

Versuch B 3: Heißluftmotor

1. Literatur: Gerthsen- Kneser-Vogel, Physik
Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Physik, Bd.I

Stichworte: Hauptsätze der Thermodynamik, Gasgesetze, Energieumwandlungen, Kreisprozesse, Wirkungsgrad, Wärmekraftmaschine, Wärmepumpe, Kältemaschine

2. Grundlagen

2.1 Wärmekraftmaschine, Stirling-Kreisprozess

Zur Erläuterung der energetischen Prozesse in Wärmekraftmaschinen wird ein Gas betrachtet, das sich unter dem Druck p in einer Kammer mit Volumen V befindet, welches durch Verschieben eines Kolbens variiert werden kann. Führt man dem Gas von außen die Wärme ΔQ zu, so erhöht sich nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz)

$$\Delta Q = dU + p dV \quad (1)$$

seine innere Energie U und damit seine Temperatur. Zusätzlich kann das Gas durch die Vergrößerung seines Volumens die mechanische Arbeit $dW = p dV$ am Kolben verrichten.^{*)} Ist das Gas bei der Expansion an ein Wärmereservoir konstanter Temperatur gekoppelt, bleibt die innere Energie ungeändert und die zugeführte Wärme wird vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt (isotherme Expansion).

Auf der Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Arbeit durch Expansion eines Gases beruht das Wirkungsprinzip von Wärmekraftmaschinen. Für den Betrieb einer Wärmekraftmaschine ist es zweckmäßig, einen Kreisprozess zu durchlaufen, d.h. das Gas nach der Expansion durch Kompression in seinen Ausgangszustand zurückzubringen. Dies geschieht bei geringerer Temperatur und somit geringeren Drucken als bei der Expansion. Auf diese Weise muss lediglich nur ein Teil der bei der Expansion erzeugten mechanischen Energie zur Kompression an das Gas zurückgeführt werden.

Die nach der Dampfmaschine älteste Wärmekraftmaschine stellt der von R. Stirling 1816 entwickelte Heißgas- oder *Stirling*-Motor dar. Obwohl die Verbrennungsmaschinen Otto- und Dieselmotor einen höheren thermischen Wirkungs-

*) Die am Gas verrichtete mechanische Arbeit ist entsprechend $dW = - p dV$.

grad (s.u.) besitzen, werden Stirling-Maschinen heute bevorzugt bei der umweltfreundlichen Bereitstellung von Arbeit und elektrischer Energie aber auch bei der Erzeugung tiefer Temperaturen zur Verflüssigung von Gasen eingesetzt.

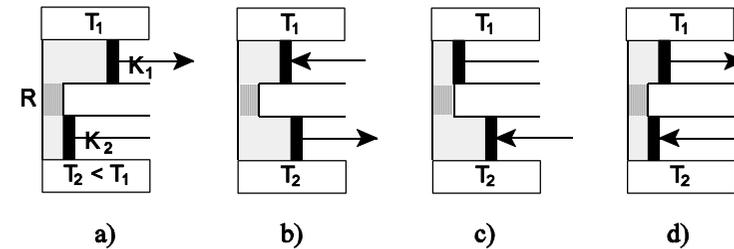


Abb. 1: Arbeitsschritte der Stirling-Maschine schematisch: T_1, T_2 Wärmereservoirs, K_1, K_2 bewegliche Kolben, R Regenerator (Wärmespeicher); a) isotherme Expansion, b) isochore Abkühlung, c) isotherme Kompression, d) isochore Erwärmung

Den prinzipiellen Aufbau des Stirlingmotors und seine Arbeitsschritte zeigt Abb.1 schematisch. Das Gas (Luft oder Inertgas) befindet sich abwechselnd in einem der beiden Teilvolumina, die mit Wärmereservoirs der Temperaturen T_1 und T_2 verbunden sind und mittels beweglicher über eine Kurbelwelle gesteuerter Kolben K_1, K_2 variiert werden. Die Gasvolumina sind über den Regenerator R verbunden, der eine große Grenzfläche zum Gas besitzt und bei Durchströmung Wärme aufnimmt oder abgibt, also als Wärmespeicher dient.

Im ersten Arbeitsschritt a) befindet sich das Gas im oberen Teilvolumen, hat die Temperatur T_1 und dehnt sich unter Energieaufnahme aus dem Reservoir aus, wobei es am Kolben K_1 mechanische Arbeit leistet (isotherme Expansion). Im zweiten Schritt b) wird es vom oberen Volumen durch den Regenerator in das untere gedrückt, wobei es an diesen Wärme abgibt und sich auf die Temperatur T_2 abkühlt. Das Gasvolumen ändert sich hierbei nicht (isochore Abkühlung). Im dritten Schritt c) wird das Gas bei der Temperatur T_2 unter äußerer Arbeitsleistung des Kolbens K_2 komprimiert, wobei es Wärme an das Reservoir abgibt (isotherme Kompression). Im vierten Schritt d) schließlich wird das Gas wieder durch den Regenerator in das obere Teilvolumen gedrückt, wobei es die gespeicherte Wärme aufnimmt und sich auf die Temperatur T_1 erwärmt. Auch hierbei ändert sich das Gasvolumen nicht (isochore Erwärmung).

