



Wärmepumpe

1 Vorausgesetzte Kenntnisse

1. Wärmepumpe allgemein, Wirkungsweise der Kompressions-Wärmepumpe
2. Zustandsänderungen (isotherm, isobar, isochor, isentrop und adiabatisch)
3. das *ideale* und *reale Gas* (Definition und Zustandsgleichungen), latente Wärme
4. Carnot-Prozess, Effizienz, Wirkungsgrad, Leistungszahlen
5. erster Hauptsatz der Thermodynamik
6. zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, Enthalpie und Entropie, reversible und nicht reversible Prozesse
7. Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera
8. Flächenabgleich (s. Zusatzblatt W0)

2 Mitzubringende Hilfsmittel

Bringen Sie folgende Materialien mit:

- 2 Blatt Millimeterpapier
- 1 Enthalpiediagramm („vergrößertes Mollier-Diagramm“ (Seite 11), Größe: DIN A4)

3 Literatur

Grundlagenbücher der Physik, z. B.

- Tipler, Mosca: *Physik*,
- Halliday, Resnick, Walker: *Halliday Physik*,
- Giancoli: *Physik*,
- Gerthsen: *Gerthsen Physik*.

4 Lernziele

Bestimmung verschiedener Leistungszahlen aus Druck- und Temperaturmessungen in einem Kältemittelkreislauf und deren Vergleich mit entsprechenden Carnot-Effizienzen; Abbildung eines Wärmepumpen-Kreislaufs im Mollier- (Enthalpie H , $\log p$)-Diagramm.

5 Grundlagen

Thermodynamische Maschinen setzen mechanische Energie und Wärme ineinander um. Dabei unterscheidet man zwischen *Wärmekraftmaschinen* (Wärmeumsatz liefert mechanische Arbeit) und *Wärmepumpen* (mechanische Arbeit bewirkt Wärmeumsatz). Wird der Wärmeumsatz einer Wärmepumpe nur einseitig genutzt (nur Wärmeabgabe bzw. -aufnahme), so nennt man sie Heizwärmepumpe bzw. Kältemaschine.

5.1 Funktionsweise der Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe entzieht einem Reservoir der Temperatur T_{kalt} Wärme und führt sie einem Reservoir der Temperatur T_{warm} zu, transportiert also Wärmeenergie zwischen beiden Reservoiren.

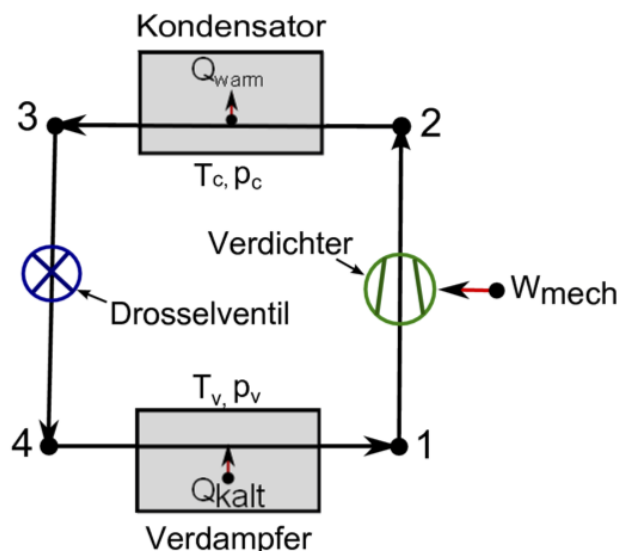
Im Versuch geschieht dieser Wärmetransport über einen Kältemittelkreislauf.¹ Das Kältemittel (R134a) nimmt beim Verdampfen Wärme auf und gibt sie beim Kondensieren wieder ab. Die Wärmereservoirs werden durch gefüllte Wassereimer realisiert. Das Kältemittel wird durch Kupferrohre transportiert.

Damit der Wärmetransport vom kalten zum warmen Reservoir stattfinden kann, muss Arbeit von außen zugeführt werden. Wegen Energieerhaltung muss im Idealfall die von der Maschine benötigte Arbeit W_{mech} gleich der Wärmebilanz sein.

$$W_{\text{mech}} \stackrel{!}{=} Q_{\text{warm}} - Q_{\text{kalt}} \quad (1)$$

Man beachte, dass die (in elektrischer Form bereitgestellte) gesamte Antriebs-Energie W zwei Aufgaben erfüllt: $W = W_{\text{mech}} + Q_{\text{reib}}$. Der (idealisierte) Kompressionsvorgang erfordert den mechanischen Arbeitsaufwand W_{mech} . Zusätzlich treten unerwünschte, aber unvermeidbare Effekte wie Reibungswärme sowie Wärmeentwicklung in Pumpe und Antriebsmotor auf.

