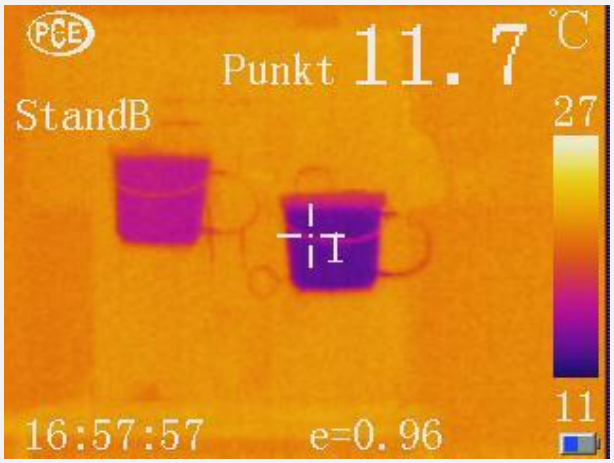
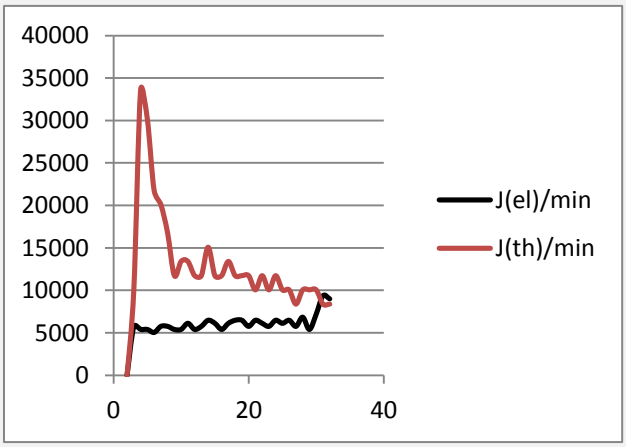
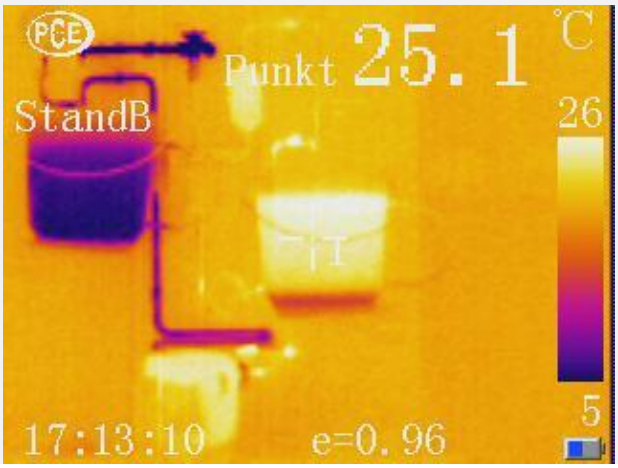
Landeshauptstadt Hannover

Hannover

Schulbiologiezentrum







19.80

Experimente mit der Wärmepumpe

Dezember 2014

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum Hannover

Titel: Experimente mit der Wärmepumpe

Titelbild und Fotos: Ingo Mennerich

Arbeitshilfe 19.80

Verfasser: Ingo Mennerich
Dezember 2014

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info

Inhalt

Einige Sätze vorweg 4

Aus "kalt" wird "warm 5

Modell einer Wärmepumpe (LD-Didactic) 6

Erste Versuche mit dem Wärmepumpen-Modell 7

Exkurs: Wasser als (ungeeignetes) Kältemittel 8

Besondere Eigenschaften des in Kältemaschinen eingesetzten Kältemittels 10

Der "Trick" der Kältemaschine: Zustandswechsel (und damit Verdampfungsenthalpie) nutzen 11

Energiesparmeister? Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe 11

Effizienz der Wärmepumpe: Leistungszahl 12

Jahresarbeitszahl 13

Wärmebildkamera 13

Wärmepumpe und Fußbodenheizung 14

Testen des Wirkungsgrades (Leistungszahl) 14

Was zeigen die beiden Manometer an? 17

Wärmepumpe trifft Wärmebildkamera 19

Experimente rund um Wärmepumpe 20

Einige Sätze vorweg:

Das "Bienenhaus" im Schulbiologiezentrum Hannover - eines unserer Unterrichts- und Tagungsgebäude - wurde 2003 erbaut. Es ist Standort einer Schulimkerei mit maximal 15 Bienenvölkern. Hier erfahren Schülerinnen und Schüler im praktischen Umgang mit den Tieren und Imkergerät viel über Bienen, Bienenhaltung und Honigerzeugung.

Das "Bienenhaus" wird mit einer Wärmepumpe beheizt.
Die Anlage vom Typ "IVT Greenline E9" hat eine Nenn-Heizleistung von 8,5 KW und eine elektrische Nenn-Leistungsaufnahme von 2,5 KW. Als Niedertemperatur-Anlage ausgelegt ist die maximale Ausgangstemperatur 55°C.
Das zum Betrieb notwendige Wasser (0,5 Liter/Sekunde) wird aus einer Tiefe von etwa 60 m hochgepumpt.
Dass es sich bei dem heraufgepumpten Wasser um warmes Wasser handelt ist allerdings falsch.
Wir sind nicht auf Island! Die Temperatur in dieser Tiefe liegt lediglich bei 10 °C, dies jedoch konstant - völlig unabhängig von der Jahreszeit.
2013 erhielten wir von der Tellkampfschule in Hannover ein dort nur selten eingesetztes Funktionsmodell einer Wärmepumpe (LD-Didactic). Es steht jetzt in der Eingangshalle des Bienenhauses und kann, ob man es nun nur zeigt, vorführt oder damit experimentiert, deutlich machen, wie unsere "echte" Wärmepumpe arbeitet.
Die "Wärmepumpe" ist eine, dem Kühlschrank sehr ähnliche "Kältemaschine", die kaltes Wasser noch kälter macht und dabei warmes Wasser erzeugt. Sie ist ein physikalisches, allerdings durchaus durchschaubares "Wunderwerk", dessen Wesen man durch Ausprobieren, Anfassen und Messen ergründen kann und um das sich eine Reihe gar nicht so komplizierter Experimente reiht. Einige davon sind hier beschrieben.
Nicht jeder hat eine Wärmepumpe zum Heizen Hause. Aber die meisten besitzen eine "Wärmepumpe" zum Kühlen. Gefrier- und Kühlschränke sind Wärmepumpen, deren technisches "Herz" etwas versteckt auf die Rückwand der Geräte liegt. Da der Zweck des Kühlschranks nicht das Heizen ist, sollte man die "Wärmepumpe" in diesem Fall besser "Kältemaschine" nennen.
Klimaanlagen sind kombinierte "Kälte-" und "Wärmepumpen". Sie können entweder den Raum durch Wärmeentzug kühlen oder ihn wärmen, indem sie der Umgebungsluft Wärme entziehen.
Die "Kältemaschine" Kühlschrank entzieht seinem Inhalt Wärme und führt sie auf der Geräterückseite ab. Daher sollte man zwischen Gerät und Wand für ausreichende Luftzirkulation sorgen.
Das spart im Übrigen auch Energie, denn nur wenn der Kühlschrank die entzogene Wärme auch wirklich abgeben kann arbeitet er effizient.
Wärmepumpen können bei richtiger Auslegung viel Energie einsparen: Die zum Betrieb der Pumpe erforderliche elektrische Energie beträgt im Idealfall nur ein Viertel der erzeugten Heizenergie.

Aus "kalt" wird "warm"…

Wasser erhitzen kostet Energie. Zum Beispiel elektrische Energie.

- Kaltes Wasser enthält weniger Energie (Wärme) als warmes Wasser.
- Beim Erhitzen wird dem Wasser Energie hinzugefügt.
- Ein elektrischer Wasserkocher verbraucht mindestens so viel oder in der Regel **mehr** Energie als dann im heißen Wasser steckt.

Aber:

- Die Wärmepumpe erhitzt Wasser und braucht dabei **weniger** Energie als nachher im heißen Wasser enthalten ist.

Normalerweise fließt die Wärme von heiß nach kalt, z.B. vom Glühwein in die kalte Winterluft.
Dabei wird der Glühwein kalt und die Umgebung ein ganz klein wenig wärmer. Dieser Prozess läuft so lange, bis der Glühwein und die Winterluft gleich warm sind und in beiden gleich viel Energie enthalten.
Kann Energie im Falle der "Wärmepumpe" auch "bergauf" fließen? Hier wird doch Kälte benutzt um daraus Wärme zu machen! Natürlich kann Energie nicht "bergauf" fließen und die kalte Winterluft wird niemals den Glühwein erwärmen können.
Zauberei? Nein: Physik, der man auf den Grund gehen kann!

