Zeit. Erstellen Sie dann ein Diagramm, in dem die Leistungsziffer über der Temperaturdifferenz aufgetragen ist. Vergessen Sie nicht die Fehlerbalken.
 - Zu 3. Tragen sie die Zustandsädnerungen des idealisierten Kreisprozesses so in das p-H-Diagramm ein, dass die gemessenen Temperaturen und Drücke mit den entsprechenden Punkten im Kreisprozess zusammenstimmen.
- 7. Diskussion: Geben Sie für jede Messgröße deren Unsicherheit quantitativ mit einer kurzen

Begründung an (z.B: "Unsicherheit der Temperatur: 100mK, Ursache: Rauschen" oder "Digitalisierungsunsicherheit"). Bei abgeleiteten Größen (hier z.B. Leistungsziffer) berechnen Sie die Beiträge der einzelnen Messunsicherheiten zur Gesamtunsicherheit getrennt quantitativ und summieren sie diese erst dann zur Berechnung der Gesamtunsicherheit.

- 8. Zusammenfassung
- 9. Literatur

Version

28.08.2014: Erste Version basierend auf der Betriebsanleitung von LH.

Anhang

p-H-Diagramm von R134a