Abbildung 1: Schema einer Wärmepumpe
 W_{mech} ist Kompressionsarbeit (Energiezufuhr).
 Q_{warm} ist die an das „warme“ Reservoir
abgegebene Wärme;
Temperatur T_c , Druck p_c gelten für das
Kältemittel beim Kondensieren.
 Q_{kalt} ist die dem „kalten“ Reservoir
entzogene Wärme;
Temperatur T_v , Druck p_v gelten für das
Kältemittel beim Verdampfen.



Die Abb. 1 beschreibt folgenden Kreislauf:

Das gasförmige Kältemittel (Dampf) wird vom Verdichter komprimiert ($1 \rightarrow 2$) und dabei erhitzt. Dann kühlt es sich im Kondensator ($2 \rightarrow 3$) ab und kondensiert, wobei es seine Wärme an das Wasser im Warmwasserbehälter abgibt.

¹Traditionell nennen Techniker und Ingenieure das Transport-Medium „Kältemittel“ – ein Fachbegriff aus der *Kältetechnik*. Physiker sprechen von „Wärmeträger“ – besonders bei der Heizwärmepumpe sieht *Energieträger* nicht so paradox aus...

Das Drosselventil ($3 \rightarrow 4$) reduziert durch lokale Verengung des Strömungsquerschnitts den Druck des flüssigen Kältemittels von p_c auf p_v ; letzteres beginnt zu siedeln und kühlt sich dabei ab. Im Verdampfer ($4 \rightarrow 1$) wird das Kältemittel vollständig zum Gas und entzieht dabei dem Kaltwasserbehälter Wärme. Der Kältemitteldampf wird vom Verdichter angesaugt, wo der Kreislauf von vorne beginnt.

5.2 Effizienzen

Die Effizienz (η bzw. ε) ist generell definiert als

$$\eta, \varepsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (2)$$

Bei einer Wärmekraftmaschine („Motor“) spricht man vom **Wirkungsgrad** η , bei der Wärmepumpe hingegen von **Leistungszahlen** ε .

Man beachte, dass sich für die Wärmepumpe *zwei* Leistungszahlen ergeben wegen der verschiedenen Vorgänge im Kondensator bzw. Verdampfer, nämlich

$$\text{Heizwärmepumpe: } \varepsilon_{\text{warm}} = \frac{Q_{\text{warm}}}{W_{\text{mech}}} \quad (3)$$

$$\text{Kältemaschine: } \varepsilon_{\text{kalt}} = \frac{Q_{\text{kalt}}}{W_{\text{mech}}} \quad (4)$$

Beziehungen (3) und (4) definieren *mittlere* Leistungszahlen, da der Betrieb der Pumpe über eine festgelegte Zeitdauer unter festgelegten Bedingungen stattfindet.

Kann man Q_{warm} und Q_{kalt} gleichzeitig nutzen („Heizung hier und Kühlung dort“), so gilt:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{warm}} + \varepsilon_{\text{kalt}} \quad (5)$$

Für den Wärmeumsatz in jedem Wasserbehälter gilt:

$$\Delta Q = (K + c_{\text{Wasser}} \cdot m_{\text{Wasser}}) \cdot \Delta T \quad (6)$$

c ist die spezifische Wärmekapazität des Wassers, m die Masse des Wassers, und ΔT gibt die Temperaturänderung innerhalb eines Wasserbehälters an, s. Anleitungsblatt W0. K heißt Kalorimeterkonstante und fasst die Wärmekapazitäten derjenigen Zonen von Behälter, Thermometer, Rührer, Kupferrohr zusammen, welche die Temperaturänderung der Wasserfüllung mitmachen.

5.3 Carnot-Prozess

Der Carnot-Kreisprozess ist ein vollkommen reversibler Prozess, der Wärme in zwei Bädern auf Temperaturen T_{warm} und T_{kalt} umsetzt. In der Realität lässt sich solch ein *reversibler* Prozess zwar nicht verwirklichen, aber die „thermodynamische Qualität“ von realen Maschinen wird an seinem sogenannten Carnot-Wirkungsgrad gemessen.

