

Zur Theorie: Die Wärmepumpe

Die Wärmepumpe ist eine Arbeitsmaschine, die elektrische Energie aufnimmt und Wärme liefert. Dabei gibt sie mehr Nutzwärme ab, als sie elektrische Energie verbraucht. In unseren Breitengraden können moderne Anlagen mit Leistungsziffern von 3...bis...4 arbeiten. D.h. bei einer Stromentnahme von 1 Kilowatt aus dem Stromnetz erhält man eine Heizleistung von 3...bis...4 Kilowatt. Solch eine Maschine arbeitet allerdings nicht als Perpetuum mobile, sondern entzieht die abgegebene Wärme einem Reservoir (in der Luft, dem Erdreich oder im Wasser gespeicherte Sonnenenergie oder Erdwärme). Dies funktioniert selbst bei arktischen Temperaturen, allerdings dann mit wesentlich schlechteren Leistungsziffern.

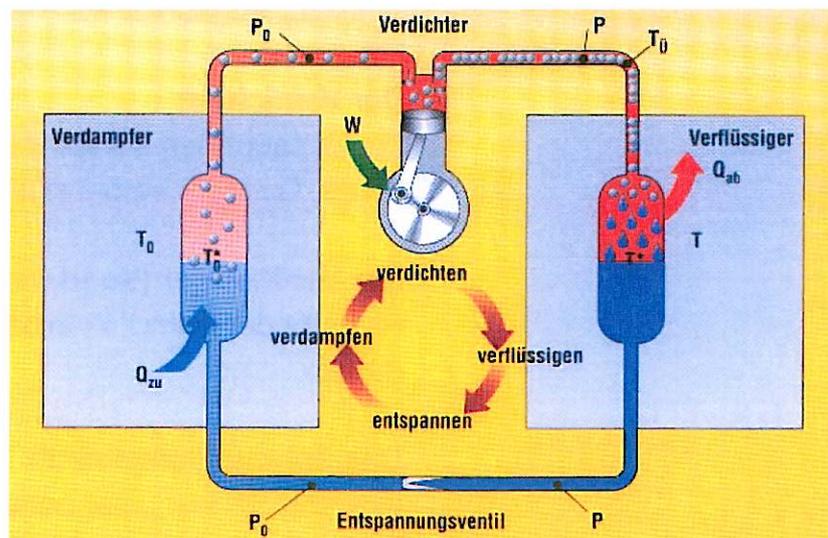


Abbildung 1.: Kreisprozess der Wärmepumpe

Funktionsweise

Die Wärmepumpe (Abb. 1.) entzieht einem Reservoir (hier: gefüllter Wasserbehälter) der Temperatur T_1 Wärme und führt sie einem Reservoir der Temperatur T_2 zu. Dadurch vergrößert sich der Temperaturunterschied ($T_1 - T_2$). Der Wärmetransport erfolgt über das Kältemittel R134a, das beim Verdampfen Energie aufnimmt und sie beim Kondensieren wieder abgibt. Das gasförmige Kältemittel wird von einem Kompressor verdichtet, wobei es sich stark erhitzt. Es kühlt sich in der Kupferrohrschlange des Verflüssigers ab und kondensiert, wobei es seine Kondensationswärme an das Warmwasserreservoir abgibt.

Das verflüssigte, aber noch mit Gasblasen durchsetzte Kältemittel, wird in einem „Reiniger“ gefiltert. Dieser wirkt gleichzeitig als „Sammler“, der eine blasenfreie Flüssigkeitszufuhr für das Expansionsventil gewährleistet.

Das Expansionsventil, als Gegenstück zum Kompressor, dosiert die Kältemittelzufuhr zum Verdampfer. Bei der Expansion des Kältemittels verdampft dieses, wobei es sich stark abkühlt und so dem Kaltwasserreservoir Wärme entzieht.

Das nun wieder gasförmige Kältemittel wird von dem Kompressor angesaugt. Der Kreislauf beginnt von vorne.

Das Expansionsventil, thermostatisch geregelt, schützt den Kompressor vor „Flüssigkeitsschlägen“, d.h. Ansaugen flüssigen Kältemittels mit nachfolgender Zerstörung des Kompressors. Ein Druckwächter schaltet den Kompressor ab, wenn auf der Verflüssigerseite ein Überdruck von 16 bar überschritten wird (Verhinderung einer Überhitzung).

Als optimaler Kreisprozess für alle thermischen Maschinen gilt der Carnot-Prozess (Abbildung 2 und 3), der sich aus zwei Isentropen und je einer Isothermen bei einer hohen, sowie einer niedrigen Temperatur zusammensetzt. Der Carnot-Prozess gilt gleichzeitig als Vergleichsprozess zur Beurteilung realer Prozesse.

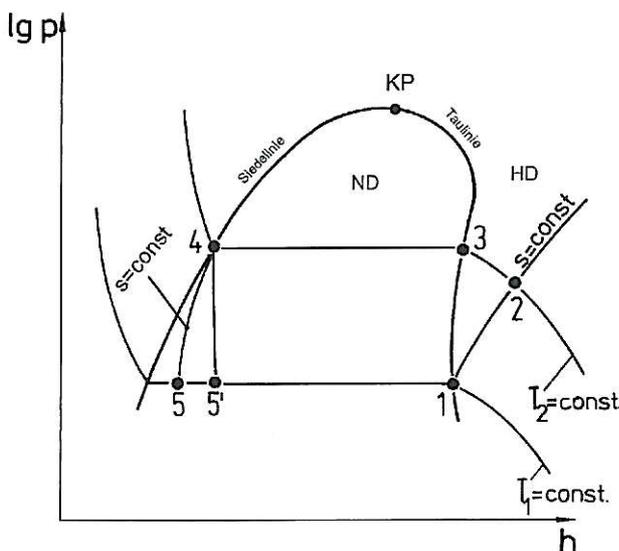


Abbildung 2: Carnot-Prozess (lg p-h)

