

Die Stirling-Maschine, Thermodynamische Kreisprozesse (STI)

Themengebiet: Thermodynamik

1 Stichworte

Thermodynamischer Zustand, Zustandsgröße, thermodynamischer Kreisprozess, Wirkungsgrad

2 Literatur

1. W. Demtröder, *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, Springer, Berlin
2. D. Meschede, *Gerthsen Physik*, Springer, Berlin
3. L. Bergmann, C. Schäfer, *Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.1, Mechanik, Akustik, Wärme*, deGruyter

3 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*

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T . \quad (1)$$

Hier bedeuten n die Stoffmenge (in Mol) im Volumen V , und $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ die Gaskonstante.

Befindet sich das Gas in einem Zylinder, der auf einer Seite von einem beweglichen Kolben abgeschlossen ist, dann wird das Volumens V durch die Stellung des Kolbens bestimmt. Eine Vorrichtung, die bei periodischer Änderung des Gasvolumens die

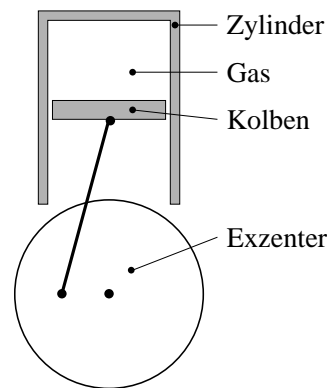


Abbildung 1: Die Kolbenmaschine

Kolbenbewegung über einen Exzenter in Drehbewegung verwandelt, bezeichnet man als *Kolbenmaschine* (Abb.1). Dabei können die Volumenänderungen durch verschiedene physikalische Prozesse hervorgerufen werden (z.B. Verbrennung, Zuführung von Dampf oder Wärme). Das Gas im Zylinder erfährt während eines Zyklus verschiedene Zustandsänderungen und gelangt schließlich wieder in den Ausgangszustand zurück. Man bezeichnet diesen Vorgang als *Kreisprozess*.

3.1 Thermodynamisches System und Zustandsänderungen

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. Es handelt sich hierbei um ein geschlossenes System, das keine Materie mit der Umgebung austauschen kann. Jedoch kann dem System *von außen* Wärme zugeführt ($+Q$) werden oder *nach außen* die Wärmemenge $-Q$ abgeführt werden. Dabei wird nach Vereinbarung jede dem System zugeführte Energie positiv, die abgeführte Energie negativ gezählt (vgl. Abb. 2).

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

$$dW = -p dV \quad (2)$$

Mit Hilfe der Zustandsgleichung (1) lässt sich der Druck aus Gleichung (2) eliminieren, und man erhält die Arbeit als Funktion der Temperatur und des Volumens:

$$dW = -n R T dV/V \quad (3)$$

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.

3.2 Der Kreisprozess der Stirling-Maschine

Die prinzipiellen Vorgänge beim Stirlingmotor sollen nun erläutert werden. Ein Arbeitsgas, in unserem Fall Luft, befindet sich in einem durch einen beweglichen Kolben abgeschlossenen Raum. Der obere Teil des Gasvolumens befindet sich in Kontakt zu einem Wärmebad bzw. einer Heizung, der untere Teil zu einem Kältebad. Durch einen beweglichen Verdränger kann das Gas zwischen geheiztem und gekühlten Bereich verschoben werden (vgl. Abb. 3).

Zu Beginn sei der Arbeitskolben an der obersten Position, und der Verdrängerkolben dicht am Arbeitskolben. Das Gas ist dann in dem Zustand mit dem kleinsten Volumen V_0 und der hohen Temperatur T_2 und damit einem hohen Druck p_1 (Abb. 3a). Der Kolben wird dann bei konstanter Temperatur T_2 nach unten gedrückt (Abb. 3b), das Gas vergrößert dabei sein Volumen bis auf den maximalen Wert V_m . Es nimmt dabei die Wärme Q_{12} von der Heizung auf. Der Druck verringert sich entsprechend der Zustandsgleichung (1) auf p_2 . Da sich bei dieser isothermen Zustandsänderung die innere Energie U des Gases nicht ändert, folgt aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ($dU = dQ + dW$), dass die zugeführte Wärme restlos in mechanische Arbeit umgewandelt wird

$$W_{12} = - \int_{V_0}^{V_m} n R T_2 \frac{dV}{V} = -n R T_2 \ln \left(\frac{V_m}{V_0} \right) = -Q_{12} < 0 \quad (4)$$

