# Die Wärmepumpe -
# Wie gelangt eigentlich die Wärme vom Kalten ins Warme?

Thomas Bauer, Thomas Wilhelm

## 1 Begründung

Der Klimawandel, der unter anderem durch die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen hervorgerufen wird, ist ein tägliches Thema in den Medien und im Alltag der Schüler. Immer wieder wird diskutiert, wie man den Ausstoß von Treibhausgasen reduzieren und somit den Klimawandel verhindern kann. Um diese Diskussion führen zu können, ist es interessant zu wissen, wie viel Treibhausgase in welchen Bereichen emittiert werden. So beträgt in Deutschland der Anteil der Haushalte an der $CO_2$-Emission 13,06% [1], wobei hierbei gerade für die Heizung und die Warmwasserversorgung, die meist mit fossilen Brennstoffen wie Öl oder Gas betrieben werden, die meiste Energie verbraucht und am meisten $CO_2$ emittiert wird. Somit ist es lohnenswert, sich Alternativen zur Heizung mit fossilen Brennstoffen zu überlegen. Wärmepumpen sind hierfür eine Alternative. Das Thema Wärmepumpen hat also enorme Wichtigkeit, stellt einen Bezug zum Alltag der Schüler her und bietet sich deshalb an, im Unterricht behandelt zu werden.

## 2 Verschiedene Elementarisierungen

Die Wärmepumpe ist aus physikalisch-technischer Sicht das Gleiche wie ein Kompressor-Kühlschrank und damit recht komplex [2] (siehe Abb. 1). Für den Physikunterricht muss dies elementarisiert werden, das heißt, es muss das Wesentliche herausgearbeitet werden, die Inhalte vereinfacht und eine Reihenfolge einzelner Erklärungsschritte festgelegt werden. Mit dem Begriff „didaktische Rekonstruktion“ wird das Elementarisieren als längerfristiges Forschungsprogramm der Fachdidaktik verstanden [4]. Bei einem Thema sind stets mehrere verschiedene Elementarisierungen möglich. *Weltner* hat dies am Beispiel des Kompressor-Kühlschrankes aufgezeigt [5].

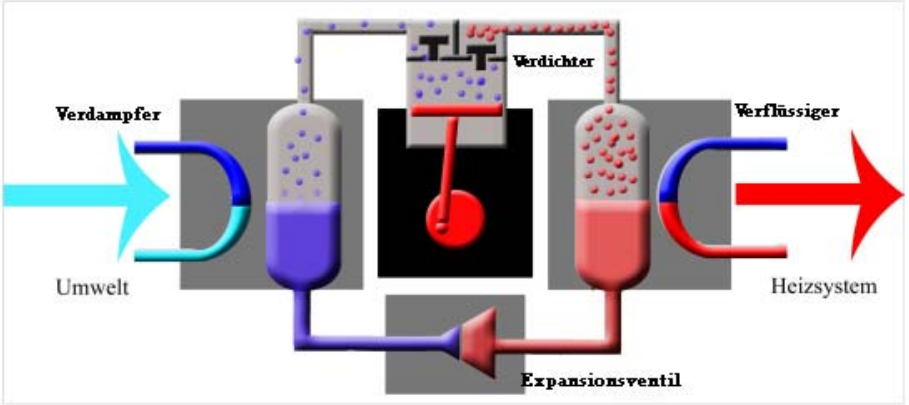


**Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Wärmepumpe (eigene Darstellung nach [3] )**

Unter physikalischem Aspekt könnte man als Wesentliches die Abkühlung beim Verdunsten ansehen. Demnach würde man im Unterricht zunächst die Vorerfahrung aktualisieren, dass

man bei nasser Haut friert. Diese Erfahrung kann man erweitern, indem man Flüssigkeiten mit stärkerem Abkühlungseffekt (wie Alkohol oder Äther) auf der Haut verdunsten lässt. Des Weiteren kann man die Verdunstung beschleunigen, indem man den entstandenen Dampf abpumpt.