Abb. 2 zeigt das $p(V)$ -Diagramm des Stirling-Kreisprozesses. Das linke Teilbild gibt die ideale, reversible Zustandsänderung des Gases wieder, die entlang der

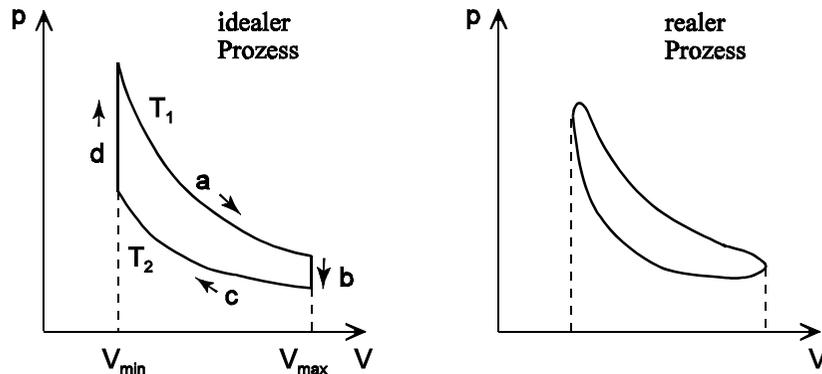


Abb. 2: p(V)-Diagramm des Stirling-Kreisprozesses: links für idealen, rechts für realen Prozess. Die schraffierte Fläche gibt die pro Umlauf von der Maschine geleistete mechanische Arbeit an.

Isothermen T_1 und T_2 sowie der Isochoren V_{\max} und V_{\min} verläuft. Der im Versuch benutzte Heißluftmotor durchläuft einen Kreisprozess, dessen reale Zustandsänderung durch ein pV-Diagramm wie im rechten Teilbild gezeigt beschrieben wird. Eine solche Zustandsänderung folgt hauptsächlich aus der kontinuierlichen Bewegung der Kolben (s.u.) jedoch auch aus dem unvollkommenen Temperaturausgleich zwischen Gas und Wärmebädern beim schnellen Durchlaufen des Prozesses und der mangelhaften Speicherung thermischer Energie im Regenerator.

Zur Bestimmung der im Kreisprozess übertragenen bzw. umgewandelten Energiemengen betrachten wir zunächst den idealen Stirling-Prozess: Die im Schritt a) dem Wärmereservoir der Temperatur T_1 entnommene Wärmemenge Q_1 ist mit Gl. (1) gleich der von der Maschine geleisteten Expansionsarbeit W_1' .

$$Q_1 = W_1' = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} p(T_1, V) dV \quad (2)$$

Sie ist durch die in Abb. 2 zwischen der Isothermen T_1 und der Abszisse V liegenden Fläche gegeben. Entsprechend ist die im Schritt c) an das Wärmereservoir der Temperatur T_2 abgegebene Wärmemenge $|Q_2|$ ($Q_2 < 0$) gleich der Kompressionsarbeit $|W_2'|$ ($W_2' < 0$)

$$Q_2 = W_2' = \int_{V_{\max}}^{V_{\min}} p(T_2, V) dV \quad (3)$$

Sie entspricht der unter der Isothermen T_2 liegenden Fläche. Während der beiden isochoren Prozesse b) und d) wird keine mechanische Arbeit verrichtet, lediglich die Wärmemenge

$$Q_3 = m c_v (T_1 - T_2) \quad (4)$$

zwischen dem Gas (Wärmekapazität $m c_v$) und dem Regenerator zur Abkühlung bzw. Erwärmung ausgetauscht. Die bei einem Umlauf von der Maschine verrichtete mechanische Arbeit ist mit Gln. (2) u. (3)

$$W' = W_1' + W_2' = \oint p dV = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} (p(T_1, V) - p(T_2, V)) dV \quad (5)$$

Sie entspricht der in Abb. 2 schraffierten Fläche und kann aus dem p(V)-Diagramm ermittelt werden, unabhängig davon ob es sich um einen idealen, reversiblen oder realen, irreversiblen Kreisprozess handelt.

Der *thermodynamische Wirkungsgrad* η_{st} des Stirling-Kreisprozesses gibt das Zahlenverhältnis von verrichteter mechanischer Arbeit W' des Gases zu aufgenommener Wärmemenge Q_1 an:

$$\eta_{st} = \frac{W'}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{\int p(T_2) dV}{\int p(T_1) dV} \quad (6)$$

η_{st} ist stets kleiner als 1. Für das ideale Gas (wechselwirkungsfreie, punktförmige Molekel) mit der Zustandsgleichung $pV = \nu RT$ (ν = Molzahl, R = Gaskonstante, T = Temperatur in Kelvin) ergibt sich durch Einsetzen in Gl. (6) der *maximale* thermodynamische Wirkungsgrad η_{\max} des Stirlingprozesses zu

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (7)$$

Der max. Wirkungsgrad η_{\max} hängt nur vom Verhältnis der Temperaturen der Wärmebäder ab. Dies gilt bei reversiblen Kreisprozessen nach dem zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik für beliebige Arbeitssubstanzen. (Vergl.auch: Wirkungsgrad des *Carnot-Kreisprozesses*).