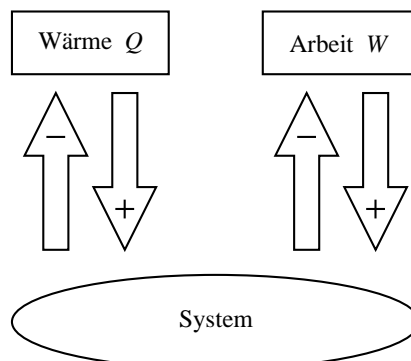


Abbildung 2: Vorzeichenkonvention für Wärme- und Arbeitsumsatz

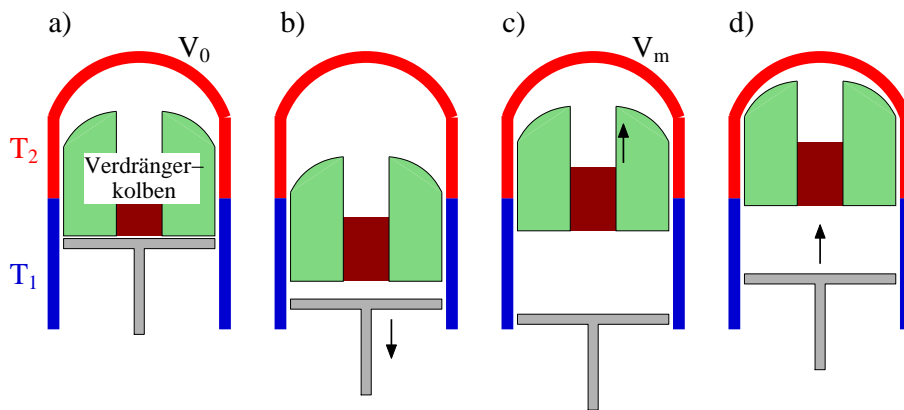


Abbildung 3: Die Takte der Stirling-Maschine.

Nun wird der Verdrängerkolben nach oben bewegt, und so das Gas in Kontakt mit dem Kältebad gebracht, wo es isochor von der Temperatur T_2 auf T_1 abkühlt (Abb. 3c). Dabei fällt der Druck weiter auf p_3 ab. Hier wird die Wärme Q_{23} abgegeben.

Bei der anschließenden isothermen Kompression des Gases (T_1) wird der Kolben wieder nach oben geschoben bis das Ausgangsvolumen V_0 erreicht ist. Der Druck steigt auf den Wert p_4 an. Dabei wird die Wärme Q_{34} abgeführt und die Arbeit W_{34} am Gas geleistet

$$W_{34} = - \int_{V_m}^{V_0} n R T_1 \frac{dV}{V} = -n R T_1 \ln \left(\frac{V_0}{V_m} \right) = -Q_{34} > 0 \quad (5)$$

Im letzten Schritt wird der Verdrängerkolben wieder zum Arbeitskolben verschoben (Abb. 3d), die Temperatur steigt wieder isochor auf T_2 an, der Druck erhöht sich auf p_1 . Bei diesem Vorgang wird die Wärme $Q_{41} = -Q_{23}$ aufgenommen. Damit ist der Ausgangszustand wieder erreicht.

Der theoretische Stirling-Kreisprozess, bestehend aus den beiden isothermen und den beiden isochoren Zustandsänderungen, ist in Abbildung (4a) noch einmal in einem Druck-Volumen-Diagramm dargestellt. Beim Betrieb als Motor wird der Kreisprozess rechtsherum (im Uhrzeigersinn) durchlaufen.

