

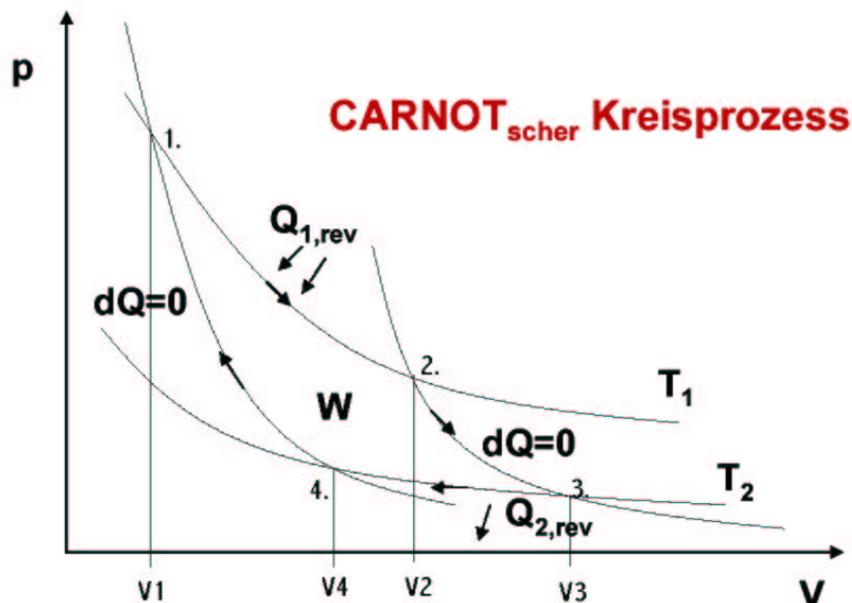
Physikalisches Anfängerpraktikum: W6: Heißluftmotor

Marc Weber (548976), Jan Korger (561543)

durchgeführt am 03.05.2004

1 Theorie

1.1 Carnotscher Kreisprozess



Der Carnotsche Kreisprozess wurde von Carnot ursprünglich entwickelt, um den maximalen Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen (insbesondere Dampfmaschinen) zu ermitteln. Er besteht aus 4 Phasen: Der dehnbare Gasraum ist an die erste Wärmequelle angeschlossen und dehnt sich auf das Volumen V_2 aus.

- 1.-2. Hier dehnt sich der Gasraum isotherm aus. D. h. er behält den Kontakt zum Wärmereservoir.
- 2.-3. Hier dehnt sich der Gasraum, nun aber vom Wärmereservoir getrennt, bis auf das Volumen V_3 weiter aus und verliert dadurch an Temperatur

- 3.-4. Der Gasraum wird ans Kältereservoir angeschlossen und zieht sich (wiederum isotherm) auf das Volumen V_4 zusammen.
- 4.-1. Der Gasraum wird vom Kältereservoir getrennt und ein Teil der gewonnenen mechanischen Energie wird verwendet, um das Gas wieder auf das ursprüngliche Volumen V_1 zu komprimieren. Dabei erwärmt es sich wieder auf die Anfangstemperatur

1.2 Wirkungsgrad

$$\text{Wirkungsgrad} := \eta = \frac{W_{\text{outingewünschterForm}}}{W_{\text{in}}}$$

Der Wirkungsgrad beim Stirlingmotor, unter Verwendung eines Wärmespeichers, ist im Idealfall, d.h. wenn die frei werdende Wärme zu 100

1.3 Sterlingscher Kreisprozess

Der Stirling'sche Kreisprozess ist dem Carnot'schen ähnlich, nur dass diesmal die Zustandsänderung des Gases von der Stufe 2.-3. und 4.-1. isochor (bei konstantem Volumen) verläuft. Von 2. nach 3. nimmt die Temperatur bei konstantem Volumen im gleichen Maße ab, wie sie beim Übergang von 4.-1. wieder zunimmt. Dh. Die Energie, die von 2.-3. frei wird, muss von 4.-1. wieder investiert werden, da von 1.-2. und 3.-4. das Volumen verändert wird, (theoretisch) aber nicht die Temperatur.