Zunächst einmal: Was hat Kälte mit Wärme zu tun?
Erleichtern kann man sich das Verständnis, wenn man sich von der üblichen Vorstellung löst, dass Wärme etwas anderes sei als Kälte und beides durch die Sichtweise ersetzt "Kälte ist einfach nur weniger Wärme."

Um eine Wärmepumpe zu verstehen hilft einstiegsweise ein einfaches Experiment:

- Tauchen Sie eine (!) Hand in normaltemperiertes Wasser. Während die dann wieder herausgezogene Hand an der Luft trocknet, erscheint sie uns kälter als die andere trocken gebliebene Hand.
  Der Grund: Beim Verdunsten (Verdampfen) entzieht der Wasserfilm der Umgebung (und besonders warmen Hand) Energie (Wärme). Diese Energie geht nicht verloren: Sie wird mit dem gasförmigen und unsichtbaren Wasserdampf fortgetragen. Die entzogene Wärme "fehlt" der Haut jetzt. Sie fühlt sich kalt an.
  Irgendwann und irgendwo gerät der Wasserdampf durch Abkühlung unter Bedingungen, bei denen er wieder flüssig werden kann.
  Beim Kondensieren wird die beim Verdunsten aufgenommene Wärme wieder frei.

Umgangssprachlich wird diese Abkühlung als "Verdunstungskälte" bezeichnet.
Die "Wärmepumpe" fußt auf diesem Prinzip.

Modell der Wärmepumpe (LD-Didactic)

Das Modell besteht aus folgenden Elementen (siehe Abbildungen)

1. Blauer Eimer
2. Roter Eimer
3. Kompressor
4. Expansionsventil
5. Digitalthermometer
6. Manometer (Niederdruckseite)
7. Manometer (Hochdruckseite)

Fotos: Ingo Mennerich

Die beiden 5-Liter Eimer, ein blauer (1) und ein roter (2) enthalten zunächst je 4 Liter kaltes Wasser.
Zwei Digitalthermometer (5) messen die Temperaturen in den beiden Eimern.

Beide Eimer sind durch eine geschlossene Rohrleitung miteinander verbunden.

In den beiden Eimern versteckt befinden sich als Teil des Rohrleitungssystems je ein spiralförmiger Wärmetauscher (siehe Abbildung unten).

Im Rohrleitungssystem zirkuliert ein "Kältemittel" das innerhalb des Systems zwischen gasförmigem und flüssigem Zustand wechselt.

2 Manometer messen den Druck des Kältemittels,
links (6) nach Durchgang durch das Expansionsventil (Niederdruckseite) und rechts (7) nach Durchgang durch den Kompressor (Hochdruckseite).

Das gleiche Bild mir abgenommenen Eimern.

Hier sind die beiden Wärmetauscher zu erkennen,
links der Verdampfer, rechts der Verflüssiger.

3

4

Der elektrisch betriebene Kompressor (3) saugt das gasförmige Kältemittel an bringt es unter hohen Druck so dass es verdichtet und erhitzt wird. Der Stromverbrauch kann mit einem Steckdosen-Energiemonitor gemessen werden.

Das Expansionsventil (4) bringt das flüssige Kältemittel unter niedrigen Druck so dass es auf seinem weiteren Weg verdampfen kann. Die Öffnungsweite des Ventils wird durch ein Bimetall temperaturgesteuert.

Erste Versuche mit dem Wärmepumpen-Modell

Vor Versuchsbeginn werden beide Eimer mit jeweils 4 Litern gleich warmem Wasser (z.B. 15°C) gefüllt und auf die ausschwenkbaren Platten gestellt.

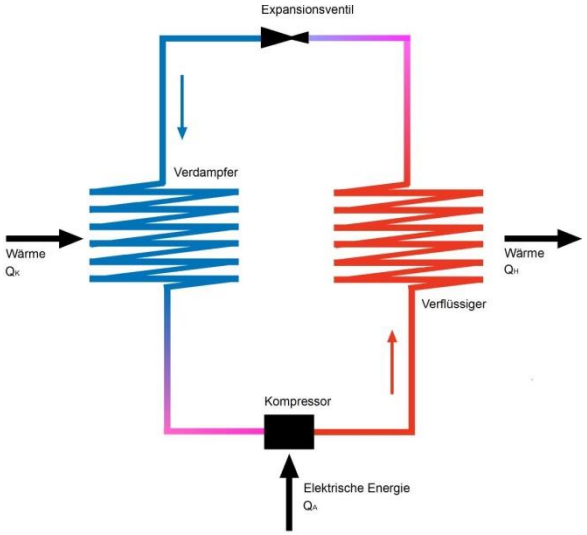
- Die Kupferspiralen (Wärmetauscher) müssen vollständig vom Wasser bedeckt sein.
- Sobald der Strom eingeschaltet ist "pumpt" die Wärmepumpe Wärme vom blauen Eimer zum roten.
- Dabei wird dem Wasser im blauen Eimer Energie (Wärme) entzogen: Das Wasser wird kälter.
- Dem Wasser im roten Eimer wird Energie hinzugefügt: Das Wasser wird wärmer.
- Das kann man sowohl fühlen als auch mit Thermometern messen.

Der Wärmetransport erfolgt durch das "Kältemittel" das, durch den Kompressor angetrieben, im geschlossenen Rohrleitungssystem zirkuliert.

- Der elektrische Kompressor ist der gleiche wie man ihn auch vom Kühlschrank kennt.
- Er ist Pumpe und Verdichter zugleich:
- Das Kältemittel ist bei normalen Raumtemperaturen und geringem Druck gasförmig.
- Unter Hochdruck wird es verflüssigt.

Der "Trick" der "Kältemaschinen" Wärmepumpe bzw. Kühlschranks besteht darin, dass das Kältemittel auf seinem Weg durch das geschlossene Rohrleitungssystem auf der einen Seite verdichtet ("zusammengedrückt") wird und auf der anderen Seite ausdehnen (expandieren) kann.
Das Kältemittel geht dabei einmal vom gasförmigen in den flüssigen Zustand und einmal von der flüssigen in die gasförmige über. Wir haben es also mit zwei Aggregatzuständen zu tun.

Der von der Wärmepumpe erzwungene abwechselnde Übergang vom einen in den anderen Zustand ermöglicht es, dass man viel mehr Energie aus dem System herausholen kann als man hineinsteckt…



Prinzip einer Kompressions-Kältemaschine (Wärmepumpe)

Grafik: Ingo Mennerich

Im linken Wärmetauscher (**Verdampfer**) nimmt das verdampfende Kältemittel Wärme (Q_K) aus der Umgebung auf. Das Kältemittel muss dabei *kälter* sein als die Umgebung.

Der elektrische **Kompressor** saugt das gasförmige und erwärmte Kältemittel an und verdichtet es unter Hochdruck. Dabei wird ihm zusätzlich Wärme (Q_A) zugefügt.

Im rechten Wärmetauscher (**Verflüssiger**) gibt das kondensierende Kältemittel die Wärme (Q_H) an die Umgebung ab. Dabei muss das Kältemittel *wärmer* sein als die Umgebung.

Im **Expansionsventil** beginnt das abgekühlte und flüssige Kältemittel unter Niederdruck wieder gasförmig zu werden.