Betrachtet man die verrichtete Nettoarbeit W , so erhält man

$$\begin{aligned} W &= W_{12} + W_{34} = \\ &= -n R T_2 \ln \left(\frac{V_m}{V_0} \right) - n R T_1 \ln \left(\frac{V_0}{V_m} \right) = \\ &= n R (T_1 - T_2) \ln \left(\frac{V_m}{V_0} \right) < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

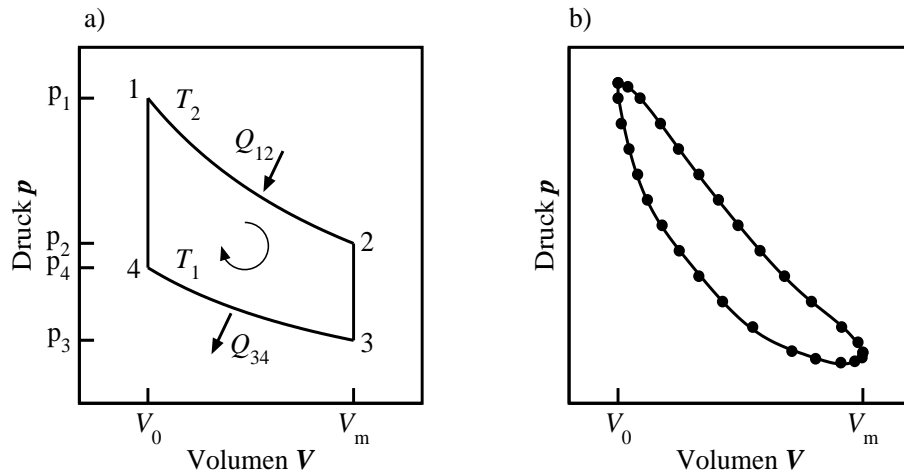


Abbildung 4: Der Stirlingprozess der Wärme-Kraft-Maschine, theoretisch (a) und gemessen (b).

Betragsmäßig entspricht die Arbeit gerade der Fläche, die in Abbildung (4a) von den beiden isothermen und isochoren Kurven eingeschlossen wird. Allgemein gilt für thermodynamische Kreisprozesse: Die im p - V -Diagramm eingeschlossene Fläche entspricht der umgesetzten Nettoarbeit.

Wird der Kreisprozess rechtsherum durchlaufen, so wird Wärme in mechanische Energie umgesetzt ($W < 0$). Bei entgegengesetztem Durchlauf (gegen den Uhrzeigersinn) wird Arbeit aufgenommen ($W > 0$). Zu beachten ist, dass hier der Umlaufsinn im p - V -Diagramm betrachtet wird, und nicht die Drehrichtung der realen Maschine.

Für den *idealen thermodynamischen Wirkungsgrad* η_0 setzt man die Nettoarbeit W zur aufgenommenen Energie ins Verhältnis. Nimmt man dabei an, dass die Wärme Q_{23} , die bei der isochoren Abkühlung frei wird, vollständig gespeichert und bei der isochoren Erwärmung (Q_{41}) wieder zugeführt werden kann, so treten diese Größen in der Energiebilanz nicht mehr auf. Für den Wirkungsgrad η_0 erhält man dann mit den Gleichungen (4) und (6)

$$\eta_0 = -\frac{W}{Q_{12}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (7)$$

Unter der gemachten Annahme ist dieser also gleich dem Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses.

Der in Abbildung 4a) dargestellte idealisierte Stirling-Kreisprozess ist nicht mit einer tatsächlich funktionierenden Maschine zu verwirklichen. Der Kolben 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_0 und V_m

$$V(t) = \frac{1}{2}(V_m + V_0) + \frac{1}{2}(V_m - V_0) \cdot \cos \omega t \quad (8)$$

wobei $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz ist. Die Bewegung des Verdrängers ist ebenfalls harmonisch. Man kann zeigen, dass der Kreisprozess am günstigsten abläuft, wenn die Position des Verdrängers der des Arbeitskolbens um 90° voraussieht.