Von technischer Bedeutung für die Leistung einer Wärmekraftmaschine ist der *Gesamtwirkungsgrad* η_g , der das Verhältnis von nutzbarer, z.B. an der Antriebswelle verfügbarer mechanischer Energie zu insgesamt verbrauchter Primärenergie angibt. Infolge von Verlusten ist der Gesamtwirkungsgrad stets kleiner als der thermodynamische Wirkungsgrad (s. Kap.4).

2.2 Kältemaschine, Wärmepumpe

Beim Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine wird wie oben beschrieben Wärme einem Reservoir mit der Temperatur T_1 entnommen, ein Teil davon in mechanische Energie umgewandelt, der Rest an ein weiteres Reservoir mit der Temperatur $T_2 < T_1$ abgegeben. Sind die Temperaturen T_1 und T_2 gleich, d.h. wird die Heizung des einen Reservoirs und die Kühlung des anderen dauerhaft unterbunden, bleibt die Maschine stehen, da für die Erzeugung mechanischer Energie aus Wärme ein Temperaturgefälle nötig ist.

Wird die Maschine jedoch extern, z.B. mit einem Elektromotor über die Kurbelwelle im gleichen Drehsinn angetrieben, so wird bei jeder Expansion des Gases Wärme dem Reservoir mit der Temperatur T_1 entzogen, T_1 sinkt unterhalb T_2 . Die Maschine arbeitet als *Kältemaschine* oder *Wärmepumpe*, je nachdem ob die Abkühlung des einen oder Erwärmung des anderen Reservoirs betrachtet bzw. ausgenutzt wird. Da nun $T_1 < T_2$ ist, gilt für den Kreisprozess qualitativ das gleiche p(V)-Diagramm wie das in Abb. 2 gezeigte, lediglich der Umlaufsinn ist umgekehrt. Die Fläche im p(V)-Diagramm entspricht der vom Elektromotor pro Umlauf am Gas verrichteten Arbeit $W = -W'$.

Wird der Heißluftmotor extern im umgekehrten Drehsinn angetrieben, so wird Wärme dem Reservoir mit der Temperatur T_1 zugeführt, T_1 steigt. Wiederum gilt das gleiche p(V)-Diagramm wie bei der Wärmekraftmaschine, lediglich der Umlaufsinn und damit der Wärmetransport ist umgekehrt. Das Verhältnis von abgegebener Wärme $|Q_1|$ ($Q_1 < 0$) zu verrichteter Arbeit W gibt die *Leistungszahl* ε_w der Wärmepumpe an:

$$\varepsilon_w = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} = \frac{1}{\eta_{st}} \approx \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1 \quad (8)$$

Bei einer Wärmepumpe wird mehr Wärme abgegeben als mechanische Arbeit geleistet, da zusätzlich einem Wärmereservoir Wärme entzogen wird. Man beachte den Unterschied zur gewöhnlichen Heizung, bei der chemische oder elektrische Energie lediglich in Wärme umgewandelt wird.

Wird wie im vorliegenden Versuch der Heißluftmotor so betrieben, dass das Reservoir mit der höheren Temperatur T_1 gekühlt wird, so gilt für die *Leistungszahl* ε_K dieser Kältemaschine $\varepsilon_K = \varepsilon_w$ gem. Gl. (8). Werden wie üblich mit einer Kältemaschine tiefe Temperaturen erzeugt, ist jedoch mit der Festlegung, dass mit T_1 jeweils die hohe, mit T_2 die tiefe Temperatur gemeint ist:

$$\varepsilon_K = \frac{Q_2}{W} = \frac{|Q_1| - W}{W} = \frac{1}{\eta_{st}} - 1 \approx \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (9)$$

In beiden Fällen sind die Leistungszahlen um so größer, d.h. wird Wärme um so effizienter transportiert, je geringer das Temperaturgefälle $T_1 - T_2$ ist.

3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Betriebsdaten des Heißluftmotors als Wärmekraftmaschine bei verschiedener elektrischer Heizleistung im Leerlauf.
- 2. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Betriebsdaten des Heißluftmotors als Wärmekraftmaschine bei verschiedener mechanischer Last und konstanter elektrischer Heizleistung.
- 3. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Reibungsverluste des Heißluftmotors ohne Kompression bei Antrieb durch einen Elektromotor.
- 4. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Kühlleistung des Heißluftmotors im Betrieb als Kältemaschine bei Raumtemperatur.

4. Versuchsaufbau

Abb. 3 zeigt den im Versuch benutzten Heißluftmotor im Längsschnitt: Der Motor besteht aus einem Glaszylinder, in dessen oberes geschlossenes Ende, den Zylinderkopf eine elektrisch beheizte Glühwendel hineinragt und der im unteren Bereich von einem wasserdurchflossenen Kühlmantel umgeben ist.