Exkurs: Wasser als (ungeeignetes) "Kältemittel"

Bevor wir uns mit den Eigenschaften des in Kältemaschinen wie Kühlschrank und Klimaanlagen Wärme transportierenden "Kältemittels" beschäftigen, folgt hier ein kleiner Exkurs zur Physik des Wassers.
Wasser hat im Gegensatz zum Kältemittel Tetrafluorethan den Vorteil, dass es allgemein bekannt ist, überall vorhanden und gefahrlos gehandhabt werden kann und dennoch das Prinzip eines "Kältemittels" verdeutlichen kann.
Die naheliegende Frage, warum man im Kühlschrank und in der Wärmepumpe das umweltschädliche, weil (treibhauswirksame) Kältemittel Tetrafluorethan und nicht einfach Wasser verwendet, soll zunächst noch außen vor bleiben.
Wie ist der Begriff "Kältemittel" in Bezug auf Wasser zu verstehen?
Wasser nimmt bei Erwärmung Energie auf und gibt sie bei Abkühlung ab. Pro Liter und Grad Celsius (= Kelvin, K) werden 4,182 Kilojoule (kJ) der Umgebung entzogen bzw. an die Umgebung abgegeben.
Um die vier Liter Wasser (4 kg) im roten Eimer des Wärmepumpenmodells von 10°C auf 40° zu erwärmen, müssen ihm 4 kg x 30°C x 4,182 = 501,8 kJ Energie zugeführt werden. Die zugeführte Energie wird in Form von Bewegungsenergie (kinetischer Energie) in den Wassermolekülen gespeichert.
Energie geht nicht verloren: Beim späteren Abkühlen auf die Ursprungstemperatur werden 501,8 kJ an die Umgebung zurückgegeben. Dabei verlieren die Moleküle Bewegungsenergie.
Wasser kann fest (Eis), flüssig (Wasser) oder gasförmig (Wasserdampf) sein.
Im festen Zustand ist die Bewegungsenergie der Wassermoleküle so gering, dass sie durch die sie umgebenden elektrischen Kräfte aneinander gebunden sind. Oberhalb des absoluten Nullpunkts sind die Moleküle nicht in Ruhe sondern schwingen je nach Temperatur schwächer oder stärker hin und her. Durch Wärmezufuhr wird den Molekülen Bewegungsenergie hinzugefügt wodurch sie stärker schwingen. Übersteigt ihre Eigenbewegung ein gewisses Maß, können sich Gruppen von Wassermolekülen voneinander lösen und sich unabhängig voneinander bewegen. Das Wasser ist jetzt flüssig. Wird weiter Wärme hinzugefügt ist irgendwann ein Zustand erreicht, bei dem sich auch die vorher noch von

elektrischen Kräften zusammengehaltenen Gruppen auflösen und sich die Wassermoleküle einzeln durch den Raum bewegen.
Als stark vereinfachende Analogie kann man sich eine Gruppe von Menschen vorstellen, die bei Kälte bewegungslos und dicht aneinander gekuschelt verharrt, bei ansteigender Temperatur immer unruhiger wird um bei Hitze schließlich wild durcheinander zu laufen.

Beim Übergang vom festen über die flüssige in die gasförmige Phase wird zusätzliche Energie benötigt um die zwischenmolekularen Bindungen zu lösen. Diese zusätzliche Energie heißt "Schmelzenthalpie" oder "Schmelzwärme". Einem Kilogramm Eis müssen 333,5 kJ/kg·K Schmelzwärme zugeführt werden, um es vollständig in flüssiges Wasser zu verwandeln. Das ist auch der Grund dafür, dass die Temperatur von (gut durchgerührtem!) Eiswasser bis zum völligen Schmelzen bei 0°C verharrt.
Gleiches gilt für das Sieden: Beim Übergang von 1 kg flüssigen Wassers in die gasförmige Phase kostet das Lösen der Wasserstoffbrücken zwischen den Wassermolekülen zusätzliche "Verdampfungswärme" (Verdampfungsenthalpie) und zwar 2257 kJ/kg· K
Beim Abkühlen des Wassers wird die Bewegungsenergie der Moleküle geringer. Das gilt besonders für den Übergang von der gasförmigen in die flüssige bzw. von der flüssigen in die feste Phase.
Energie geht aber nicht verloren: Die Bewegungsenergie der Wassermoleküle wird auf die Moleküle der Umgebung übertragen die dadurch erwärmt wird.
Wenn Wasser gefriert, verliert es Energie: 1 Kilogramm Wasser gibt beim Erstarren 333,5 kJ/kg·K Energie (Erstarrungsenthalpie, "Erstarrungswärme") an die Umgebung ab. Das ist genau der Energiebetrag, der in den Übergang von Eis zu Wasser als Schmelzwärme investiert wurde.
Beim Kondensieren gibt der Wasserdampf die in die Verdampfung hineingesteckte Energie in Form von Kondensationsenthalpie (Kondensationswärme) wieder ab.
Pro Kilogramm Wasserdampf also 2257kJ/(kg·K).

Wärmekapazität, Schmelz-, Verdampfungs-, Kondensations- und Erstarrungswärme:

Eis	1,377 - 2,1 kJ/(kg·K)	Eis
Schmelzen	333,5 kJ/ kg	Gefrieren
Wasser	4,182 kJ/(kg·K) (20°C)	Wasser
Verdampfen	2257 kJ/ kg	Kondensieren
Wasserdampf	2,08 kJ/(kg·K) (100°C)	Wasserdampf

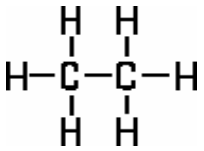
Einfacher und umgangssprachlich ausgedrückt:

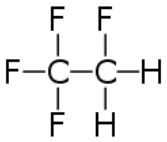
- Beim Schmelzen und Sieden wird zusätzlich Wärme "verbraucht"
- beim Kondensieren und Gefrieren wird Wärme "frei".
- Oder: Beim Schmelzen und Sieden wird der Umgebung die Wärme entzogen die beim Kondensieren und Gefrieren wieder frei wird.

Da bei geeigneten Bedingungen auch bei Temperaturen unterhalb des Siedepunkts Wasser verdunstet gestaltet sich der ganze Prozess um einiges komplexer. Zum Verständnis des "Kältemittels" möge diese vereinfachende Darstellung reichen.

Besondere Eigenschaften des in Kältemaschinen eingesetzten Kältemittels

Eine naheliegende Frage wäre, warum man nicht einfach Wasser statt Tetrafluorethan verwendet, das zwar ungiftig und nicht brennbar, aber doch ein in Bezug auf den Treibhauseffekt nicht unproblematischer Fluorkohlenwasserstoff ist.
Ein Kältemittel ist nach DIN definiert als *„Fluid, das zur Wärmeübertragung in einer Kälteanlage eingesetzt wird, und das bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck Wärme aufnimmt und bei höherer Temperatur und höherem Druck Wärme abgibt, wobei üblicherweise Zustandsänderungen des Fluids erfolgen.“* (Wikipedia, "Kältemittel"). Unter Zustandsänderung ist eine Änderung des Aggregatzustandes zu verstehen. Das gilt im Prinzip auch für Wasser - es trägt die Kältemittelbezeichnung R-718 - nur dass die Temperaturen dieser Zustandsänderungen für eine Anwendung in Kälteanlagen nicht passen.
Wasser gefriert unter Normaldruck bei 0°C und siedet bei 100°C. Im Verdampfer würde es gefrieren, die Zirkulation blockieren und schließlich durch Volumenzunahme das Rohr sprengen. Andererseits wäre ein Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand (und umgekehrt) erst bei 100°C zu erwarten.
Wasser hat mit 2088 kJ/kg zwar eine erheblich höhere Verdampfungsenthalpie als Tetrafluorethan (277 kJ/kg), kann diesen Vorteil aber bei relativ niedrigen Temperaturen, z.B. im Kühlschrank oder Wohnräumen nicht ausspielen. Es siedet ja erst bei 100°C. Benötigt wird ein Stoff, der innerhalb "normaler" Temperaturen und geringem Druck gasförmig, unter Druck und ähnlichen Temperaturen aber leicht verflüssigt werden kann. Des Weiteren darf er innerhalb der im Betrieb üblichen Temperaturspanne nicht gefrieren.
Fluorchlorwasserstoffe (FCKW´s) haben solche Eigenschaften und wurden viele Jahre lang in "Kältemaschinen" wie Kühlschränken und Klimaanlagen eingesetzt. Sie tragen aber ein hohes Potential in sich, die uns vor der UV-Strahlung der Sonne schützende Ozonschicht zu zerstören.
Daher hat man FCKW´s zunehmend durch "umweltfreundlichere" Mittel wie z.B. Fluorkohlenwasserstoffe (FKW´s) ersetzt. Dazu zählt Tetrafluorethan.
Das in Kühlschränken, Klimaanlagen und Wärmepumpen eingesetzte Kältemittel Tetrafluorethan (Ra134a) ist ein Fluorkohlenwasserstoff mit der Summenformel $C_2H_2F_4$.
Es ähnelt dem Alkan Ethan (C_2H_6), nur das 4 Wasserstoff- durch Fluoratome ersetzt werden.





- Der Schmelzpunkt von Tetrafluorethan liegt bei -101°C, sein Siedepunkt bei -26°C (bei Normaldruck!).
- Bei Raumtemperaturen und unter normalem Druck ist es also gasförmig.
- Die Verdampfungswärme liegt bei 217 kJ/kg.
- Tetrafluorethan ist nicht Ozonschädigend (kein chlorierter Kohlenwasserstoff), es hat aber ein Treibhauspotential von 1430 (CO_2 = 1).
- Tetrafluorethan ist ungiftig (im Gegensatz z.B. zum sonst umweltfreundlichen Ammoniak R-717 mit hoher Verdampfungsenthalpie).
- Es ist nicht entzündlich (anders als z.B. Gas Ethan R-170).
- Es ist von geringer Viskosität (es muss in flüssiger Form leicht fließen!)
- Es ist nicht korrosiv (Rohre dürfen nicht angegriffen werden).