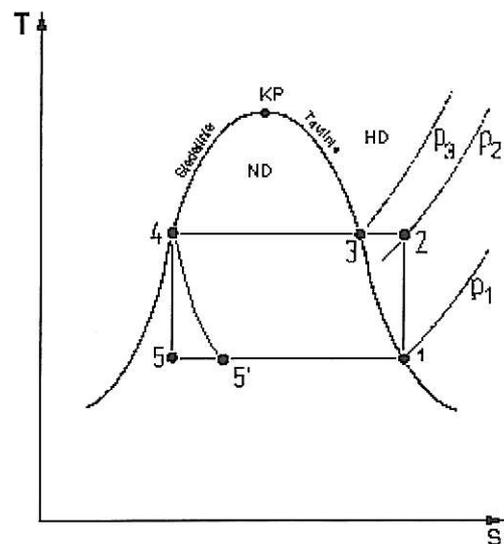


Abbildung 3: Carnot-Prozess (T-s)

Zustandsänderungen

- 1→2 : isentrope Verdichtung
- 2→3 : isotherme Verdichtung mit Wärmeabgabe
- 3→4 : isotherme und isobare Wärmeabgabe durch Verflüssigung
- 4→5 : isentrope Entspannung mit Entspannungsmaschine
- 4→5' : isenthalpe Entspannung über Drosselventil
- 5→1 : isotherme und isobare Wärmeaufnahme durch Verdampfung

Um eine isotherme Wärmezufuhr und Wärmeabgabe zu realisieren, lässt man die Zustandsänderungen am einfachsten im Nassdampfgebiet (zwischen Siedelinie und Taulinie) ablaufen, da hier Isotherme und Isobare zusammenfallen.

Der Carnot-Prozess ergibt sich dann dadurch, dass man die Verdichtung auf der rechten Grenzcurve (Ende des Verdampfungsvorganges) beginnt und die Wärmeabgabe an der linken Grenzcurve enden lässt.

Die dabei verrichteten Arbeiten und übertragenen Wärmemengen lassen sich einfach im T-S-Diagramm als Flächen oder im lg p-h-Diagramm als Strecken ablesen. So ergibt sich:

Heizleistung: $q_{ab} = T_2 \cdot (s_4 - s_2)$ {Gleichung 1}

bzw.: $q_{ab} = (h_4 - h_2)$ {Gleichung 2}

Antriebsenergie: $w_t = (T_2 - T_5) \cdot (s_4 - s_2)$ {Gleichung 3}

bzw.: $w_t = (h_2 - h_1)$ {Gleichung 4}

Zur isentropen Entspannung von 4 nach 5 wäre eine Entspannungsmaschine, z.B. eine kleine Turbine, erforderlich, die die aus dem Kreislauf entzogene Arbeit dem Verdichter verlustlos wieder zuführen müsste. Hierbei ist die gewinnbare Arbeit für kleine bis mittlere Anlagen jedoch so gering, dass sich der große Aufwand einer solchen Maschine nicht rechtfertigt. Deshalb begnügt man sich mit einer isenthalpen Drosselung (Drosselung bei konstanter Enthalpie), wofür nur ein einfaches Drosselorgan erforderlich ist.

Auch die isotherme Verdichtung zwischen 2 und 3 im Heissdampfgebiet ist praktisch nicht zu erreichen. Stattdessen erhöht man den Druck in 2 so, dass bis zum Erreichen des ND-Gebietes in 3 isobare Wärme abgegeben werden kann.

Damit ergibt sich der in den Abbildungen 4 und 5 dargestellte idealisierte Wärmepumpen-Vergleichsprozess mit isenthalper Drosselung.

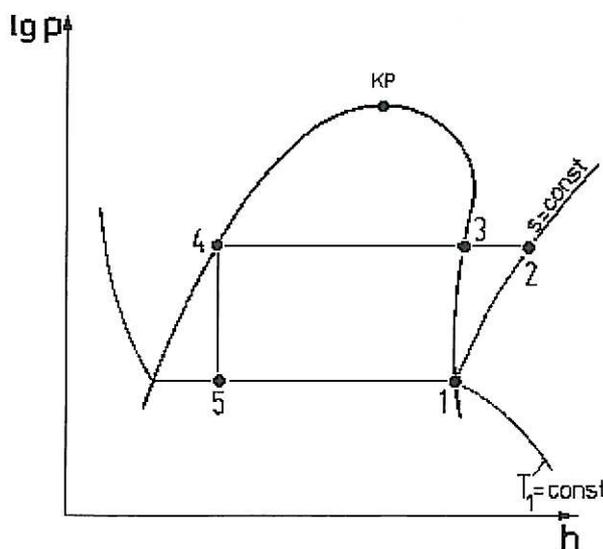


Abbildung 4: idealisierter Wärmepumpen-
vergleichsprozess (lg p-h)