Wärmekraftmaschine (Wirkungsgrad η)

Der von den Arbeitstemperaturen abhängige Wirkungsgrad $\eta_{\text{Carnot (WKM)}}$ gibt an, welcher Anteil der zugeführten Wärme maximal in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Da der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass zur Gewinnung von W_{mech} *mindestens* so viel Wärmeenergie zugeführt werden muss, wie auch die Carnot-Maschine benötigt, gilt für die reale Wärmekraftmaschine:

$$\eta_{\text{(WKM)}} \stackrel{(2)}{=} \left(\frac{W_{\text{mech}}}{Q_{\text{warm}}} \right)_{\text{real}} \leq \frac{W_{\text{mech}}}{Q_{\text{warm, Carnot}}} = \left(\frac{W_{\text{mech}}}{Q_{\text{warm}}} \right)_{\text{Carnot}} = \frac{T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}}}{T_{\text{warm}}} = \eta_{\text{Carnot (WKM)}} \quad (7)$$

Wärmepumpe (Leistungszahlen ε)

Für die einzelnen Leistungszahlen der Wärmepumpe gilt nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, dass die Carnot-Maschine mit demselben Arbeitsaufwand W_{mech} *mindestens* die Wärmeumsätze (zum Heizen bzw. zum Kühlen) einer realen Wärmepumpe erzielt – sie also praktisch immer übertrifft:

$$\varepsilon_{\text{warm}} = \left(\frac{Q_{\text{warm}}}{W_{\text{mech}}} \right)_{\text{real}} \leq \frac{Q_{\text{warm, Carnot}}}{W_{\text{mech}}} = \left(\frac{Q_{\text{warm}}}{W_{\text{mech}}} \right)_{\text{Carnot}} \stackrel{\text{reversibel!}}{=} (\eta_{\text{Carnot}})^{-1} \stackrel{(7)}{=} \frac{T_{\text{warm}}}{T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}}} = \varepsilon_{\text{warm, Carnot}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{kalt}} = \left(\frac{Q_{\text{kalt}}}{W_{\text{mech}}} \right)_{\text{real}} \leq \frac{Q_{\text{kalt, Carnot}}}{W_{\text{mech}}} \stackrel{(1)}{=} \frac{Q_{\text{warm, Carnot}}}{W_{\text{mech}}} - 1 \stackrel{(8)}{=} \varepsilon_{\text{warm, Carnot}} - 1 \stackrel{(8)}{=} \frac{T_{\text{kalt}}}{T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}}} = \varepsilon_{\text{kalt, Carnot}} \quad (9)$$

5.4 Thermografieverfahren mit Wärmebildkamera

Bei diesem Verfahren wird berührungslos mittels Infrarotdetektoren die Temperatur einer großen Oberfläche gemessen. Das Verfahren beruht darauf, dass jede warme Oberfläche, unabhängig vom Aggregatzustand, elektromagnetische Strahlung emittiert, die für Temperaturen ≈ 300 K noch jenseits des sichtbaren Lichts im Infraroten liegt. Diese Wärmestrahlung wird in elektrische Signale umgewandelt und zu einem Wärmebild weiterverarbeitet, Abb. 2. Die Zuordnung von Temperaturen zur erfassten Wärmestrahlung setzt allerdings voraus, dass der Emissionsgrad der Objektflächen bekannt ist. Der Emissionsgrad eines Objektes gibt an, wie viel Strahlung es im Vergleich zu einem „ideal schwarzen“ Körper abgibt. Letzterer besitzt den größtmöglichen Emissionsgrad, nämlich 1. Für die meisten Materialien unserer Wärmepumpe liegt der Emissionsgrad ganz nahe um 0.95.