Der "Trick" der Kältemaschine:
Zustandswechsel (und damit Verdampfungsenthalpie) nutzen

Bei der Wärmepumpe erfolgt ein im Kreisprozess erzwungener Wechsel des Aggregatzustands des Kältemittels:

- Der **Kompressor** saugt das gasförmige Kältemittel an, verdichtet und verflüssigt es.
- Dabei wird Kondensationswärme an die Umgebung abgegeben
- Durch Drucksteigerung entsteht zusätzliche Wärme
- Die Wärme wird über den Wärmetauscher an die Umgebung abgegeben.
- Das Wasser im roten Eimer wird wärmer.
- Das **Expansionsventil** lässt das flüssige Kältemittel **verdampfen**.
- Durch den Verdampfungsprozess wird der Umgebung (Wärmetauscher) Wärme entzogen.
- Das Wasser im blauen Eimer wird kälter.

Energiesparmeister?
Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe

Um das gasförmige Kältemittel zu komprimieren und durch das System zu treiben erfordert Energie. Der Kompressor "verbraucht" daher Strom. Wie ist der Wirkungsgrad dieser Maschine?

Messung des Stromverbrauchs

Um den Stromverbrauch für die Versuchsdauer zu bestimmen wird ein Energie-Monitor zwischen Steckdose und Wärmepumpen-Netzstecker eingefügt.

Es erlaubt die laufende Kontrolle der

- Spannung (V)
- Zeit (min, s)
- Leistung (W)
- Energie (Wh)

und der Kosten, sofern ein Wert €/kWh eingestellt ist.

Der Reset des Gerätes erfolgt durch 3 Sekunden langes Drücken auf die "Zeit"-Taste.

Durch Multiplikation der durchschnittlichen Leistung (W) und der Zeit (s) lässt sich die elektrische Arbeit *W* (Ws = Wattsekunden) errechnen.

Es gilt 1 Ws = 1 J, daher ist die Arbeit *W* gleich der Energie E.

Die Energie wird in Wattstunden (Wh) angezeigt und muss noch in Wattsekunden (Ws) umgerechnet werden: 1 Wh = 3600 Ws = 3600 J = 3,6 kJ

- Den Stromverbrauch kann man mit einem einfachen Messgerät erfassen und beispielsweise im Minutentakt protokollieren.
- Ein Watt entspricht einem Energiefluss von einem Joule pro Sekunde (1W = 1 J / s).
- Wenn das Messgerät 30 Minuten lang eine elektrische Leistung von 100 Watt anzeigt ist der Energiefluss 100 x 1800 Sekunden = 18000 Joule oder 18 KJ. Oder E = Wh x 3600s

$$E = P \times t \times 4{,}19 \text{ KJ}$$

Im Falle von 100 W Leistung und 30 Minuten Versuchsdauer

$$E = 100\text{W} \times 1800\text{s} = 18000\text{J} = 18 \text{ kJ}$$

In welchem Verhältnis steht die investierte elektrische Energie zur Energieaufnahme des Wassers?

- Um einen Liter Wasser (1 kg) um 1°C (oder 1 K) zu erwärmen muss ihm 4,182 Kilojoule (4182 Joule) Energie zugeführt werden.
- Das Volumen des sich erwärmenden Wassers ist bekannt (z.B. 4 kg).
- Versuchsbeginn und -ende sind aufzuschreiben.
- Zu notieren sind auch die Start- und Endtemperatur. Dabei muss man das Wasser gut umrühren!

Der Rest besteht aus einer einfachen Formel:

$$E = m \times \Delta T \times 4{,}18 \text{ KJ}$$

Im Falle von 4 kg Wasser und einer Temperaturerhöhung von 30°C:

$$E = 4\text{kg} \times 30°\text{C} \times 4{,}18 \text{ KJ} = 501{,}8 \text{ kJ}$$

Das wäre ein tolles Ergebnis:
Für 18 kJ investierte elektrische Energie erhielte man über 500 kJ Wärmeenergie!
Doch so effizient ist unsere Wärmepumpe nicht. Schon allein deshalb nicht, weil Rohre und Wärmespeicher (roter Eimer) nicht isoliert sind.

Effizienz der Wärmepumpe: Leistungszahl

Der Quotient zwischen thermischer, vom Wasser aufgenommener Energie (E_{th}) und in den Kompressor investierte elektrische Energie (E_{el}) wird als Leistungszahl ε (Eta) oder COP (Coefficient of Performance) bezeichnet.

Die Leistungszahl lässt sich über die gesamte Dauer des Betriebs ermitteln oder z.B. im Minutentakt, wenn jeweils die thermische Energiezunahme und der Stromverbrauch notiert und verrechnet werden.
Dabei zeigt sich, dass die Leistungszahl im Laufe des Prozesses sinkt. Es muss also immer mehr elektrische Energie eingesetzt werden um das Wasser zu erwärmen. Gleichzeitig geht die Temperaturabnahme pro Zeiteinheit im kalten Gefäß geht gegen Null.

Die wesentlichen Gründe:

- Dem sich abkühlenden (und schließlich gefrierendem Wasserreservoir) kann immer weniger Wärme entzogen werden.
- Der steigende Temperaturunterschied zwischen dem kalten und dem warmen Wasser macht den zu überwindenden Energie-"Berg" immer höher.
- Es gilt: Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der Primärenergiequelle Wasser und der Heizungs-Vorlauftemperatur, desto höher die Leistungszahl.

Erreicht das Kältemittel Temperaturen unter 0°C beginnt das Wasser in unmittelbarer Nähe des Wärmetauschers zu gefrieren. Gleichzeitig überzieht sich das Expansionsventil zunächst mit Wasser, dann mit Eis (Kondensation und Sublimation des in der Luft enthaltenen Wasserdampfs).

Abzuhelfen ist dem Abfall der Leistungszahl durch ständige Zu- und Abfuhr von Wasser, sowohl im Kälte- als auch im Wärmereservoir. Die Schlauchanschlüsse ("Oliven") an beiden Eimern ermöglichen einen Kaltwasser-Zulauf anzuschließen und das warme Wasser, z.B. in eine Modell-Heizung abzuführen.

Bei Wärmepumpenheizungen wird dem Verdampfer ständig neues Wasser zugeführt, z.B. aus einem geschlossenen, tief in den Boden hineinreichenden ganzjährig gleichmäßig temperierten (etwa 10°C) und frostfreien Kreislauf. So können die Temperaturdifferenz zwischen dem geförderten Wasser und der Heizungs-Vorlauftemperatur und damit die Leistungszahl (COP-Wert) auch bei tiefen (Luft-) Außentemperaturen relativ klein gehalten werden. Im "Bienenhaus" des Schulbiologiezentrums reicht der Förder- bzw. Schluckbrunnen rund 60 m tief in den Boden hinein.

Jahresarbeitszahl

Die Effizienz einer Wärmepumpe kann an der so genannten Jahresarbeitszahl gemessen werden.
Sie ist die auf das Jahr projizierte Leistungszahl, also das Verhältnis der investierten elektrischen Energie zur Nutzenergie (Wärme). Gute Wärmepumpen, etwa Direktverdampfungsanlagen, haben Jahresarbeitszahlen von >5. Das heißt nichts anderes als dass man für eine KWh Strom mehr als 5 KWh Wärme erhält.

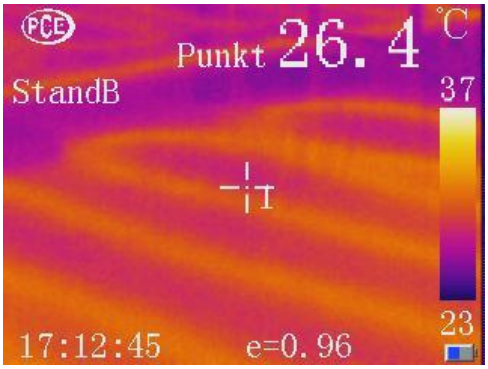
Wärmebildkamera

Mit einer Wärmebildkamera lassen sich die Wärmeflüsse im Wärmepumpen-Modell und die Wärmeabgabe im Raum sichtbar machen.
Eine Wärmebildkamera nimmt die für unsere Augen unsichtbare infrarote Wärmestrahlung (infrarotes Licht) auf und gibt sie in Falschfarben wieder.