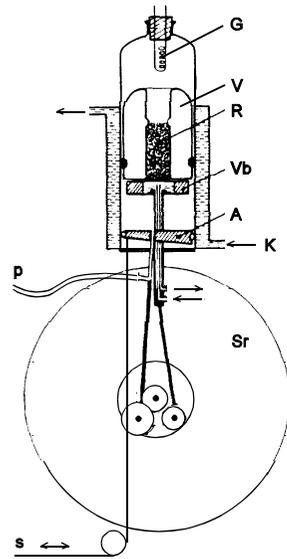


Abb.3:

Heißluftmotor
im Längsschnitt:

- G Glühwendel
- V Verdränger
- R Regenerator
- Vb Verdrängerboden
- A Arbeitskolben
- K Kühlwasser
- Sr Schwungrad
- p Druckmessung
- s Wegmessung

Das untere Ende des Zylinders wird vom Arbeitskolben abgeschlossen, dessen Pleuel exzentrisch an der Welle des Schwungrades montiert ist. Die vertikale Position s des Kolbens wird über einen Seilzug von einem Wegaufnehmer bestimmt. An einer Bohrung im Kolben wird über einen Schlauch der Druck p im Zylinder mit einem Druckaufnehmer gemessen. Zwischen Zylinderkopf und Arbeitskolben befindet sich der Verdrängerkolben mit wassergekühltem Boden, dessen Pleuel durch den Arbeitskolben hindurch ebenfalls exzentrisch mit der Welle des Schwungrades verbunden ist. Im axial mittig gelegenen Längskanal des Verdrängers befindet sich der aus Kupferwolle bestehende Regenerator. Bei der Auf- bzw. Abwärtsbewegung des Verdrängers wird das Gas durch den Regenerator hindurch von der warmen zur kalten bzw. von der kalten zur warmen Seite des Zylinders transportiert.

Im Versuch werden zwei Heißluftmotoren eingesetzt. Aufbau I dient zur Aufnahme mechanischer Betriebsdaten eines Motors als Wärmekraftmaschine im Leerlauf (1. Aufgabe) sowie unter Last (2. Aufgabe). Im Aufbau II wird der andere Motor über einen Riemen am Schwungrad von einem regelbaren Elektromotor angetrieben. Je nach Drehrichtung arbeitet der Motor entweder als Wärmepumpe oder Kältemaschine (4. Aufgabe), d.h. der Zylinderkopf (Temperatur T_1) wird über das Gas geheizt oder gekühlt. Hier werden kalorische Betriebsdaten ermittelt. Aufgabe des Versuchs ist die Bestimmung der vom Motor in der jeweiligen Betriebsart umgesetzten Energiemengen bzw. Leistungen sowie entsprechender Wirkungsgrade.

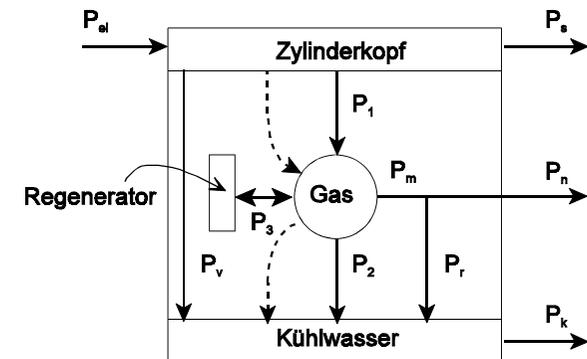


Abb. 4: Energieflussschema des Heißluftmotors

Abb. 4 zeigt das Energiefluss- bzw Leistungsschema des Heißluftmotors als Wärmekraftmaschine. In dieser Betriebsart stellt die elektrische Leistung P_{el} der Glühwendel im Zylinderkopf den Energieinput dar. Er wird durch die Messung von Spannung und Strom bestimmt. Ein großer Teil von P_{el} geht unmittelbar als Strahlungsleistung P_s an die Umgebung verloren (Glühbirne!), ein weiterer durch Wärmeleitung bzw. Wärmestrahlung P_v im Motor an das Kühlwasser. Diese Verluste werden durch den Wirkungsgrad η_{el} beschrieben:

$$\eta_{el} = \frac{P_1}{P_{el}} = \frac{n Q_1}{UI} \quad (10)$$

Die dem Gas im Kreisprozess bei der Expansion zugeführte (zeitlich gemittelte) Leistung $P_1 = nQ_1$ wird mit Gl. (2) aus dem $p(V)$ - bzw. $p(s)$ -Diagramm berechnet,

ebenso die vom Gas bei der Kompression an das Kühlwasser abgegebene Leistung $P_2 = nQ_2$ mit Gl. (3). Hieraus kann mit Gl.(6) der thermodynamische Wirkungsgrad $\eta_{st} = P_m / P_1$ bestimmt werden. Die Aufnahme und Auswertung des p(s)-Diagramms geschieht im Aufbau I mit den oben erwähnten Messaufnehmern und einem angeschlossenen PC (s.u.). Die Drehzahl n des Motors wird mit einem am Schwungrad montierten Drehzahlmesser gemessen.

Die mit dem Regenerator ausgetauschte Leistung P_3 bleibt unbestimmt, sie ist im zeitlichen Mittel Null. In der Praxis ist die ausgetauschte Wärme vom Betrag geringer als in Gl. (4) angegeben. Dies hat einen zusätzlichen Wärmestrom vom Zylinderkopf zum Kühlwasser für das Aufwärmen bzw. Abkühlen des Gases zur Folge, der hier ebenfalls unbestimmt bleibt (gestrichelte Pfeillinien in Abb. 4).

