

Wärmepumpe DT400-1P

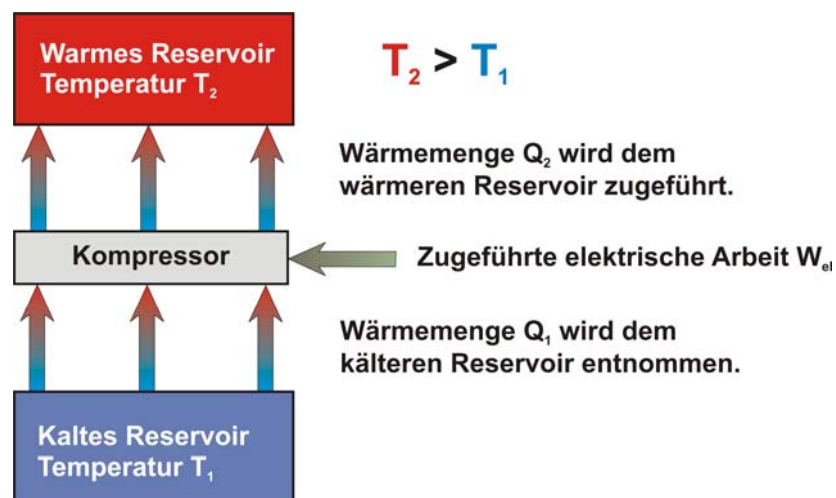
NTL-Schriftenreihe „Versuchsanleitung“
- Wärmepumpe –



Allgemein

Eine Wärmepumpe ist eine Wärmekraftmaschine. Sie „hebt“ Wärme von einem Körper tieferer Temperatur T_1 auf einen Körper höherer Temperatur T_2 .

Je kleiner die Temperaturdifferenz ΔT ist, desto kleiner ist die dazu nötige Arbeit W und umso größer die Leistungszahl ϵ .

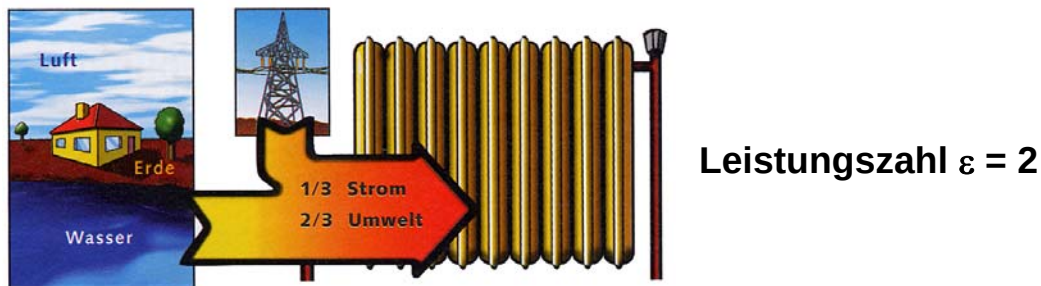


Energiefluss in einer Wärmepumpe

Wird die Wärmekraftmaschine als Wärmepumpe genutzt, so liegt ihr Nutzen in der Erwärmung des wärmeren Reservoirs, z.B. eines Wohnraumes. Das kältere Reservoir kann kühles Wasser (Fluss, Grundwasser,..), Erdreich oder Außenluft sein.

Wird die Wärmekraftmaschine als Kühlschrank genutzt, so liegt ihr Nutzen in der Abkühlung des kälteren Reservoirs, z.B. Kühlfach. Das wärmere Reservoir ist die Umgebungsluft des Kühlgerätes.

Da für die Erwärmung des gewünschten Mediums, z.B. Warmwasser der Heizungsanlage, ein wesentlicher Teil aus der Umgebung des kälteren Reservoirs kommt, ist die Leistungszahl in der Regel >1 und kann bei modernen Anlagen bereits den Wert 5 erreichen.
(Achtung: Leistungszahl ε nicht mit Wirkungsgrad η verwechseln!)



Leistungszahl $\varepsilon = \text{Nutzen/Aufwand}$

Leistungszahl $\varepsilon = Q_1 / W$ (bei hoher Temperatur abgegebene Wärme / Hebearbeit)

Es gilt: $\varepsilon < T_1 / \Delta T$

Wirkungsgrad $\eta = \text{gewonnene Energie/zugeführte Energie (Elektrische Energie des Kompressors + Wärmeenergie aus Reservoir)}$

Beim Kühlschrank ist die Leistungszahl geringer, da die Wärme der elektrischen Energie nicht genutzt wird.

Je nachdem, ob die Wärme aus Wasser, Erdreich oder Luft entnommen wird, und das erwärmte Medium Wasser oder Luft ist, spricht man von einer:

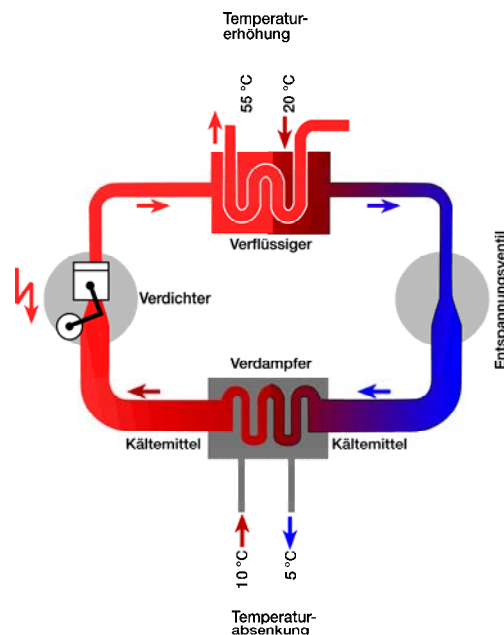
Wasser–Wasser – Wärmepumpe
 Erdreich–Wasser – Wärmepumpe

 Luft–Luft – Wärmepumpe.

Bei diesem Modell handelt es sich um eine Wasser–Wasser – Wärmepumpe.