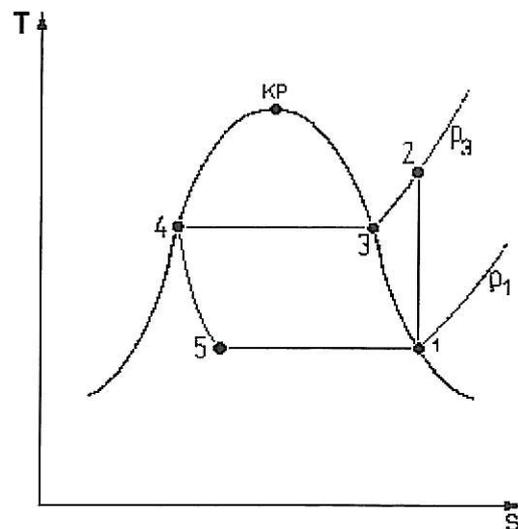


Abbildung 5: idealisierter Wärmepumpen-
vergleichsprozess (T-s)

Zustandsänderungen

1→2 : isentrope Verdichtung

2→3 : isobare Wärmeabgabe

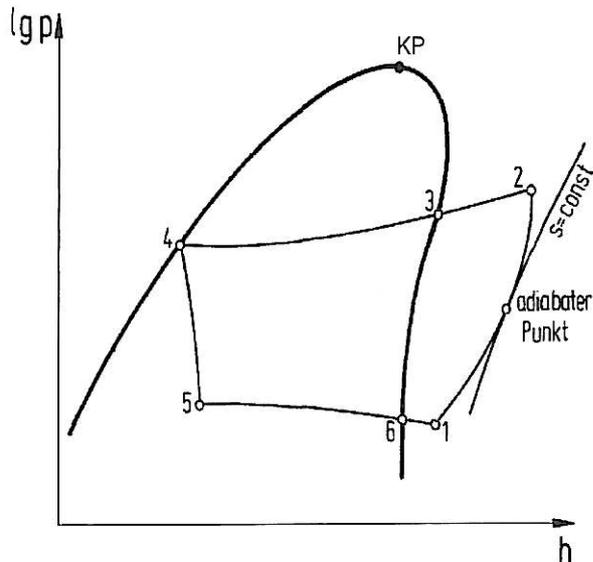
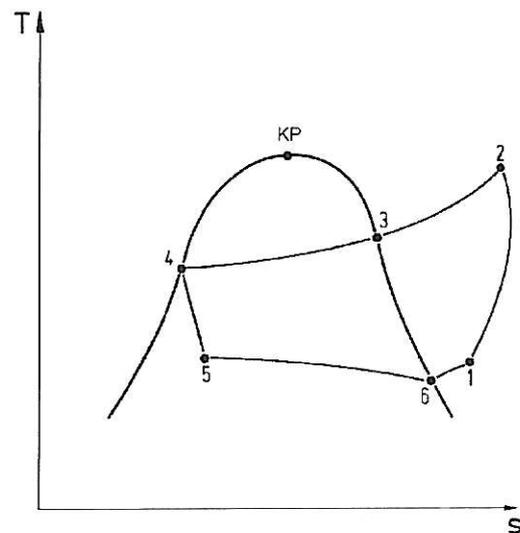
3→4 : isotherme/isobare Wärmeabgabe durch Verflüssigung

4→5 : isenthalpe Entspannung über Drosselventil

5→1 : isotherme/isobare Wärmeaufnahme durch Verdampfung

Bei einem Vergleich mit dem Carnot-Prozess ist zu erkennen, dass die Temperatur im Endpunkt der Verdichtung höher ist, als die Temperatur des Verflüssigungsvorganges. Daraus ergibt sich, dass auch die Arbeitsaufnahme für den Verdichter entsprechend höher ist als beim Carnot-Prozess.

Obwohl sich der Real-Prozess (Abbildung 6 und 7) schon ziemlich an den idealisierten Prozess (Abbildung 4 und 5) annähern lässt, ist es nicht möglich ihn vollständig nach dem zuvor beschriebenen Prinzip durchzuführen.

Abbildung 6: Real-Prozess ($\lg p$ - h)Abbildung 7: Real-Prozess (T - s)

Zustandsänderungen

- 1→2 : Verdichtung mit veränderlichem Polytropenexponenten
- 2→3 : Wärmeabgabe mit Druckabfall infolge Reibung
- 3→4 : Wärmeabgabe durch Verflüssigung mit Druckabfall
- 4→5 : Drosselung mit Wärmeaufnahme
- 5→1 : Wärmeaufnahme mit Druckabfall und Überhitzung

Eine Abweichung besteht darin, dass der Verdichter bei allen Betriebsbedingungen davor geschützt werden muss, unverdampftes flüssiges Kältemittel anzusaugen. Andernfalls könnte es durch Flüssigkeitsschläge leicht zu Schäden am Verdichter kommen. Dies kann verhindert werden, indem man die Verdichtung nicht mit Nassdampf betreibt, sondern mit ausreichender Überhitzung im Ansaugstutzen (Punkt 1 in Abbildung 7). Diese Überhitzung kann durch eine entsprechende Einstellung des Expansionsventils bereits im Verdampfer erfolgen oder durch einen Wärmetauscher bei gleichzeitiger Unterkühlung der Flüssigkeit, mit einer daraus resultierenden Erhöhung der Heizleistung. Der Wärmetauscher zweigt dabei einen Teil der Verflüssigungswärme nach dem Verflüssiger ab und erwärmt damit das Kältemittel unmittelbar vor dem Verdichter.

Zu einer weiteren Abweichungen kommt es, da beim Ansaugen das Sauggas zunächst eine geringere Temperatur als die Zylinderwand des Verdichters besitzt

und daher Wärme aufnimmt. Infolge der Temperaturerhöhung durch die polytrope Verdichtung erreicht das Kältemittel Temperaturen oberhalb der Temperatur des Verdichters. Es kommt zu einer Wärmeabgabe im oberen Teil der Verdichtung. Daraus folgt, dass die Verdichtung am Anfang mit einer Entropiezunahme und am Ende mit einer Entropieabnahme verbunden ist.