Unter technischem Aspekt würde man dagegen den Kühlmittelkreislauf als das Entscheidende ansehen und kommt auf vier Phasen: Verstärkung der Verdunstung durch Absaugen des Dampfes, Platz sparendes Aufbewahren durch Kompression des Dampfes, Verflüssigung des Dampfes durch Abkühlung und Rückführung zum Verdampfer über ein Ventil, wo er erneut verdunsten kann. Hier geht man also nach den einzelnen Bauteilen vor: Verdampfer und Kompressor bzw. Verdichter, Verflüssiger oder Kondensator, Expansionsventil.

Geht es einem dagegen mehr darum, Energieflüsse aufzuzeigen, dann stellt man die vier Phasen anders vor: Im Verdampfer nimmt der Arbeitsstoff Energie, nämlich die Verdampfungsenergie, aus der Umgebung auf und verdampft. Im Kompressor wird der Arbeitsstoff verdichtet und es kommt dabei zu einer Temperaturerhöhung. Im Kondensator kondensiert der Arbeitsstoff und gibt die Kondensationsenergie an den Heizungsspeicher ab. Im Drosselventil kühlt der Arbeitsstoff wieder ab und kann erneut Energie aus der Umgebung aufnehmen.

Bei einem Unterricht gemäß dem Karlsruher Physikkurs würde man den Energiestrom und den Entropiestrom unterscheiden. Elementar wäre hier für eine ideale Wärmepumpe, dass sie keine Entropie erzeugt: Aus dem Außenraum wird durch die Wärmepumpe durch so viel Entropie in den zu heizenden Raum hineingepumpt, wie durch die Wände wieder nach außen geht, so dass ein konstanter Entropiestrom vorliegt [6].

In der Hochschule wird der Wärmepumpenprozess als umgekehrter Carnotprozess dargestellt (siehe Abb. 2). Dabei wird von 1 nach 2 der Stoff isotherm expandiert und nimmt dabei Wärme auf. Dann kommt es von 2 nach 3 zu einer adiabatischen Erwärmung. Unter Abgabe von Wärme wird anschließend der Stoff von 3 nach 4 komprimiert. Schließlich kommt es von 4 nach 1 zu einer adiabatischen Abkühlung. Der Carnotprozess verläuft aber völlig ohne Phasenübergänge, welche jedoch in den meisten obigen Erklärungen wesentlich für die Funktionsweise der Wärmepumpe sind. Kann man nun also die Funktionsweise der Wärmepumpe auch ohne Phasenübergänge erklären?

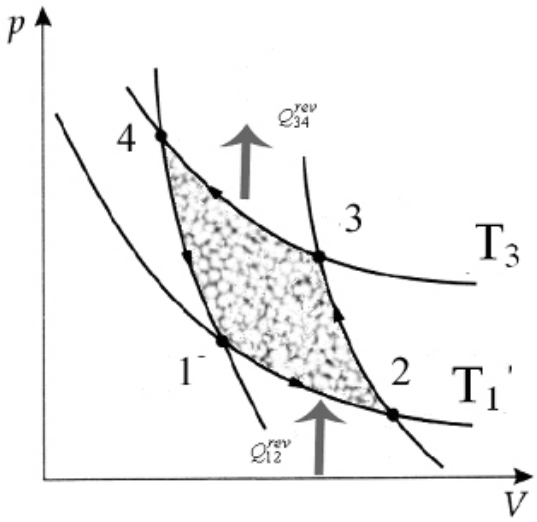


**Abb. 2: p-V-Diagramm des umgekehrten Carnot-Prozesses**

## 3 Alternative Elementarisierung

Das Erstaunliche an der Wärmepumpe ist die Tatsache, dass sie Wärme vom Ort niedrigerer Temperatur zum Ort höherer Temperatur befördert. Im Alltag macht man aber die Erfahrung, dass Wärme vom Ort höherer Temperatur, also vom Warmen, zum Ort kälterer Temperatur, also ins Kalte fließt.

Nach den obigen Elementarisierungen wird dieser Widerspruch nicht aufgelöst. Wie geht man vor, wenn man dieses Problem lösen will? Dazu brauchen wir zwei physikalische Grundprinzipien und kommen so auf eine Elementarisierung mit nur zwei Schritten.

