Fachrichtungen der Physik

UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen

Teil II

Stirling-Motor
Thermodynamische Kreisprozesse

WWW-Adresse Grundpraktikum Physik: http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/

Kontaktadressen der Praktikumsleiter:

PD Dr. Manfred Deicher
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6
e-mail: manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de
Telefon: 0681/302-58198

PD Dr. Patrick Huber
Zimmer: 3.23, Gebäude E2.6
e-mail: p.huber@physik.uni-saarland.de
Telefon: 0681/302-3944

Version 4 (8/2009)

1 Stoffgebiet

Thermodynamische Zustandsänderungen, Zustandsgrößen, Kreisprozesse, Energie, Entropie, ideales Gas, Wärme-Kraft-Maschine, Kraft-Wärme-Maschine, Wirkungsgrade

2 Literatur

- Bergmann-Schäfer,*Lehrbuch der Experimentalphysik Bd.1*, de Gruyter, Berlin
- Gerthsen, Kneser, Vogel, *Physik*, Springer, Berlin
- Eichler, Kronfeld, Sahn, *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*, Springer, Berlin
- Falk, Ruppel, *Energie und Entropie*, Springer, Berlin
- Stephan, Mayinger, *Thermodynamik Bd.1*, Springer, Berlin

3 Fragen zur Vorbereitung

1. Geben Sie die Zustandsgleichung für ein "ideales Gas" und "reales Gas" an. Begründen Sie die Unterschiede!
2. Was ist Entropie? Wovon hängen die Entropie und die innere Energie eines idealen Gases ab?
3. Beschreiben Sie den 1.Hauptsatz der Wärmelehre und wenden Sie ihn auf eine isotherme, isochore und adiabatische Expansion beim idealen Gas an.
4. Welche Zustandsänderungen laufen in der Natur von selbst ab? Formulieren Sie den 2. Hauptsatz der Wärmelehre?
5. Welche Energieformen treten beim Versuch Stirlingmotor auf? Wie werden Sie gemessen?
6. Was ist ein reversibler Kreisprozess? Warum durchlaufen thermodynamische Maschinen Kreisprozesse?
7. Skizzieren Sie das T-S-Diagramm einer Carnot und einer Stirling Maschine. Welche Bedeutung hat in diesem Bild der Regenerator im Stirling-Motor?
8. Wie ist allgemein der Wirkungsgrad einer Maschine (sinnvoll) definiert? Was ist der Unterschied zwischen dem "thermodynamischen" und "effektiven" Wirkungsgrad einer Maschine?
9. Skizzieren Sie die p-V-Diagramme für einen Heißluftmotor, die Wärmepumpe sowie die Kältemaschine. Erläutern Sie wie man daraus graphisch die entsprechenden thermodynamischen Wirkungsgrade ermittelt.
10. Welche Vor- und Nachteile hat der Stirling Motor gegenüber anderen Motoren?

4 Grundlagen

Die Thermodynamik ist eine allgemeine Lehre von der Energie. Sie befasst sich mit den verschiedenen Erscheinungsformen der Energie und mit der Umwandlung einer Energieart in eine andere. Die Thermodynamik ist eines der grundlegenden Gebiete der Physik, denn es gibt kaum einen physikalischen Vorgang ohne Energieumwandlung. Beim Stirling-Prozess betrachten wir Energieänderungen eines gasförmigen Mediums. Der Energieinhalt eines Gases wird bestimmt durch die messbaren physikalischen Größen Volumen V, Druck p, und Temperatur T. Um sich nicht auf den Begriff Energie beschränken zu müssen, kann man auch den Zustand eines Gases betrachten, der durch die Zustandsgrößen p, V und T bestimmt wird. Beim idealen Gas sind diese verknüpft durch die Zustandsgleichung

$$p\,V = n\,R\,T \tag{1}$$

Hier bedeuten n die Anzahl der Mole des Gases im Volumen V und $R = 8,314\mathrm{J}/(\mathrm{mol\ K})$ die Gaskonstante.

Befindet sich das Gas in einem Zylinder, der auf einer Seite von einem beweglichen Kolben abgeschlossen ist (Abb.1), dann wird die Größe des Volumens V durch die Stellung des Kolbens bestimmt. Eine Vorrichtung, die Kolbenbewegung bei periodischer Änderung des Gasvolumens über einen Exzenter in Drehbewegung verwandelt, bezeichnet man als Kolbenmaschine. Dabei können die Volumenänderungen durch verschiedene physikalische Prozesse hervorgerufen werden (z.B. Verbrennung, Zuführung von Dampf oder Wärme, mech. Antrieb des Schwungrades). Das Gas im Zylinder erfährt während eines Zyklus verschiedene Zustandsänderungen und gelangt schließlich wieder in den Ausgangszustand zurück. Man bezeichnet einen derartigen Vorgang als Kreisprozess.

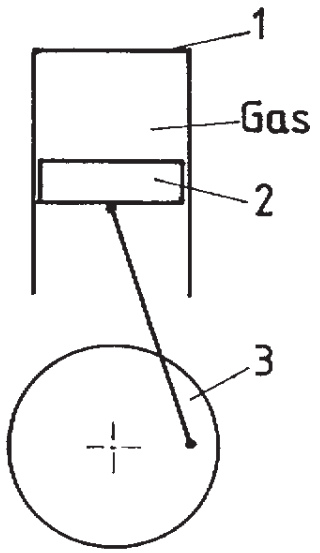

Abbildung 1: Die Kolbenmaschine (1: Zylinder, 2: Kolben, 3: Exzenter)

Es ist ein Ziel des Praktikumsversuchs, im Umgang mit der Stirling-Maschine die Begriffe thermodynamisches System, Zustandsänderung und Kreisprozess zu erarbeiten. Dabei soll die Maschine als Wärmekraftmaschine (Heißluftmotor), als Kältemaschine und als Wärmepumpe betrieben werden.

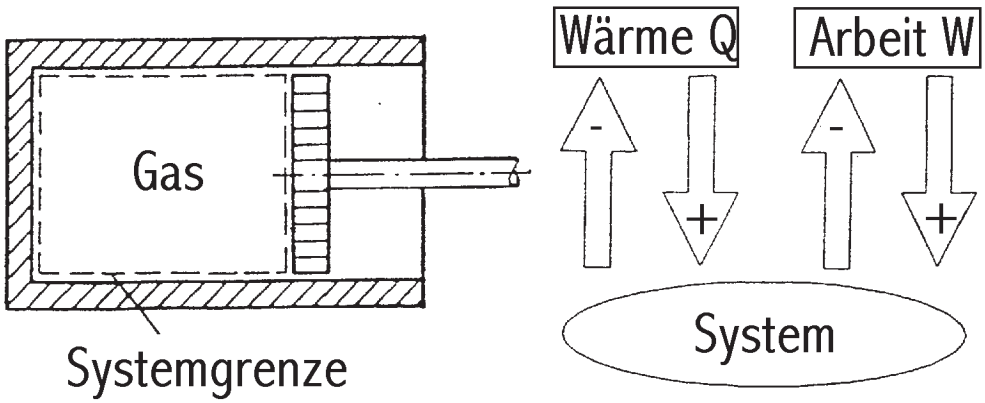

Abbildung 2: Geschlossene Systeme und Vorzeichenkonvention für Wärme- und Arbeitsumsatz.

4.1 Thermodynamisches System, Zustandsänderung

Als thermodynamisches System, kurz auch System genannt, bezeichnet man einen mit Materie angefüllten Bereich, dessen thermodynamische Größen man betrachten will. Bei der Stirling-Maschine ist es das Gasvolumen im Zylinder, das vom Kolben begrenzt wird. Die Systemgrenze ist in Abb.2 angedeutet. Über diese Grenze kann dem System von außen Wärme ($+Q$) zugeführt oder nach außen die Wärmemenge ($-Q$) abgeführt werden. Dabei wird nach Vereinbarung jede dem System zugeführte Energie positiv, die abgeführte Energie negativ gezählt.

Verändert das Gas sein Volumen gegen den äußeren Druck p, so wird Arbeit umgesetzt. Dabei gilt folgende Definition bezüglich der Vorzeichen: Die Arbeit, die das Gas verrichtet (bei Volumenvergrößerung), ist negativ, also ($-W$). Die Arbeit, die in das Gas hineingesteckt wird (Volumenverringerung), ist positiv, also ($+W$). Für die Arbeit dW bei Volumenveränderung um dV gilt:

$$dW = -p\ dV \tag{2}$$

Um die Arbeit als Funktion von Temperatur und Volumen auszudrücken, wird p mit Hilfe von Gl.1 aus Gl.2 eliminiert. Damit gilt

$$dW = -n\ R\ T\ \frac{dV}{V} \tag{3}$$

Durch Wärmeaustausch mit der Umgebung und die Bewegung des Kolbens ändert sich der Zustand eines Systems mit der Zeit. Die Beschreibung der Zustandsänderung läßt sich beträchtlich vereinfachen, wenn man die Energieänderung beim Übergang von einem Gleichgewichtszustand in einen anderen Gleichgewichtszustand betrachtet. Vom Anfangs- in den Endzustand kann man auch schrittweise über Zwischenzustände gelangen. Mit dieser Methode werden im folgenden die thermodynamischen Vorgänge beim Stirling-Motor beschrieben.