Erreicht das Kältemittel bei dem Verdichtungsprozess die mittlere Temperatur des Verdichters, findet augenblicklich keine Wärmeübertragung statt und der Prozess ist an einem adiabaten Punkt angelangt.

Weitere Abweichungen folgen aus Rohrreibungs- und Strömungsverlusten.

Bei der Versuchsdurchführung mit der Wärmepumpenanlage treten außerdem noch Wärmeverluste infolge Wasserverdunstung, Wärmeabstrahlung und Wärmeleitung des Kompressors, der Wasserreservoirs sowie der Rohrleitungen auf. Dieser Einfluss ist quantitativ nicht zu erfassen.

In Abbildung 8 ist qualitativ ein idealisierter- (rot) und ein realer Kreisprozess (blau) in ein Zustandsschaubild des Kältemittels R 134a eingetragen. Hierbei muss allerdings der reale Verlauf als theoretisiert angesehen werden, da er in Anlehnung an für Wärmepumpen übliche Verluste gezeichnet wurde.

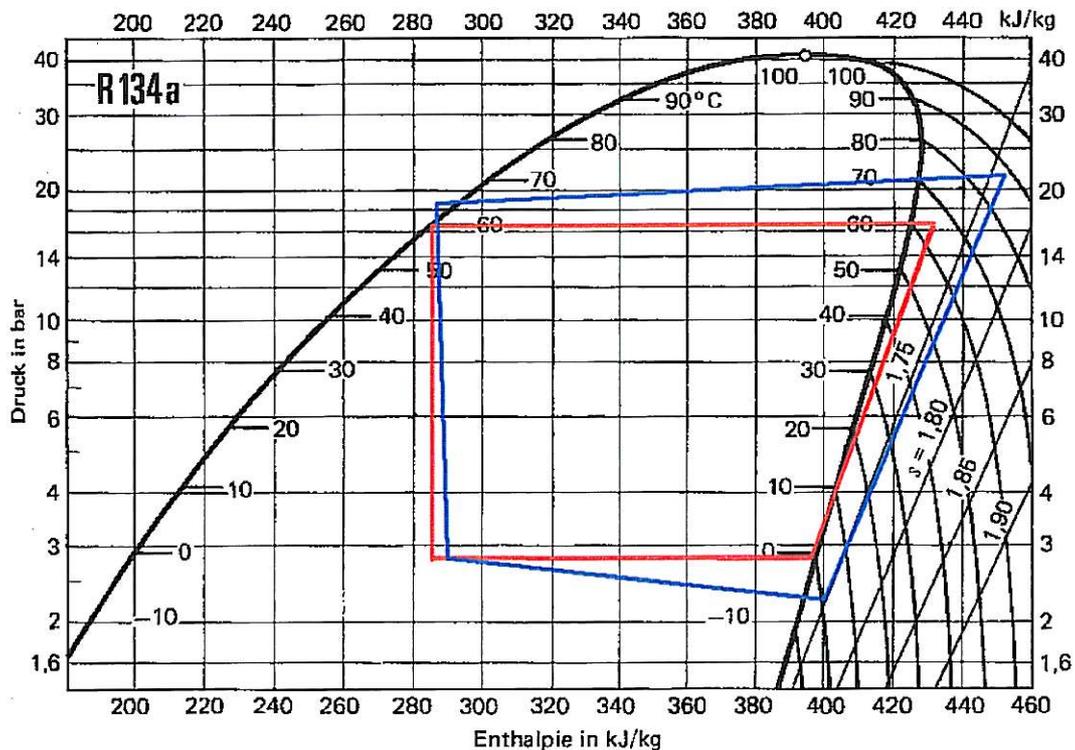


Abbildung 8: Kreisprozesse im p-h-Diagramm (R 134a)



Leistungszahl

Die Bewertung von thermodynamischen Kreisprozessen erfolgt mit Hilfe der Leistungszahl. Sie gibt als wesentliche Kenngröße das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand an, welches bei Wärmepumpenprozessen meist einen Wert größer als eins erreicht.

Allgemeine Definition der Leistungszahl:

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\text{abführbare Wärme}}{\text{aufgewandte Arbeit}} \quad \{\text{Gleichung 5}\}$$

mit den Gleichungen 1 und 3:

$$Q_{ab} = T_2 * (S_4 - S_2) \quad \{\text{Gleichung 1}\}$$

$$W_i = (T_2 - T_5) * (S_4 - S_2) \quad \{\text{Gleichung 3}\}$$

ergibt sich für die carnotsche Leistungszahl:

$$\varepsilon_C = \frac{T_2 * (S_4 - S_2)}{(T_2 - T_5) * (S_4 - S_2)} \quad \{\text{Gleichung 6}\}$$

$$\varepsilon_C = \frac{T_2}{T_2 - T_5} \quad \{\text{Gleichung 6a}\}$$

mit:

T_2 = Temperatur des Kältemittels im Verflüssiger (T_{rot})

T_5 = Temperatur des Kältemittels im Verdampfer (T_{blau})

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung einer Leistungszahl für den realen Prozess besteht darin, dass man die Leistungszahl definiert als Verhältnis der Wärmemenge ΔQ_{ab} , die von der Wärmepumpe pro Zeiteinheit Δt dem Warmwasserreservoir zugeführt wird, zur Leistung P des Verdichters.