Die Zwischenspeicherung der Wärme Q_{23} und Rückführung im Prozess 4-1 wird durch einen Regenerator aus Kupferwolle im Verdrängerkolben realisiert. Strömt das warme Gas beim Schritt 2-3 durch den Verdränger, so gibt es Wärme an den Regenerator ab. Im Schritt 4-1 strömt das dann kalte Gas wieder durch den Verdränger und nimmt dabei Wärme vom Regenerator auf. Eine *vollständige* Rückgewinnung der Energie ist aber auch so nicht zu erreichen. Das p - V -Diagramm der realen Stirling-Maschine sieht dann wie in Abbildung (4b) aus.

Für die Charakterisierung eines realen Motors lassen sich die folgenden Größen bestimmen:

1. Die Wärmeleistung L_h , die durch die elektrische Heizung dem Motor zugeführt wird, ist

$$L_h = U \cdot I . \quad (9)$$

2. Aus der im gemessenen p - V -Diagramm umschlossenen Fläche ergibt sich die thermodynamische Nettoarbeit W , bzw. die Leistung bei der Drehzahl f

$$L_t = f \cdot W . \quad (10)$$

3. An der Welle des Motors lässt sich ein Drehmoment M messen. Daraus erhält man die effektiv abgegebene mechanische Leistung bei der Drehzahl f zu

$$L_m = 2\pi f \cdot M . \quad (11)$$

Daraus lassen sich der *reale thermodynamische Wirkungsgrad* η_t und der *effektive Wirkungsgrad* η_e bestimmen:

$$\eta_t = \frac{L_t}{L_h} \quad (12)$$

$$\eta_e = \frac{L_m}{L_h} \quad (13)$$

4 Der Versuchsaufbau der Stirling-Maschine

Der Aufbau der im Versuch verwendeten Stirling-Maschine der Firma Leybold ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Zylinder und Verdrängerkolben bestehen aus Glas, sodass alle Vorgänge beim Stirlingprozess direkt beobachtet werden können.

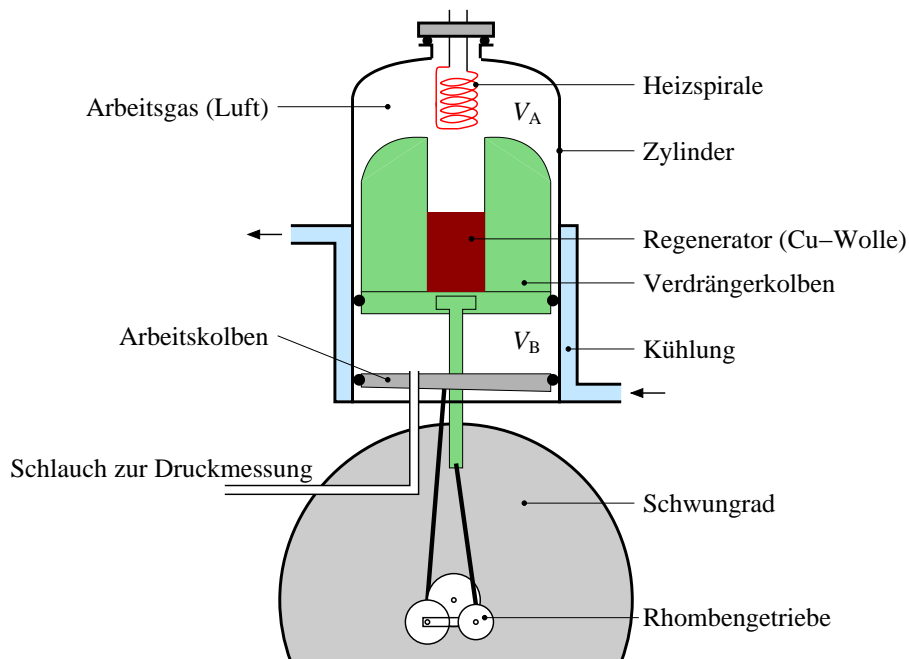


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Stirling-Maschine

Der untere Teil des Zylinders ist doppelwandig und wird von Wasser mit Zimmertemperatur durchströmt. Dies stellt das Kältebad dar. Die obere Zylinderabdeckung enthält beim Betrieb als Wärme-Kraft-Maschine die Heizung, die beim Kreisprozess die Temperatur T_2 erzeugt.