Wirkungsweise einer Wärmepumpe:

Bei Kompressorwärmepumpen wird ein Arbeitsmittel, dessen Siedepunkt bei geringen Temperaturen liegt (in diesem Fall: R 134a, Siedepunkt: $-26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) eingesetzt. Dieses Arbeits- oder Kältemittel durchläuft nacheinander die Prozesse Verdampfen, Verdichten, Verflüssigen und Entspannen.



Verdampfer (Wärmeaufnahme):

Durch den Verdampfer strömt das flüssige Kältemittel unter niedrigem Druck p_0 und einer Temperatur unter der des kühleren Wärmereservoirs. Die Temperatur des kühleren Wärmereservoirs ist höher als die dem Druck p_0 entsprechende Siedetemperatur des Kältemittels. Auf diese Weise wird neben der Wärme aufgrund der Temperaturerhöhung auch die Verdampfungswärme transportiert.

Verdichter (Temperatur- und Druckerhöhung durch den Kompressor)

Das verdampfte Arbeitsmittel wird fortwährend vom Kompressor angesaugt und verdichtet. Durch die zugeführte Verdichtungsarbeit wird der Druck im Kältemittelkreislauf erhöht (p_1). Außerdem erwärmt sich das Kältemittel über die Temperatur des wärmeren Reservoirs. Für diesen Prozess muss Energie von außen zugeführt werden.

Verflüssiger (Wärmeabgabe)

Der komprimierte Dampf gelangt in den Verflüssiger und gibt aufgrund seiner höheren Temperatur Wärme an das warme Reservoir ab. Da im warmen Reservoir die Temperatur unter der des Druckes p_1 entsprechenden Siedetemperatur des Kältemittels liegt, kondensiert das Kältemittel und gibt zusätzlich Kondensationswärme ab.

Entspannen (Temperatur- und Druckerniedrigung durch das Expansionsventil)

Das Kältemittel strömt durch das Expansionsventil, wobei es sich durch den niedrigen Druck p_0 im Verdampfer abkühlt.

Damit ist der Kreislauf geschlossen.



Verdampfer mit Niederdruckmanometer und Expansionsventil

Experimente zum Verständnis der Wärmepumpe

Für die einzelnen Teilprozesse in der Wärmepumpe bieten sich folgende Versuche an:

Verdampfen:

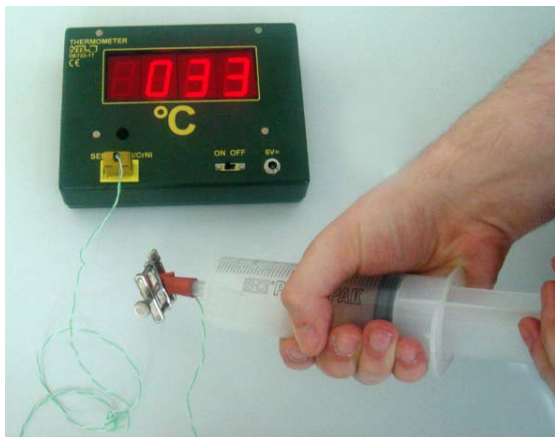


Wird Kältespray, wie er zur Lokalanästhesie bei leichten Verletzungen im Sport verwendet wird, auf die Haut gesprüht, erzeugt er ein Kältegefühl.

Der Grund ist, dass die zum Verdampfen benötigte Wärme dem Körper entzogen wird.

Wenige Tropfen eines Parfums auf der Haut erzeugen ebenfalls ein Kältegefühl, da das Parfum einen niedrigen Siedepunkt besitzt und beim Verdampfen die dazu nötige Wärme dem Körper entzieht.

Verdichten:

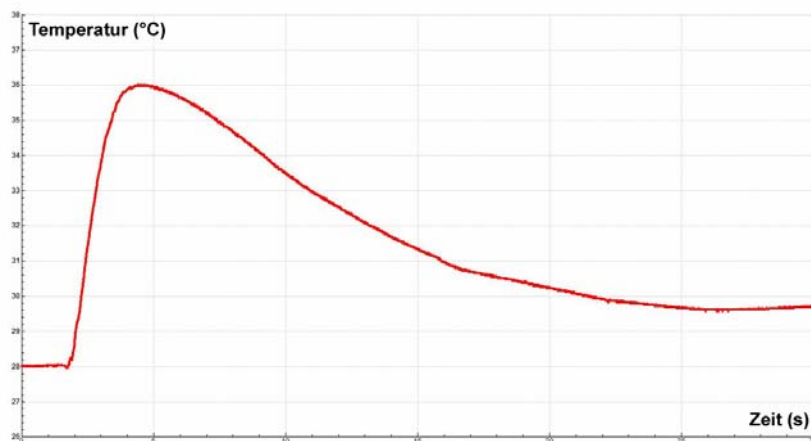


Ein Temperatursensor (z.B. NiCrNi-Thermofühler P4120-1T) wird durch die schmale Öffnung in eine Gasspritze eingeführt. Mit Hilfe eines Gummischlauches und einer Schraubklemme wird die Gasspritze abgedichtet. Der Temperatursensor wird mit einem Temperaturmessgerät (z.B. DE722-1T Thermometer „inno“, 1100 °C) verbunden.

Wird mit Hilfe des Kolbens das Gas in der Spritze ruckartig komprimiert, steigt die Temperatur für kurze Zeit sofort an.

Ergebnis: ΔT ca. 8 °C

Für dieses Experiment ist es zweckmäßig, ein Computermesssystem (z.B. Coach 6 und €Lab P4920-1L) mit Speichermöglichkeit der Messwerte zu verwenden.



Temperatur-Diagramm, aufgezeichnet mit Coach 6

Kondensieren:



In einem Kolben wird Wasser zum Sieden gebracht. Strömt dieser Wasserdampf über ein Glasrohr in ein Reagenzglas, kondensiert er und gibt Wärme ab.

Das Reagenzglas steht in einem Wasserbad.

Diese Kondensationswärme erwärmt das Wasserbad.