Die im Schritt 1.-2. gewonnene (oder in Form von Wärme eingesetzte Energie ist:

$$Q_{12} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p \cdot dV}{V} = \int_{v_1}^{V_2} \frac{nRT_1 \cdot dV}{V} = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

(Schritt 3.-4. errechnet sich analog) Die im Schritt 2.-3. verlorengelassene um im Schritt 4.-1. wieder zu investierende Energie ist:

$$n \cdot C_V(T_1 - T_2)$$

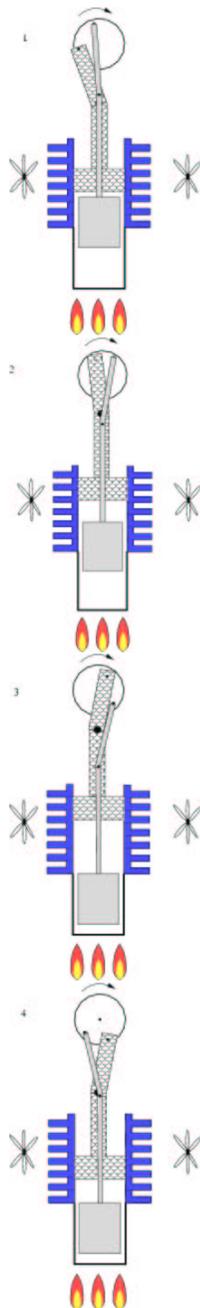
, wobei C_V die spezifische Wärmekapazität des Gases ist.

Damit ergibt sich ein Wirkungsgrad von

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{Energiegewinn(1.-2.)} - \text{Kompressionsenergie(3.-4.)}}{\text{Wärmeenergie(2.-3.)} + \text{Wärmeenergie(4.-1.)}} \\ &= \frac{nR \ln \frac{V_2}{V_1} (T_1 - T_2)}{nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + nC_v(T_1 - T_2)} \end{aligned}$$

Wenn man die Wärmeenergie, die im Schritt 2.-3. verloren geht, vollständig speichern könnte, dann ergäbe sich logischerweise auch hier der Carnotsche Wirkungsgrad, denn $nC_v(T_1 - T_2)$ fällt weg, man kann alles außer die Ts kürzen:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



Wärmekraftmaschine: Gasvolumen dehnt sich isotherm aus. Dabei bewegt sich der Verdrängerkolben in Richtung Heizung, um das Gas an sich vorbei an die Kältequelle zu schieben.

Stirlingmotor als Wärmepumpe: Kolben vergrößert Volumen. Dadurch wird das Gas kälter und nimmt, weil der Verdrängerkolben oben ist, im unteren Zylinderteil Wärme auf.

Wärmekraftmaschine: Gas kühlt bei konstantem Volumen ab.

Stirlingmotor als Wärmepumpe: Verdrängerkolben schiebt Gas in obere Hälfte

Wärmekraftmaschine: Gas wird komprimiert.

Stilingmotor als Wärmepumpe: Arbeitskolben komprimiert Gas, welches sich dadurch erhitzt und gibt die Wärme an den oberen Teil des Zylinders ab.

Wärmekraftmaschine: Verdrängerkolben bewegt sich in die Richtung der Kältequelle, so dass das Gas wieder zur Heizung geschoben wird, wo es wieder auf Ausgangstemperatur T_1 aufgeheizt wird.

Stirlingmotor als Wärmepumpe: Verdrängerkolben schiebt Gas nach unten.

Wie oben erwähnt kann man einen Teil der immer wiederkehrenden Wärmeabgabe und -aufnahme des Gases (Schritt 2.–3. und 4.–1.) vor dem Energieverlust retten, in dem man den Kolben als Wärmespeicher benutzt. Der Stirling-Motor in unserem Experiment verfügt über einen solchen Wärmespeicher. Die Luft fließt nicht außen am Kolben vorbei, sondern in der Mitte durch ein Loch

im Kolben, welches mit Kupferwolle gefüllt ist. Wenn die heiße Luft zur Kühlung (im Bild nach unten) fließt, so gibt sie die Wärme an die Wolle ab. Die dann kalte zurückströmende Luft erwärmt sich wieder an der Kupferwolle..

1.4 II. Hauptsatz der Wärmelehre

Entropie nimmt immer zu. Das heißt: Wenn man zwei Gefäße mit unterschiedlichen Gasen verbindet, dann gibt es nur wenige geordnete Zustände im Vergleich zur Masse der ungeordneten Zustände. Also wird man auf Grund der Wahrscheinlichkeit und Diffusion immer nur beobachten, dass aus Ordnung (geringe Entropie) Unordnung (große Entropie) wird, aber nie die entgegengesetzte Richtung.