Das eine Grundprinzip ist, dass Wärme immer vom Körper höherer Temperatur zum Körper niedrigerer Temperatur fließt. Das andere Grundprinzip ist, dass man durch Erhöhung des Drucks eine Erhöhung der Temperatur erreichen kann.

Die Wärmepumpe kann durch Veränderung des Drucks Wärme vom Ort niedriger Temperatur zum Ort höherer Temperatur bringen. Dabei wird zunächst der Druck so weit erniedrigt, dass die Temperatur des Kältemittels geringer als die Umwelttemperatur ist. Energie fließt nun aus dem Ort höherer Temperatur, der Umwelt (beim Kühlschrank: der Innenraum), zum Ort niederer Temperatur, also ins Kältemittel. Im Kältemittel ist nun Energie aus der Umgebung gespeichert. Anschließend wird der Druck des Kältemittels so weit erhöht, dass dessen Temperatur höher als die des Heizwassers ist (beim Kühlschrank: der Raumtemperatur) und somit Wärme aus dem Kältemittel ins Heizwasser (beim Kühlschrank: in den Raum) fließt. Die gespeicherte Energie wird also wieder abgegeben, die Wärmepumpe oder der Kühlschrank hat Wärme vom Ort niedrigerer Temperatur zum Ort höherer Temperatur transportiert. Zudem wird natürlich auch ein Teil der durch die Verdichtung verrichteten Arbeit ans Heizwasser abgegeben. Entscheidend sind hier die beiden Zustände niedrigen bzw. hohen Druckes.

## 4 Versuche zur Veranschaulichung der Grundprinzipen

Die Tatsache, dass Wärme immer vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedrigerer Temperatur fließt, kann man mit folgendem Versuch zeigen (siehe Abb. 3). Man stellt ein kleines Glas in ein größeres Glas und füllt das innere Gefäß mit kaltem Wasser. In beide Gläser stellt man ein Thermometer. Anschließend erhitzt man Wasser und füllt dieses in das äußere Glas und misst in Abhängigkeit von der Zeit die Temperatur der beiden Thermometer. Man stellt fest, dass sich die Temperatur annähert, also Wärme vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedrigerer Temperatur geflossen ist.

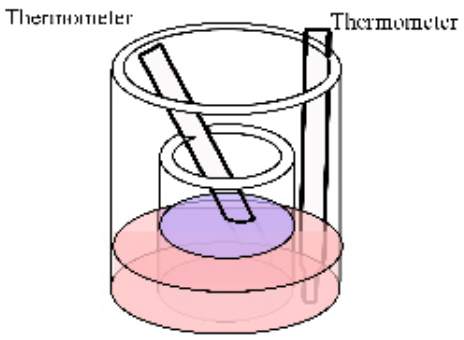


**Abb. 3: Versuch zum Wärmefluss**

Dass man durch Erhöhung des Drucks die Temperatur erhöhen kann, kann man durch folgenden Versuch mit Luft demonstrieren (siehe Abb. 4). Man verschließt einen Glaskolben mit einem Gummistopfen mit zwei Öffnungen. In den einen führt man eine Pipette und in diese den Temperatursensor ein. Dabei ist darauf zu achten, dass die Pipette so eng ist, dass Pipette und Sensor die Öffnung vollkommen verschließen. In die andere Öffnung führt man ein Glasrohr ein.

Dieses verbindet man über einen Gummischlauch mit einem Manometer, an das eine Luftpumpe angeschlossen ist. Anschließend erhöht man mit Hilfe der Luftpumpe den Druck der Luft und beobachtet auf dem Thermometer die Temperaturangabe. Dabei ist es ratsam, den Gummistopfen festzuhalten, damit dieser nicht heraus gestoßen wird. Man beobachtet dabei eine Temperaturerhöhung von ca. 2° C.