Die Temperaturerhöhung wird z.B. mit dem Temperaturmessgerät DE722-1T Thermometer „inno“, 1100 °C und Thermofühler P4120-2T gemessen.

Entspannen:

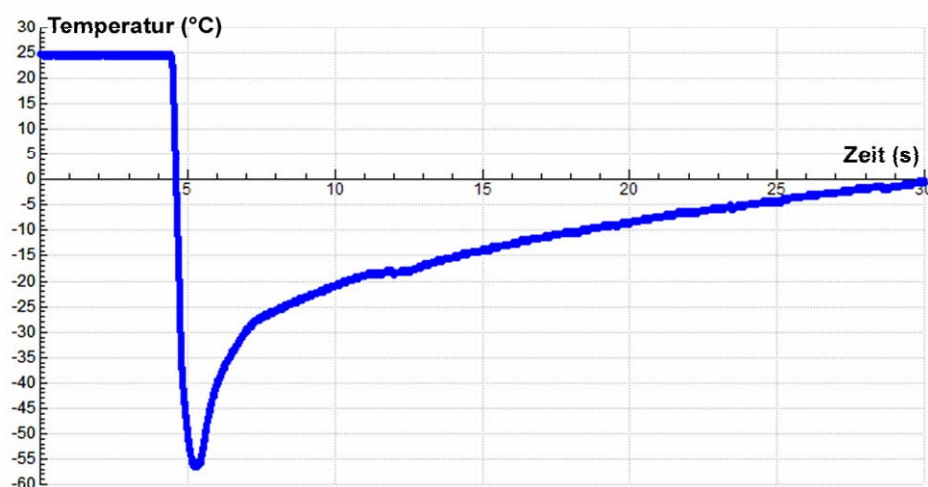


Strömt das Gas aus einer CO₂-Patrone (gehalten im Patronenaufsatz DM340-3B) plötzlich aus, sinkt die Temperatur der CO₂-Patrone durch die abrupte Volumsvergrößerung deutlich ab.

Ergebnis: $\Delta T > 60\text{ °C}$

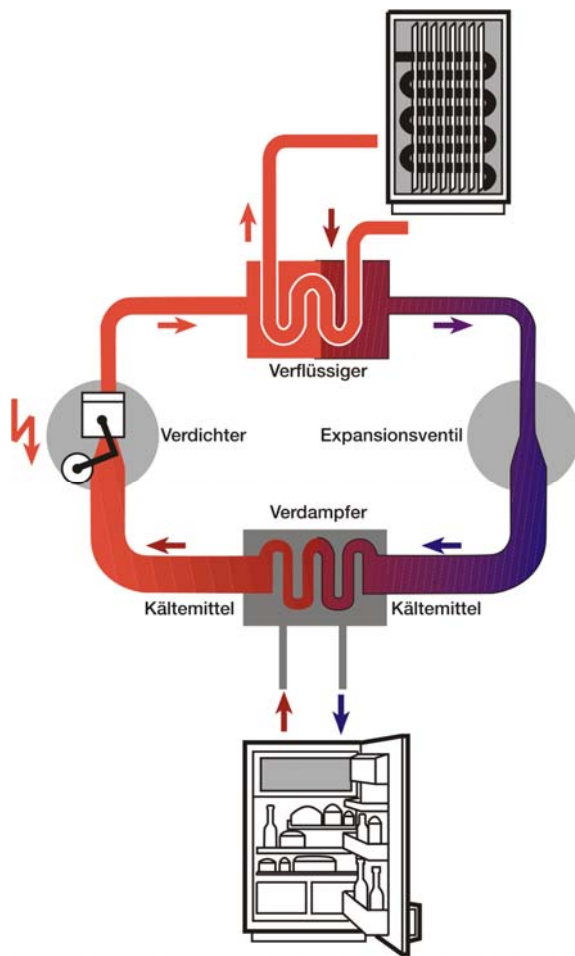
Mit Hilfe des Temperaturmessgerätes DE722-1T Thermometer „inno“, 1100 °C und des NiCrNi-Thermofühlers P4120-1T kann dies eindrucksvoll gezeigt werden.

Auch für dieses Experiment ist es zweckmäßig, ein Computermesssystem (z.B. Coach 6 und ELab P4920-1L) mit Speichermöglichkeit der Messwerte zu verwenden.