Die Wärmebildkamera PCE TC 31 können Schulen im Schulbiologiezentrum ausleihen.
Der Bildschirm dient als IR-Sichtfenster und ist zugleich Messinstrument dessen Parameter einstellbar ist (z.B. Temperaturspanne, maximale Temperatur).
Die Kamera speichert Bilder im jpg-Format. Über ein mitgeliefertes Verbindungskabel können Sie sie auf einen Rechner spielen.

Wärmepumpe und Fußbodenheizung

Die Wärmepumpe im Bienenhaus ist als Niedrigtemperatur-Fußbodenheizung ausgelegt.



Die Wärmebildkamera erkennt (auch im Stockdunklen) die Heizwasserschleifen im Fußboden unseres Bienenhauses.
Das Kreuz in der Bildmitte zeigt auf einen Punkt mit der Temperatur 26,4°C.
Die erfasste Temperaturspanne reicht von 23°C (blau) bis 37°C (hellgelb)

Foto: Ingo Mennerich

Testen des Wirkungsgrades (Leistungszahl)

Das folgende, einen 30minütigen Zeitraum überstreichende Messprotokoll zeigt im Minutentakt

- Die Wassertemperatur im Kaltwasserreservoir (blauer Eimer)
- Die Wassertemperatur im Warmwasserreservoir (roter Eimer)
- Die Leistungsaufnahme des Kompressors (Watt, W)
- Die gegen die Zeit aufgetragene elektrische Arbeit (Wattstunden, Wh)
- Die pro Minute eingesetzte elektrische Energie ($J_{(el)}$)
- Die dem Wärmereservoir pro Minute zugefügte thermische Energie ($J_{(th)}$)
- Die aktuelle Leistungszahl als Quotient von ($J_{(th)}$)/ ($J_{(el)}$)

Messprotokoll

Versuchssauer 30 Minuten

Wasser: 2 x 4 Liter, Ausgangstemperatur in beiden Gefäßen ca. 10°C

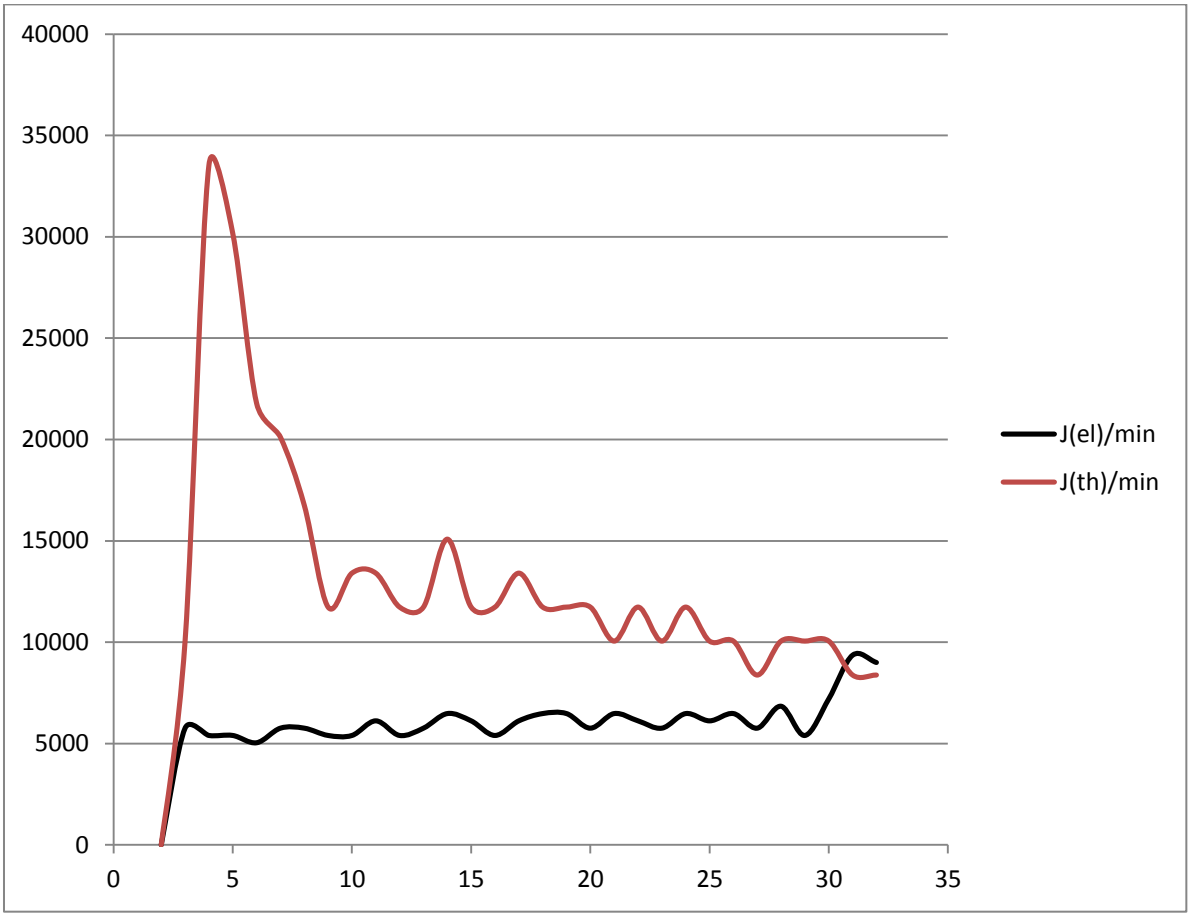
Masse Wasser (Wärmereservoir)	4000 g
Ausgangstemperatur K (Kaltwasserreservoir)	10,1 °C
Ausgangstemperatur H (Warmwasserreservoir)	10,6 °C
Endtemperatur K (Kaltwasserreservoir)	-1,6 °C
Endtemperatur H (Warmwasserreservoir)	34,5 °C

Zeit (min)	T °C (K)	T °C (H)	Kompressor (W)	Energie (Wh)	(Wh)	J(el)/min	J(th)/min	Leistungszahl ε
0	10,1	10,6	96	0	0	0	0	-
1	9,9	11,2	93	1,6	1,6	5760	10056	1,7
2	8	13,2	93	3,1	1,5	5400	33520	6,2
3	7,4	15	93	4,6	1,5	5400	30168	5,6
4	6,7	16,3	94	6	1,4	5040	21788	4,3
5	6,2	17,5	94	7,6	1,6	5760	20112	3,5
6	5,7	18,5	95	9,2	1,6	5760	16760	2,9
7	5,2	19,2	96	10,7	1,5	5400	11732	2,2
8	4,8	20	95	12,2	1,5	5400	13408	2,5
9	4,4	20,8	97	13,9	1,7	6120	13408	2,2
10	3,7	21,5	98	15,4	1,5	5400	11732	2,2
11	3,1	22,2	100	17	1,6	5760	11732	2,0
12	2	23,1	101	18,8	1,8	6480	15084	2,3
13	0,8	23,8	101	20,5	1,7	6120	11732	1,9
14	0,3	24,5	101	22	1,5	5400	11732	2,2
15	0	25,3	101	23,7	1,7	6120	13408	2,2
16	-0,2	26	102	25,5	1,8	6480	11732	1,8
17	-0,4	26,7	103	27,3	1,8	6480	11732	1,8
18	-0,5	27,4	102	28,9	1,6	5760	11732	2,0
19	-0,7	28	102	30,7	1,8	6480	10056	1,6
20	-0,7	28,7	104	32,4	1,7	6120	11732	1,9
21	-0,9	29,3	103	34	1,6	5760	10056	1,7
22	-1	30	104	35,8	1,8	6480	11732	1,8
23	-1	30,6	104	37,5	1,7	6120	10056	1,6
24	-1,2	31,2	104	39,3	1,8	6480	10056	1,6
25	-1,2	31,7	104	40,9	1,6	5760	8380	1,5
26	-1,3	32,3	104	42,8	1,9	6840	10056	1,5
27	-1,5	32,9	104	44,3	1,5	5400	10056	1,9
28	-1,5	33,5	105	46,3	2	7200	10056	1,4
29	-1,6	34	105	48,9	2,6	9360	8380	0,9
30	-1,8	34,5	105	49,6	2,5	2520	8380	0,9
	ΔT -11,9°C	ΔT 23,9°C				SUMME(el)	SUMME(th)	QUOTIENT
						178560	400564	2,2