4.2 Der Kreisprozess der Stirling-Maschine

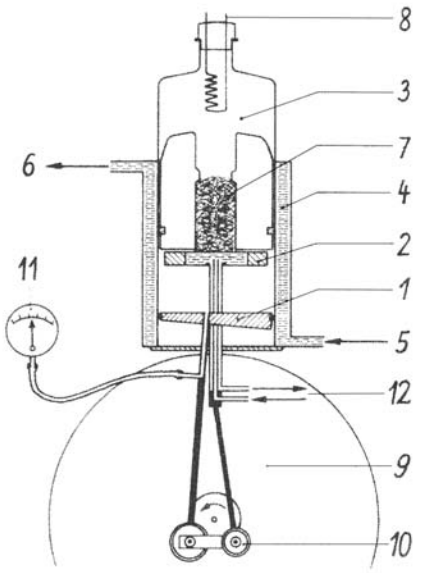

Abbildung 3: Stirling-Maschine von Leybold: l: Arbeits-Kolben; 2: Verdränger-Kolben; 3: oberer Zylinderteil; 4: Kühlwassermantelrohr; 5: Kühlwasserzufluß; 6: Kühlwasserabfluß; 7: Regenerator (Cu-Wolle); 8: Heizung; 9: Schwungrad; 10: Kolbenstangen mit Rhombengetriebe; 11: Schlauch mit Manometer (Zylinderinnendruck); 12: Kühlwasserzu -und abflußstutzen.

Wir machen uns nun das Zustandsdiagramm des Kreisprozesses beim Betrieb der Stirling- Maschine als Wärmekraftmaschine (Heißluftmotor) anhand der Abbildungen 3, 4, 5 klar.

Das gasförmige Arbeitsmedium Luft bewegt sich in einem abgeschlossenen Volumen, das durch den Arbeits-Kolben (1) beschränkt wird. Der Verdränger-Kolben (2) teilt das Arbeitsvolumen in zwei Bereiche. Dabei wird das Gas im Teilvolumen oberhalb des Verdrängers mit einer Heizung (8) auf der Temperatur T_1 gehalten. Im unteren Teilvolumen steht das Gas durch den Kühlwassermantel (4) im Kontakt mit einem Wärmereservoir der Temperatur $T_2 < T_1$. Der Verdränger kann das Gas zwischen den beiden Bereichen hin und her schieben. Dabei Strömt das Arbeitsgas durch den Regenerator (7), mit dem es Wärme austauschen kann.

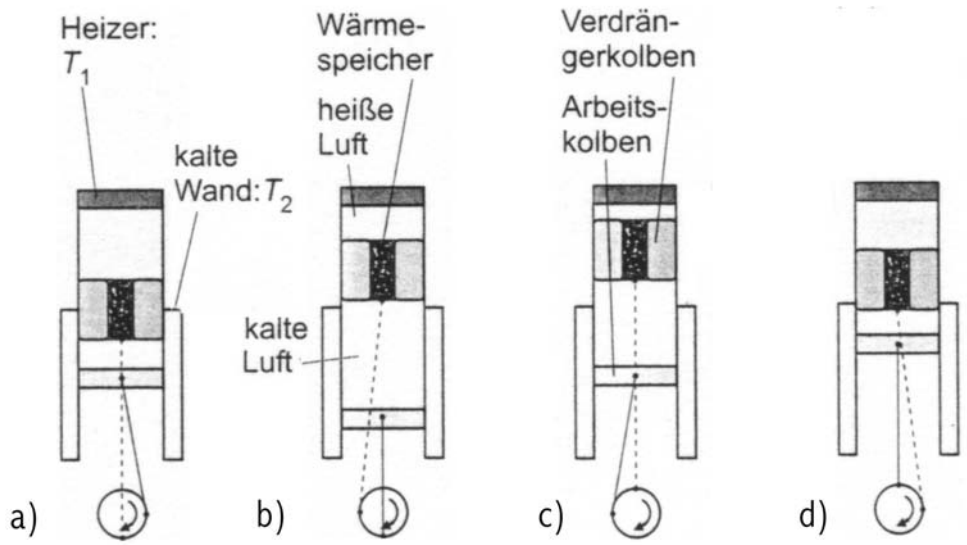

Abbildung 4: Kolbenstellungenen bei a) isothermer Expansion, b) isochorer Abkühlung, c) isothermer Kompression und d) isochorer Erwärmung des Arbeitsgases

Die Änderung des Arbeitsvolumens zwischen den Extremwerten V_1 und V_2 wird über einen Exzenter (10) in eine Drehbewegung umgesetzt. Die Bewegung des Verdrängers relativ zum Arbeitskolben wird durch ein sogenanntes Rhombengetriebe gesteuert.

Während einer Motordrehung läuft idealisiert folgender, in Abb.5 dargestellter thermodynamischer Prozess ab. Beginnen wir bei Phase 1 des Prozesses, wenn sich der Arbeits-Kolben am oberen Umkehrpunkt befindet ($V = V_1$). Der Verdränger sei so nahe am Kolben, dass sich das gesamte Gas im "warmen" Zylinderteil mit der Temperatur T_1 befindet.

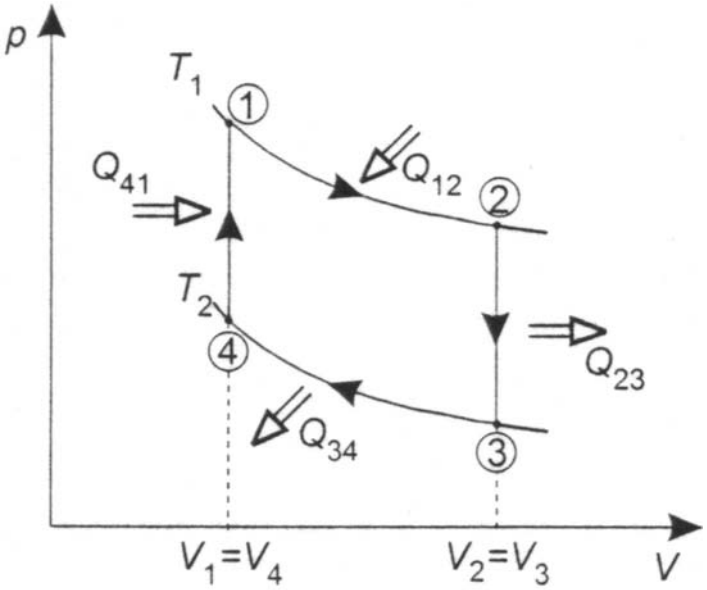

Abbildung 5: p-V-Diagramm des Stirlingmotors

1. **Isotherme Expansion (1-2):**
   Unter Zuführung der Wärmemenge Q_{12} expandiert das Gas isotherm vom Volumen V_1 nach V_2 (Abb.4a). Der Druck im Zylinder fällt entsprechend Gl.1 ab. Da sich bei isothermen Zustandsänderungen die innere Energie U des Systems nicht ändert ($dU = 0$), folgt aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik $dW = -dQ$, d.h. die zugeführte Wärme wird restlos in mechanische Arbeit umwandelt. Aus Gleichung 3 folgt

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} dW = -n\ R\ T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{12} \tag{4}$$

2. **Isochore Abkühlung (2-3):**
   Der Arbeits-Kolben befindet sich am unteren Umkehrpunkt ($V = V_2 = V_3$). Nun wird der Verdränger nach oben bewegt (Abb.4b), und das warme Gas strömt durch den "kalten" Regenerator in den unteren gekühlten Bereich des Zylinders. Dabei wird es (vom Regenerator) von der Temperatur T_1 auf die Temperatur T_2 abgekühlt und verringert seine innere Energie um $\delta U_{23} = C_{\mathrm{V}} \cdot (T_2 - T_1)$. Da bei isochoren Zustandsänderungen keine mechanische Arbeit verrichtet wird ($W_{23} = 0$), folgt aus dem 1. Hauptsatz, dass die Wärme $Q_{23} = \delta U_{23} < 0$ an den Regenerator abgegeben wird,

diesen erwärmt und dort später wieder zur isochoren Erwärmung des Gases zur Verfügung steht. (Ohne Regenerator würde Q_{23} sozusagen an das Kühlwasser "verschwendet" werden!)

3. **Isotherme Kompression (3-4):**
   Durch das Schwungrad wird der Arbeits-Kolben zum oberen Umkehrpunkt zurück bewegt (Abb.4c). Dabei wird das Gas im "kalten" Zylinderteil bei der Temperatur T_2 vom Volumen V_3 nach V_4 komprimiert. Dabei steigt der Gasdruck gemäß Gl.1. Die vom Schwungrad verrichtete mechanische Arbeit
   $$W_{34} = \int_{V_3=V_2}^{V_4=V_1} dW = n\ R\ T_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{34} \tag{5}$$
   wird bei diesem Vorgang als Wärme Q_{34} an den Kühler abgegeben.