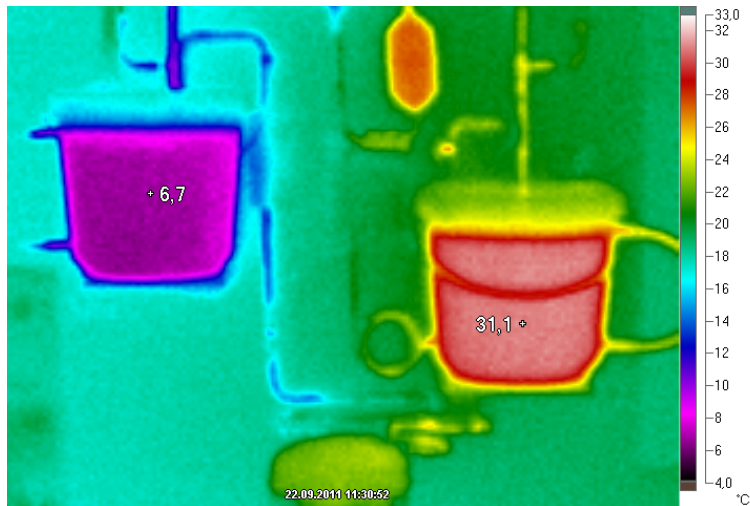


Abbildung 2: Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera

5.5 Mollier-Diagramm

Das verwendete Kältemittel Tetrafluorethan $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ (Handelsname: R134a) ist ein farbloses, fast geruchloses Gas, welches unter Druck leicht verflüssigt werden kann. Mit dem Mollier-Diagramm (Enthalpiediagramm), Abb. 4 auf Seite 7 und Abb. 6 auf Seite 11, können Energie-Umsetzungen und Phasenübergänge des Kältemittels im gesamten Wärmepumpenkreislauf quantitativ beschrieben werden. Abb. 3 zeigt schematisch einen vollständigen Wärmepumpenkreislauf. Auf der vertikalen, logarithmisch geteilten Achse ist der Druck in bar aufgetragen, auf der horizontalen Achse kann die spezifische Enthalpie h (in kJ/kg) abgelesen werden, die auf die Kältemittelmenge bezogen ist. Energie-Umsetzungen, d. h. sowohl Wärmemengen als auch Verdichtungsarbeit, sind in dieser Darstellung als Strecken parallel zur Enthalpieachse abzulesen.

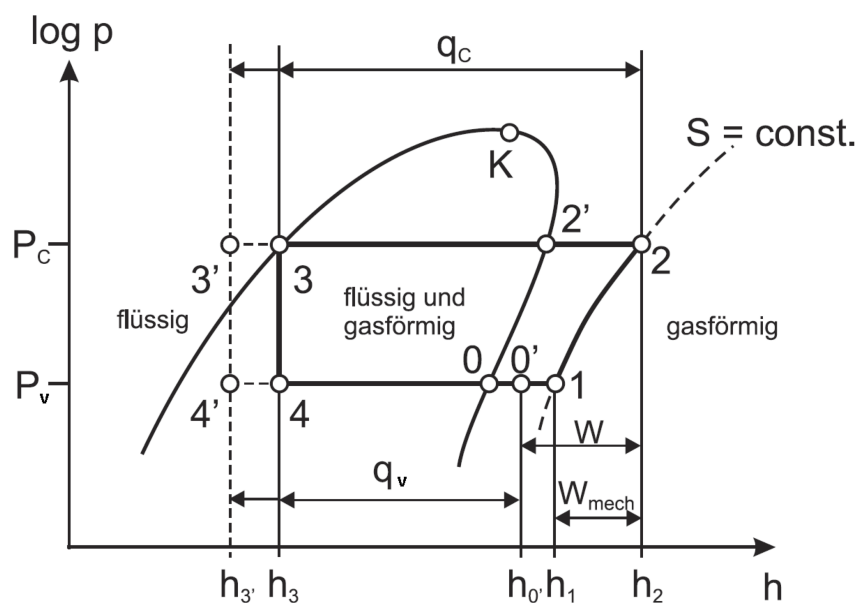


Abbildung 3: Kreisprozess im Enthalpiediagramm

Farblich unterscheidbar sind Isothermen (rot), Isentropen (orange) und Isochoren (schwach grün) eingezeichnet, Abb. 4. Eine fett durchgezogene, schwarze Linie trennt die Bereiche, in denen das Kältemittel unterhalb des kritischen Punktes K flüssig oder teils gasförmig/flüssig oder gasförmig vorliegt.

[1] Die Drücke p_v und p_c sind an der Apparatur ablesbar. Die Temperatur T_E des überhitzten Dampfes vor der Kompression wird direkt an der Kupferrohrzuleitung zum Kompressor gemessen. Ausgehend von [1] (p_v -Isobare schneidet T_E -Isotherme) kann der Kreisprozess konstruiert werden, d.h. wir beobachten einen kleinen Anteil² des Kältemittels auf seinem Weg durch den Kreislauf [1 → 2 → 3 → 4 → 1] der Abb. 1 von Seite 2.

[1 → 2] Unter der Annahme, dass die Verdichtung von p_v auf p_c adiabatisch und reversibel abläuft (Entropie konstant), folgt man bei [1] der Linie konstanter Entropie bis zum Druck p_c und erreicht somit [2]. Der Energieaufwand ist $W_{\text{mech}} = h_2 - h_1$ gemäß Abb. 3.

[2 → 2'] Im Kondensator bleibt der Druck konstant bei p_c . Der Kältemitteldampf gibt Wärme an das Wasserbad ab, bis er die Kondensationstemperatur T_c erreicht hat.

[2' → 3] Anschließend wird der Kältemitteldampf unter Abgabe seiner latenten Wärme zur Flüssigkeit. Diese Zustandsänderung erfolgt isotherm und isobar. Zur Abfuhr der Kondensationswärme in endlicher Zeit ist ein Temperaturgefälle zum Wasserbad hin notwendig: $T_{\text{warm}} < T_c$. Deshalb kühlt das Kältemittel nach vollständiger Verflüssigung noch weiter ab [3'], bevor es den Kondensator verlässt. [3'] und [4'] werden wir allerdings im Enthalpiediagramm nicht weiter berücksichtigen.