$$\varepsilon_W = \frac{\Delta Q_{ab}}{P * \Delta t} \quad \{\text{Gleichung 7}\}$$

mit:

$$W_t = P * t \quad \{\text{Gleichung 8}\}$$

ergibt sich das Verhältnis aus der Änderung der jeweils abgeführten Wärme und zugeführten Arbeit:

$$\varepsilon_W = \frac{\Delta Q_{ab}}{\Delta W_t} \quad \{\text{Gleichung 9}\}$$

mit:

$$\Delta Q_{ab(n+1)} = m * c_p * (T_{rot(n+1)} - T_{rot(n)}) \quad \{\text{Gleichung 10}\}$$

ergibt sich:

$$\varepsilon_{W(n+1)} = \frac{Q_{ab(n+1)} - Q_{ab(n)}}{W_t(n+1) - W_t(n)} \quad \{\text{Gleichung 11}\}$$

mit: $T_{rot(n); \text{ bzw. } (n+1)}$ = Temperatur des Warmwasserreservoirs

Für das Zeitintervall n wurde bei der Versuchsdurchführung und –Auswertung der Zeitraum von einer Minute gewählt.

Die Versuchsdurchführung

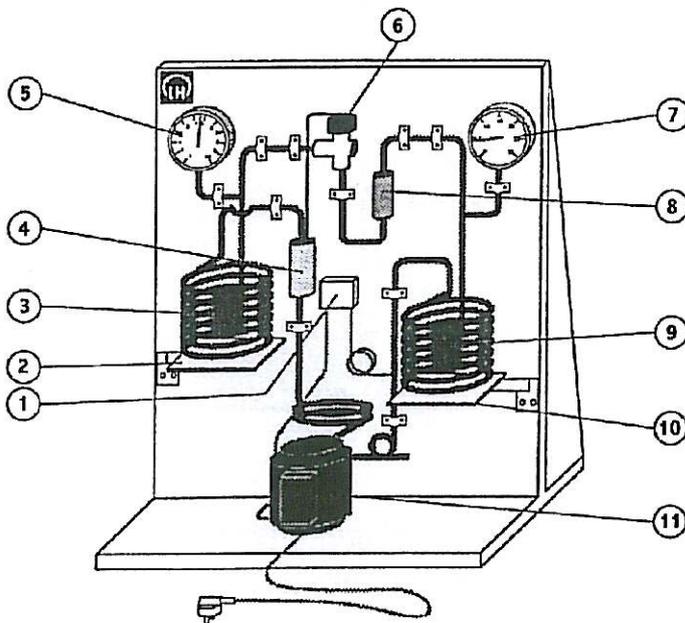
Ihre Aufgabe im Versuch *Wärmepumpe* ist es bei gleichen Ausgangstemperaturen von Warm- und Kaltseite den Temperaturverlauf in beiden Behältern, den Druckverlauf sowie die aufgewandte Arbeit zu messen. Aus den ermittelten Daten sind die abgeführten Wärmen sowie die Leistungsziffern (Wärmezahlen) zu ermitteln.

Sicherheitshinweise



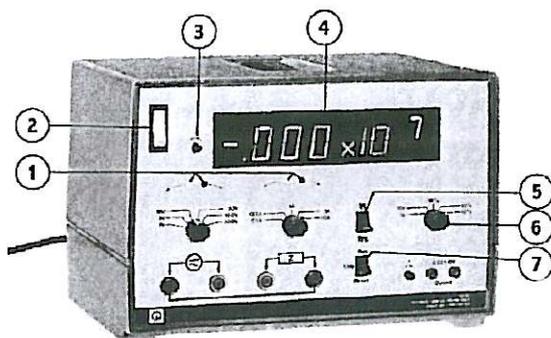
- Berührungsfähige Spannung im Kompressor-Stromkreis!
- Unter Druck stehenden Kältemittelkreislauf unter keinen Umständen zu öffnen versuchen!
- Kompressor nicht thermisch isolieren! Überhitzungsgefahr!
- Kupferrohre nicht als Griff benutzen! Verbiegungsgefahr!

Versuch : Wärmepumpe



1. Druckwächter
2. Stellfläche ausschwenkbar
3. Verdampfer
4. Temperaturfühler des Expansionsventils
5. Manometer der Niederdruckseite
6. Expansionsventil, thermostatisch geregelt
7. Manometer der Hochdruckseite
8. Sammler/Reiniger
9. Verflüssiger
10. Stellfläche ausschwenkbar
11. Kompressor 230V/ca.130W

Abbildung 9: Versuchsmodell Wärmepumpe



1. Unter-/Übersteuerungsanzeige
2. Netzschalter
3. Nullpunktsteller für Leistungsmessung (P [W])
4. Digitalanzeige
5. Funktionsschalter W/Ws
6. Bereichswahlschalter für Zeitkonstante zur Best. der Arbeit (W [Ws])
7. Steuerschalter RUN/STOP/RESET

Abbildung 10: Leistungs- und Energiemesser

Die Versuchsdurchführung

Füllen Sie die Eimer jeweils mit 4 Liter destilliertem Wasser (es wird destilliertes Wasser verwendet, um Kalkablagerungen an der Anlage zu vermeiden). Schwenken Sie anschließend die Stellflächen {Abb.: 9 Pos.Nr.:2+10} aus und bringen die Eimer in Versuchsposition, so dass die Rohrwindungen des Verdampfers {Abb.: 9 Pos.Nr.:3} bzw. Verflüssigers {Abb.: 9 Pos.Nr.: 9} ins Wasser tauchen. Danach sind die Eimer auf den zurückgeschwenkten Stellflächen abzustellen.