Zwei Konstruktionsdetails des Verdrängers erhöhen die Geschwindigkeit mit der sich das Gas erwärmt bzw. abkühlt, wenn es zwischen den Volumina V_A und V_B hin und her strömt:

1. Der Verdränger besteht aus einem hohlen Glaskörper, der von Kühlwasser durchströmt wird. Eine gelochte Metallplatte, die in das Unterteil des Verdrängers eingeschmolzen ist, kühlt durch seine relativ große Wärmeleitfähigkeit das durch sie hindurchströmende warme Gas. Dadurch erhöht sich der Temperaturgradient im Zylinder und damit der Wärmestrom vom wärmeren oberen Teil des Zylinders zum kühleren Unterteil.
2. In einer zylinderförmigen Öffnung des Verdrängers befindet sich feine Kupferwolle als Regenerator. Das relativ große Oberflächen-Volumen-Verhältnis und die große Wärmeleitfähigkeit von Kupfer bewirken, dass das Gas relativ schnell mit der Wolle Wärme austauscht, wenn es den Verdränger passiert. Strömt das Gas aus dem wärmeren oberen Bereich durch den Verdränger nach unten, so gibt es Wärme an die kältere Kupferwolle ab, d.h., die Abkühlung wird verstärkt. Strömt das Gas aus dem kälteren unteren Zylinderbereich durch die Wolle nach oben, so nimmt sie von dieser zusätzlich Wärme auf.

Die Position des Arbeitskolbens wird über eine Schnur auf den p - V -Indikator übertragen, und dort in eine Drehbewegung eines Spiegels um seine senkrechte Achse umgesetzt. Die horizontale Auslenkung eines am Spiegel reflektierten Lichtstrahls auf einem Projektionsschirm ist deshalb proportional zur Volumenänderung des Gases im Zylinder. Bei der Bewegung des Kolbens ändert sich das Zylindervolumen insgesamt um $(150,0 \pm 0,5) \text{ cm}^3$. Der Zylinderinnenraum ist über einen Schlauch ebenfalls mit dem p - V -Indikator verbunden. Eine Druckänderung im Gas verursacht eine Drehbewegung des Spiegels, wodurch der Lichtstrahl vertikal abgelenkt wird, und so der Druck abgelesen werden kann. Die Skala ist allerdings nicht linear und muss kalibriert werden (Aufgabe 5.1).

5 Aufgabenstellung

Verschließen Sie zuerst den Zylinder mit dem Deckel, an dem die elektrischen Heizwendel befestigt ist. **Achten Sie darauf, dass die Heizwendel nicht am Verdrängerkolben schleift!** Ziehen Sie die Flügelschrauben gleichmäßig, aber nicht zu fest an (Vorsicht!).

Justieren Sie die Beleuchtungseinrichtung (Laser) so, dass die durch Druck- und Volumenänderung hervorgerufenen Bewegungen des reflektierten Lichtflecks auf einem auf dem Projektionsschirm befestigten Bogen Papier Platz haben. Drehen Sie nun das Schwungrad von Hand, beobachten Sie dabei die Bewegungen von Kolben und Verdränger, und machen Sie sich klar, was beim Stirlingprozess vor sich geht. Sehen Sie sich das p - V -Diagramm an, das vom Lichtfleck durchlaufen wird.

5.1 Kalibrierung der Druck- und Volumenanzeige

Bevor die Stirling-Maschine in Betrieb genommen wird, muss die Druck und Volumenanzeige kalibriert werden.

Verbinden Sie dazu den Rohrstutzen des p -Indikators mit einer Luftpumpe und einem Manometer. Bringen Sie den Kolben in die Stellung mit kleinsten Volumen (V_0). Tragen Sie dann auf dem Projektionsschirm an der y -Achse in Intervallen von 0,1 bar die entsprechenden Druckwerte bis etwa 1,2 bar ein. Wiederholen Sie dies für die Stellung mit dem größten Volumen (V_m). Mit diesen beiden Druckskalen können Sie später in der Auswertung Werte auf Ihren Messkurven durch geeignete Interpolation bestimmen. Die Volumenskala darf dabei als linear angenommen werden, die Druckskala explizit nicht.