Die vom Gas an den Arbeitskolben abgegebene mechanische Leistung $P_m = P_1 - P_2$ geht zum Teil im Reibungsverlust P_r der Kolben und im geringeren Maße des Wellenlagers verloren, d.h. als Wärme ebenfalls ins Kühlwasser. Der andere Teil steht als mechanische Nutzleistung P_n an der Welle zur Verfügung. Die Reibungsverluste werden durch den Wirkungsgrad η_{mech} beschrieben:

$$\eta_{mech} = \frac{P_n}{P_m} = \frac{P_m - P_r}{P_m} \quad (11)$$

Im Leerlaufbetrieb ($P_n = 0$, $P_r = P_m = P_1 - P_2$) wird die drehzahlabhängige Verlustleistung P_r aus dem p(V)-Diagramm ermittelt. Bei Betrieb unter Last ($P_m = P_n + P_r$) wird die Nutzleistung P_n durch Abbremsen der Welle mittels eines verstellbaren Holzsaums bestimmt (s. Abb. 5).

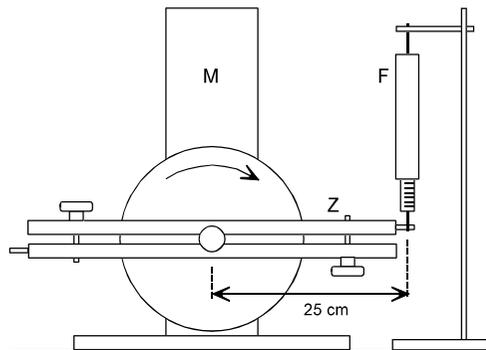


Abb. 5:
Anordnung zur Bestimmung der Bremsleistung P_n
M Motor
Z Zaum
F Federwaage

Die eingestellte Bremsarbeit W_n pro Umlauf ergibt sich aus der Kraft F und der Länge $l = 25\text{cm}$ des Zaums von der Welle bis zur Federwaage, die Bremsleistung P_n aus W_n und der Drehzahl n.

$$P_n = W_n n = 2 \pi n F l \quad (12)$$

Mit Gl. (3), (10) u. (11) ist der Gesamtwirkungsgrad η_g der Wärmekraftmaschine:

$$\eta_g = \frac{P_n}{P_{el}} = \eta_{el} \eta_{st} \eta_{mech} \quad (13)$$

Im Aufbau II wird die mit dem Kühlwasser abgeführte Wärmeleistung P_k bei Betrieb des Motors ohne Kompression (3. Aufgabe) und als Kältemaschine (4. Aufgabe) aus dem Anstieg ΔT_2 der Kühlwassertemperatur beim Betrieb des Motors im Vergleich zum Stillstand ermittelt:

$$P_k = c_w \rho_w \frac{\Delta V}{\Delta t} \Delta T_2 \quad (14)$$

Hierbei ist $c_w = 4,1868 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ die spez. Wärmekapazität und $\rho_w \approx 1 \text{ g cm}^{-3}$ die Dichte des Wassers. Der Kühlwasserfluss $\Delta V/\Delta t$ wird durch die Messung der Füllzeit eines Behälters im Wasserauslauf bestimmt, die Temperatur T_2 mit einem Thermometer unmittelbar am Motor im Ablauf des Kühlwassers. Wird der ungeheizte Motor bei geöffnetem Zylinderkopf und Druckschlauchanschluss, d.h. ohne Kompression mit dem Elektromotor angetrieben, sollte gelten: $P_k \approx P_r$.

Die Kühlleistung P_1 des Motors als Kältemaschine wird bestimmt, indem durch Strom- und Spannungsmessung die Heizleistung P_{el} ermittelt wird, welche nötig ist, um die Temperatur T_1 des Zylinderkopfes bei Raumtemperatur (20°C) zu halten. Gleichzeitig wird die Kühlwassertemperatur T_2 gemessen und mit Gl. (14) die Kühlwasserleistung P_k bestimmt (4. Aufgabe). Mit dem Ergebnis für P_r der 3. Aufgabe wird die Leistungszahl der Kältemaschine berechnet:

$$\epsilon_k = \frac{P_1}{|P_m|} = \frac{P_{el}}{P_2 - P_{el}} = \frac{P_{el}}{P_k - P_r - P_{el}} \quad (15)$$

5. Versuchsdurchführung

Zu Beginn der Versuche werden zuerst die Kühlwasserhähne für beide Motoren geöffnet (1/4 Umdrehung) sowie alle Messgeräte und der PC mit Drucker eingeschaltet, ebenso die für die Zylinderkopfheizungen vorgesehenen Netzgeräte. Deren Spannungsausgänge bleiben vorerst auf Null gestellt. Aufbau I (Wärmekeftmaschine) kann mit max. 300 W (ca. 17V~, 17A) über einen Transformator mit vorgeschaltetem Regeltransformator beheizt werden. Aufbau II (Wärmepumpe bzw. Kältemaschine) wird über ein Netzgerät lediglich zur Bestimmung der Kühlleistung am Zylinderkopf beheizt (ca. 8V~, 2A).

5.1 Wärmekeftmaschine im Leerlauf

Zunächst wird das zur Aufnahme der p(s)-Diagramme benutzte Programm *Messen und Auswerten* mit dem Befehl C:\cassy\lh.exe geladen, im darauf angezeigten Menü das Unterprogramm *XY-Schreiber*.