1.5 Wärmeäquivalenz

James Prescott Joule (1818-1889) untersuchte 1840 die Wärmewirkungen des Stroms und formulierte 1840 das Joule'sche Gesetz, nach dem Wärme proportional zum Produkt der Spannung und Stromstärke ist (mechanische Wärmeäquivalenz). 1843 bewies er den Zusammenhang zwischen Wärmeenergie und mechanischer Energie, indem er einer isolierten Wassermenge eine definierte Menge mechanischer Energie aussetzte und eine Proportionalität feststellte. Er erweiterte den EES auf Wärmeenergie. Auch die Einheit Joule wurde nach ihm benannt, die alte Einheit Kalorie wird nicht mehr verwendet.

1.6 elektrische Leistung von Wechselstrom

Die elektrische Leistung beim Wechselstrom definiert man analog zum Gleichstrom als das Produkt von effektiver Spannung und Stromstärke (U_{eff} , I_{eff}), so dass die mittlere elektrische Leistung an einem Ohm'schen Widerstand gleich der Leistung eines Gleichstromes mit $U = U_{eff}$, $I = I_{eff}$ ist.

1.7 Transformator

Gerät um das Spannungs-/Stromstärkenverhältnis bei gleichbleibender Leistung zu verändern. Den Transformator haben wir bei uns nur verwendet, um einen Elektromotor anzutreiben, der wiederum den Stirlingmotor gedreht hat, um ihn als Kälte- oder Wärmemaschine zu verwenden. (Muskelkraft hat auch funktioniert, wie wir ausprobiert haben. Das wäre aber schnell anstrengend geworden)

1.8 Pyrometrie

Jeder Körper strahlt aufgrund seiner Wärme in einem bestimmten Frequenzspektrum elektromagnetische Wellen ab. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Spektrum in Richtung blau und die Intensität wird größer. Pyrometrie ist ein Verfahren um sehr hohe Temperaturen zu bestimmen, denn kein Quecksilberthermometer hält über 1000C° aus. Dazu vergleicht man das ausgestrahlte

Spektrum eines Glühdrahts mit dem zu messenden Objekt (in unserem Fall die Glühwendel der Heizung im Stirlingmotor). Zuerst eicht man, indem man bei einem schwarzen strahlenden Körper bekannter Temperatur die durch den Vergleichsdraht fließende Stromstärke aufschreibt, wenn entweder die Farbe oder die Strahlungsintensität des Drahtes und des schwarzen Strahlers gleich erscheinen (je nach Messmethode). Entsprechend misst man dann die Temperatur des zu messenden Objektes, bei welchem man evtl noch einen Korrekturfaktor, falls es kein schwarzer Strahler ist, berücksichtigen muss. In unserem Fall war nichts von dem allen nötig, weil der Pyrometer vom Hersteller geeicht wurde.

2 Versuch

2.1 Aufgabe (1), (2) Messung der Leistung des Heißluftmotors und der zugeführten Energie

Unter Anleitung des Betreuers den Motor in Gang setzen. Warten bis der Motor eingelaufen ist. Um die Welle des Schwungrads einen Kupferband spannen, die Spannung an Federwaagen messen um auf die Leistung schließen zu können. Messung der der Heizwicklung zugeführten Energie mit dem Wattmeter

Wenn die Kurbelwelle eine Umdrehungszahl U hat, dann bewegt sich die Oberfläche der Welle mit Radius r mit $v = U \cdot 2\pi \cdot r$ also ergibt sich eine Leistung von $v \cdot \Delta F_{Federwaagen} = 2U\pi r \Delta F$.

In unserem Fall ($r = 1,25cm$, $U = \frac{100}{60s}$, $\Delta F = (10 - 9,7)N$) ergibt sich also eine Leistung $P = 2 \frac{100}{60s} \cdot \pi \cdot 0,0125m \cdot 0,3N = 39,3mW$

Mit der hineingesteckten elektrischen Heizleistung von $P_{in} = 280W$ ergibt sich so ein Wirkungsgrad:

$$\eta_{Experiment} = \frac{P_{Stirling}}{P_{in}} = \frac{39,3mW}{280W} = 0,014\%$$

Vergleich mit dem theoretisch erreichbaren Wert:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \frac{1273K - 295K}{1273K} = 76,8\%$$

2.2 Aufgabe (3) Messung der Temperatur der Heizwicklung und der des Kühlwassers

Messung der Temperatur der Heizwicklung mit dem Pyrometer

Der Mittelwert der durchgeführten Messungen ergab eine Temperatur von etwa $1000^\circ C$

Messung der Temperatur des Kühlwassers mit Hg-Thermometer

$22,8^\circ C$

2.3 Aufgabe (4) Heißluftmotor als Kältemaschine

Man installiere den Heißluftmotor durch Anbringen eines Elektromotors als Kältemaschine. Gefrieren von 0,5 bis 1cm³ Wasser im Reagenzglas mit zugehörigem Flanscheinsatz

Der E-Motor wird mit größtmöglicher Umsetzung angeschlossen. Das Wasser gefriert nach etwa 3 Minuten.