Stecken Sie nun wieder den Druckschlauch aus dem Kolben an p - V -Indikator. Achten Sie darauf, dass der Indikator nicht verdreht wird, da sonst die Kalibrierung nicht mehr stimmt.

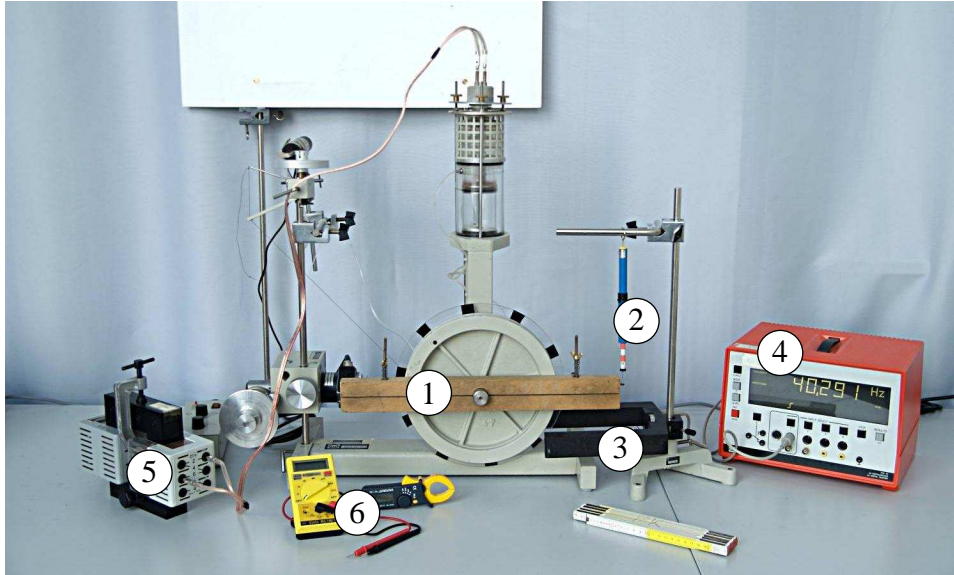


Abbildung 6: Versuchsaufbau der Wärme-Kraft-Maschine: 1) Pronyscher Zaum (Bremsbacken); 2) Federwaage; 3) Gabellichtschranke; 4) Digitalzähler; 5) Spannungsversorgung; 6) Multimeter und Stromzange

5.2 Betrieb als Wärme-Kraft-Maschine

Der Versuchsaufbau für den Versuchsteil „Wärme-Kraft-Maschine“ ist in Abbildung 6 dargestellt.

Lassen Sie den Betreuer die Wasserkühlung einschalten, sofern nicht schon geschehen. Verbinden Sie die Heizung mit den Buchsen am Transformator, an denen verschiedene Spannungen abgegriffen werden können. Benutzen Sie dazu das Kabel mit Silikon-Isolierung. Beginnen Sie mit einer Nennspannung von 12 V. Bringen Sie zunächst den Verdränger in seine unterste Stellung, indem Sie das Schwungrad von Hand drehen. Schalten Sie nun den Transformator ein und beobachten Sie die Heizwendel. Sobald diese nach einigen Sekunden zu glühen beginnt, muss der Motor von Hand am Schwungrad angeworfen werden. **Der Motor läuft nicht von alleine an.** Unterstützen Sie die Drehbewegung des Motors, bis dieser ohne wieder stehenzubleiben weiterläuft. Lassen Sie den Motor bei 12 V Heizspannung einige Minuten warmlaufen.

Die Heizwendel darf sich nur bei laufendem Motor bis zur Gelbglut (nicht Weißglut) erhitzen. Kommt der Motor zum Stillstand, Heizung sofort ausschalten, da es sonst zu Schäden kommt. Die Heizspannung darf 18 V auf keinen Fall überschreiten.