4. **Isochore Erwärmung (4-1):**
   Der Arbeits-Kolben befindet sich am oberen Umkehrpunkt ($V = V_4 = V_1$). Nun wird der Verdränger nach unten bewegt (Abb.4d), und das kalte Gas strömt durch den "warmen" Regenerator in den oberen beheizten Bereich des Zylinders. Dabei wird es (vom Regenerator) von der Temperatur T_2 auf die Temperatur T_1 erwärmt und erhöht seine innere Energie um $\delta U_{41} = C_{\mathrm{V}} \cdot (T_1 - T_2)$. Die dazu benötigte Wärme $Q_{41} = \delta U_{41} = -Q_{23}$ wird vom Regenerator entnommenen, wobei sich dieser wieder abkühlt. (Ohne Regenerator müßte Q_{41} zusätzlich von der Heizung zur Verfügung gestellt werden!)

Am Ende ist folgende Nettoarbeit verrichtet worden:

$$W = W_{12} + W_{34} = -n\ R\ (T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} = -\oint p\ dV \tag{6}$$

Grafisch entspricht diese Arbeit der Fläche, die von den beiden Isochoren und Isothermen in Abb.5 eingeschlossen wird. Der ideale thermische Wirkungsgrad dieses Stirlingprozesses ist definiert durch das Verhältnis der bei einem Umlauf in mechanische Arbeit umgesetzten Energie $\oint p\ dV$ zur insgesamt zugeführten Wärmeenergie, hier also Q_{12}. Berücksichtigt man die Gleichungen 4 und 6, ergibt sich

$$\eta_{\mathrm{th}} = \frac{\oint p\ dV}{Q_{12}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1\ . \tag{7}$$

Ganz allgemein gilt für die Nettoarbeit von Kreisprozessen: Wird die Kurve rechtsherum durchlaufen (Wärmekraftmaschine), wird vom System Arbeit abgegeben ($W < 0$), bei entgegengesetztem Durchlauf (Kältemaschine bzw. Wärmepumpe) wird dagegen Arbeit aufgenommen ($W > 0$).

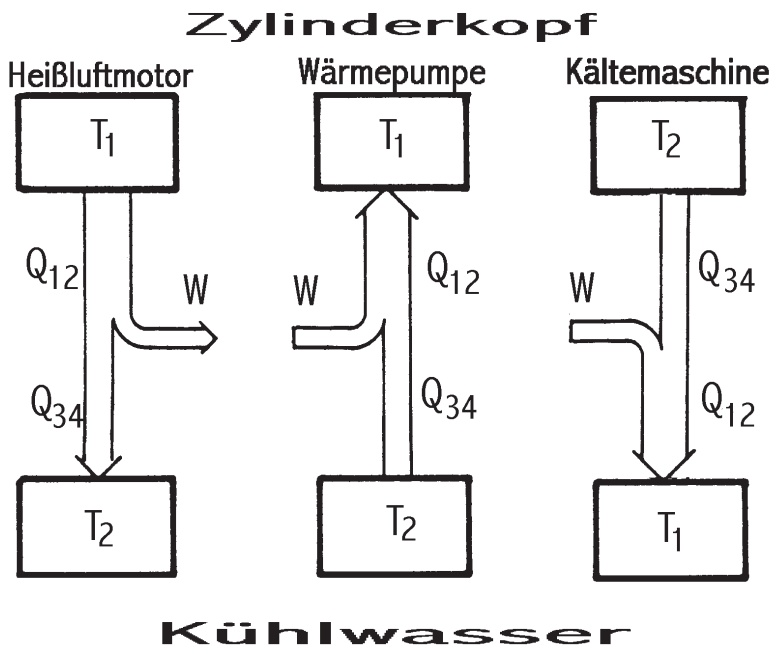

Abbildung 6: Energieumwandlung bei Wärmekraft- und Kraftwärmemaschinen

Abb.6 zeigt schematisch, den Energieumwandlungsprozess beim Versuchsmotor, aber auch allgemein gilt für
Rechtsprozesse: Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie
Linksprozesse: Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie

4.3 Energieumwandung und effektiver Wirkungsgrad beim Heißluftmotor

Durch Wärmestrahlung, Konvektion und Reibung treten Verluste im "realen" Stirling Motor auf, die den idealen thermodynamischen Wirkungsgrad η_{th} verkleinern. Der gesamte Prozeß der Umwandlung elektrischer Heizleistung in mechanisch verfügbare Leistung am Stirlingmotor ist in Abb.7 dargestellt, wobei sich bei gegebener Motordrehfrequenz f folgende Leistungen und Teilwirkungsgrade ergeben:

elektrische Heizleistung	$P_{\mathrm{QH}} = U\ I$	
vom Arbeitgas aufgenommene Wärmeleistung	$P'_{\mathrm{QH}} = \eta_{\mathrm{wv}} P_{\mathrm{QH}} = f\ Q_{12}$	η_{wv}: Wärmeverluste an die Umgebung
vom Arbeitsgas abgegebene mechanische Leistung	$P_{\mathrm{W}} = \eta_{\mathrm{th}} P'_{\mathrm{QH}} = f \oint p\ dV$	η_{th}: thermodynamischer Wirkungsgrad
an Motorwelle abnehmbare mechanische Leistung	$P_{\mathrm{E}} = \eta_{\mathrm{mech}} P_{\mathrm{W}}$	η_{mech}: mechanische Reibungsverluste (Kolben, Lager)

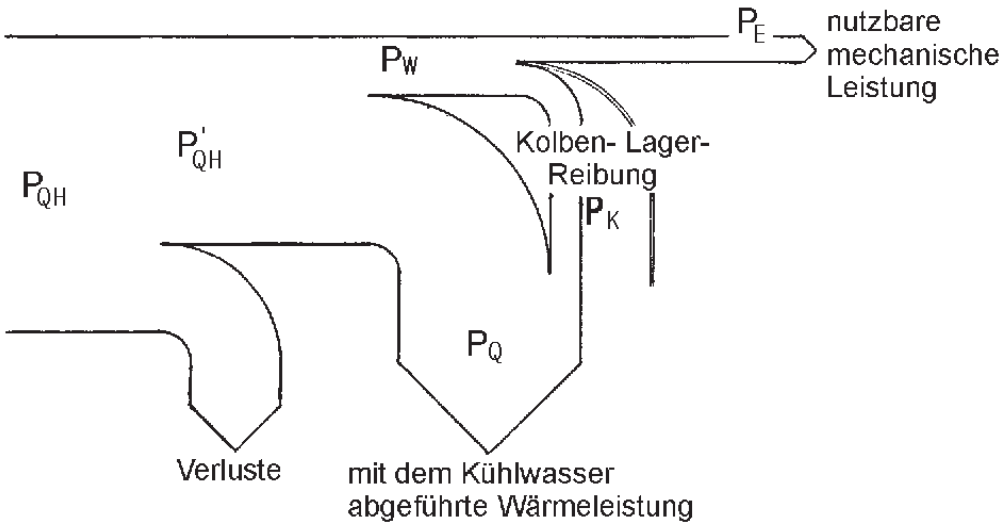

Abbildung 7: Energieflussdiagramm mit Verlusten im "realen" Stirlingmotor

Für den technischen Einsatz des Motors ist von eigentlicher Bedeutung wieviel der eingesetzten elektrischen Heizleistung P_{QH} letztlich in mechanisch abnehmbare Leistung P_{E} umgewandelt werden kann. Der effektive Wirkungsgrad des Heißluftmotors ergibt sich damit zu

$$\eta_{\mathrm{eff}} = \frac{P_{\mathrm{E}}}{P_{\mathrm{QH}}} = \eta_{\mathrm{mech}}\eta_{\mathrm{th}}\eta_{\mathrm{wv}} \ . \tag{8}$$

Für die Ermittlung der Teilwirkungsgrade können im Experiment die elektrische Heizleistung P_{QH}, die Drehfrequenz f des Motors (Kap.5.5) und die mechanischen Leistung P_{E} (Kap.5.7) gemessen werden. Ebenso lassen sich aus den entsprechenden pV-Diagrammen (durch Integration) die vom Arbeitsgas abgegebene Leistung P_{W} und Q_{12} bestimmmen.

Weiter sind folgende Leistungen aus Abb.7 experimentell zugänglich:

- Die vom Kühlwasser abgeführte Wärmeleistung: $P_{\mathrm{Q}} = c_{\mathrm{W}}\ \rho_{\mathrm{W}}\ \Phi_{\mathrm{W}}\ \Delta T_{\mathrm{W}}$ (spez. Wärme von Wasser: c_{W}, Dichte von Wasser: ρ_{W}, Kühlwasserdurchfluß: $\Phi_{\mathrm{W}} = \Delta V/\Delta t$, Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasserein- und auslauf: ΔT_{W})

- Die durch Kolbenreibung an das Kühlwasser abgegebene Wärmeleistung: $P_{\mathrm{K}} = fW_{\mathrm{K}}$, wobei W_{K} die in Aufg.1d zu bestimmende Reibungsarbeit pro Umlauf ist.