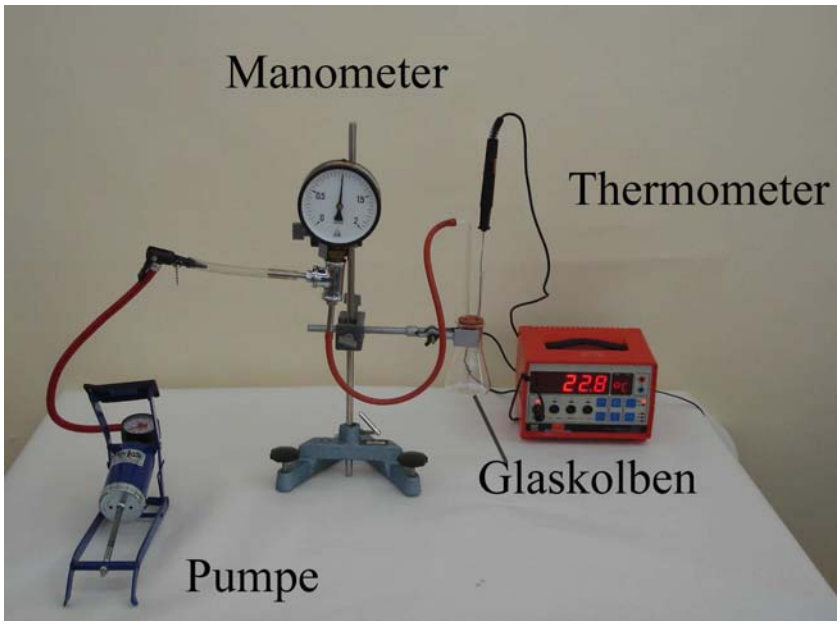


**Abb. 4: Versuch zur Temperaturerhöhung durch Druckerhöhung**

Den umgekehrten Vorgang, also die Abkühlung bei Expansion eines Gases, kennen die Schüler schon qualitativ von Spraydosen, wie einem Deodorant. Er ist auch für die Nebelbildung beim Öffnen der Sektflasche verantwortlich [7].

Auf die Vorgänge in den einzelnen Bauteilen kann anschließend noch eingegangen werden. Hier wäre insbesondere interessant, wie man die Druckänderung im Kühlmittel erzeugt.

## 5 Leistungszahl und Wärmequellen von Wärmepumpen

Um Wärmepumpen zu bewerten, verwendet man die so genannte Leistungszahl $\varepsilon_{WP}$. Diese Zahl gibt das Verhältnis aus abgegebener Wärme $Q_{ab}$ (also der Wärme, die zum Heizen verwendet werden kann) und aufgewendeter Arbeit des Kreisprozesses $W_k$ (also der Arbeit, die man zum Betreiben der Wärmepumpe benötigt) an. Somit ergibt sich

$$\varepsilon_{WP} = \frac{|Q_{ab}|}{|W_k|} \qquad (1).$$

Je größer die Leistungszahl einer Wärmepumpe ist, desto energetisch günstiger ist diese. So bedeutet eine Leistungszahl von 3 zum Beispiel, dass 1/3 der Heizenergie aus elektrischer Energie und 2/3 aus der Umwelt kommen.

Beschreibt man die Wärmepumpe mit Hilfe eines Carnot-Prozesses erhält man nach einiger Rechnung

$$\varepsilon_{WP} = \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_a}} \qquad (2),$$

