

# Bomba de calor



Física

Termodinámica / Termodinámica

Temperatura y calor



Nivel de dificultad

duro



Tamaño del grupo

2



Tiempo de preparación

10 minutos



Tiempo de ejecución

30 minutos

**PHYWE**  
excellence in science

## Información para el profesor

### Aplicación

**PHYWE**  
excellence in science

Fig.1: Montaje experimental

La conductividad térmica tiene muchas aplicaciones, desde los sistemas de calefacción central en los hogares hasta el transporte de energía en las centrales eléctricas.

## Información adicional para el profesor (1/2)



Los conocimientos previos necesarios para este experimento se encuentran en la sección de principio.

### Conocimiento

#### previo



### Principio

Las presiones y temperaturas en la circulación de la bomba de calor de compresión eléctrica se miden en función del tiempo cuando funciona como bomba de calor agua-agua. La energía absorbida y liberada se calcula a partir del calentamiento y el enfriamiento de los dos baños de agua. Cuando funciona como bomba de calor aire-agua, se determina el coeficiente de rendimiento a diferentes temperaturas del vaporizador.

## Información adicional para el profesor (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science



### Objetivo

El objetivo de este experimento es investigar la conductividad térmica del agua y del aire.



### Tareas

1. Medir la presión y la temperatura en el circuito y en los depósitos de agua del lado del condensador y del lado del vaporizador alternativamente. Calcular la energía tomada y liberada, también la concentración de volumen en el circuito y la eficiencia volumétrica del compresor.
2. Medir la temperatura del vaporizador y la temperatura del baño de agua en el lado del condensador bajo diferentes condiciones de funcionamiento en el lado del vaporizador.

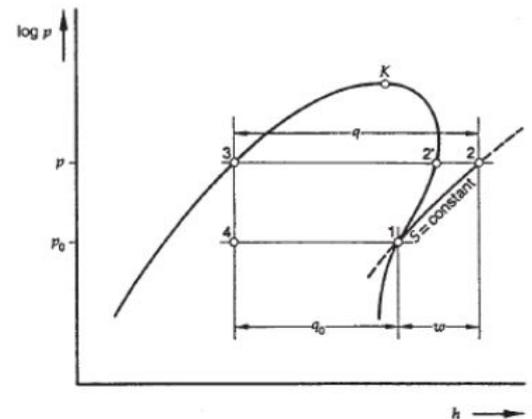
## Principio (1/2)

**PHYWE**  
excellence in science

El Mollier ( $h, \log p$ ), en el que  $p$  es la presión y  $h$  la entalpía específica de la sustancia de trabajo, se utiliza para describir el proceso cíclico en la tecnología del calor. La Fig. 2 muestra una representación idealizada del circuito de la bomba de calor.

La curva que pasa por el punto crítico  $K$  delimita la zona de vapor húmedo en la que coexisten la fase líquida y la fase gaseosa. En esta zona las isothermas son paralelas al eje  $h$ .

Fig. 2: diagrama  $h, \log p$  de una bomba de calor, curva ideal.



## Principio (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science

Partiendo del punto 1, el compresor comprime la sustancia de trabajo hasta el punto 2; en el caso ideal, esta acción procede sin intercambio de calor con el entorno, es decir, isentrópicamente ( $S = \text{const.}$ ). En el camino del punto 2 al 3 se libera calor útil y la sustancia de trabajo se condensa. A continuación, la sustancia de trabajo fluye a través de la válvula de restricción y llega al punto 4. En una acción restrictiva ideal la entalpía permanece constante. Al pasar del punto 4 al punto 1, la sustancia de trabajo toma energía del entorno y se vaporiza.