Das Programm *XY-Schreiber* ist menügeführt und wird im wesentlichen gesteuert durch die Cursor-Tasten (Auswahl von Menüpunkten), die Return-Taste (Aktivierung eines Menüpunktes bzw. Bestätigung der Eingabe von Parametern etc.), die Esc-Taste (Verlassen einer Menüebene bzw. Bildschirmgrafik, Abbrechen einer Eingabe oder Messung, Rücksetzung einer Fehlermeldung) sowie die Funktionstasten F1 - F10 (vor allem für Befehle im Grafikmodus des Bildschirms).

Ist der Menübildschirm von *XY-Schreiber* gewählt, stehen im **Kopfbereich** alle wichtigen Parameter des laufenden Messprogramms bzw. der aktuell erstellten oder geladenen Messdatei. Im **Hauptmenü** ist zu Beginn auszuführen nach:

Messgrößen auswählen:

Kanal A neu wählen: Wegaufnehmer

Kanal D neu wählen: Drucksensor

Messbereiche auswählen:

Bereich A neu wählen: 0 - 15cm

Bereich D neu wählen: Bereich teilen 0 - 2000 hPa (0 - $2 \times 10^5 \text{Nm}^{-2}$)

Dann wird mit dem Regeltrafo die Spannung der Zylinderkopfheizung auf ca. 16V eingestellt. Wenn die Glühwendel zu leuchten beginnt, wird der Motor am Schwungrad kurz und kräftig mit der Hand im Uhrzeigersinn angeworfen. Zur Sicherheit ist von der studentischen Hilfskraft Hilfestellung zu leisten. Sollte der Motor nicht von allein weiterlaufen, ist das Anwerfen unmittelbar zu wiederholen, anderenfalls die Heizung sofort abzustellen (Regeltrafo auf Null). **Auf keinen**

Fall darf der Zylinderkopf länger als einige Sekunden bei Rotglut im Stand beheizt werden, da sonst innerhalb kürzester Zeit der Motor überhitzt und zerstört wird! Lläuft der Motor von allein, sollte er ca. 5 min. einlaufen, wobei er eine Drehzahl von mindestens $n = 7 \text{ s}^{-1}$ erreichen sollte ($n(\text{s}^{-1}) = \text{Anzeige} \times 0.1$). Darauf ist Heizspannung auf ca. 10V zu reduzieren.

Die Messungen sind bei Heizspannungen von ca. 10V, 12,5V u. 15V durchzuführen. Nach jeder Spannungseinstellung ist ca. 5 min. zu warten, bis sich das Temperaturgleichgewicht neu eingestellt hat. Gegebenenfalls kann diese Zeit zur Auswertung bereits aufgenommener p(s)-Diagramme (s.u.) genutzt werden.

Für jede eingestellte Spannung werden jeweils notiert bzw. gespeichert: lfd. Nr., Heizspannung und -strom, Drehzahl, das p(s)-Diagramm sowie der Filename der gespeicherten Daten.

Nach Aktivierung von *Messung aufnehmen* erscheint der Grafik-Bildschirm mit p(s)-Diagramm. Mit *F1* werden 2270 Messwerte gespeichert. Falls die Aufnahme nicht in Ordnung ist, wiederholen! Danach unter

Darstellung auswählen:

<i>Option wählen:</i>	Skalierung merken	abschalten
	Achsen optimieren	einschalten.

Falls nach *Grafisch auswerten* das gezeigte p(s)-Diagramm in Ordnung ist, die Messdaten speichern mit:

Diskettenoperation:

Messdaten speichern: Filename: [Gruppennr.] [Aufgabennr.] [lfd. Nr.]
(z.B.: 10513)

Die unmittelbare Auswertung der p(s)-Messdaten kann entweder nach jeder Einzelmessung oder im Anschluss an alle Messungen der 1. u. 2. Aufgabe geschehen. Hierfür, falls die auszuwertende Grafik nicht schon auf dem Bildschirm ist, mit der Menüauswahl

Diskettenoperation:

Messdaten laden: Filename auswählen

Grafisch auswerten:

die Daten auf dem Bildschirm darstellen. Darauf ist für jedes Diagramm mit

<i>F9</i>	der Cursor zu holen (oder zu löschen),
<i>shift TAB</i>	der Cursor an den oberen linken Punkt des Diagramms zu bringen,
<i>ctrl ←</i>	der Bereichsanfang zu setzen,

TAB der Cursor an den unteren rechten Punkt des Diagramms zu bringen,
ctrl → das Bereichsende zu setzen,
F5 der Bereich zu integrieren,
alt F5 der Wert $\int_1 pds$ anzuzeigen und zu notieren, z.B. 3300 hPacm,
F5, F9 der Cursor rechts unten zu positionieren,
ctrl ← der Bereichsanfang zu setzen,
TAB der Cursor an den oberen linken Punkt des Diagramms zu bringen,
ctrl → das Bereichsende zu setzen,
F5 der Bereich zu integrieren,
alt F5 der Wert $\int_2 pds$ anzuzeigen und zu notieren, z.B. -2200 hPacm.

Am Schluss ist mit *Druck* ein neu geladenes typisches p(s)-Diagramm für das Protokoll auszudrucken.