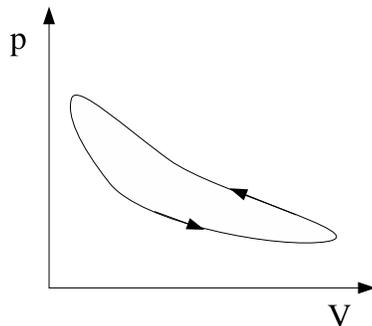
2.4 Aufgabe (5) Heißluftmotor als Wärmepumpe

Man betreibe den Heißluftmotor als Wärmepumpe. 0.5 bis 1cm³ Wasser im Reagenzglas zum Sieden bringen.

Das Wasser erreicht etwa 80°C.

2.5 Aufgabe (6) p-V-Diagramm

Demonstration des p-V-Diagramms mit dem p-V-Indikator



3 Fragen

3.1 Ermittlung des Wirkungsgrades aus dem p-V-Diagramm

Die vom p-V-Diagramm umschlossene Fläche entspricht der pro Zyklus eingesetzten Wärmeenergie. Ist nun der Kolbenhub (also die pro Zyklus gewonnene Energie) bekannt, lässt sich der Wirkungsgrad leicht berechnen. Dies setzt natürlich eine präzise Eichung beider Skalen des p-V-Diagramms voraus.

3.2 Umlaufrichtung durch das p-V Diagramm

Das p-V-Diagramm wird in beiden Fällen entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen.

Die Durchlaufrichtung ist gleich, obwohl die Achse in entgegengesetzter Richtung angetrieben wurde, da der Prozess die selben Phasen durchläuft. Die Änderung der Antriebsrichtung entspricht lediglich dem Vertauschen von Wärme-

und Kälte-Reservoir. (Da weder das Volumen noch der Druck von dieser Anordnung abhängen, hängt die Durchlaufrichtung des p-V-Diagramms nur zwar von der Durchlaufrichtung des Sterling-Prozesses, nicht jedoch von der Drehrichtung des Antriebs ab).

3.3 2. Hauptsatz der Wärmelehre und “Perpetuum Mobile zweiter Art”

Hat man einen Raum mit statistisch verteilten Teilchen A gefüllt, und verbindet ihn mit einem zweiten Raum, welcher mit Teilchen des Typs B gefüllt ist, so werden Teilchen aus dem einen Raum in den anderen diffundieren und umgekehrt, d.h. auf Dauer vermischen sich die Teilchen beider Sorten, sprich die Entropie nimmt zu. Da die Teilchen sich zufällig bewegen ist es zwar möglich, dass sich die Teilchen zufällig wieder entmischen, aber die Wahrscheinlichkeit dafür ist nahe Null. Sieht man die statistische Bewegung der Teilchen als Entropie an, so lässt sich der 2. Hauptsatz der Wärmelehre wie folgt definieren:

Ein System geht nie von selbst in einen bedeutend unwahrscheinlicheren Zustand über, d.h. seine Entropie nimmt nie mehr als kleine statistische Fluktuationen ab.

Damit ist auch das Perpetuum Mobile der 2. Art widerlegt. (Das Perpetuum Mobile 1. Art erzeugt Energie von sich heraus, ohne irgendetwas in der Umgebung zu ändern.) Das Perpetuum Mobile 2. Art, nutzt einen warmen Körper, entzieht ihm Wärme und setzt diese in Arbeit um. Da aber so ein unwahrscheinlicherer Zustand erzeugt wird, ist auch dies nicht möglich.

4 Quellen

- <http://de.wikipedia.org> (4 Phasenbilder des Stirlingmotors)
- <http://www1.physik.uni-greifswald.de/lehre/thermodynamik/carnot-prozess.pdf> (Schema des Carnot-Prozesses, leicht verändert)
- Das Neue Physikalische Grundpraktikum von Echler, Kronfeldt, Sahn