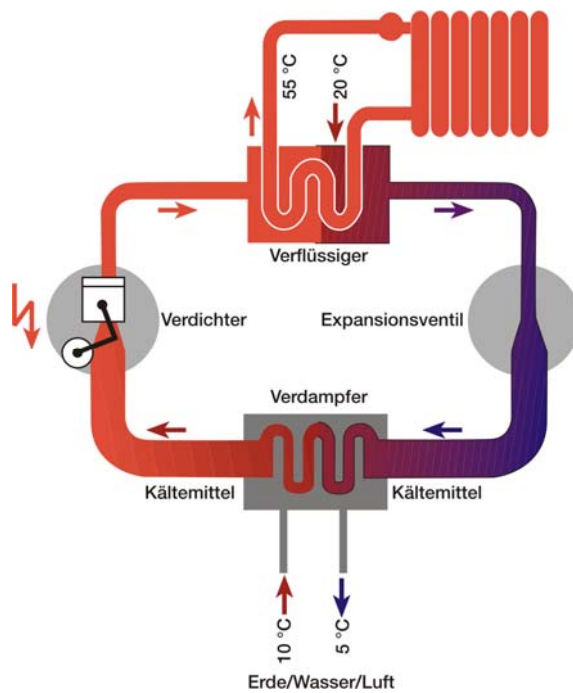


Temperatur-Diagramm, aufgezeichnet mit Coach 6

Wärmekraftmaschine (Wärmepumpe) als

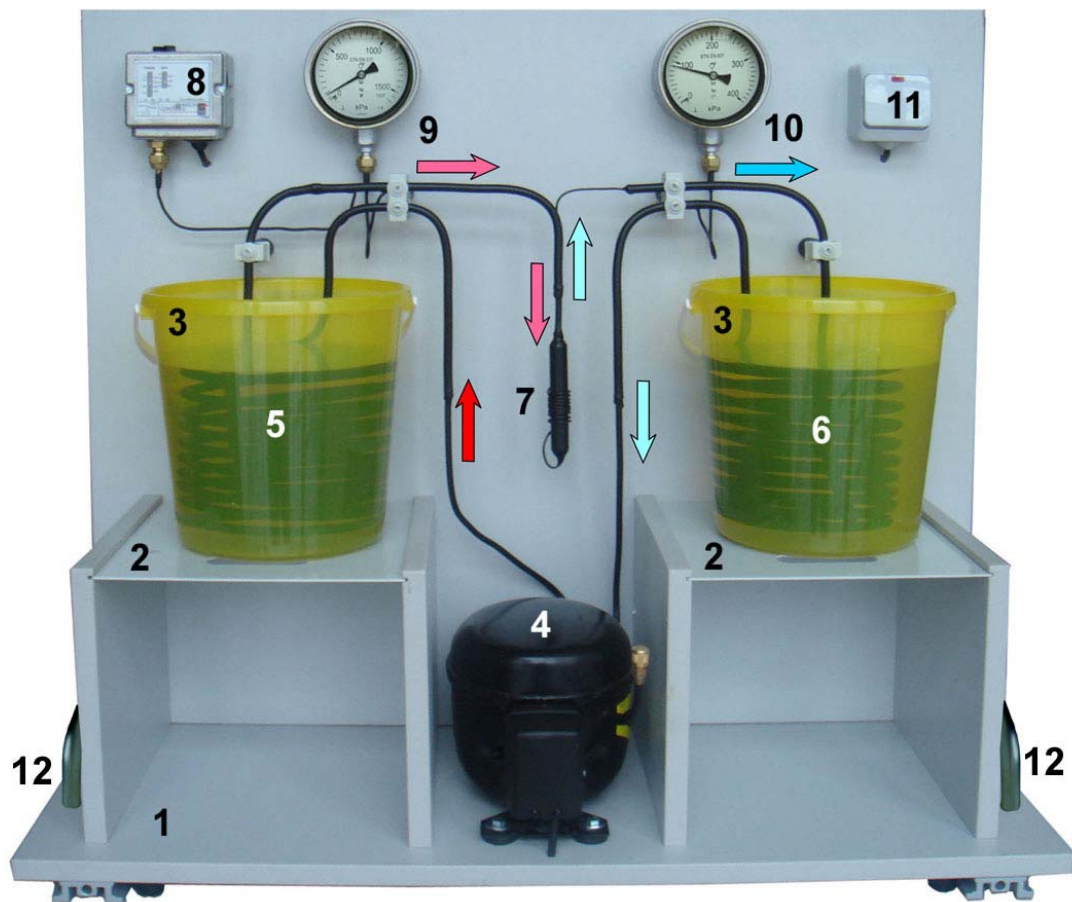


Kühlschrank



Heizungsanlage

Beschreibung



- (1) Aufbaugestell aus Holz
- (2) Einschubplatte aus Metall
- (3) 5-Liter-Gefäß aus Polypropylen
- (4) Kompressor, 230 V
- (5) Verflüssiger
- (6) Verdampfer
- (7) Expansionsventil
- (8) Sicherheits-Überdruckregulator (schaltet bei 1500 kPa ab; Betriebseinstellung)
- (9) Manometer für Hochdruckbereich
- (10) Manometer für Niederdruckbereich
- (11) EIN/AUS-Schalter
- (12) Tragegriff aus Metall



Leistungsmessgerät (Symbolbild)

Experimente mit der Wärmepumpe

1. Abkühlung und Erwärmung der Wasserbehälter

Die beiden Wasserbehälter werden mit je 4 Liter Wasser befüllt. Die Wassertemperatur soll in beiden Behältern annähernd gleich sein (etwa Raumtemperatur).

Die Wärmepumpe wird über das Energiemessgerät (Funktion: Leistungsanzeige) an die Netzsteckdose angeschlossen.

Nach dem Start der Wärmepumpe werden laufend die beiden Wassertemperaturen und die Wirkleistung des Kompressors gemessen.

Interessant ist auch die Beobachtung der beiden Manometer.

Empfehlenswert ist eine kontinuierliche Temperaturaufzeichnung mit einem Computermesssystem, z.B. Coach 6 und €Lab P492-1L mit 2 geeigneten Temperatursensoren, z.B. -20 °C+125 °C, P4210-3T.

Diese Messreihe kann auf zwei Arten durchgeführt werden:

Methode1:

Es erfolgt eine ständige Durchmischung der Wasserbehälter, die Temperatursensoren werden händisch im Wasser bewegt.

Methode 2:

Die Temperatursensoren werden so eingespannt, dass sie in der Mitte der Wasserbehälter eintauchen.



2. Bestimmung der Leistungszahl ϵ beim Betrieb als Wärmepumpe

Die beiden Wasserbehälter werden mit je 4 Liter Wasser befüllt. Die Wassertemperatur im Verflüssiger soll eher unter der Raumtemperatur sein, um Wärmeverluste durch Verdampfen zu minimieren.

Nach dem Start der Wärmepumpe wird laufend die Wassertemperatur im Verflüssiger gemessen und die Wassertemperatur im Verdampfer und die Wirkleistung des Kompressors beobachtet.

Die Wassertemperatur im Verdampfer muss durch Austausch von Wasser annähernd konstant gehalten werden. Dazu muss einige Male Wasser abgeschöpft und durch heißes Wasser ersetzt werden. Die dadurch auftretende Temperaturänderung ist auch im Graphen der Messreihe ersichtlich.

Die Temperatursensoren sind fix eingespannt.

3. Bestimmung der Leistungszahl ε beim Betrieb als Kältemaschine

Die beiden Wasserbehälter werden mit je 4 Liter Wasser befüllt. Die Wassertemperatur kann in beiden Behältern gleich sein (etwa Raumtemperatur).