wobei $T_1$ die Temperatur der Wärmequelle und $T_a$ die Temperatur des Heizsystems ist [8].
Die Gleichung (2) und insbesondere ihre Herleitung sind allerdings für Schüler viel zu schwierig. Auf folgende Art kann man aber dennoch die Leistungszahl einer Wärmepumpe mit Schülern an Hand der Gleichung (1) qualitativ mit der Elementarisierung aus Abschnitt 3 diskutieren: Die Leistungszahl einer Wärmepumpe ist umso größer, je kleiner bei gleicher abgegebener Wärme die Arbeit ist, die zur Druckerhöhung nötig ist. Die Arbeit ist umso kleiner, je kleiner der nötige Druckunterschied ist. Da Druck und Temperatur zusammenhängen, ist der benötigte Druckunterschied - also die benötigte Arbeit - umso kleiner, je kleiner der Unterschied zwischen der Temperatur im Verdampfer und der Temperatur im Verflüssiger ist. Um eine große Leistungszahl zu erreichen, sollte also die Temperatur der Wärmequelle möglichst hoch und die Temperatur des Heizsystems möglichst gering sein.
Eine niedrige Temperatur des Heizsystems erreicht man durch die Verwendung von Heizanlagen mit großer Fläche, wie zum Beispiel Wand- und Fußbodenheizungen. Diese benötigen nämlich für den Betrieb geringere Temperaturen des Heizwassers.
Bei Wärmepumpen werden Erde, Wasser oder Luft als Wärmequellen verwendet. Wie oben diskutiert, ist für eine hohe Leistungszahl eine möglichst hohe Temperatur der Wärmequelle nötig. Da die Temperatur im Erdreich nahezu konstant (in 5 m Tiefe minimal 9°C) [9] und die Verfügbarkeit immer gegeben ist, ist vor allem das Erdreich als Wärmequelle gut geeignet. So haben Wärmepumpen mit dem Erdreich als Wärmequelle Leistungszahlen zwischen 4 und 5, Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle aber nur Leistungszahlen zwischen 3 und 4 [10].
Nach *Tiator* und *Schenker* [11] lohnt sich eine Wärmepumpe ab einer Leistungszahl von 3. Das heißt, ab einer solchen Leistungszahl stellt die Wärmepumpe mehr Energie in Form von Wärme bereit, als entstehen würde, wenn man die ganze Primärenergie in Wärme umsetzen könnte. Somit lohnen sich aus energetischer Sicht alle Wärmepumpen.

## 6 Fazit

Die hier vorgeschlagene Elementarisierung der Wärmepumpe betont ein Grundprinzip der Wärmelehre, sowie einen grundlegenden Zusammenhang, der bei den Gasgesetzen behandelt werden kann. Ein Vorteil dieser Erklärung ist die Tatsache, dass diese auch dann funktionieren würde, wenn man keine Phasenübergänge im Kühlmittel hätte (die man aber hat), also auch ohne Verdampfungskälte.

## Literatur:

[1] http://www.lpb-bw.de/klimaschutz_deutschland.html, aufgerufen am 12.11.2011

[2] Thomas Bauer (2009): Regenerative Energietechnik im Wohnhaus, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/regenerativeEnergie.htm

[3] www.langeundpartner.info/bilder/waerempumpe.html, aufgerufen am 13.11.2011

[4] Ulrich Kattmann, Reinders Duit, Harald Gropengießer, Michael Komorek (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftliche Forschung und Entwicklung, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 3, Heft 3, S. 3-18.

[5] Klaus Weltner (1983): Elementarisierung physikalischer und technischer Sachverhalte als eine Aufgabe der Didaktik des Physikunterrichts, Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie 31, Heft 7, S. 303 - 310

[6] Heiner Schwarze

[7] Hartmut Wiesner, Giuseppe Colicchia, Alexander Rachel: Warum „raucht“ Sekt? Physikalische Aspekte des Lösens von Gasen in Flüssigkeiten - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Heft 8, 2011, S. 18 - 22

[8] Cerbe, G.; Wilhelms, G. (2008): Technische Thermodynamik: Theoretische Grundlagen und Anwendungen, Carl Hanser Verlag, München

[9] http://www.viessmann.de/etc/medialib/internetglobal/pdf_documents/technical_series.Par.81012.File.File.tmp/fr-waermepumpen.pdf, aufgerufen am 11.6.2009

[10] Wärmepumpen-Testzentrum WPZ (2011): WPZ - Bulletin, Ausgabe 01-2011, http://www.ntb.ch/

[11] Tiator, I.; Schenker, M. (2007): Wärmepumpen Wärmepumpenanlagen, Vogel Buchverlag, Würzburg

## Anschrift der Verfasser:

StRef Thomas Bauer, Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main
E-Mail: info@thomas-wilhelm.net, Web: www.thomas-wilhelm.net