4.4 Stirlingmotor als Kältemaschine und Wärmepumpe

Bisher wurde der Stirlingmotor als Wärmekraftmaschine dargestellt: Durch den Fluß von Wärmeenergie von einem warmen zu einem kalten Reservoir wurde mechanische Arbeit erzeugt. Steckt man dagegen umgekehrt mechanische Arbeit hinein, indem man die Maschine von außen antreibt, so wird dadurch umgekehrt ein Wärmestrom vom kälteren zum wärmeren Reservoir erzeugt. Wird nun der wärmere Behälter auf Zimmertemperatur gehalten, läßt sich das andere Reservoir dadurch abkühlen: man erhält eine Kältemaschine. Befindet sich dagegen der kältere Behälter auf Zimmertemperatur, wird das andere Reservoir geheizt: es liegt eine sogenannte Wärmepumpe vor.

In beiden Fällen wird das pV-Diagramm - anders als im Fall des Heißluftmotors - entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen. D.h. die isotherme Expansion erfolgt bei der tieferen Temperatur T_2. Die dafür notwendige Wärmeenergie wird dem kälteren Reservoir entnommen und bei der Kompression bei der höheren Temperatur T_1 wieder freigesetzt (vgl. Abb.6).

Auch für diese Betriebsarten lassen sich thermodynamische Wirkungsgrade definieren. In beiden Fällen vergleicht man die Nutzenergie mit der in den Prozeß hinein gesteckten mechanischen Arbeit $W = \oint p\, dV$. So erhält man für die Kältemaschine einen Wirkungsgrad

$$\eta_{\mathrm{th}}^{\mathrm{K}} = \frac{Q_{34}}{\oint p\, dV} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \gtrless 1 \tag{9}$$

und für die Wärmepumpe einen Wirkungsgrad

$$\eta_{\mathrm{th}}^{\mathrm{W}} = \frac{Q_{12}}{\oint p\, dV} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1\ . \tag{10}$$

Die effektiven Wirkungsgrade dieser Maschinen ergeben sich analog zum Heißluftmotor aus der messbaren Kühl- bzw. Wärmeleistung $P_{\mathrm{K/W}}$ bezogen auf die zum Antrieb der Maschine vom Elektromotor aufgenommenen Leistung $P_{\mathrm{Motor}} = UI$ zu

$$\eta_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{K/W}} = \frac{P_{\mathrm{K/W}}}{P_{\mathrm{Motor}}}\ . \tag{11}$$

5 Versuchsausstattung

5.1 Die Stirling-Maschine der Firma Leybold

Der Aufbau der Stirling-Maschine der Firma Leybold ist in Abb.3 schematisch dargestellt. Zylinder (3) und Kühlwassermantelrohr (4) bestehen aus Glas. Deshalb können alle Vorgänge beim Stirlingprozess direkt beobachtet werden.

ACHTUNG:

- **Die Glasbauteile des Heißluftmotors dürfen thermisch nicht zu stark belastet werden. Deshalb ist auf ausreichenden Kühlwasserdurchsatz zu achten.**
- **Beheizen Sie den stehenden Motor nie länger als wenige Sekunden!**

5.2 Das Kühlwassersystem

Der untere Teil des Zylinders ist doppelwandig und wird von Kühlwasser aus einem 15l Voratsbehälter durchströmt. Der Durchfluß wird mittels einer 9V Tauchpumpe gewährleistet, die sich in diesem Behälter befindet. Am Kühlwassereinlauf (5) und Auslauf (6) der Stirlingmaschine kann die Vor- bzw. Rücklauftemperatur des Kühlwassers abgelesen werden.

ACHTUNG:

- **Die Temperatur des eintretenden Kühlwasser darf 30°C nicht übersteigen!**
- **Der Mindestdurchfluß beträgt 100ml/min.**

5.3 Die Zylinderaufsätze

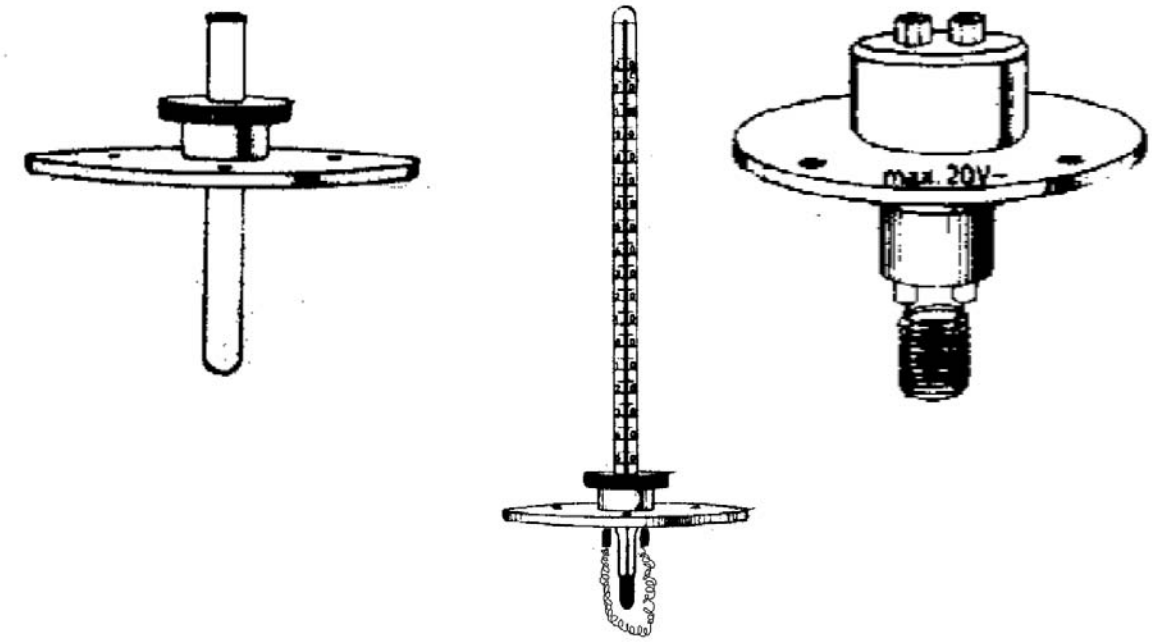

Abbildung 8: ZylinderAufsaetze von links nach rechts: Flanscheinsatz mit Schraubdichtung für Reagenzglas mit Flüssigkeit zur Durchführung von Aufg.2, Flanscheinsatz mit Thermometer und Heizwendel zum Bestimmen der Kälteleistung (Aufg.3), Flanscheinsatz mit Doppel-Heizwendel (1Ω) zum Betrieb des Heißluftmotors (Aufg.4).

Für die unterschiedlichen Betriebsarten als Heißluftmotor, Kältemaschine und Wärmepumpe sind drei verschiedene Zylinderaufsätzte vorgesehen (siehe Abb.8). Diese können leicht durch drei Flügelmuttern gelöst und ausgewechselt werden.

ACHTUNG:

- **Das Reagenzglas muß fest in der Quetschdichtung sitzen (Überdruck). Das Festziehen darf jedoch nicht auf dem Zylinderkopf geschehen, da das Reagenzglas dabei zerspringen kann.**
- **Beim Aufschrauben der verschiedenen Einsätze ist stets darauf zu achten, daß diese nicht vom Verdrängerkolben berührt werden!**
- **Der Zylinderkopf kann beim Motorbetrieb sehr heiß werden, deshalb muß das Schutzgitter montiert werden und ggf. muß vor dem Austausch des Zylinderaufsatzes einige Minuten zum Abkühlen gewartet werden!**

5.4 Der Transformator zur Versorgung der Heizwendel beim Heißluftmotor

Zur Stromversorgung der Heizung des Heißluftmotors steht ein Experimentiertrafo zur Verfügung, an dem wahlweise Wechselspannungen zwischen 0V und 20V abgegriffen werden können (Abb.9). Zum Messen der elektrischen Leistung $P_{\mathrm{QH}} = UI$ stehen zwei Digitalmultimeter zur Verfügung. Messen Sie die Heizspannung unmittelbar an den Kontakten der Heizwendel, da die Kontakt- und

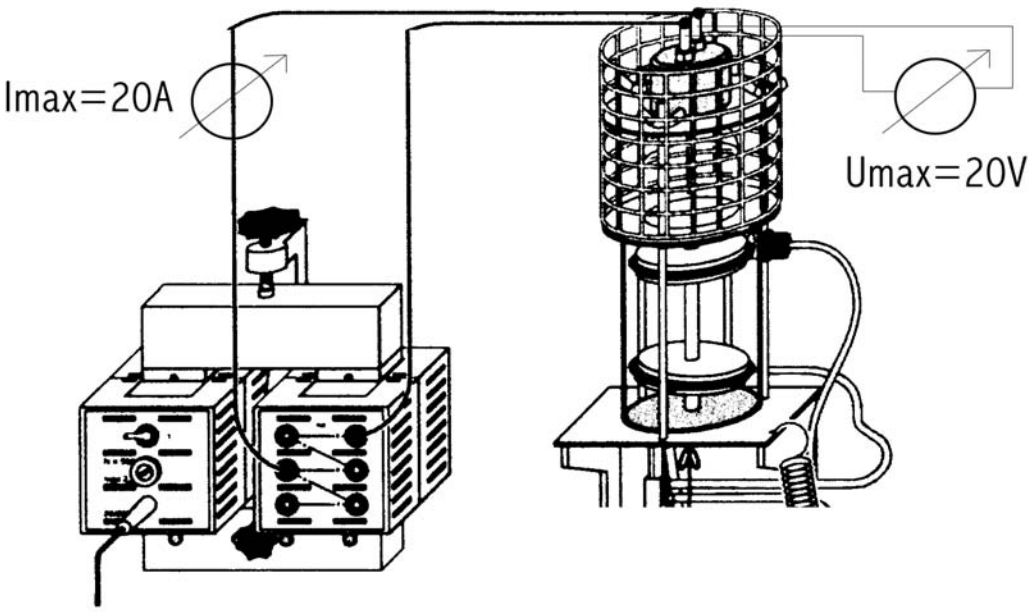

Abbildung 9: Anschluß des Experimentiertrafos an die Heizwendel

Eigenwiderstände der Zuleitungskabel nicht vernachlässigbar sind.