Schalten Sie den Leistungsmesser {Abb.: 10} ein (empfohlene Warmlaufzeit: 15 min) und stellen den Wahlschalter {Abb.: 10 Pos.Nr.:5} auf Arbeitsmessung (Ws). Die Digitalanzeige ist mit Hilfe der „Reset-Taste“ {Abb.: 10 Pos.Nr.:7} rückzusetzen. Schalten Sie das Rührwerk ein und regeln die Drehzahl mit Hilfe des Potentiometers (empfohlen wird eine Spannung zwischen 6 und 10 Volt; **Vorsicht!** max. zulässige Spannung des Motors: **12 V**).

Danach schalten Sie den Papierschreiber ein. Die Stifte sind mit Hilfe der Potentiometer zu kalibrieren.

Um den Versuch zu starten, müssen Sie den Stecker des Kompressors {Abb.: 9 Pos.Nr.:11} in die Steckdose des Messanschlußkastens zur Leistungs- und Energiemessung stecken. Außerdem ist der Papiervorschub des Papierschreibers, sowie die Energiemessung mit Hilfe der jeweiligen Steuerschalter zu starten.

Notieren Sie nun periodisch die Temperaturen der Wasserreservoirs, die Drücke an Nieder- und Hochdruckseite (Verdampfer und Verflüssiger), die Temperatur des Kältemittels nach dem Verdampfer, sowie die jeweils verrichtete Arbeit.

Um die Messwerte in gleichmäßigen Intervallen aufzunehmen, wird empfohlen, sich am Raster des Schreiberpapiers zu orientieren (bewährt haben sich Intervalle von 1 min Länge).

Benutzen Sie zur Messwernerfassung und Auswertung die Protokollvordrucke im Anhang (Seiten 12 bis 14).

Der Versuch ist beendet beim Erreichen einer Temperatur von 1°C im Wasserreservoir des Verdampfers (Eisbildung), bzw. beim Erreichen eines Überdruckes von 16 bar auf der Hochdruckseite (automatische Abschaltung des Kompressors).

Nach der Durchführung ist der Versuch auszuwerten. Mit Hilfe der angegebenen Gleichung {10} sind die abgegebenen Wärmemengen zu bestimmen. Aus den ermittelten Werten sind dann die jeweiligen Leistungszahlen (Wärmezahlen) mit den Gleichungen {6a} und {11} zu bestimmen und in einem Diagramm, auf Millimeterpapier, über der Temperaturdifferenz der Wasserreservoirs aufzutragen. Zeichnen Sie den Verlauf des Kreisprozesses anhand dreier ausgewählter Punkte mit Hilfe der jeweiligen Absolutdrücke (Vorsicht! : Manometeranzeige als Überdruck) nach etwa gleichen zeitlichen Intervallen (wählen Sie als ersten Wert einen Punkt, der etwa 10 min nach Versuchsbeginn aufgenommen wurde) in die p-h-Diagramme im Anhang (Seite 14).



Diskutieren Sie die Kurvenverläufe der Temperaturen sowie der Leistungszahl und stellen Ihr Ergebnis stichwortartig dar.

Erklären Sie, warum zu Beginn des Versuches der Druck und somit auch die Temperatur des Kältemittels, nach dem Verdampfer erst nach etwa 10 Minuten zu sinken beginnt, wohingegen die Temperatur des Warmwasserreservoirs von Versuchsbeginn an steigt.