Die Drehzahl wird aus der Lichtpulsrate einer Gabellichtschranke bestimmt. Machen Sie sich zunächst klar, wie die Pulsrate mit der Drehzahl zusammenhängt. **Die Drehzahl des Motors darf 3 s^{-1} nicht unter- und $6,5 \text{ s}^{-1}$ nicht überschreiten.**

Die mechanische Leistung, die an der Welle des Motors zur Verfügung steht, wird mit dem *Pronyschen Zaum* (Bremsdynamometer) gemessen. Er besteht aus zwei Bremsbacken, die mit einer variablen Kraft auf die Welle des Motors drücken. Die Reibungskraft kann dabei durch die Flügelmutter am Zaum eingestellt werden. Das Drehmoment, das dabei an den Bremsbacken erzeugt wird, lässt sich bestimmen. Dazu misst man die Kraft G am Hebelarm im Abstand l von der Welle, die nötig ist, um den Zaum in der *horizontalen* Gleichgewichtslage zu halten. Dreht sich die Welle mit f Umdrehungen pro Sekunde, so ist die im Gleichgewicht vom Motor abgegebene Leistung

$$L_m = 2\pi f l G . \quad (14)$$

Aufgabenstellung

Betreiben Sie den Stirlingmotor mit einer Nennspannung von 12 V. Bestimmen Sie die Drehzahl f des unbelasteten Motors. Bei 12 V sollte der Motor eine Drehzahl von mindestens 4,5 Hz erreichen, andernfalls muss die Spannung auf 14 V erhöht werden. Messen Sie die tatsächliche Spannung U , die an der Heizwendel anliegt, sowie mit der Stromzange den Heizstrom I . Nehmen Sie bei unbelastetem Motor das p - V -Diagramm auf.

Schieben Sie nun den Zaum auf die Motorachse. Verringern Sie durch Vergrößern der Andruckkraft am Zaum schrittweise die Drehzahl des Motors bis zu einer minimalen Drehzahl von $3,5 \text{ s}^{-1}$ (vier bis fünf Zwischenschritte). Bestimmen Sie bei jedem Schritt die Drehzahl und das zugehörige Drehmoment.

Nehmen Sie schließlich bei der niedrigsten Drehzahl nochmal ein p - V -Diagramm auf.

Wiederholen Sie die Messungen für eine Nennheizspannung von 16 V.

Auswertung

Bestimmen Sie die jeweils von der Heizwendel aufgenommene elektrische Leistung L_h . Ermitteln Sie bei allen vier p - V -Diagrammen die beim Kreisprozess verrichtete Arbeit und die dazugehörige Leistung L_t . Sie erhalten diese aus der Fläche, die von der p - V -Kurve eingeschlossen wird. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Druckskala nichtlinear ist. Die Volumenachse kann als linear angesehen werden.

Geben Sie die bei den verschiedenen Drehzahlen an der Motorachse wirkenden Drehmomente an und tragen Sie diese graphisch gegen die Drehzahl f auf.

Berechnen Sie alle thermischen und effektiven Wirkungsgrade η_t und η_e . Tragen Sie für beide Heizspannungen den effektiven Wirkungsgrad gegen die Drehzahl auf. Diskutieren Sie die erhaltenen Abhängigkeiten.

Geben Sie bei allen Ihren Ergebnissen auch eine Unsicherheit an. Die Unsicherheiten einiger Größen müssen abgeschätzt werden. Begründen Sie Ihre Abschätzungen.

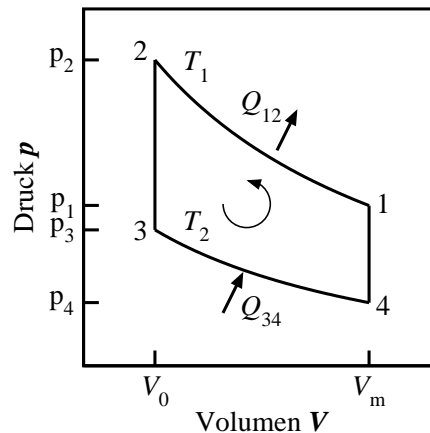


Abbildung 7: Der Stirlingprozess der Kältemaschine.