Las cantidades específicas de energía  $q_0$  y  $q$  tomados y liberados por kg y el trabajo específico del compresor  $w$  requerido pueden leerse directamente como segmentos de línea en el gráfico.

$$q_0 = h_1 - h_3$$

$$q = h_2 - h_3$$

$$w = h_2 - h_1$$

**Material**

| Posición | Material  | Artículo No. | Cantidad |
|----------|---|--------------|----------|
| 1        | BOMBA D.CALOR,PRINCIP.D.COMPRES.                  | 04370-88     | 1        |
| 2        | Termómetro de laboratorio, -10...+110 °C          | 38056-00     | 4        |
| 3        | TERMOMETRO DE INMERSION,-10/+110C                 | 38060-00     | 2        |
| 4        | PASTA CONDUCTIVA                                  | 03747-00     | 1        |
| 5        | Secador de pelo con aire frío y caliente, 1800 W  | 04030-93     | 1        |
| 6        | CRONOMETRO DIGITAL, 24 h, 1/100 s y 1 s           | 24025-00     | 1        |
| 7        | Base trípode PHYWE                                | 02002-55     | 1        |
| 8        | Varilla de acero inoxidable, 18/8, 250 mm         | 02031-00     | 1        |
| 9        | Pinza universal con articulación                  | 37716-00     | 1        |
| 10       | Doble nuez  | 02054-00     | 1        |
| 11       | V.D.PRECIP.,ALTO,BORO 3.3, 2000 ml                | 46033-00     | 1        |
| 12       | Varilla de vidrio, BORO 3.3, l = 300 mm, d = 7 mm | 40485-05     | 2        |
| 13       | Medidor de energía digital                        | 07049-01     | 1        |



## Montaje y ejecución

### Montaje y ejecución (1/2)

Verter una cantidad medida de agua en ambos depósitos de agua, de modo que el intercambiador de calor quede completamente sumergido. Hay que tener cuidado de que el agua del lado del condensador no esté más fría que la del lado del vaporizador. Medir todas las presiones y temperaturas antes de encender la bomba de calor:

Lado del condensador:

$p_1$  = Pressure,  $\Theta_1$  = Water temperature,  $\Theta_{Co}$  = Temperature at the condenser outlet

Lado del vaporizador:

$p_2$  = Pressure,  $\Theta_2$  = Water temperature,  $\Theta_{Ci}$  = Temperature at the condenser inlet,  
 $\Theta_{Vo}$  = Temperature at the vaporizer outlet

Conectar la bomba de calor y parar el reloj y medir la presión y las temperaturas del lado del condensador y del vaporizador alternativamente (por ejemplo, cada minuto). Dejar de medir después de unos 30 minutos.

## Montaje y ejecución (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science

Retirar el depósito de agua del lado del vaporizador, secar cuidadosamente las bobinas del intercambiador de calor. Realizar tres series de mediciones con la bomba de calor aire-agua. Al comienzo de cada serie de mediciones, la temperatura del agua es de aproximadamente 20°C, medir el volumen de agua (marcar el nivel de agua, vaciar el agua caliente y rellenar con agua fría hasta la marca).

Colocar un soplador de aire caliente a unos 30 cm del serpentín del vaporizador y soplar un chorro de aire frío sobre el vaporizador. Encender la bomba de calor y medir la temperatura a la salida del vaporizador  $\Theta_{V_o}$  y la temperatura del agua  $\Theta_1$  en función del tiempo. Duración de una serie de mediciones aprox. 20 min, hasta  $\Theta_1 > 30^\circ\text{C}$  y  $\Theta_{V_o} \approx \text{constantes}$ .

Repetir la serie de mediciones con corriente de aire caliente y luego sin corriente de aire.