Dauer der Versuchsdurchführung mit anschließender Auswertung: ca. 90 Minuten

**Weiterführende
Informationen
zum Versuch**

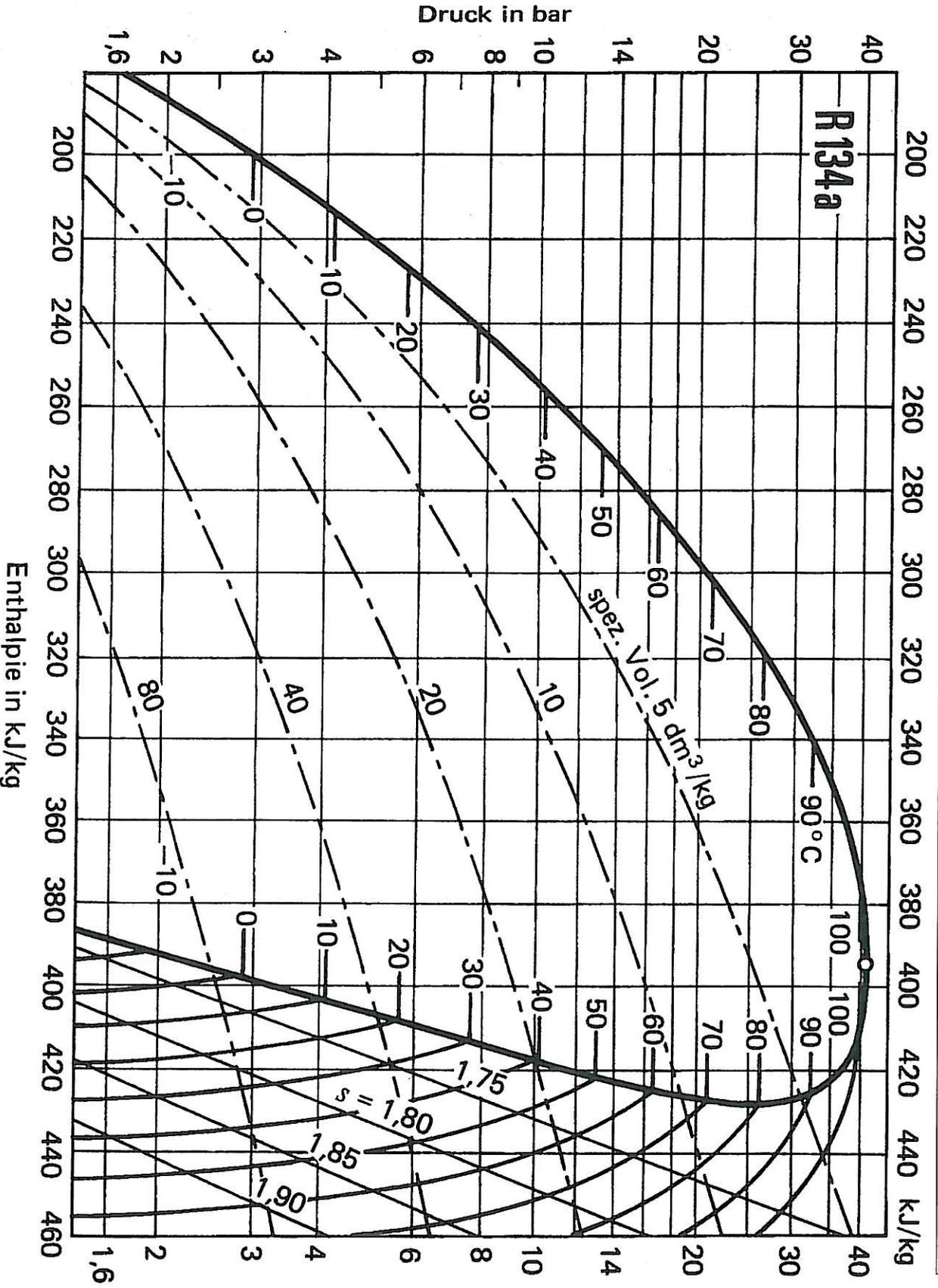
- Leybold Katalog
- Gebrauchsanweisung Leybold 389 521 (Wärmepumpe)
- Gebrauchsanweisung Leybold 531 83 (Leistungs- und Energiemesser)
- Gebrauchsanweisung Leybold 502 05 (Messanschlußkasten)
- Gebrauchsanweisung Leybold 666 193 (Temperaturfühler NiCr—Ni)

Literatur

- Arnold Frohn: Einführung in die technische Thermodynamik, Verlag Wittwer, 3. Auflage 1998
 - Fran Bosnjakovic: Technische Thermodynamik, Teil II, Darmstadt, 8. Auflage, korr. Auflage 1998
 - Prof. Dr.-Ing. W. Nieratschker: Skript zur Vorlesung Thermodynamik an der FH Koblenz, SS 2007
 - Karl Ochsner: Wärmepumpen in der Heizungstechnik, 3., neu bearbeitete Auflage 2005, Verlag Müller C.F.
-



Druck [bar]	Temp. [°C]
2,0	-10,1
2,1	-8,9
2,2	-7,7
2,3	-6,6
2,4	-5,4
2,5	-4,2
2,6	-3,3
2,7	-2,3
2,8	-1,3
2,9	-0,3
3,0	0,6
3,1	1,5
3,2	2,4
3,3	3,3
3,4	4,2
3,5	5,0
3,6	5,8
3,7	6,6
3,8	7,3
3,9	8,1
4,0	8,9
4,1	9,6
4,2	10,4
4,3	11,0
4,4	11,7
4,5	12,4
4,6	13,1
4,7	13,8
4,8	14,4
4,9	15,1
2,01	-10,0
2,43	-5,0
2,93	0,0
3,50	5,0
4,15	10,0
4,88	15,0
5,72	20,0
6,65	25,0
7,70	30,0
8,87	35,0
10,17	40,0
11,60	45,0
13,18	50,0
14,92	55,0
16,82	60,0
18,90	65,0





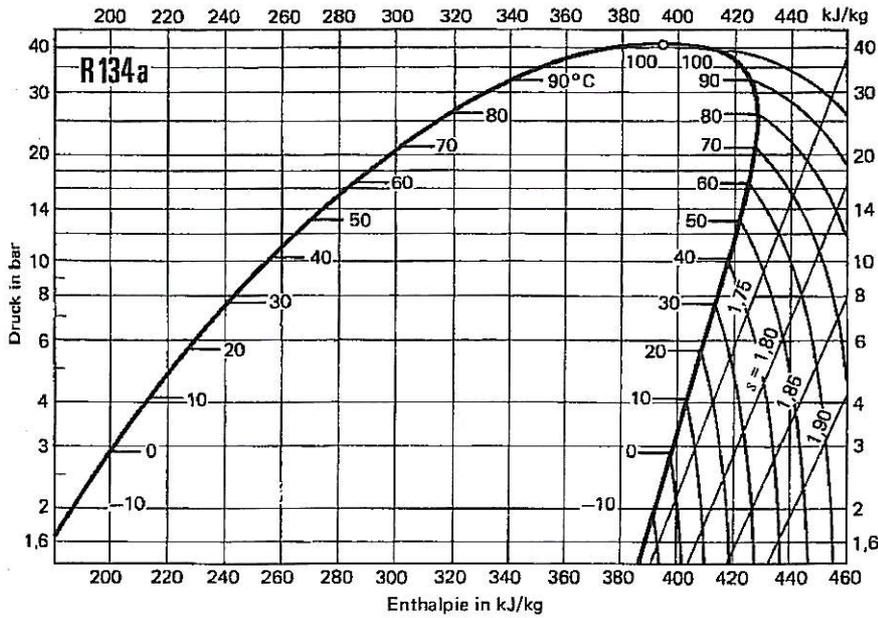
Datum: _____ Uhrzeit: _____ T_{Raum, Versuchsbeginn} = 27,0 °C T_{Raum, Versuchsende} = 27,0 °C *1 Manometerdruckanzeige und Angabe als Überdruck