5.3 Betrieb als Kältemaschine

Beim Betrieb als Kältemaschine wird der Kreisprozess durch Zuführung mechanischer Arbeit gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen (Abb. 7). Dabei wird bei niedriger Temperatur (T_2 , Kühlraum) vom Gas Wärme aufgenommen. Diese wird dann zusammen mit der Wärme, die bei der Kompression durch mechanische Arbeit zugeführt wird, bei höherer Temperatur (T_1 , Umgebung) abgegeben.

Im oberen Teil des Zylinders befindet sich nicht mehr der Erhitzer, sondern der Kühlraum (Froster). Der Antrieb erfolgt durch einen Elektromotor, wobei die Drehrichtung des Motors (nicht der Umlaufsinn des Kreisprozesses!) wie beim Heißluftmotor im Uhrzeigersinn ist. So wird im oberen Teil des Zylinders dem Froster Wärme entzogen, und im unteren Teil an den Kühler abgegeben.

Betrachten wir Abbildung 7 und beginnen im Zustand 1 (V_m, p_1). Der Kolben befindet sich in der niedrigsten, der Verdränger in der höchsten Stellung. Das Gas wird bei der Kühlertemperatur T_1 längs der Isothermen 1-2 vom Volumen V_m auf V_0 komprimiert. Dabei wird dem Gas die Arbeit W_{12} zugeführt und die Wärme Q_{12} abgeführt. Dann wird das Gas unter Wärmeentzug im Regenerator in den oberen Zylinderraum geschoben, wobei es längs der Isochoren 2-3 auf T_2 abkühlt. Bei der anschließenden Expansion auf der Isothermen 3-4 entzieht das Gas dem Froster die Wärme Q_{34} . Schließlich bewegt sich der Verdränger wieder nach oben, wobei das Gas durch den Regenerator wieder auf T_1 erwärmt wird.

Aufgabenstellung

Ersetzen Sie den Deckel mit der Heizwendel durch den mit der Halterung für ein Reagenzglas. Füllen Sie etwa 0,5 bis 1,0 cm³ Wasser in das Reagenzglas und führen

Sie den Temperaturfühler ein. Legen Sie den Schnurriemen über die größte Antriebscheibe am Elektromotor und das Schwungrad. Betreiben Sie den Elektromotor auf höchster Geschwindigkeit so, dass sich das Schwungrad im Uhrzeigersinn dreht.

Messen Sie nun die Temperatur in Abständen von etwa 15 s bis das Wasser *vollständig* gefroren ist.

Tragen Sie in der Versuchsausarbeitung die gemessenen Temperaturwerte gegen die Zeit auf und diskutieren Sie den Temperaturverlauf.

5.4 Betrieb als Wärmepumpe

Wird die Drehrichtung des Motors umgekehrt (gegen den Uhrzeigersinn), so wird aus der Kältemaschine eine Wärmepumpe. Dem Kühler wird nun Wärme entzogen und am Zylinderkopf wieder abgegeben. Der Kreisprozess wird in derselben Richtung wie bei der Kältemaschine durchlaufen (Abb. 7), jedoch erfolgt die isotherme Expansion jetzt im unteren Zylinderraum, wenn der Verdränger sich in der oberen Position befindet. Die bei der isothermen Kompression vom Gas am Zylinderkopf abgegebene Wärme dient zur Heizung.

Aufgabenstellung

Betreiben Sie die Stirlingmaschine als Wärmepumpe. Erwärmen Sie die Wasserprobe bis sich eine annähernd konstante Temperatur einstellt. Messen Sie dabei die Temperatur in Zeitintervallen von etwa 15 s.

Stellen Sie bei der Ausarbeitung den Temperaturverlauf graphisch dar und diskutieren Sie die einzelnen Bereiche.

6 Fragen

1. Vergleichen Sie den Stirling-Kreisprozess mit den Vorgängen eines (idealisierten) Benzinmotors. Welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten gibt es?
2. Vergleichen Sie den Stirling-Kreisprozess mit dem Carnot-Prozess. Wie lässt sich der in der Anleitung angegebene Carnot-Wirkungsgrad beim Stirling-Kreisprozess erreichen?