Für die an das warme Wasserbad abgegebene Wärme q_c gilt:

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (10)$$

[3 → 4] Infolge der Druckabsenkung am Drosselventil (p_c auf p_v) beginnt das Kältemittel zu siedeln. Es stellt die Verdampfungswärme hierfür selbst bereit – seine Temperatur fällt von T_c auf T_v , dann hört das Siedeln auf (Phasengleichgewicht). Da mit der Außenwelt weder Wärme noch Arbeit ausgetauscht wird, herrscht konstante Enthalpie.

[4 → 0] Mit Eintritt in den Verdampfer beginnt das Kältemittel erneut zu siedeln; es beharrt auf der Siedetemperatur T_v bis zur vollständigen Verdampfung bei [0]. Damit die Verdampfungswärme in endlicher Zeit das Kältemittel erreicht, muss das Wasserbad etwas wärmer sein: $T_v < T_{\text{kalt}}$.

[0 → 0'] Bevor er den Verdampfer verlässt, wird der Kältemitteldampf erwärmt auf $T_{0'}$. Wir nehmen $T_{0'}$ gleich T_{kalt} an.³

Die aus dem kalten Wasserbad aufgenommene Wärmemenge q_v berechnet sich nach:

$$q_v = h_{0'} - h_3 \quad (11)$$

[0' → 1] Auf dem Weg zum Verdichter wird dessen Abwärme q_{reib} auf das Kältemittel übertragen und bringt es auf die Temperatur T_E . Für die Abwärme gilt:

$$q_{\text{reib}} = h_1 - h_{0'} \quad (12)$$

Damit ist der Zyklus abgeschlossen.

²zum Beispiel ein Milligramm

³Als Dampf strömt das Kältemittel deutlich schneller als im flüssigen Zustand, verlässt schnell den Verdampfer.