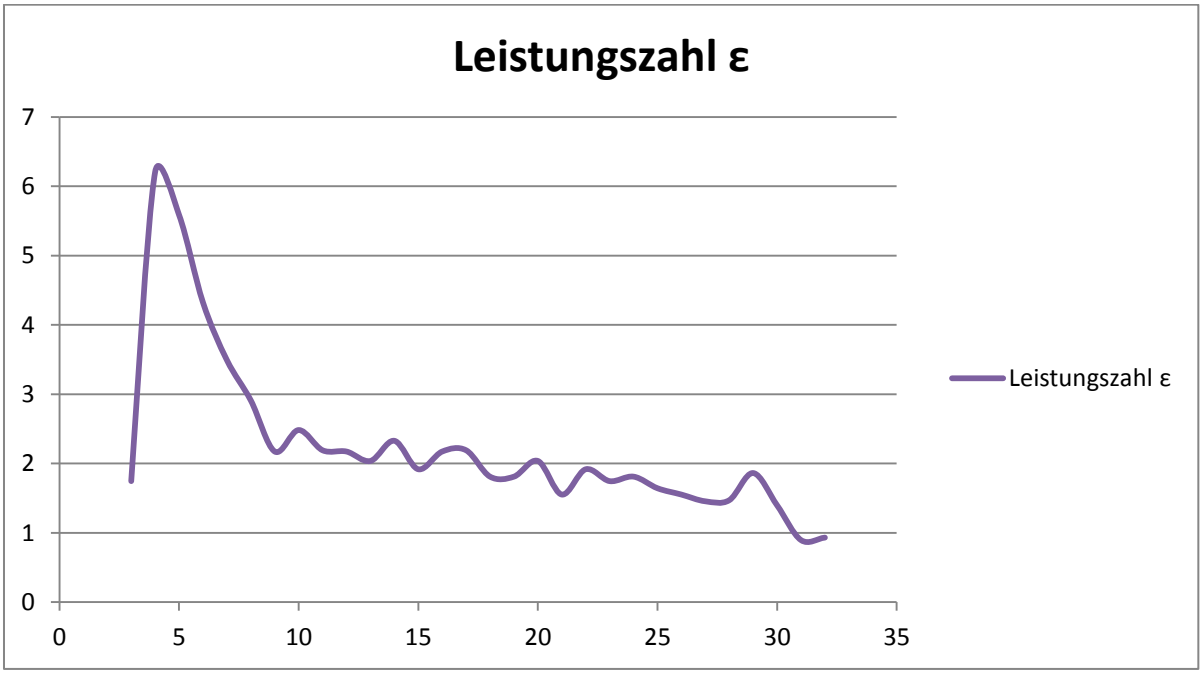
Die durchschnittliche Leistungszahl liegt bei 2,2. Es wird also nur halb so viel elektrische Energie investiert wie die vom Wasser aufgenommene Energie erwarten ließe. Deutlich wird in der Messreihe aber, dass die Leistungszahl zum Ende des Versuchs abnimmt.

Mit EXCEL dargestellte Kurven des elektrischen Energieverbrauchs ($J_{(el)/}$min)

und des Wärmegewinns ($J_{(th)/}$min)

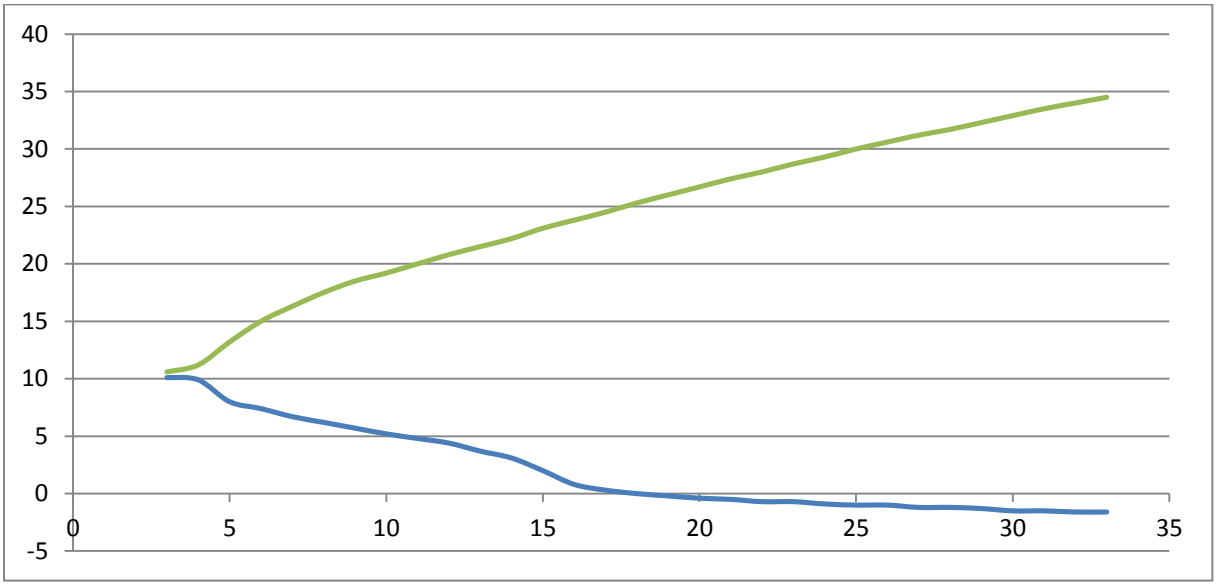


Aus dem Quotienten ($J_{(th)/}$min) / ($J_{(el)/}$min) resultierende, mit der Zeit sinkende Leistungszahl



Temperaturentwicklung im roten bzw. blauen Eimer

Gut zu sehen ist, dass beide Kurven mit der Zeit flacher werden (sinkende Leistungszahl)



Was zeigen die beiden Manometer an?

Die beiden oben angebrachten Manometer messen den Druck des Kältemittels, links (6) nach Durchgang durch das Expansionsventil (Niederdruckseite) und rechts (7) nach Durchgang durch den Kompressor (Hochdruckseite).

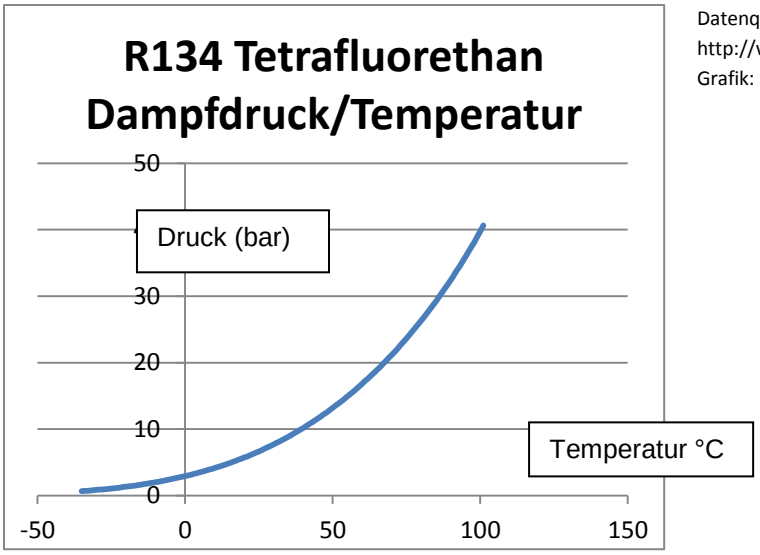
Der Druck unter dem sich das Kältemittel befindet, entscheidet über die Temperatur des Siedepunktes So ist der Siedepunkt von Wasser bei Normaldruck auf Meereshöhe 100°C, auf dem Mount Everest nur bei 70°. Tetrafluorethan ist bei normalen Temperaturen gasförmig und wird unter Druck verflüssigt. Daher ist es besser, statt von Siedetemperatur vom **Taupunkt** zu sprechen. Der Taupunkt ist die Temperatur, bei der ein Gas in den flüssigen Zustand übergeht (kondensiert).

Für das Kältemittel Tetrafluorethan (R134a) angegebene Siedetemperatur -26,3°C bezieht sich 1013 hPa Druck der in der folgenden Dampfdrucktabelle einmal mit 0 und einmal mit 1 bar gleichgesetzt wird weil die beiden Manometer unterschiedlich anzeigen.