Nach dem Start der Wärmepumpe wird laufend die Wassertemperatur im Verdampfer gemessen und die Wassertemperatur im Verflüssiger und die Wirkleistung des Kompressors beobachtet.

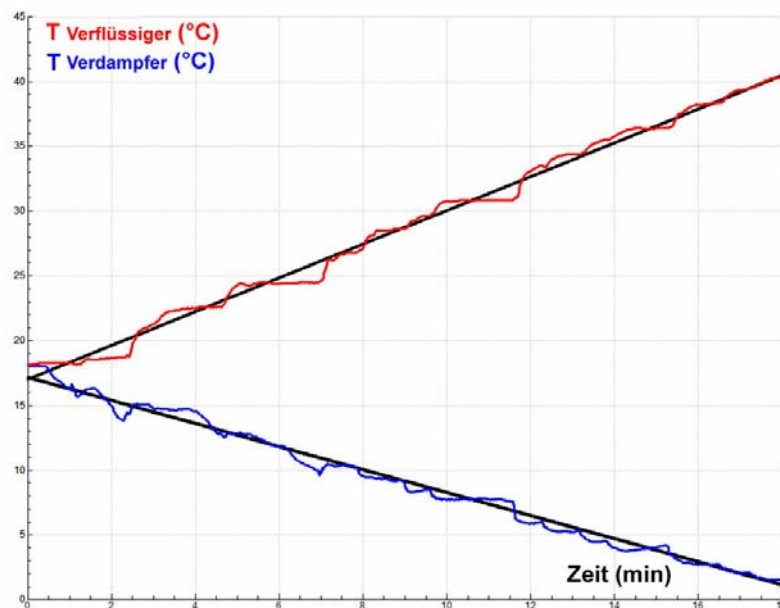
Die Wassertemperatur im Verflüssiger muss durch Austausch von Wasser annähernd konstant gehalten werden. Dazu muss einige Male Wasser abgeschöpft und durch kaltes Wasser oder Eiswürfel ersetzt werden. Die dadurch auftretende Temperaturänderung ist auch im Graphen der Messreihe ersichtlich.

Die Temperatursensoren sind fix eingespannt.

Auswertung der Experimente

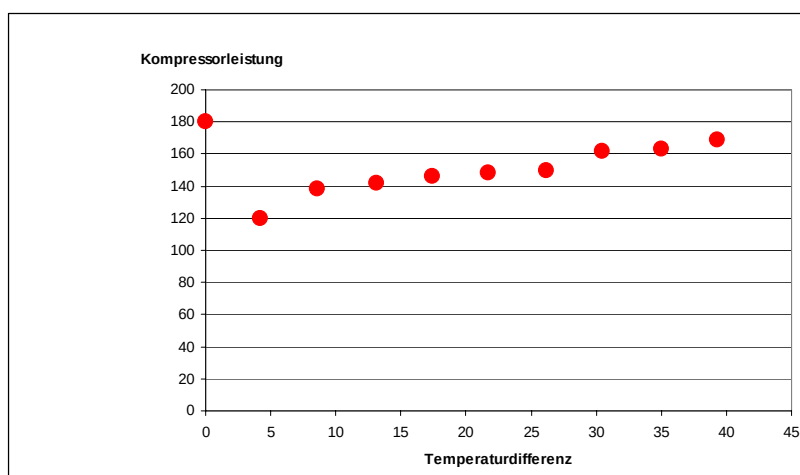
1. Abkühlung und Erwärmung der Wasserbehälter

Methode 1



Nach 18 Minuten ist der Druck im Hochdruckteil auf 1500 kPa angestiegen, der Kompressor hat abgeschaltet. Die Messung wurde beendet.

Betriebsdauer (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
T Verflüssiger; gemessen (°C)	18,0	18,6	22,5	24,4	27,1	30,7	33,0	35,7	38,2	40,3
T Verflüssiger; gemittelt (°C)	17,0	19,6	22,2	24,9	27,4	30,0	32,7	35,2	37,9	40,5
T Verdampfer; gemessen (°C)	18,0	15,0	14,6	11,8	9,6	7,7	5,9	4,0	2,7	1,6
T Verdampfer; gemittelt (°C)	17,1	15,4	13,6	11,8	10,0	8,3	6,5	4,7	2,9	1,2
ΔT Verflüssiger – Verdampfer (°C)	0	4,2	8,6	13,1	17,4	21,7	26,2	30,5	35	39,3
Kompressorleistung (Watt)	180	120	138	142	146	148	150	162	163	169