**PHYWE**  
excellence in science

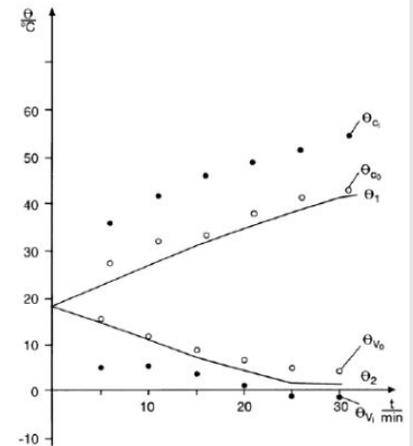
## Resultados

## Tarea 1 (1/6)

**PHYWE**  
excellence in science

La Fig. 3 muestra la curva de las temperaturas frente al tiempo en el caso de funcionamiento como bomba de calor agua-agua. La temperatura de la sustancia de trabajo no cambia durante la vaporización ni durante la condensación. El recalentamiento del vapor se produce antes del condensador (véase la Fig. 2; el punto 2 se encuentra fuera de la zona de vapor húmedo). En el lado del vaporizador, el termostato de la válvula de restricción garantiza el recalentamiento del vapor para que la sustancia de trabajo líquida no entre en el compresor. Por lo tanto, el punto 1 (Fig. 2) también se encuentra fuera de la zona de vapor húmedo en el proceso real de bombeo de calor.

Fig. 3:  
Temperaturas a la entrada y a la salida del vaporizador  $\Theta_{V_o}$  (•),  $\Theta_{V_o}$  (o) y el condensador  $\Theta_{C_i}$  (•),  $\Theta_{C_o}$  (o) en función del tiempo de funcionamiento; curvas continuas: temperatura en depósitos de agua.

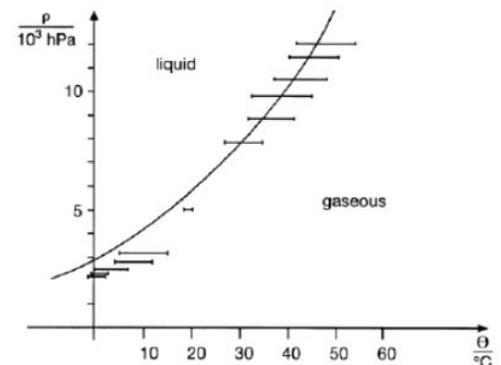


## Tarea 1 (2/6)

**PHYWE**  
excellence in science

En la Fig. 4 se representan algunos de los pares de valores de presión y temperatura medidos y se comparan con los valores de la Tabla 1. Hay que tener en cuenta que los manómetros del circuito indican una presión superior a la atmosférica. En el gráfico se observa que el sobreenfriamiento de la sustancia de trabajo líquida también se produce en el proceso de bombeo de calor real, es decir, el punto 3 (Fig. 2) también se encuentra fuera de la zona de vapor húmedo.

Fig. 4: Interdependencia de la presión (absoluta) y la temperatura de ebullición de la sustancia de trabajo (intervalo de valores de prueba para el vaporizador y el condensador) cuando la bomba de calor está en funcionamiento; curva continua: según la ecuación 1.



## Tarea 1 (3/6)

**PHYWE**  
excellence in science

La vaporización y la condensación de la sustancia de trabajo pueden observarse a través de las mirillas de la bomba de calor. Como la válvula reductora controlada por un termostato deja pasar cantidades variables de sustancia de trabajo, la escena no siempre es uniforme. El flujo de energía  $\dot{Q}$  en el lado del condensador y del vaporizador se calcula a partir del calentamiento y enfriamiento del baño de agua.

$$\dot{Q} = c \cdot m_W \frac{\Delta\theta}{\Delta t} (1)$$

$c$  = Specific heat capacity of water,  $m_W$  = Mass of the water,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$  = Temperature change per unit time

Los flujos de energía no son constantes, sino que, aparte del estado de funcionamiento de la bomba de calor (carga en el circuito, ajuste de la válvula de restricción, potencia instantánea del compresor), dependen sobre todo de la diferencia de temperatura entre el vaporizador y el condensador.

## Tarea 1 (4/6)

**PHYWE**  
excellence in science

Los valores medidos de las Figs. 3 y 4 se evalúan en el momento  $t = 10$  min.