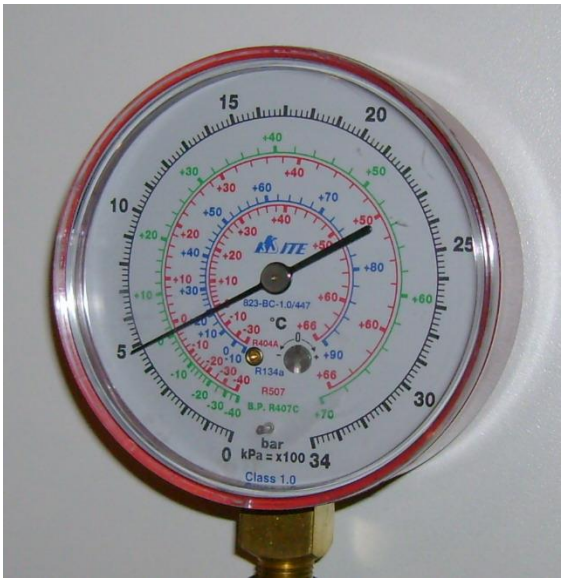
Dampfdrucktabelle R134a

Temperatur	**A** Druck (1013 hPa = 0 bar)	**B** Druck (1013 hPa = 1 bar)
-40°C	-0,49	0,51
-30°C	-0,16	0,84
-20°C	0,32	1,32
-10°C	1,00	2,00
0°C	1,92	2,92
+10°C	3,13	4,13
+20°C	4,70	5,70
+30°C	6,70	7,70
+40°C	9,10	10,10
+50°C	12,11	13,11
+60°C	15,72	16,72
+70°C	20,05	21,05
+80°C	25,21	26,21
+90°C	31,34	32,34

Quelle: Refrigerant Pressure Calculator,
http://www.csgnetwork.com/r134apresstempconv.html



Datenquelle:
http://www.deka-controls.com/kaeltemittel-dampftafeln.html
Grafik: Ingo Mennerich



Manometer Hochdruckseite

Äußere schwarze Skala:
Druck des Kältemittels in Bar

1 bar = 100 kPa (P = Pascal)
Messbereich 0 - 34 bar

Innere blaue Skala:
Taupunkttemperatur für Kältemittel R-134a

Die anderen Skalen beziehen sich auf Taupunkttemperaturen anderer Kältemittel!

Im abgebildeten Fall beträgt der Druck 5 bar und die (druckabhängige) Taupunkttemperatur* 20°C.

*) Der Taupunkt ist die Temperatur, bei der ein Stoff in gasförmigem Zustand in die flüssige Phase übergeht und umgekehrt.

Manometer Niederdruckseite

Äußere schwarze Skala:
(Über)Druck des Kältemittels in Bar
Der normale atmosphärische Druck von 1 bar wird hier gleich "0" gesetzt

1 bar = 100 kPa (P = Pascal)
Messbereich -1 - 8 bar

Innere blaue Skala:
Taupunkttemperatur für Kältemittel R-134a

Die anderen Skalen beziehen sich auf Taupunkttemperaturen anderer Kältemittel!

Im abgebildeten Fall beträgt der Druck 4,4 bar und die (druckabhängige) Taupunkttemperatur* 18°C

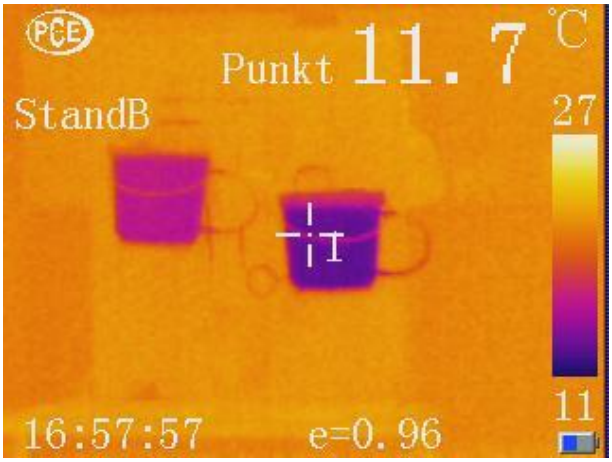
Wenn die Wärmepumpe eingeschaltet wird steigt der Druck auf der Hochdruckseite während er auf der Niederdruckseite sinkt.

- Der Kompressor bewirkt die Drucksteigerung,
- das Expansionsventil setzt den Druck herab.

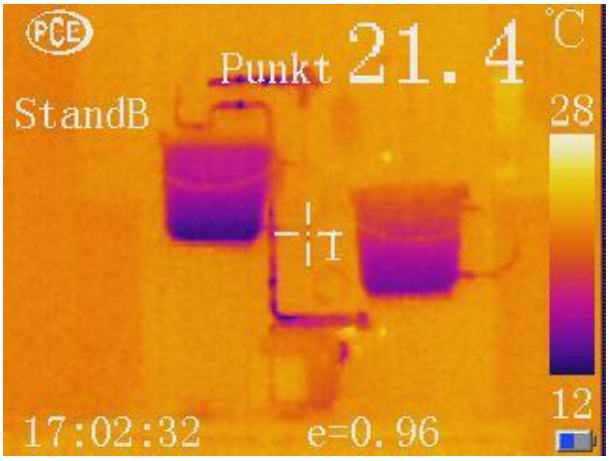
Misst man die Temperatur am Anschluss der Manometer kann man eine Aussage darüber treffen, ob das Kältemittel an dieser Stelle flüssig (Temperatur unter dem auf dem Manometer angezeigten Taupunkt) oder gasförmig (Temperatur über dem Taupunkt) ist.

Wärmepumpe trifft Wärmebildkamera

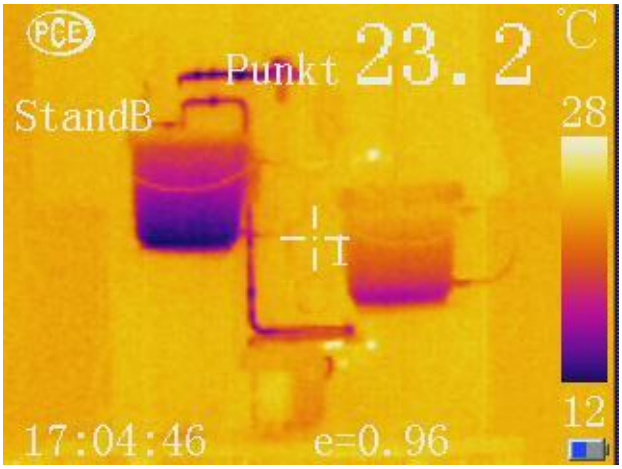
Mit der (bei uns ausleihbaren) Wärmebildkamera können Sie die für uns unsichtbare Wärmestrahlung (Infrarot-Strahlung) sichtbar machen und in Falschfarben verfolgen, wie Wärme von der "Kalten" Seite zur "warmen" gepumpt wird:



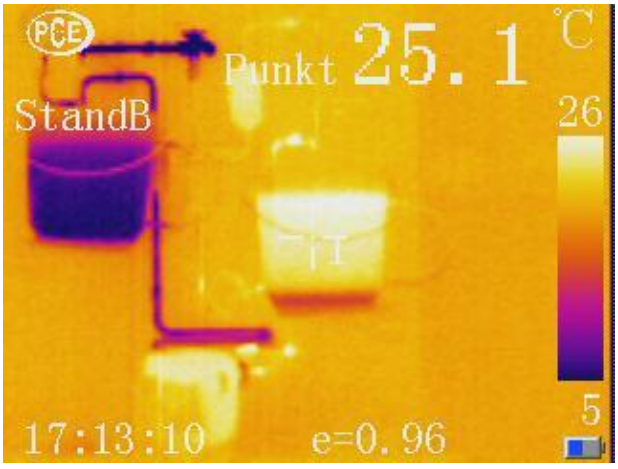
Versuchsbeginn
Das Wasser in beiden Eimern ist kalt. Das im rechte Eimer sogar noch kälter (11,7°C)
Alle Rohre haben Raumtemperatur.