ACHTUNG:

- **Da beim Versuchsbetrieb Ströme bis zu 18A fließen können benutzten Sie zur Strommessung ein Multimeter mit einem Maximalstrom von 20A (oder eine Stromzange). Vorsicht, die Stromführenden Kabel und Stecker können sehr warm werden!**

5.5 Die Computererfaßte pV-Messung mit dem CASSY-Adapter (vgl.: GP-Handbuch Computer-Experimente)

Der in Abb.5 dargestellte idealisierte Stirling-Kreisprozess wird nur annährend mit der hier verwendeten Stirlingmaschine verwirklicht. Der Arbeitskolben steht während der isochoren Prozesse 2-3 bzw. 4-1 nicht still sondern führt eine zeitlich harmonische Bewegung aus. Läuft der Motor mit f Umdrehungen pro Sekunde, so ändert sich das Volumen periodisch zwischen den Extremwerten V_1 und V_2 (siehe Abb.10, rechts). Die Bewegung des Verdrängers ist ebenfalls harmonisch. Man kann zeigen, dass der Kreisprozess am günstigsten abläuft, wenn die Position des Verdrängers gegenüber dem Kolben um 90° phasenverschoben ist. Ein tatsächlich gemessenes pV-Diagramm ist in Abb.10 (links) abgebildet.

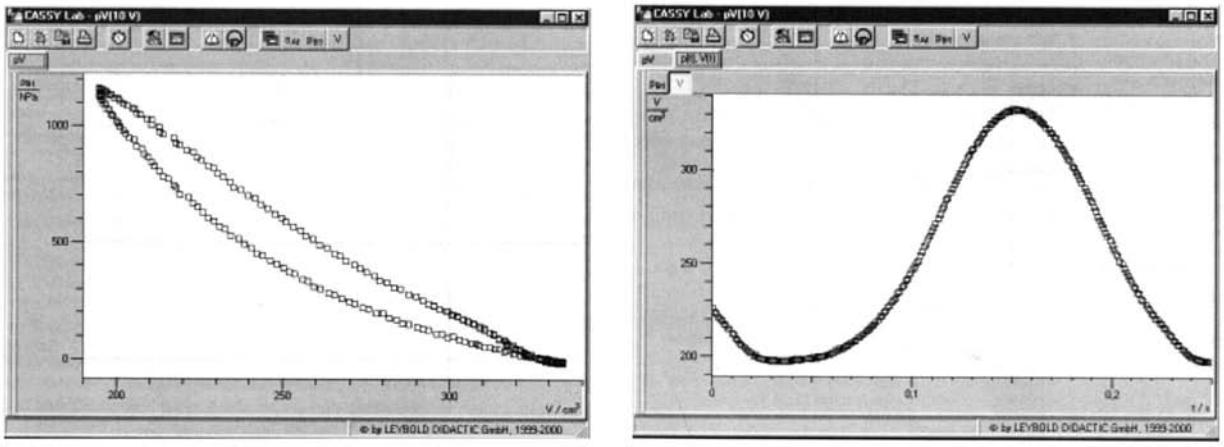

Abbildung 10: CASSY-Auschnitte: pV-Diagramm (links), $V(t)$-Diagramm (rechts)

Die Position des Arbeitskolbens wird über einen Schnurzug auf einen Wegmesser übertragen (siehe Abb.14). Bei der Bewegung des Kolbens ändert sich das Zylindervolumen insgesamt um (140 ± 0.5) cm^3. Der Zylinderinnenraum ist über einen Schlauch mit dem Manometer verbunden. Der Druck p und das Volumen V können mit dem CASSY-Adapter und der dazugehörigen Software in Millisekundenintervallen im Computer erfaßt werden. Die Software ist so eingerichtet, daß während der Versuchsdurchführung wahlweise $p(t)$-, $V(t)$-

und $p(V)$-Diagramme angezeigt werden können (siehe Abb.10). Zusätzlich kann über die Anzeige des Frequenzspektrums von $V(t)$ die ungefähre Drehzahl des Motors im Betrieb abgelesen werden (ohne Abbildung).

Der komplette Datensatz (p, V, t) einer Messung kann zur späteren Auswertung ins ASCII-Format konvertiert und gespeichert werden. Zur Integration der pV-Diagramme steht auf dem Meßrechener geeignete Software (ORIGIN) zu Verfügung. Zur Bestimmung der genauen Motordrehzahl wird die Zeit Δt für mehrere Motorzyklen N in der $V(t)$-Darstellung ausgewertet: $f = N/\Delta t$.

5.6 Der Elektromotor zum Antrieb der Kältemaschine bzw. Wärmepumpe

Das Schwungrad der Stirlingmaschine kann mit einem Elektromotor über einen Gummi-Riemen angetrieben werden (vgl. Abb.12). An dem dazugehörigen Netzgerät lassen sich die am Elektromotor angelegte Spannung U bzw. der aufgenommene Strom I einstellen und ablesen. Die aufgenommene Leistung des Motors ist dann $P_{\text{Motor}} = UI$. Die Drehrichtung des Motors kann durch Umpolen geändert werden.

ACHTUNG:

- **Betreiben Sie den Elektromotor nicht mit mehr als 13.2V.**
- **Sollte der E.-Motor nicht anlaufen, so muß etwas per Hand nachgeholfen werden!**

5.7 Prony'scher Zaum zur Messung der mechanischen Leistung

Die mechanische Leistung, die an der Welle des Motors zur Verfügung steht, wird mit dem Prony'schen Zaum (Bremsdynamometer) gemessen (Abb.11). Er besteht aus zwei Bremsbacken (2), die mit einer bestimmten Kraft (mit Schrauben (3) regulierbar) auf die Welle mit Durchmesser $d = 25$mm drücken. Die Reibungskraft die dabei entsteht, erzeugt an den Bremsbacken ein Drehmoment. Seine Größe wird bestimmt, indem man (mit Gewichten (4)) und Federwaage (5) die Kraft G mißt, die im Abstand $l = 25$ cm von der Achse den Hebelarm in der horizontalen Gleichgewichtslage hält. Die Reibungskraft kann durch unterschiedlich starkes Anziehen der Flügelmuttern verändert werden. Wenn sich die Welle mit f Umdrehungen pro Sekunde dreht, ist im Gleichgewicht die vom Motor abgegebene Leistung

$$P_{\text{E}} = 2\pi \; f \; G \; l \; . \tag{12}$$

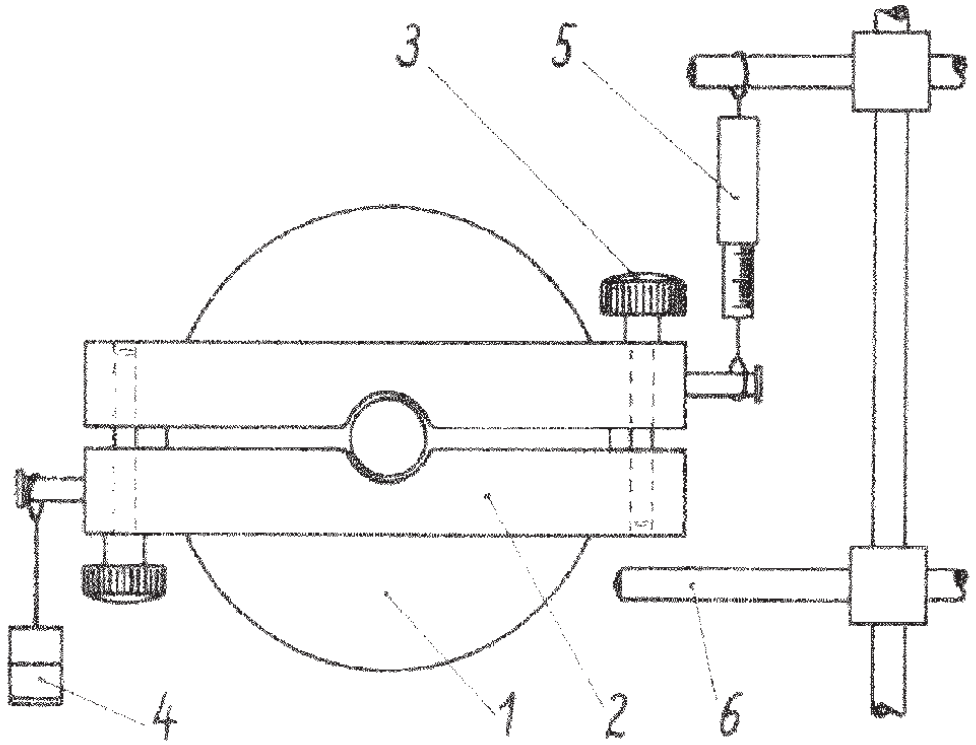

Abbildung 11: Aufbau Prony'scher Zaum: (1) Schwungrad, (2) Bremsbacken, (3) regulier Schrauben, (4) Ausgleichsgewichte (optional), (5) Federwaage, (6) Halterung mit Fuß

Beim Einsatz der Ausgleichsgewichte muß die entsprechende Gewichtskraft $F_{\mathrm{G}} = m\ g$ von der Rückstellkraft G abgezogen werden.