Masa de agua en cada depósito de agua  $m_W = 4,8$  kg

Flujo de calor del condensador

$$\dot{Q} = 269 \text{ W}$$

Flujo de calor del vaporizador

$$Q_0 = 235 \text{ W}$$

La potencia del compresor fluctúa con el tiempo. En promedio es  $P = 120$  W.

Por lo tanto, la cifra de rendimiento resultante es

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P} = 2.2.$$

La relación entre el volumen de carrera real  $V$  y el volumen de carrera geométrico  $V_g$  del compresor se llama eficiencia volumétrica  $\lambda$  del compresor:

$$\lambda = \frac{V}{V_g}$$

## Tarea 1 (5/6)

**PHYWE**  
 excellence in science

Suponiendo un proceso de bombeo de calor ideal, el flujo de volumen real  $\dot{V}$  de la sustancia de trabajo en el circuito y la eficiencia volumétrica  $\lambda$  del compresor se puede calcular a partir del flujo de calor del vaporizador con la ayuda de la ecuación 1.

$$V = \frac{v \cdot \dot{Q}_0}{h_1 - h_3}$$

( $v$ = volumen específico del vapor)

Presión en el lado del vaporizador en

$$t = 10 \text{ min}$$

$$p_0 = 3.1 \cdot 10^3 \text{ hPa}$$

De la tabla 1

$$h_1 = 399.84 \cdot \text{kJ/kg}$$

$$h_3 = 247.47 \cdot \text{kJ/kg}$$

$$v = 0.0647 \cdot \text{m}^3/\text{kg} = 64.7 \text{ l/kg}$$

## Tarea 1 (6/6)

**PHYWE**  
 excellence in science

Por lo tanto,

$$\dot{V} = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$$

y la frecuencia de rotación del pistón

$$f = 1450 \text{ min}^{-1}$$

Obtenemos un flujo de volumen geométrico de

$$\dot{V}_g = V_g \cdot f = 123 \text{ cm}^3/\text{s}$$

y por lo tanto una eficiencia volumétrica del compresor

$$f = 1450 \text{ min}^{-1}$$

## Tarea 2 (1/3)

El flujo de calor del condensador de la bomba de calor depende de la temperatura del vaporizador. Cuando funciona como bomba de calor aire-agua, la temperatura del vaporizador se mantiene aproximadamente constante al cabo de unos 10 minutos, ya que, gracias al soplador, se dispone de una reserva de aire prácticamente infinita.

Sin el soplador, el vaporizador se hiela, por lo que su temperatura también se mantiene casi constante.

para comparar los diferentes modos de funcionamiento, el flujo de calor del condensador  $\dot{Q}$  se calcula mediante la ecuación (1) a una temperatura del agua de  $\Theta_1 = 30^\circ\text{C}$ .

La temperatura media del vaporizador  $\Theta_{Vo}$ , el flujo de calor del condensador  $\dot{Q}$  y la cifra de rendimiento  $\epsilon$  (potencia del compresor  $P = 120\text{ W}$ ) para los diferentes modos de funcionamiento se muestran en la siguiente tabla.

| Soplador | $\theta_{Vo}$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $\dot{Q}$ [W] | $\epsilon$ |
|----------|------------------------------------|---------------|------------|
| caliente | 12                                 | 276           | 2.1        |
| frío     | 8                                  | 193           | 1.5        |
| sin      | -10                                | 117           | 0.9        |

Por lo tanto, es necesario un soplador para el funcionamiento de una bomba de calor aire-agua que sea económica.