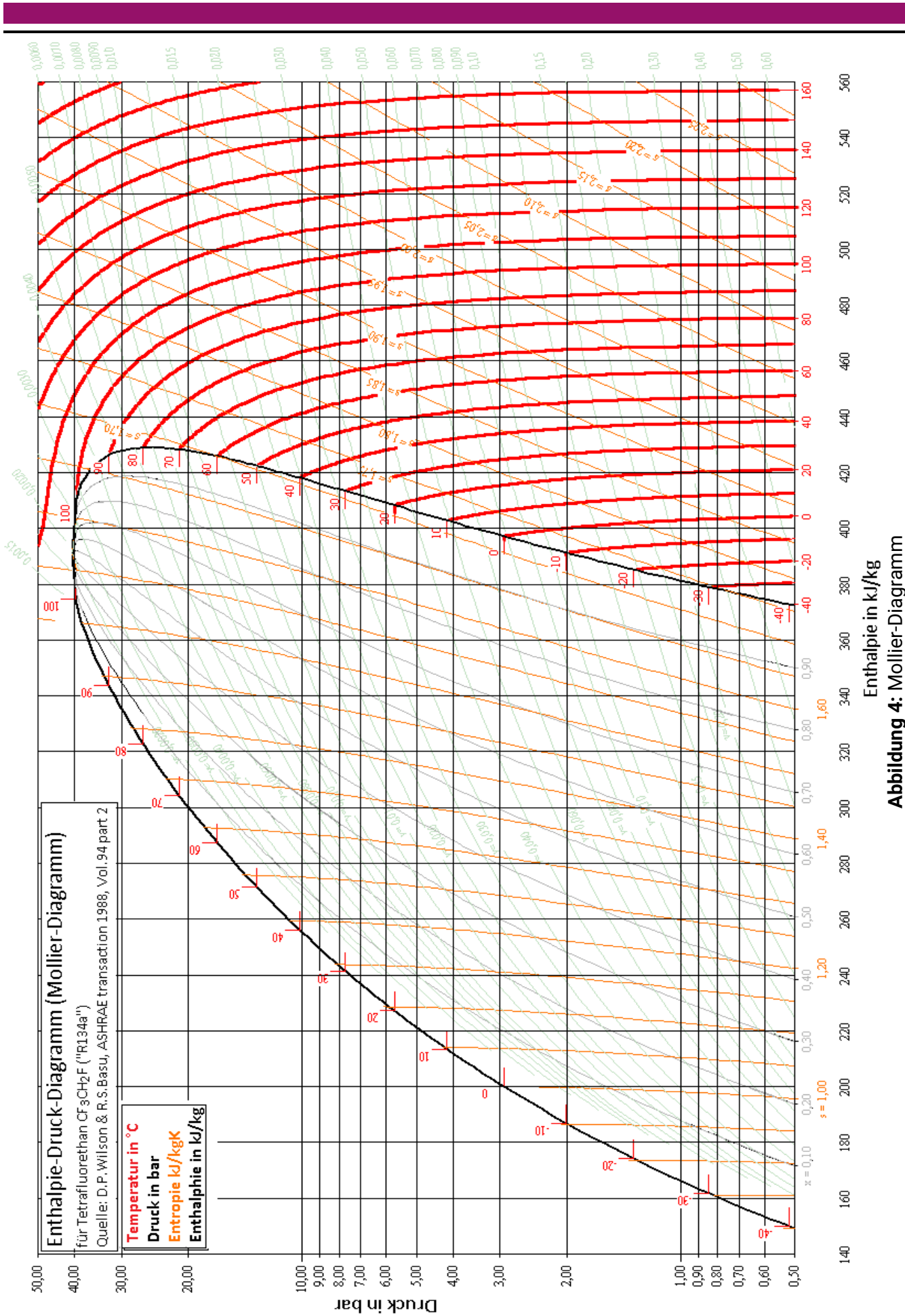


Abbildung 4: Mollier-Diagramm

6 Versuchsaufbau

Der grundsätzliche Aufbau der verwendeten Kompressionspumpe ist in Abb. 5 dargestellt.

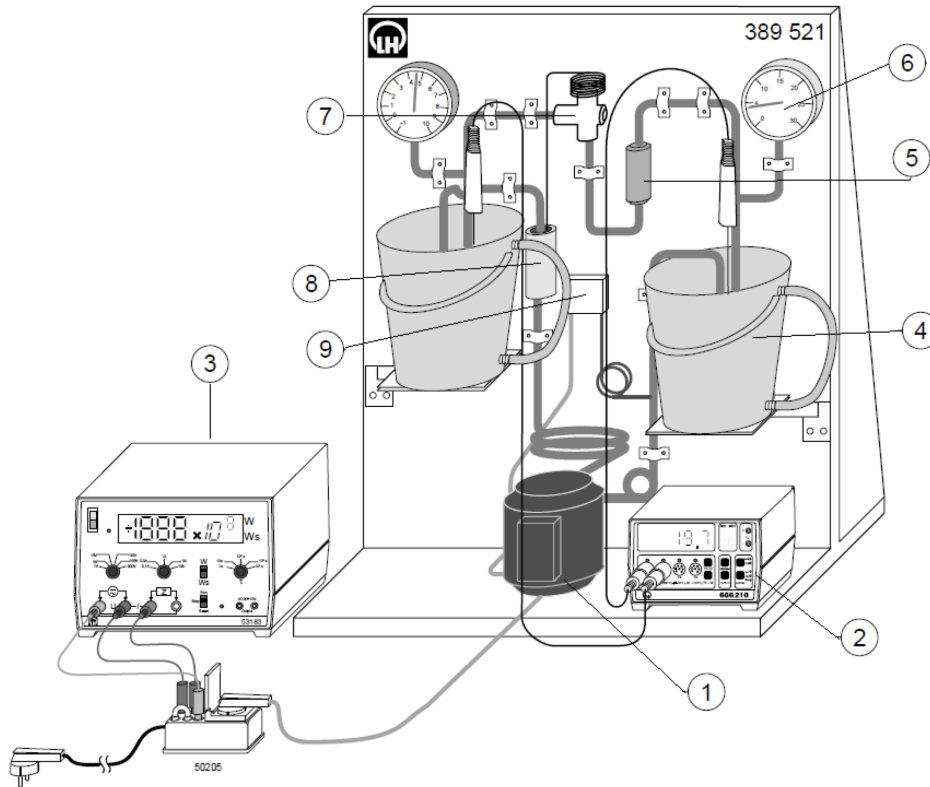


Abbildung 5: Aufbau der Kompressionswärmepumpe;
aus der Gebrauchsanweisung von Leybold Didactic GmbH.