Nach 5 Minuten
Das Wasser im rechten Eimer wird wärmer. In beiden Eimern ist eine Temperaturschichtung zu erkennen: Kaltes Wasser ist schwerer! Vom Expansionsventil bis zum Kompressor wird die Rohrleitung deutlich kälter. Raumtemperatur (und Temperatur des Modells) 21,4°C

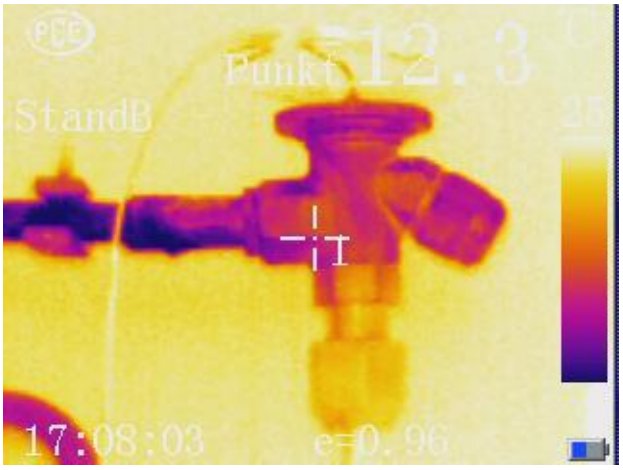


Nach 10 Minuten
Im rechten Eimer wird das Wasser immer wärmer

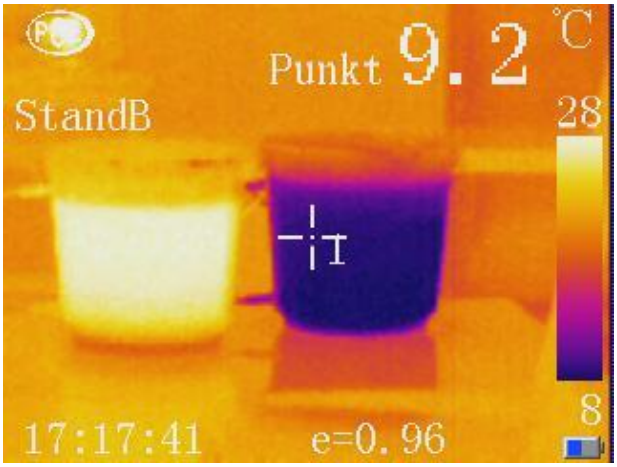


Nach 15 Minuten
Das Wasser im linken Eimer ist auf Temperaturen unter 10°C gesunken (siehe Farbskala). Das Wasser im rechten Eimer ist mehr als 25°C warm.

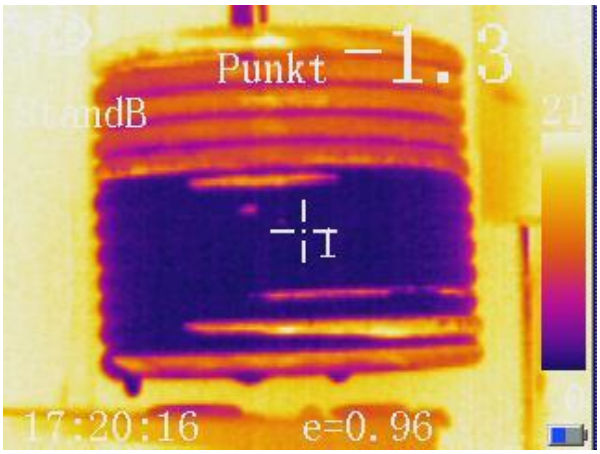
Details der Wärmepumpe im Infrarot:



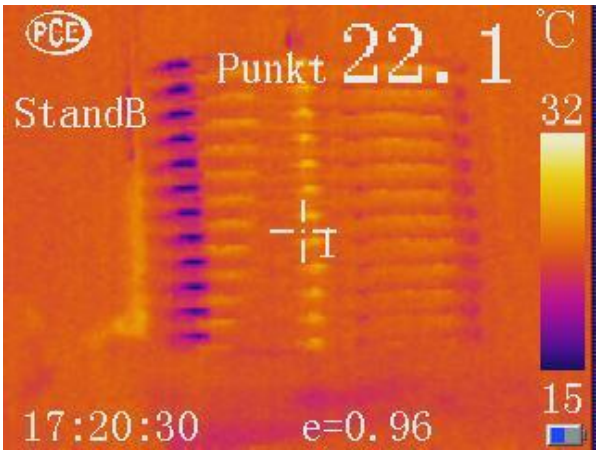
Temperaturen am Expansionsventil
Das warme Kältemittel tritt von unten ein und wird auf dem Weg nach links schlagartig abgekühlt



Das Ergebnis nach 20 Minuten:
9,2°C kaltes Wasser und warmes Wasser mit mehr als 28°C!



Verdampfer (nach Wegnahme des Eimers)



Verflüssiger (nach Wegnahme des Eimers)

Foto: Ingo Mennerich

Weitere Experimente mit der Wärmepumpe

Aufrechterhalten der Wassertemperatur im "Kaltwasserreservoir"

- Bei steigender Temperaturdifferenz zwischen "Kalt-" und "Warmwasserreservoir" sinkt der Wirkungsgrad (Leistungszahl). Was geschieht, wenn man die Wassertemperatur im blauen Eimer durch Abschöpfen und Zugabe neuen Wassers konstant hält?
- Lässt sich das mit einem pumpengetriebenen Kaltwasserzufluss optimieren?

Wie weit kann die Temperaturdifferenz zwischen "kalt" und "warm" sinnvollerweise gehen?

Wie verhält sich die Anlage, wenn man das warme Wasser in einer "Heizungsanlage", bestehend aus einem an den Eimer angeschlossenen Schlauch und einer Aquarienfilter-Pumpe, zirkulieren lässt?

Auf welche Temperatur kann man das warme Wasser bringen, wenn man den Eimer isoliert?

Nicht ausprobieren: Warum darf die Anlage nicht "wasserlos" betrieben werden?

Experimente rund um Wärmepumpe

Wärmeentzug durch Verdampfen (Verdunsten)

- Wenn man den Messfühler eines Thermometers in Wasser hält dass die gleiche Temperatur wie die Umgebung hat und anschließend es anschließend an der Luft trocknen lässt wird die dann angezeigte Temperatur einige Grad unter der vorher angezeigten Temperatur des Wassers liegen. Der Grund: Das Restwasser auf dem Fühler verdunstet und entzieht dem Fühler Wärme.
- Wenn man Tiefkühlpizza in ein feuchtes Tuch oder Zeitungspapier einschlägt, bleibt sie länger kalt.
- In Indien gibt es einen einfachen "Kühlschrank": Ein Topf aus gebranntem, vorher mit Strohteilchen gemischten Ton wird mit Wasser gefüllt. Beim Brennen hinterlässt das Stroh Löcher so dass der Ton porös wird. Das austretende Wasser verdunstet an der Topfoberfläche und entzieht der Umgebung Wärme. Wenn man Nahrungsmittel (z.B. in einem Beutet) ins Wasser legt bleiben sie kalt.
- Eine einfachere Version des "indischen Kühlschranks": Ein mit Wasser gefülltes Becherglas wird mit einem Handtuch umhüllt, das teilweise ins Wasser taucht.

Druckerhöhung und Erwärmung durch Kompressor:

- Das Aufpumpen eines Fahrradschlauchs kostet Energie ("Muskelkraft"). Die in die Muskeln hineingesteckte Energie wird nur zum Teil in Bewegung verwandelt, der Rest wird als Wärme frei.
- Auch die Luftpumpe, das Ventil und der Schlauch werden warm: Die Luftteilchen werden (gegen ihren "Willen") auf engerem Raum zusammengedrückt. Dabei entsteht Kompressionswärme. Das Ventil ist aus Metall und Metall ist ein guter Wärmeleiter. Die Wärme im Schlauch merkt man eher weniger, denn er hat eine verhältnismäßig große Oberfläche über die die Wärme schnell abgegeben wird.
- Wenn man die Öffnung der Pumpe mit dem Daumen fest zudrückt und schnell und kräftig pumpt kann man sich Brandblasen auf dem Daumen zuziehen. Im Inneren der Luftpumpe entstehen Temperaturen von über 100°C!

Verflüssigung unter hohem Druck:

- Unter Druck wird Wasserdampf flüssig: Ein Dampfdrucktopf lässt Wasser, das bei Normaldruck bei 100°C siedet, auch bei Temperaturen über 100°C flüssig bleiben. Dadurch wird der Inhalt schneller gar.

Druckminderung durch ein Expansionsventil:

- Strömt ein Gas aus einer Druckflasche kühlt es sich deutlich ab
- Öffnet man das Ventil eines prall gefüllten Fahrradschlauchs, wird es - genauso wie die ausströmende Luft -kalt. Den vorher im Schlauch zusammengepressten (und erwärmten) Luftteilchen wird ihre "Freiheit" zurückgegeben.

Verdampfen unter geringem Druck:

- Auf hohen Bergen (also bei geringerem Luftdruck) siedet Wasser schon bei Temperaturen unter 100°C. Mit einer Vakuumpumpe kann man in einem geschlossenen Glasgefäß so viel Unterdruck erzeugen, dass Wasser schon bei Temperaturen weit unter 100°C siedet.
- Wenn man eine Milchflasche (vorsichtig) randvoll (!) mit kochendem Wasser füllt und mit dem Schraubdeckel fest verschließt, wird das Wasser auch noch bei Zimmertemperatur sieden.
  Der Grund: Das sich abkühlende Wasser braucht weniger Platz. Dadurch entsteht ein leerer, immer größer werdender Zwischenraum ("Vakuum") zwischen Wasseroberfläche und Deckel.