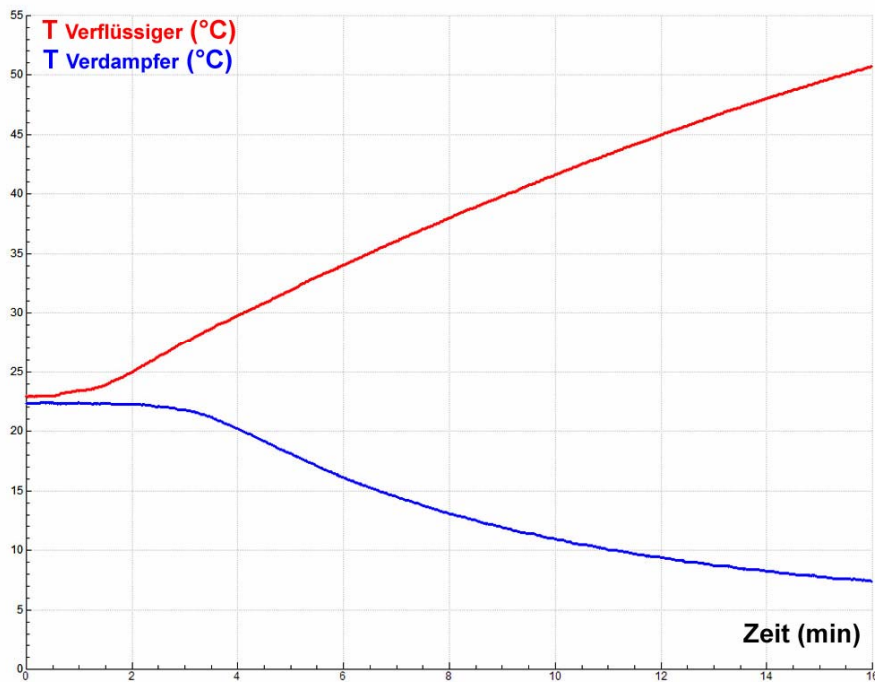


Erwärmung des Wassers im
Verflüssiger:
 $\Delta T = 22,3 \text{ °C}$

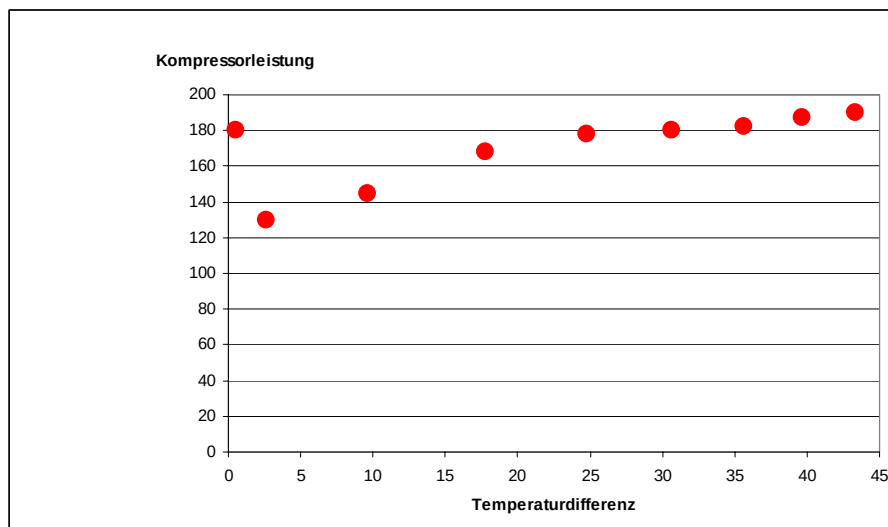
Abkühlung des Wassers im
Verdampfer:
 $\Delta T = 16,4 \text{ °C}$

Methode 2

Die Temperatursensoren sind fix eingespannt.



Betriebsdauer (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
T Verflüssiger (°C)	22,9	24,9	29,8	34,0	37,9	41,6	45,0	48,0	50,7
T Verdampfer (°C)	22,4	22,3	20,2	16,2	13,1	11,0	9,4	8,3	7,4
ΔT Verflüssiger – Verdampfer (°C)	0,5	2,6	9,6	17,8	24,8	30,6	35,6	39,7	43,3
Kompressorleistung (Watt)	180	130	145	168	178	180	182	187	190



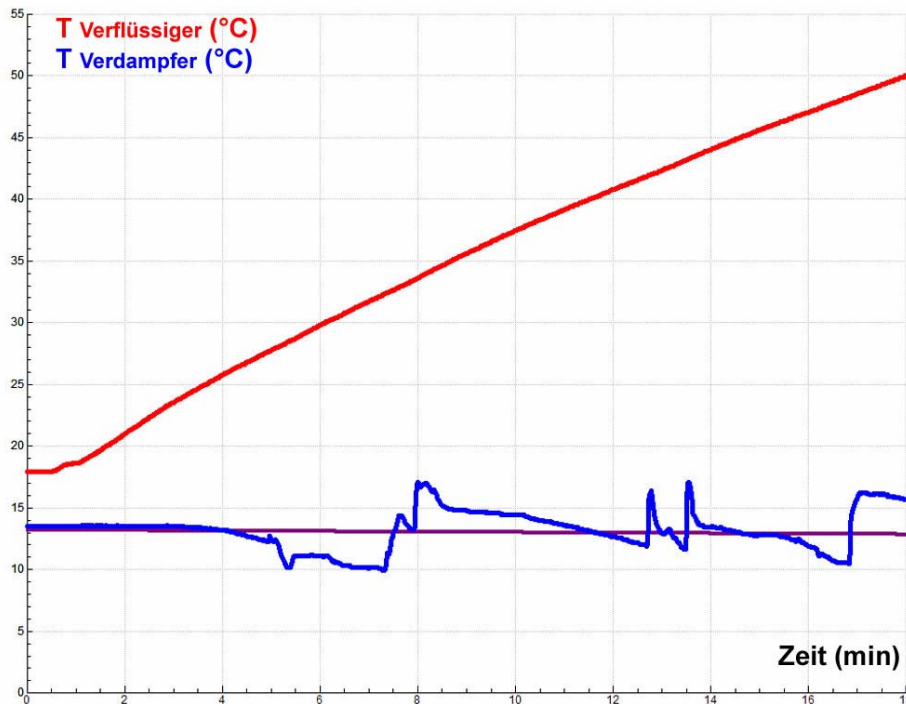
Erwärmung des Wassers
im Verflüssiger:
 $\Delta T = 27,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Abkühlung des Wassers
im Verdampfer:
 $\Delta T = 15,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Aus beiden Messreihen erkennt man, dass der Temperaturzuwachs bzw. der Wärmezuwachs im wärmeren Reservoir größer ist als die Temperaturerniedrigung im kälteren Reservoir. Der Grund dafür liegt in der aufgebrachten elektrischen Energie für den Kompressor, die teilweise zur Erwärmung des wärmeren Reservoirs geführt hat.

Für beide Messreihen wurde die Kompressorleistung gegen die Temperaturdifferenz zwischen dem wärmeren und kälteren Reservoir aufgetragen. Die ansteigende Kurve zeigt deutlich, dass zum „Heben“ der Wärme auf ein höheres Energieniveau (höhere Temperaturdifferenz) mehr Energie erforderlich ist.

Bestimmung der Leistungszahl ε beim Betrieb als Wärmepumpe



Betriebsdauer (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
T Verflüssiger (°C)	17,9	21,0	25,8	29,9	33,6	37,5	40,8	44,0	47	50
Kompressorleistung (Watt)	178	143	152	160	168	169	182	187	191	199

Der Druck im Hochdruckteil betrug am Ende der Messung 1500 kPa!