- ① Kompressor; an Kupferrohrzuleitung wird T_E gemessen (Zone ist markiert)
- ② Auslesen der Temperatursensoren T_{warm} und T_{kalt} (in beiden Wassereimern)
- ③ Energiezähler mit Schalter für Verdichter (Abbildung zeigt Vorgängermodell)
- ④ Eimer mit Wasserfüllung (Rührwerk nicht abgebildet); Rohrwicklungen mit 12 Windungen
- ⑤ Kältemittelfilter
- ⑥ Manometer (auf beiden Seiten) zum Bestimmen von p_v und p_c (äußere Druckskala ablesen!)
- ⑦ Expansionsventil, thermostatisch geregelt
- ⑧ Temperaturfühler des Expansionsventils
- ⑨ Druckwächter

7 Experiment

Zu Versuchsbeginn müssen beide Wasserbehälter, wenn sie „eingebaut“ sind (Kupferrohrwindungen, Rührer und Temperaturfühler tauchen ins Wasser ein) bis zur oberen Markierung im Eimer mit destilliertem Wasser befüllt sein. Ansonsten muss die Befüllung bis zur unteren Markierung erfolgen, wenn die Eimer neben der Apparatur stehen. Anfangs darf das „kältere“ Wasserbad (um den Verdampfer) nicht kälter sein als 17 °C, während im Bad um den Kondensator nicht mehr als 30 °C vorliegen dürfen. Damit die Temperatur in den Wasserbehältern überall gleich ist, müssen die Rührmotoren angeschaltet werden.

Die dem Verdichter zugeführte elektrische Energie kann vom Mess-&Schaltgerät ③ angezeigt werden.

Vor Beginn der Messung beachten Sie bitte zusätzlich das an der Apparatur ausliegende Blatt *Betriebsanleitung Wärmepumpe*.

8 Präsenzaufgaben

8.1 Messung (34 Minuten)

- M1 Notieren Sie 10 Minuten lang in Abständen von 1 Minute die Temperaturen der Wasserbäder.
- M2 Schalten Sie die Wärmepumpe für 14 Minuten ein. Notieren Sie alle 2 Minuten die Temperaturen T_{kalt} und T_{warm} . Nach 7 Minuten und kurz vor Ablauf der 14 Minuten notieren Sie außerdem die Drücke p_v und p_c und messen mit dem „Paddel“-Fühler die Temperatur T_E am Einlass (Kupferrohr) des Kompressors. Außerdem nehmen Sie während der 14 Minuten mindestens ein Wärmebild mit der Wärmebildkamera auf, auf dem beide Reservoirs abgebildet sind.
- M3 Nach Abschalten der Wärmepumpe notieren Sie weitere 10 Minuten in Abständen von 1 Minute die Temperaturen der Wasserbäder. Zusätzlich notieren Sie die Anzeige des Energiezählers.

8.2 Auswertung

- Ermitteln Sie die Wärmemengen Q_{warm} und Q_{kalt} . Diese Werte sollen aus dem zeitlichen Verlauf von T_{warm} bzw. T_{kalt} mittels Flächenabgleich ermittelt werden. Jedes Gruppenmitglied soll eine Wärmemenge bestimmen. Aus den Wärmemengen berechnen Sie die mittleren Leistungszahlen $\bar{\epsilon}_{\text{warm}}$ und $\bar{\epsilon}_{\text{kalt}}$ (inkl. Fehlerabschätzung!).

Da die Wärmekapazität der Kupferrohre den weitaus größten Anteil der Kalorimeterkonstante K ausmacht, werden die restlichen Beiträge zu K vernachlässigt. Für K gilt daher einfach:

$$K = m_{\text{Kupfer}} \cdot c_{\text{Kupfer}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Kupfer}} &= (5.2 \pm 0.2) \text{ kg} & c_{\text{Kupfer}} &= 385 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \\ m_{\text{Wasser}} &= (4.0 \pm 0.1) \text{ kg} & c_{\text{Wasser}} &= 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \end{aligned}$$

2. Zeichnen Sie zwei Kreisprozesse (nämlich nach 7 Minuten und nach 14 Minuten Laufzeit) in das vergrößerte Enthalpiediagramm. **Wichtig: Auf die abgelesenen Drücke muss wegen des Atmosphärendrucks noch 1 bar dazuaddiert werden.** Anschließend bestimmen Sie die *momentanen* Leistungszahlen $\varepsilon_{\text{warm}}$ und $\varepsilon_{\text{kalt}}$ für 7 Minuten und 14 Minuten aus dem Enthalpiediagramm (Fehlerabschätzung!). Nach Abb. 3 und wegen (10) und (11) gilt:

$$\varepsilon_{\text{warm}} = \frac{q_c}{W} \approx \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{0'}} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\text{kalt}} = \frac{q_v}{W} \approx \frac{h_{0'} - h_3}{h_2 - h_{0'}} \quad (15)$$

3. Bestimmen Sie für den Betriebszustand nach 14 Minuten Laufzeit die theoretischen Vergleichs-Leistungszahlen $\varepsilon_{\text{warm, Carnot}}$ und $\varepsilon_{\text{kalt, Carnot}}$ anhand der aktuellen Wasserbadtemperaturen.
4. Trifft die Energieerhaltung von Glg. (1) bei den vorliegenden Leistungszahl-Paaren zu? Überprüfen Sie das für alle Leistungszahlen aus Aufg. 1, Aufg. 2 und Aufg. 3!
5. Vergleichen Sie die „genutzte“ Wärmeabgabe Q_{warm} mit der Summe $Q_{\text{kalt}} + W$ der aufgenommenen Energien. Was fällt auf und wieso? Was können Sie mit Hilfe der Wärmebilder über die Isolierung der Apparatur feststellen? Eimer getrennt diskutieren! Hängt die Effizienz der Wärmepumpe von der Laufzeit ab?