ACHTUNG:

- **Achten Sie darauf, daß der Motor bei hoher Belastung nicht abgewürgt wird. Ansonsten ist sofort die Heizung auszuschalten.**
- **Zur Sicherung des Zaums auf der Welle muß die beiliegende Lochscheibe verwendet werden.**

5.8 Sonstiges Zubehör

- Pinsel, Silikonöl zum Schmieren der Kolbeninnenwand
- 1l Meßbecher und Stoppuhr zur Kühlwasserdurchflußmessung
- diverse Kabel zur Stromführung
- Ersatz-Reagenzgläser, Waage, Thermometer für Aufg.2
- Netzgerät zur Versorgung der Kompensationsheizung für Aufg.3

5.9 Allgemeine Sicherheitshinweise

Wichtig!

Voraussetzung zum einwandfreien Funktionieren des Heißluftmotors ist eine sachgerechte Handhabung, über die die Gebrauchsanweisung informiert. Bitte lesen Sie die Gebrauchsanweisung sorgfältig, und beachten Sie insbesondere die folgenden Hinweise:

1. Heißluftmotor beim Transport am Doppel-T-Fuß (nicht am Zylinder oder Gestänge) anfassen.
2. Flanscheinsatz mit Heizwendel nur mit aufgestecktem Schutzrohr ablegen bzw. aufbewahren, um eine mechanische Beschädigung der Wendel (z. B. Verbiegen durch Aufliegen) auszuschließen.
3. Gute Schmierung der Innenwand des Zylinders mit Silikon-Öl (388 21) gewährleisten (s. Abschnitt 2).
4. Einwandfreien Kühlwasserumlauf, notwendige Menge (mindestens 100 ml/min, höchstens 500 ml/min) und Temperatur des Kühlwassers (höchstens Zimmertemperatur) überprüfen.
5. Heizwendel bzw. Thermometer bzw. Reagenzglas so einbauen, daß sie den Verdrängerkolben an keiner Stelle berühren.
6. Thermometer bzw. Reagenzglas fest mit der Rändelmutter in den Flanscheinsatz einschrauben. Im Zylinder herrscht Überdruck!
7. Vor jeder Inbetriebnahme des Motors das Schwungrad mit der Hand drehen und prüfen, ob Kolben und Verdränger frei beweglich sind.
8. Vor dem Einschalten des Heizstromes Verdrängerkolben in den unteren Totpunkt bringen. Heizung nur kurze Zeit – bei voller Beheizung max. 3 s – ohne laufenden Motor betreiben. Dann Motor durch Andrehen des Schwungrades in Betrieb setzen (Drehrichtung beachten).
   Läuft der Motor nicht an, Heizstrom sofort unterbrechen, ordnungsgemäßen Aufbau überprüfen (insbesondere freie Beweglichkeit des Kolbens ohne Berührung der Heizwendel) und einen neuen Startversuch machen.
9. **Achtung! Wichtiger Hinweis!** Motor mit Indikator nicht unbeaufsichtigt laufen lassen! Wenn sich die Schlauchverbindung zwischen Motor und Indikator löst, bleibt der Motor stehen. Dann sofort Heizung abschalten!

6 Versuchsdurchführung

Um Beschädigungen oder Verletzungen zu vermeiden setzt die Durchführung des Versuchs unbedingt voraus, daß Sie sich vorab gründlich mit dieser Anleitung insbesondere mit den allgemeinen Sicherheitshinweisen (Kap.5.9) vertraut gemacht haben. Bei Unklarheiten oder offenen Fragen wenden Sie sich stets an den Betreuer. Gehen Sie vorsichtig mit der Maschine um!

1. **Aufgabe: Vorbereitungen**

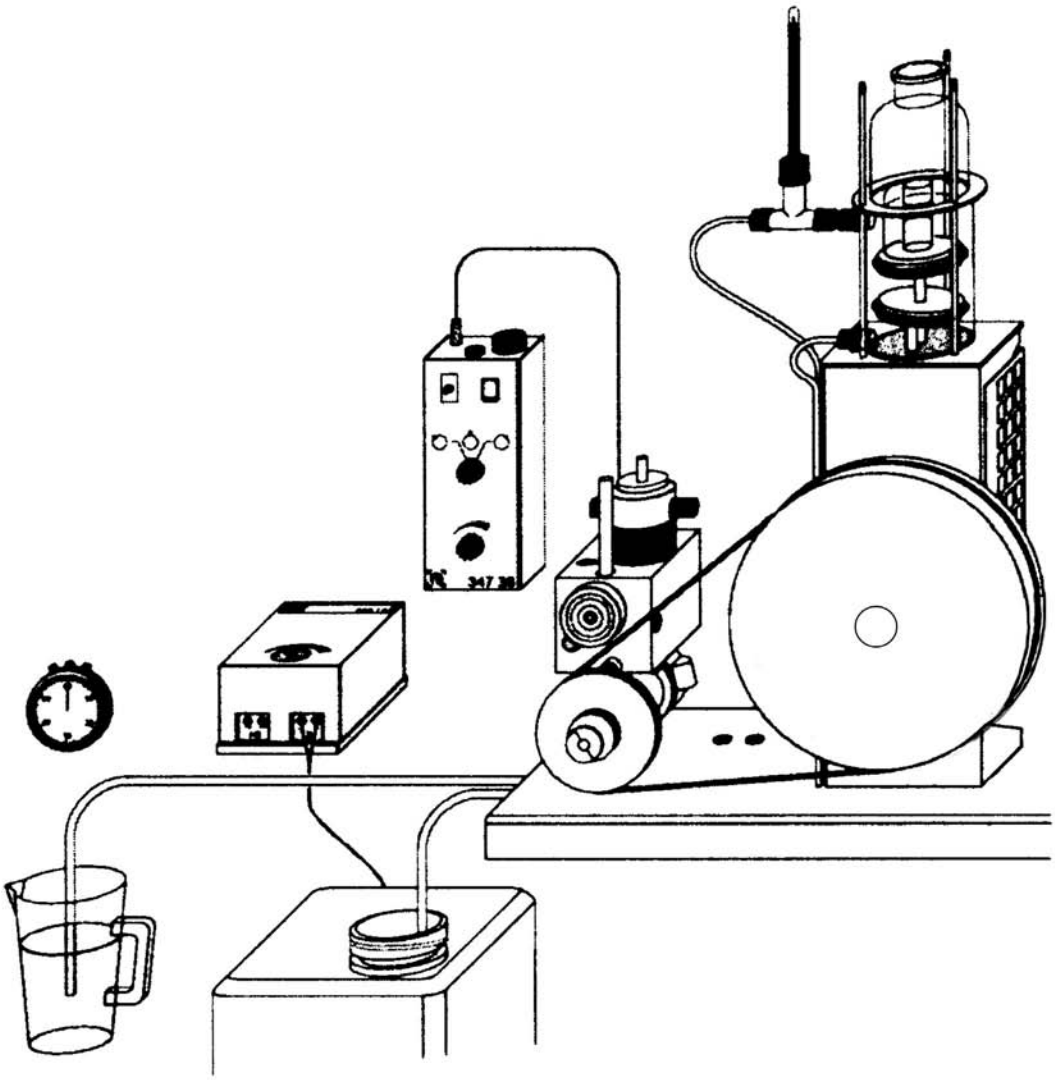

Abbildung 12: Zubehör für Aufgabe 1: Stirling Maschine, Silikon-Öl mit Pinsel (o.A.), Meßbecher, Stopp-Uhr, Kühlwasser-Reservoir mit Tauchpumpe und Netzgerät, Elektromotor mit Netzgerät und Antriebsriemen, Thermometer an Kühlwasserein- und Auslauf, Wegaufnehmer mit CASSY und Software (o.A.)

Im Einzelnen sind folgende Vorbereitungen durchzuführen:

(a) *Schmieren der Zylinderinnenwand*

Vor jeder Inbetriebnahme ist die Zylinderinnenwand am Verdrängerkolben und Arbeitskolben mit Silikonöl zu schmieren. Das geschieht bei hochgefahrenem Arbeitskolben mit einem Pinsel durch die Bohrung in der Bodenplatte (ggf. Schutzgitter abnehmen) bzw. bei heruntergefahrenem Arbeitskolben durch die Öffnung am Zylinderkopf (ggf. Zylinderaufsatz abnehmen).