5.2 Wärmekraftmaschine unter Last

Die Heizung des laufenden Motors bleibt auf ca. 15V eingestellt. Danach wird wie in Abb. 5 angedeutet der Holzsaum auf die Welle des Motors aufgeschoben und durch vorsichtiges Verdrehen der Knebelschrauben so angezogen, dass nur eine minimale Reibung entsteht und die an einer Seite angehängte Federwaage (max. 5N) eine Kraft zwischen 0,1 und 0,2 N anzeigt. Nach 2 min. Wartezeit, der Drehzahlmessung und Aufnahme eines p(s)-Diagramms wird eine Bremskraft von ca. 0,6N, danach von 1,2N eingestellt und die Messung jeweils wiederholt. Bei großer Bremskraft, d.h. geringer Drehzahl n ist die Drehung recht ungleichmäßig, so dass der Zaum evtl. zu schwingen beginnt. In diesem Fall ist der Zaum zunächst an der Waage festzuhalten und nach dem Loslassen die Kraft an der Federwaage möglichst schnell abzulesen oder der zeitliche Mittelwert zu schätzen. Am Schluss der Messungen ist die Heizung abzustellen und der Zaum vom Motor abzunehmen.

5.3 Reibungsverluste des Motors

Die Reibungsverluste P_r des Motors im Aufbau II werden aus dem Anstieg der Kühlwassertemperatur T_2 , d.h. aus der Kühlwasserleistung P_k bei Betrieb ohne Kompression mit Elektromotorantrieb ermittelt. Da T_2 sich nur wenig ($<1^\circ\text{C}$) ändert, wird zur Steigerung der Empfindlichkeit der Messung der Kühlwasserfluss durch Zudrehen des Wasserhahns auf 1/8 Umdrehung reduziert. Beobachten Sie den zeitlichen Verlauf der Temperatur T_2 vor Beginn des Versuchs! Gegebenenfalls ist im Vorlauf der Wasserhahn zum Becken zu öffnen, um in der Leitung stehendes erwärmtes Wasser zu entfernen. T_2 sollte sich vor dem Versuch nicht mehr ändern.

Lösen Sie die Flügelmuttern des Dichtflansches am Zylinderkopf des Motors und entfernen Sie vorsichtig den Flansch samt Heizung und Thermometer T_1 . Legen sie den Flansch so ab, dass er nicht auf der Heizwendel liegt. Ziehen Sie den Gummistopfen am Druckschlauchanschluss ab, so dass der Motor nun praktisch kompressionslos ist. Im folgenden Vor-, Haupt- und Nachversuch wird die Temperatur T_2 des Kühlwassers jede Minute notiert.

Im Vorversuch wird T_2 über ca. 5 min. bei Stillstand des Motors registriert. Im anschließenden Hauptversuch wird der zeitliche Verlauf von T_2 über 10 min. bei eingeschaltetem Elektromotor ermittelt. Der Motorregler ist auf die Drehzahl $n = 3.5 \text{ s}^{-1}$ im Rechtslauf einzustellen. Gegen Ende dieses Versuchsteils sollte sich T_2 zeitlich nicht mehr bzw. kaum noch ändern, T_2 also einen neuen Gleichgewichtswert nahezu erreicht haben. Im darauf folgenden Nachversuch wird wieder bei Stillstand des Motors der zeitliche Verlauf von T_2 über 10 min. registriert. Am Schluss sollte T_2 in etwa wieder den im Vorversuch registrierten Wert angenommen haben.

Der mit Gl. (14) für die Berechnung der Kühlwasserleistung $P_k = P_r$ benötigte Wert für den Kühlwasserfluss wird gegen Ende des Nachversuchs oder unmittelbar danach durch die Messung der Füllzeit eines 11-Erlemeyerkolbens am Auslauf im Waschbecken ermittelt.

5.4 Kühlleistung des Motors

Zunächst wird der Kühlwasserfluss wieder erhöht (1/4 Umdrehung) dann der Zylinderkopf-Flansch aufgesetzt und in der ursprünglichen Position mit den Flügelmuttern gleichmäßig handfest angeschraubt, danach der Gummistopfen am Druckschlauchanschluss aufgesteckt. Es werden die Heizleitungen mit Netzgerät und Geräten zur Strom- und Spannungsmessung angeschlossen.

Der Versuch wird in den Zeitintervallen 5 min. Vor-, 20 min. Haupt- und 10 min. Nachversuch durchgeführt. Es werden die Zylinderkopftemperatur T_1 und die Kühlwassertemperatur T_2 jede Minute registriert, zusätzlich im Hauptversuch Heizspannung und -strom des Zylinderkopfes. Beachten Sie auch hier, dass T_1 u. T_2 im Vorversuch zeitlich nahezu konstant sein sollen!

Nach dem Vorversuch wird im Hauptversuch **zuerst** der Elektromotor im Rechtslauf eingeschaltet und die Drehzahl auf $n = 3.5 \text{ s}^{-1}$ eingestellt. Unmittelbar **danach** ist die Heizspannung für die ersten 10 min. auf ca. 8.5V einzustellen, für die folgenden auf ca. 8.0V. Notieren Sie neben T_1 und T_2 die eingestellten Heizdaten im Minutenabstand und regeln Sie falls nötig die Drehzahl auf den Sollwert nach. Schalten Sie am Ende des Hauptversuchs **zuerst** die Heizspannung

ab, unmittelbar **danach** den Elektromotor! Nach Beenden des Nachversuchs ist wie zuvor der Kühlwasserfluss zu messen.