Die Leistungszahl ε der Wärmepumpe ist definiert als der Quotient aus Nutzenergie (Wärmezuwachs ΔQ_w im wärmeren Reservoir) und aufgebrachter elektrischer Energie W_{el} .

$$\varepsilon_{WP} = \Delta Q_w / W_{el} = c \cdot m \cdot \Delta T_w / P_m \cdot t$$

c ... spezifische Wärme bei 20 °C: 4,182 kJ/kg · K

Masse: 4000 g

Erwärmung um ΔT : 32,1 °C innerhalb von 18 Minuten

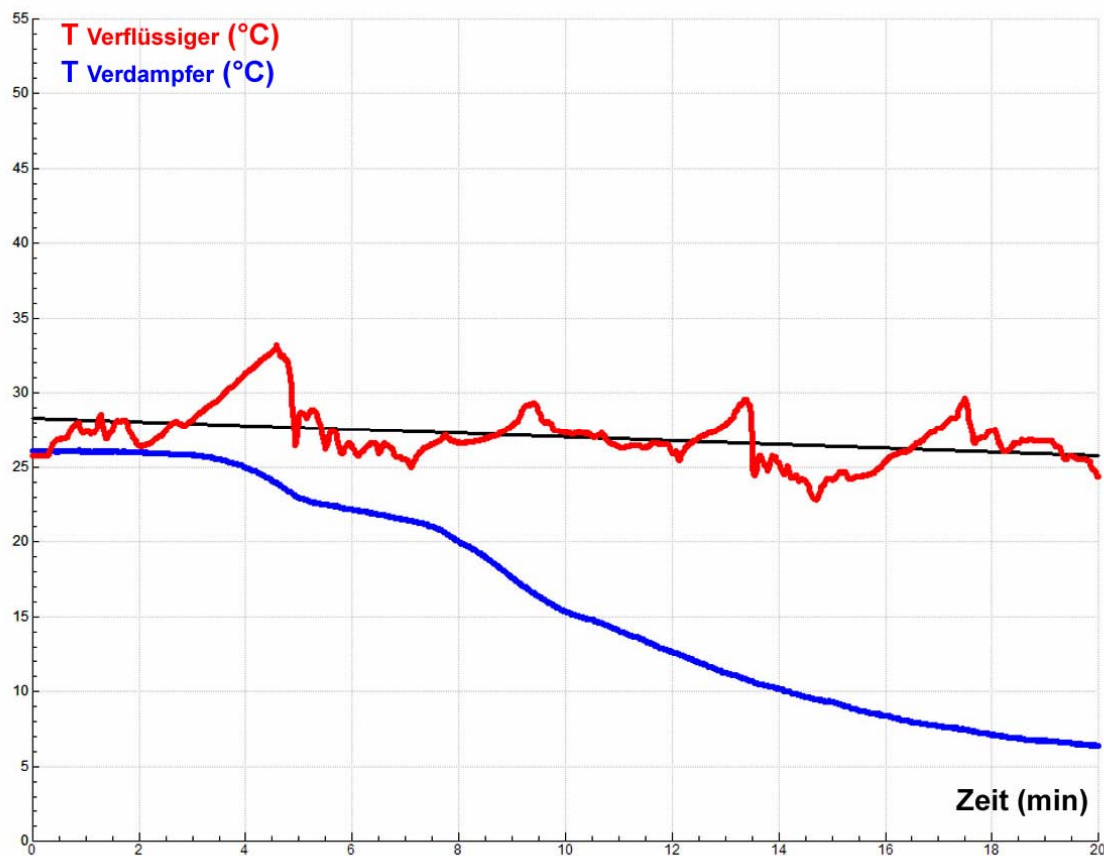
P_m mittlere Wirkleistung: 173 Watt

Wärmegewinn ΔQ_w im warmen Behälter: 537 kJ

Aufgebrachte elektrische Energie W_{el} : 187 kJ

$$\varepsilon_{WP} = 2,9$$

Bestimmung der Leistungszahl ε beim Betrieb als Kältemaschine



Betriebsdauer (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
T Verdampfer (°C)	26,0	26,0	25,0	22,2	20,0	15,4	12,6	10,2	8,4	7,1	6,4
Kompressorleistung (Watt)	180	128	130	140	142	145	143	140	140	141	142

Man erkennt deutlich, dass in diesem Fall die notwendige Kompressorleistung wesentlich geringer ist, da auch nur ein geringerer „Temperaturhub“ notwendig war. Der Druck im Hochdruckteil betrug am Ende der Messung nur 700 kPa!

Die Leistungszahl ε der Kältemaschine ist definiert als der Quotient aus (Wärmeentzug ΔQ_k aus dem kälteren Reservoir) und aufgebrachter elektrischer Energie W_{el} .

$$\varepsilon_{KM} = \Delta Q_k / W_{el} = c \cdot m \cdot \Delta T_w / P_m \cdot t$$

c ... spezifische Wärme bei 20 °C: 4,182 kJ/kg · K

Masse: 4000 g

Abkühlung um ΔT : 19,6 °C innerhalb von 20 Minuten

P_m mittlere Wirkleistung: 143 Watt

Wärmeabgabe ΔQ_k des kalten Behälters: 328 kJ

Aufgebrachte elektrische Energie W_{el} : 172 kJ

$$\varepsilon_{KM} = 1,9$$

Abschätzung der Wärmeverluste

Die hier ermittelten Leistungszahlen liegen natürlich weit weg von den im Alltag eingesetzten Anlagen. Der Grund liegt in den nicht kompensierten Wärmeverlusten dieser Modell-Wärmepumpe.