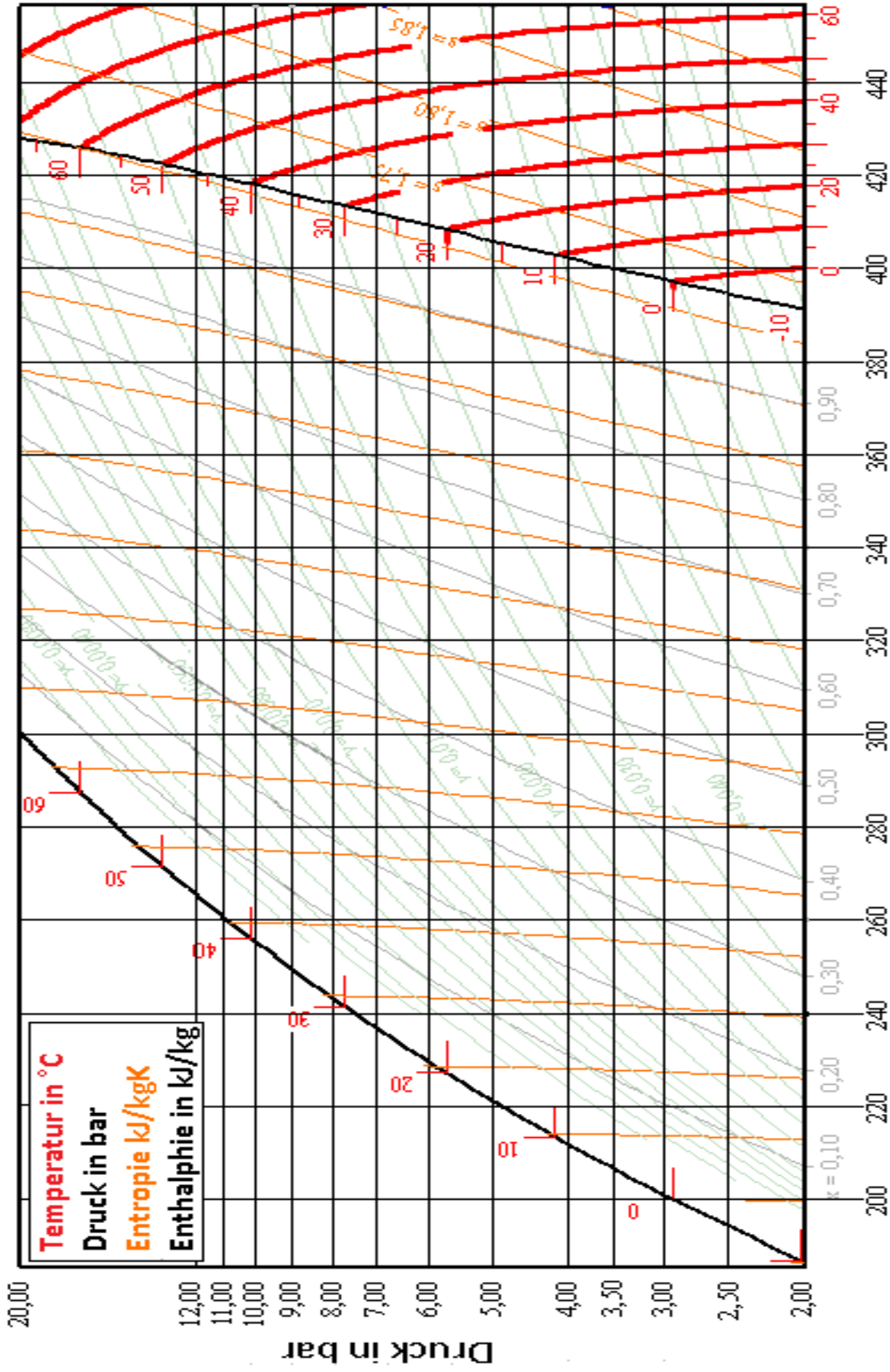


Abbildung 6: vergrößertes Mollier-Diagramm