(b) *Kühlwasserkreislauf überprüfen und Durchfluss messen*

Zum Umwälzen der Kühlflüssigkeit wird eine Eintauchpumpe (max. 9V Versorgungsspannung) für Flüssigkeiten verwendet. Dabei ist auf die Kühlwassertemperatur zu achten. Zu warmes Wasser vermindert die Leistung des Motors und gefährdet diesen. **Steigt während des Motorbetriebes die Einlauftemperatur über 30 Grad ist sofort der Betreuer hinzuzuziehen, ggf. muß das Kühlwasser im Reservoir durch kaltes Leitungswasser ersetzt werden.**

Messen Sie mit einem Meßbecher und einer Stoppuhr den für die weiteren Aufgaben benötigten Kühlwasserdurchfluss $\Phi = \Delta V/\Delta t$, indem Sie die Zeit Δt stoppen um $\Delta V = 1\,\mathrm{l}$ Kühlwasser aus dem Rücklaufschlauch in den Meßbecher zu pumpen.

Die Durchflussmenge sollte zwischen 100 und 500 ml/min liegen!

(c) *Anschluß und Funktionsprüfung des CASSY-Adapters zur pV-Messung*

- Schalten Sie den CASSY-Adapter ein und starten die zugehörige Software.
- Überprüfen Sie den Anschluß des Wegmessers (vgl. Abb.14). Der Seilzug darf nicht am Potentiometer durchrutschen.
- Überprüfen Sie den Anschluß des Manometers. Entfernen Sie ggf. Kondenswasserpropfen im Verbindungsschlauch des Manometers, indem Sie den Schlauch am Manometer lösen und den Motor unter Kompression einige Umdrehungen von Hand antreiben. (Wiederholen Sie diese Prozedur, wenn sich am Versuchsnachmittag wieder Kondenswasserpropfen bilden.)
- Machen Sie sich zusammen mit dem Betreuer mit der Software vertraut und testen diese auf Funktion.

(d) *Ermittlung der Reibungsverluste des Heißluftmotors*

Lassen Sie den Zylinderdeckel offen, schließen Sie den Elektro-Motor zum Antrieb der Stirling-Maschine an (Abb.12). Lesen Sie die Temperaturen T_{Ein} und T_{Aus} an Kühlwasser Ein- und Auslauf ab. Treiben Sie das Schwungrad mit dem E.-Motor (Versorgungsspannung 13.2V) an (Richtung egal) und messen dabei alle 60s die Erhöhung der Kühlwassertemperatur ($\Delta T_{\text{W}} = T_{\text{Aus}} - T_{\text{Ein}}$) bis diese konstant bleibt. Bestimmen Sie die Drehfrequenz f des Motors aus den CASSY-Daten des Wegaufnehmers (siehe Kap.5.5).

Berechnen Sie die durch Kolbenreibung an das Kühlwasser abgegebene Reibungsleistung $P_{\text{K}} = \rho_{\text{W}}\ \Phi\ c_{\text{W}}\ \Delta T_{\text{W}}$ und daraus die Reibungsarbeit pro Umlauf $W_{\text{K}} = P_{\text{K}}/f$. (Dichte $\rho_{\text{W}} = 1\text{g/cm}^3$, spez. Wärme $\rho_{\text{W}} = 4.18\text{J/(gK)}$)

2. **Aufgabe: Betreiben Sie die Stirling-Maschine als Wärmepumpe.**

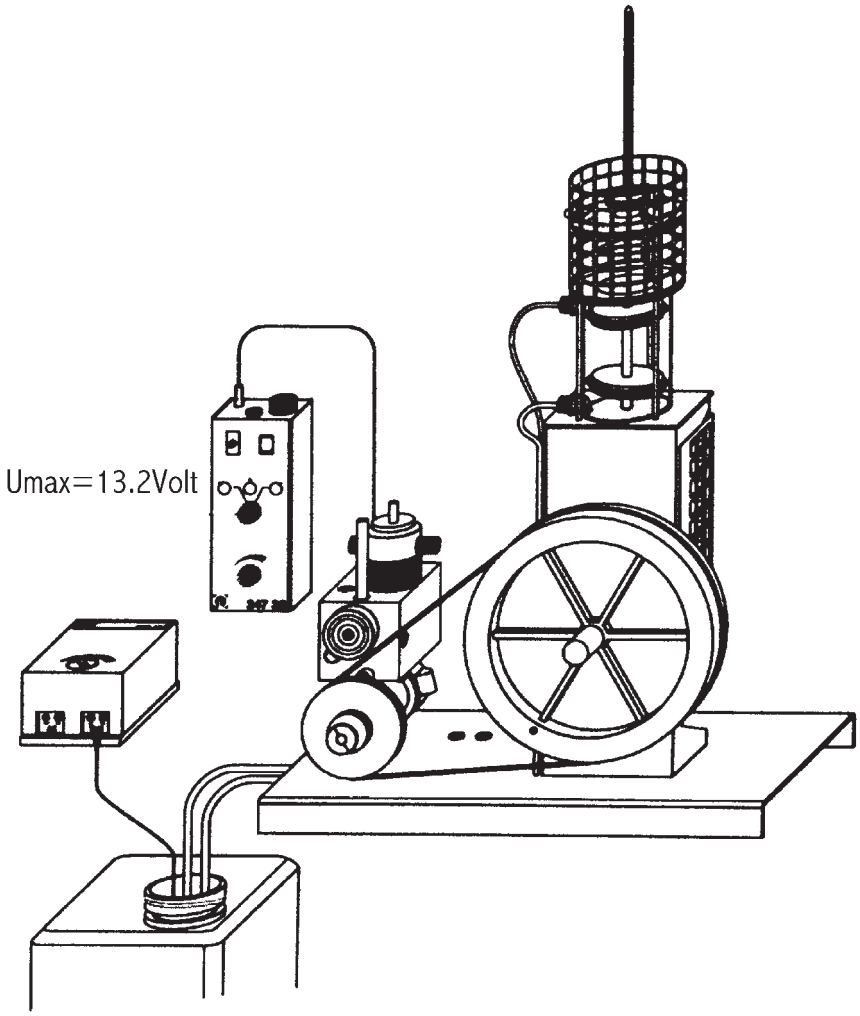

Abbildung 13: Aufbau Wärmepumpe und Kälte-Maschine

Erwärmen Sie damit eine Wasserprobe (bis etwa 65°C). Bestimmen Sie den thermodynamischen und effektiven Wirkungsgrad dieser Wärmepumpe.

Der Versuchsaufbau ist in Abb.13 dargestellt. Setzten Sie den Zylinderaufsatz mit Reagenzglas zusammen. **Achten Sie darauf, daß das Reagenzglas fest in der Quetschdichtung sitzt und den Verdrängerkolben nicht berühren kann.** Wiegen Sie etwa $m = 2$g Wasser mit einer Waage in dem Reagenzglas ab, befestigen Sie den kompletten Aufsatz auf dem Zylinderkopf und fixieren mit etwas Schaumstoff ein Thermometer in diesem. Der Elektromotor wird so betrieben, daß er das Schwungrad der Stirlingmaschine mit $f \approx 3$Hz dreht. Klären Sie vor dem Einschalten die Drehrichtung zusammen mit dem Betreuer ab.

Messen Sie nach dem Einschalten der Maschine die Temperatur der Wasserprobe in Zeitintervallen von etwa 20s. Stellen Sie bei der Ausarbeitung diesen Temperaturverlauf $T(t)$ grafisch dar. Bestimmen Sie aus dem linearen Bereich des Temperaturverlaufs die an das Wasser abgegebene Wärmeleistung $P_{\mathrm{W}} = m_{\mathrm{W}}\, c_{\mathrm{W}}\, dT/dt$. Messen Sie die Leistungsaufnahme $P_{\mathrm{Motor}} = UI$ des zum Antrieb der Maschine benötigten Elektromotors. Nehmen Sie am Versuchsende ein pV-Diagramm auf und ermitteln die Temperaturdifferenz ΔT_{W} zwischen Kühlwasser Ein- und Auslauf.

Ermitteln Sie aus dem pV-Diagramm den themodynamischen Wirkungsgrad $\eta_{\mathrm{th}}^{\mathrm{W}}$ der Maschine und vergleichen Sie diesen mit dem effektiven Wirkungsgrad $\eta_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{W}}$. Überlegen Sie ob die gemessene Temperaturdifferenz ΔT_{W} des Kühlwassers sinnvoll ist (Hinweis: Kolbenreibung berücksichtigen).

3. **Aufgabe: Betrieb des Stirlingmotors als Kältemaschine**

   Verwenden Sie die Stirling-Maschine als Kältemaschine. Der Versuchsaufbau ist ähnlich wie in Aufg.2. Ersetzen Sie das Reagenzglas durch den Einsatz mit Thermometer und Heizwendel. Schrauben Sie dazu den gesamten Aufsatz ab. **Achten Sie beim Wiederaufschrauben des Aufsatzes darauf, daß die Heizwendel den Verdrängerkolben nicht berühren kann.** Schließen sie die Heizwendel an das dazugehörige Gleichstromnetzgerät an, so daß Sie mit zwei Digitalmultimetern die Heizleistung bestimmen können (ähnlich Abb.9). Der Elektromotor ist derart in Betrieb zu setzen, dass sich das Schwungrad im Uhrzeigersinn dreht ($f \approx 3$Hz).