Zeit	Abkühlvorgang (blau)		Aufheizvorgang (rot)		Arbeit Anlage W _k [kWs]	Leistung Anlage P [W]	Temperaturdifferenz K. (R134a)		Wärme rechn. ΔQ [kWs]	Leistungszahl Carnot ε _{Carnot} [1]	Leistungszahl mit Q _{rechn.} ε _w [1]
	Kreislauf p _{U-blau} *1 [bar]	Behälter T _{blau} [°C]	Kreislauf p _{U-rot} *1 [bar]	Behälter T _{rot} [°C]			T _{rot} - T _{blau} [K]	T _{rot} - T _{blau} [K]			
0											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											

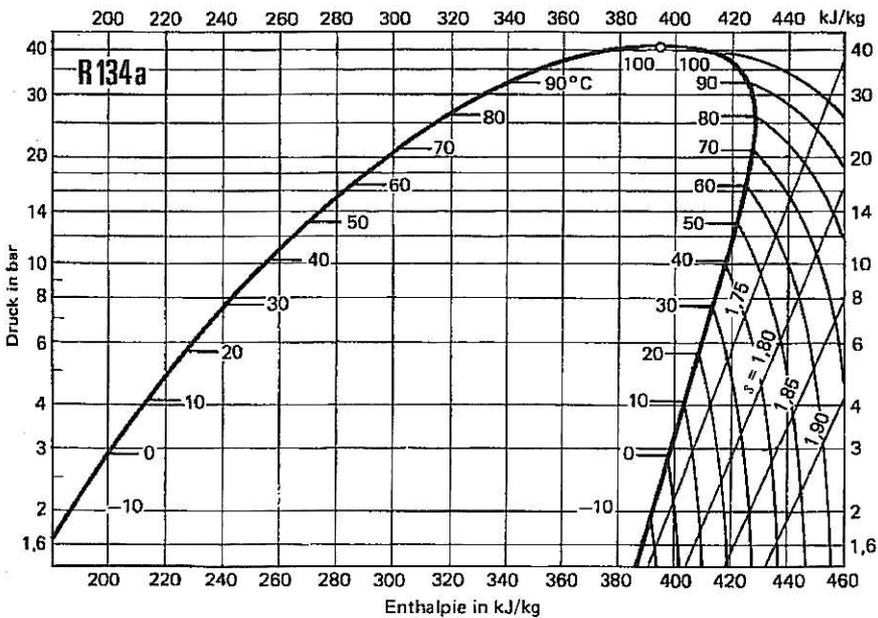


Zeit	Abkühlvorgang (blau)			Aufheizvorgang (rot)			Arbeit Anlage W_k	Leistung Anlage P	Temperaturdifferenz		Wärme rechn. ΔQ	Leistungszahl Carnot ξ_{Carnot}	Leistungszahl mit $Q_{rech.}$ ξ_w
	Kreislauf p_{U-blau}^{*1} [bar]	T_{blau} [°C]	Behälter T_{blau} [°C]	Kreislauf p_{U-rot}^{*1} [bar]	T_{rot} [°C]	Behälter T_{rot} [°C]			$T_{rot} - T_{blau}$ [K]	$T_{rot} - T_{blau}$ [K]			
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													
38													
39													
40													
41													
42													
43													
44													
45													

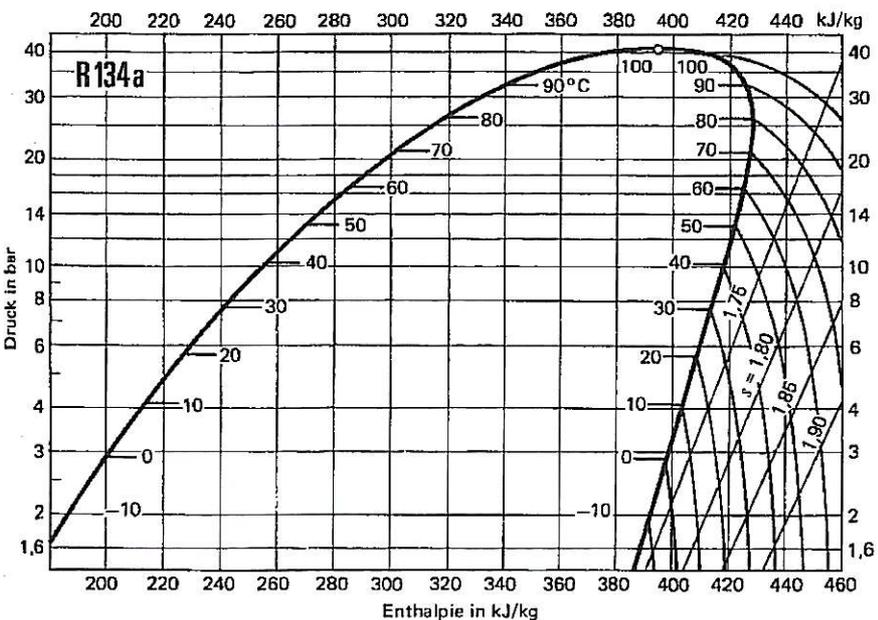
Temperaturdifferenz
der Reservoirs:



$\Delta T = \quad ^\circ\text{C}$



$\Delta T = \quad ^\circ\text{C}$



$\Delta T = \quad ^\circ\text{C}$