## Tarea 2 (2/3)

| $\theta$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $P$ [MPa] | $v$ [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] | $h^*$ [kJ/kg] | $h^{**}$ [kJ/kg] |
|-------------------------------|-----------|--------------------------------|---------------|------------------|
| -30                           | 0.08436   | 0.22596                        | 161.10        | 380.45           |
| -20                           | 0.13268   | 0.14744                        | 173.82        | 386.66           |
| -10                           | 0.20052   | 0.09963                        | 186.78        | 392.75           |
| -8                            | 0.21684   | 0.09246                        | 189.40        | 393.95           |
| -6                            | 0.23418   | 0.08591                        | 192.03        | 395.15           |
| -4                            | 0.25257   | 0.07991                        | 194.68        | 396.33           |
| -2                            | 0.27206   | 0.07440                        | 197.33        | 397.51           |
| 0                             | 0.29269   | 0.06935                        | 200.00        | 398.68           |
| 2                             | 0.31450   | 0.06470                        | 202.68        | 399.84           |
| 4                             | 0.33755   | 0.06042                        | 205.37        | 401.00           |
| 6                             | 0.36186   | 0.05648                        | 208.08        | 402.14           |

| $\theta$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $P$ [MPa] | $v$ [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] | $h^*$ [kJ/kg] | $h^{**}$ [kJ/kg] |
|-------------------------------|-----------|--------------------------------|---------------|------------------|
| 8                             | 0.38749   | 0.05238                        | 210.80        | 403.27           |
| 10                            | 0.41449   | 0.04948                        | 213.53        | 404.40           |
| 12                            | 0.44289   | 0.04636                        | 216.27        | 405.51           |
| 14                            | 0.47276   | 0.04348                        | 219.03        | 406.61           |
| 16                            | 0.50413   | 0.04081                        | 221.80        | 407.70           |
| 18                            | 0.53706   | 0.03833                        | 224.59        | 408.78           |
| 20                            | 0.57159   | 0.03603                        | 227.40        | 409.84           |
| 22                            | 0.60777   | 0.03388                        | 230.21        | 410.89           |
| 24                            | 0.64566   | 0.03189                        | 233.05        | 411.93           |
| 26                            | 0.68531   | 0.03003                        | 235.90        | 412.95           |
| 28                            | 0.72676   | 0.02829                        | 238.77        | 413.95           |

## Tarea 2 (3/3)

| $\theta$ [°C] | P [MPa] | $v$ [m <sup>3</sup> /kg] | $h^*$ [kJ/kg] | $h^{**}$ [kJ/kg] |
|---------------|---------|--------------------------|---------------|------------------|
| 30            | 0.77008 | 0.02667                  | 241.65        | 414.94           |
| 32            | 0.81530 | 0.02516                  | 244.55        | 415.90           |
| 34            | 0.86250 | 0.02374                  | 247.47        | 416.85           |
| 36            | 0.91172 | 0.02241                  | 250.41        | 417.78           |
| 38            | 0.96301 | 0.02116                  | 253.37        | 418.69           |
| 40            | 1.0165  | 0.01999                  | 256.35        | 419.58           |
| 42            | 1.0721  | 0.01890                  | 259.35        | 420.44           |

| $\theta$ [°C] | P [MPa] | $v$ [m <sup>3</sup> /kg] | $h^*$ [kJ/kg] | $h^{**}$ [kJ/kg] |
|---------------|---------|--------------------------|---------------|------------------|
| 44            | 1.1300  | 0.01786                  | 262.38        | 421.28           |
| 46            | 1.1901  | 0.01689                  | 265.42        | 422.09           |
| 48            | 1.2527  | 0.01598                  | 268.49        | 422.88           |
| 50            | 1.3177  | 0.01511                  | 271.59        | 423.63           |
| 60            | 1.6815  | 0.01146                  | 287.49        | 426.86           |
| 70            | 2.1165  | 0.00867                  | 304.29        | 428.89           |

$\Theta$  = temperatura, P = presión,  $v$  = volumen específico del vapor,  $h^*$  entalpía específica del líquido ( $h_3$ ),  $h^{**}$  entalpía específica del líquido ( $h_1$ )