   Nach dem Einschalten des Motors fällt die Temperatur am Thermometer schnell ab. Kompensieren Sie die Kühlleistung der Kältemaschine durch vorsichtiges Steigern der Heizungspannung (max. 10 Volt), so daß sich die Temperatur am Thermometer bei etwa 15°C einstellt. Messen Sie die

dazu notwendige elektrische Heizleistung $P_{\mathrm{K}} = UI$. Messen Sie die Leistungsaufnahme $P_{\mathrm{Motor}} = UI$ des zum Antrieb der Maschine benötigten Elektromotors. Nehmen Sie am Versuchsende ein pV-Diagramm auf und ermitteln Sie die Temperaturdifferenz ΔT_{W} zwischen Kühlwasser Ein- und Auslauf.

Ermitteln Sie aus dem pV-Diagramm den thermodynamischen Wirkungsgrad $\eta_{\mathrm{th}}^{\mathrm{K}}$ der Maschine und vergleichen Sie diesen mit dem effektiven Wirkungsgrad $\eta_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{K}}$. Überlegen Sie ob die gemessene Temperaturdifferenz ΔT_{W} des Kühlwassers sinvoll ist (Hinweis: Kolbenreibung berücksichtigen).

4. **Aufgabe: Betrieb des Stirlingmotors als Wärmekraftmaschine**

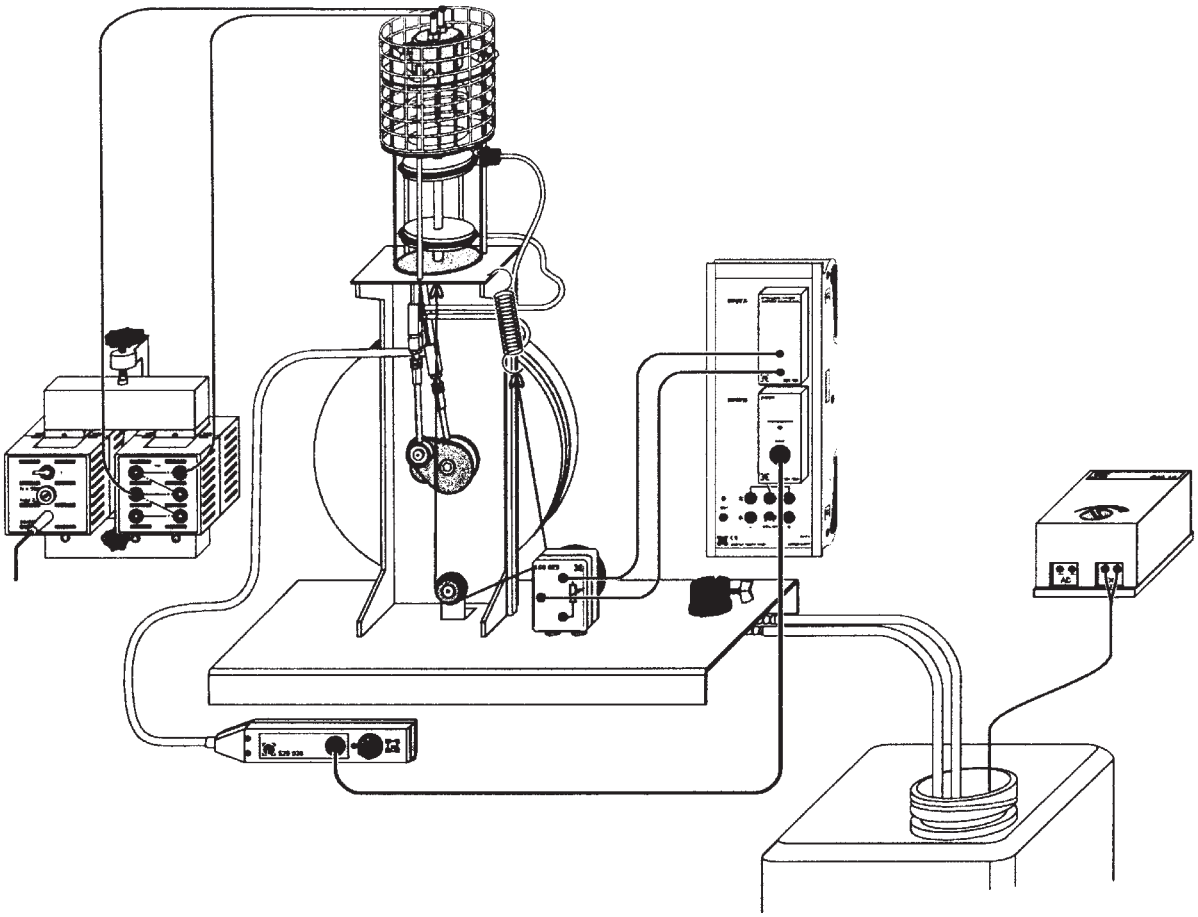

Abbildung 14: Aufbau Wärmekraftmaschine

(a) *Inbetriebnahme des Heißluftmotors*

Der Versuchsaufbau ist in Abb.14 dargestellt. Schrauben Sie den Zylinderaufsatz mit der Doppel-Heizwendel auf. **Bringen Sie unbedingt das Schutzgitter auf dem Zylinderkopf an.** Schließen Sie

den Experimetiertrafo so an die Heizwendel an, daß Sie mit zwei Multimetern die elektrische Leistungsaufnahme der Heizwendel messen können (siehe Kap.5.4).

Setzen Sie den Motors bei 12V Heizspannung zusammen mit dem Betreuer wie folgt in Betrieb. Nach dem Einschalten der Heizung warten Sie bis diese dunkel rot glüht. Danach werfen Sie das Schwungrad an. Wiederholen Sie das Anwerfen so lange, bis der Motor von selbst läuft. **Beachten Sie dabei, dass der Motor nicht länger als wenige Sekunden bei eingeschalteter Heizung stillstehen darf.** Wenn der Motor stabil läuft reduzieren Sie die Heizspannung auf den Wert, bei dem der Motor gerade noch läuft. Der Motor braucht nach jeder Änderung der Heizspannung einige Minuten Einlaufzeit bis er stationär wird, d.h. sich eine konstante Drehzahl und Kühlwassertemperaturerhöhung ΔT_{W} eingestellt hat.

(b) *Der Stirlingmotor im Leerlaufbetrieb*

Messen Sie bei gegebener Heizspannung **im stationären Zustand** die von der Heizwendel aufgenommene elektrische Heizleistung P_{QH}, die Kühlwassertemperaturerhöhung ΔT_{W} und ein pV-Diagramm. Erhöhen Sie die Heizspannung am Trafo in 2V Schritten bis 16V und wiederholen jeweils die Messungen.

Bestimmen Sie für jede Heizspannung aus den Meßwerten die Leistungen P_{QH}, P'_{QH}, P_{W}, P_{Q} und P_{K} sowie die Drehfrequenz f des Motors. Berechnen Sie daraus jeweils die Wirkungsgrade η_{wv} und η_{th}. Schätzen Sie unter der Annahme, daß die Temperatur T_2 im unteren Zylinderteil der Kühlwasserauslauftemperatur entspricht, die Temperatur T_1 im oberen Zylinderteil ab (Gl.7). Tabellieren Sie die Ergebnisse.

Tragen Sie die Drehzahl f und den thermodynamischen Wirkungsgrad η_{th} gegen die Heizleistung P_{QH} auf und begründen den Verlauf.

(c) *Der belastete Stirlingmotor*

Reduzieren Sie zunächst die Heizspannung, so daß der Motor langsam läuft. Überprüfen Sie die Kühlwassertemperatur im Reservoir und ersetzen Sie es ggf. durch frisches Wasser.

Justieren Sie bei langsam laufenden Motor den Prony'schen Zaum (siehe Kap.5.7) ohne ein Drehmoment auf die Motor-Welle auszuüben. Wählen Sie eine Heizspannung bei der der unbelastete Motor ($G = 0\mathrm{N}$) mit etwa $f = 5 - 6\mathrm{Hz}$ läuft.

Messen Sie bei gegebener Belastung die Kraft G an der Federwaage, die von der Heizwendel aufgenommene elektrische Heizleistung P_{QH},

die Kühlwassertemperaturerhöhung ΔT_{W} und ein pV-Diagramm. Erhöhen Sie durch das Anziehen der Flügelschrauben am Zaum die Motorbelastung in Schritten von etwa $\Delta G = 0.2\mathrm{N}$ bis zur maximalen Belastung und wiederholen jeweils die Messungen. **Die Maschine darf bei hoher Belastung nicht zum Stillstand kommen. Bei Stillstand ist die Maschine sofort wieder von Hand anzuwerfen oder die elektrische Heizung sofort abzuschalten.**

Am Ende der Messung reduzieren Sie die Motorbelastung auf Null, lassen den Motor bei geringer Heizspannung eine Minute auslaufen und schalten schließlich die Heizung ganz aus. Nach ein paar weiteren Minuten kann dann das Kühlwasser abgeschaltet werden.

Tabellieren Sie wie in Aufgabe 4b die Meßergebnisse. Geben Sie zusätzlich die gemessene mechanische Leistung P_{E} und die Wirkungsgrade η_{mech} und η_{eff} an.

Tragen Sie die mechanische Leistung P_{E} und den effektiven Wirkungsgrad η_{eff} gegen die Drehzahl f auf und diskutieren Sie den Verlauf.