6. Auswertung und Diskussion

1. u. 2. Aufgabe

Zunächst sind zu den aus den p(s)-Diagrammen ermittelten Integralen $\int_{1,2} p ds$ die Integrale $\pm \int p_0 ds = \pm p_0 \Delta s$ zu addieren, da lediglich der Druck p über dem Normaldruck p_0 gemessen wird. Die Energien W_1' bzw. W_2' erhält man durch Multiplikation mit dem Kolbenquerschnitt des Motors, die entsprechenden Leistungen durch anschließende Multiplikation mit der Drehzahl n:

$$P_{1,2} = n W'_{1,2} = n A_M \left[\int_{1,2} p ds \pm p_0 \Delta s \right] \quad (16)$$

Hier ist $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ der Normaldruck, $\Delta s = 4.9 \text{ cm}$ der Hub und $A_M = 2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ die Querschnittsfläche des Arbeitskolbens.

Tragen Sie die Werte $W' = W_1' + W_2'$ sowie W_n für die vom Gas pro Umlauf geleistete mech. Arbeit bzw. Nutzarbeit über n^2 auf und diskutieren Sie den Verlauf. Ermitteln Sie mit einer Ausgleichsgeraden $W_r(n) = W_0 + an^2$ die Abhängigkeit der Reibungsarbeit W_r von der Drehzahl n. Wieso ist W_r drehzahlabhängig? Vergleichen Sie für die Messungen unter Last die mit Gl. (12) ermittelten Werte für W_n mit solchen aus $W' - W_r(n)$ berechneten.

Bestimmen Sie für alle Messungen die Leistungen P_{el} , P_1 , P_m , P_n sowie die entsprechenden Wirkungsgrade η_{el} , η_{St} , η_{mech} und η_g . Tragen Sie in zwei Diagrammen die Leistungen P_m und P_n sowie die Wirkungsgrade η_{St} , $\eta_{el} \times \eta_{St}$ und η_g über der Drehzahl n auf und diskutieren Sie den Verlauf. Gibt es bei vorgegebener Heizleistung des Motors eine mech. Last, bei welcher der Gesamtwirkungsgrad η_g jeweils maximal wird? Welche Maßnahmen sind geeignet, die einzelnen Wirkungsgrade des Motors zu erhöhen?

3. u. 4. Aufgabe

Tragen sie zur Auswertung der 3. Aufgabe die Temperatur T_2 (Teilung 0.1 C) für Vor-, Haupt- und Nachversuch über der Zeit t auf. Ermitteln Sie grafisch aus dem Diagramm ΔT_2 als größte Differenz der Gleichgewichtstemperatur zur Basistemperatur im Hauptversuch. Die Basistemperatur wird durch Interpolation von T_2 im Vor- und Nachversuch bestimmt. Berechnen Sie mit Gl. (14) die

Kühlwasserleistung und damit die Leistung P_r infolge der Motorreibung. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Ergebnis der 1. Aufgabe $P_r(n)$.

Tragen Sie die aus den Messwerten der 4. Aufgabe berechnete elektrische Heizleistung P_{el} sowie die Temperaturen T_1 und T_2 übereinander jeweils als Funktion der gesamten Messzeit t auf. Bestimmen Sie für den Hauptversuch grafisch zwei zeitl. gemittelte Temperaturen T_1 u. entsprechende Kühlleistungen $P_1 = P_{el}$. Die mittlere Kühlleistung P_1 für $T_1 = 20\text{C}$ ist durch lineare Interpolation aus diesen Werten zu berechnen. Diskutieren sie den zeitlichen Verlauf der Messkurven und mögliche systematische Fehler bei der Auswertung.

Bestimmen Sie den Temperaturanstieg ΔT_2 und berechnen Sie wie zuvor die Kühlwasserleistung P_k . Mit Gl. (15) sind aus den Ergebnissen der 3. u. 4. Aufgabe Leistungszahlen ϵ_k der Kältemaschine für die gemittelten Temperaturen T_1 zu berechnen. Vergleichen Sie diese Zahlen mit Werten für ϵ_k bzw. ϵ_w , welche man mit den Gln. (8) u. (9) für den idealen Stirling-Kreisprozess erhält. Diskutieren Sie mögliche Ursachen für Unterschiede.

7. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Welche Zustandsänderungen durchläuft ein Gas beim idealen Stirling-Kreisprozess? Welche Energiemengen werden dabei jeweils übertragen?
- 2) Wie ist der thermodynamische Wirkungsgrad η_{St} des Stirling-Prozesses definiert?
- 3) Von welchen Größen hängt η_{St} beim idealen, reversiblen Stirling-Prozess ab?
- 4) Wie unterscheidet sich der thermodynamische Wirkungsgrad des irreversiblen Kreisprozesses von dem des reversiblen?
- 5) Was versteht man unter dem Gesamtwirkungsgrad η_g einer Wärmekraftmaschine? Vergleichen Sie η_g mit η_{St} !
- 6) Wie funktioniert eine Wärmepumpe?
- 7) Beschreiben Sie den Kreisprozess eines Stirling-Motors, der als Wärmepumpe bzw. Kältemaschine arbeitet!
- 8) Wie ist die Leistungszahl einer Wärmepumpe bzw. Kältemaschine definiert und wovon hängt sie beim idealen Stirlingprozess ab?
- 9) Wie funktioniert ein Kühltisch?