Mögliche Wärmeverluste:

Strahlungsverluste durch die

Polypropylenwand des wärmeren Reservoirs

Kupferrohre auf der warmen Seite

Wasseroberfläche auf der warmen Seite

Wärmeübergang von

der Polypropylenwand des wärmeren Reservoirs an die Luft

den warmen Kupferrohren an die Luft

der warmen Wasseroberfläche an die Luft

Verluste durch Verdunstung

an der warmen Wasseroberfläche

Technische Spezifikationen des Gerätes

Kältemittel: Tetrafluorethan $\text{CF}_3\text{-CH}_2\text{F}$, (Handelsname: R134a)

Füllmenge: ca. 100 Gramm

Eigenschaften von R134a

Schmelzpunkt: -102 °C bei 1023 hPa

Dampfdruck: 6 661 hPa bei 25 °C

13 190 hPa bei 50 °C

Dichte: $1,21\text{ g/cm}^3$ bei 25 °C (als Flüssigkeit)

$0,0042\text{ g/cm}^3$ bei 25 °C (1013 hPa)

$0,0053\text{ g/cm}^3$ bei $-26,1\text{ °C}$ (1013 hPa)

Wasserlöslichkeit: $1,5\text{ g/l}$ bei 25 °C (1013 hPa)

Dieses Kältemittel wurde als Folgeprodukt für R12 entwickelt. Es besitzt kein Ozonzerstörungspotenzial und hat nur einen geringen Einfluss auf den Treibhauseffekt.

R134a hat keine spezifische Wirkung auf den menschlichen Organismus. Bei starker Anreicherung in der Atemluft treten ab ca. 20 Vol% Atembeschwerden durch Sauerstoffmangel auf. R134a-Dämpfe sind schwerer als Luft, so dass in Bodennähe höhere Konzentrationen auftreten können. Eine Raumluf tabsaugung in Bodennähe ist angebracht.

R134a ist so gut wie geruchlos und damit als paniksicheres Kältemittel auch für Räume mit hohem Publikumsverkehr geeignet

Empfohlene Füllmenge für Verdampfer und Verflüssiger: je 4 l Wasser

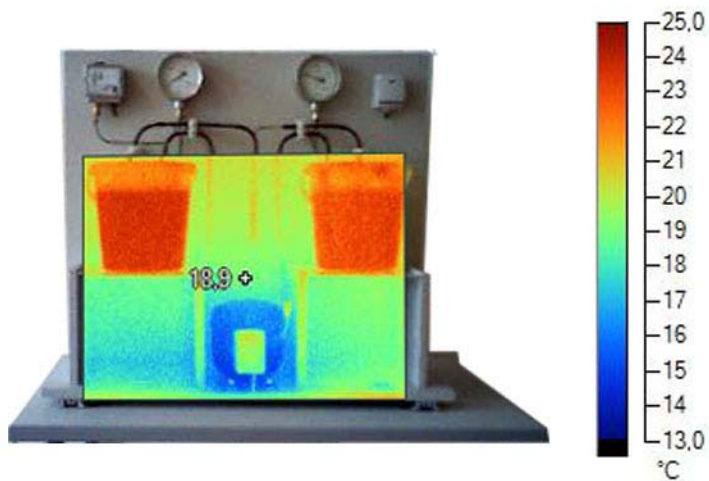
Kompressor: 230 V

Abmessungen: 82 cm x 38 cm x 73 cm, (B x T x H)

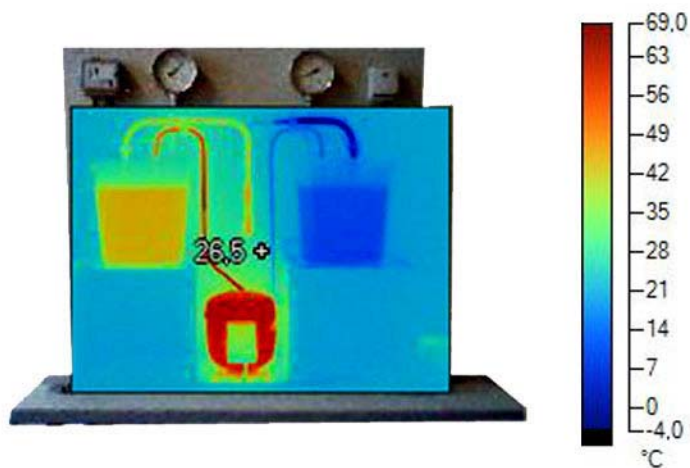
Masse: ca. 30 kg

Erforderliches Zubehör: Leistungsmessgerät

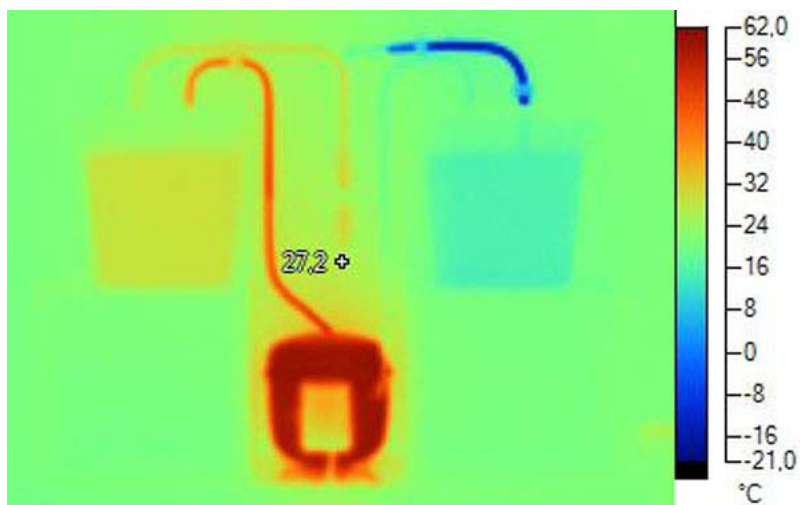
Die Wärmepumpe im „Wärmebild“



Wärmebild vor Betriebsbeginn



Wärmebild nach 15 Minuten Betriebsdauer



Diese Wärmebilder wurden mit der Fluke Ti 10 Thermal Imager aufgenommen.



Wärmebild nach 15 Minuten Betriebsdauer (Zoom)