

# 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](mailto: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](mailto:p.huber@physik.uni-saarland.de)  
Telefon: 0681/302-3944

## **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 Zustandsänderung beim idealen Gas an.
4. Welche Zustandsänderungen laufen in der Natur von selbst ab? Erläutern Sie den 2. Hauptsatz der Wärmelehre!
5. Was ist ein reversibler Kreisprozess? Warum durchlaufen thermodynamische Maschinen Kreisprozesse?
6. Skizzieren Sie die  $p$ - $V$ - und  $T$ - $S$ -Diagramme einer Carnot- und einer Stirling-Maschine. Was ist ein Regenerator? Erläutern Sie seine Funktion und Auswirkung auf den Wirkungsgrad!
7. Was versteht man unter einem Indikatordiagramm? Ergänzen Sie das  $p$ - $V$ -Diagramm aus der vorangegangenen Frage um das dazugehörige Indikatordiagramm. Nennen Sie Gründe für Abweichungen vom idealen Prozess!
8. Welche Energieumwandlungen treten beim Stirling-Motor auf?
9. Wie ist allgemein der Wirkungsgrad einer Maschine (sinnvoll) definiert? Was ist der Unterschied zwischen dem „thermodynamischen“ und „effektiven“ Wirkungsgrad einer Maschine?
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

$$pV = nRT \quad (1)$$

Hier bedeuten  $n$  die Anzahl der Mole des Gases im Volumen  $V$  und  $R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$  die Gaskonstante.

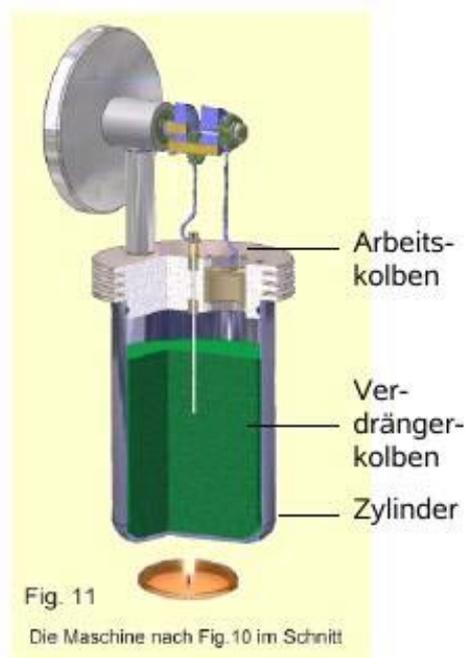


Abbildung 1: Einfaches Modell einer Kolbenmaschine. Quelle: <http://mitglied.lycos.de/PeterFette/howdo.htm>

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. Da-

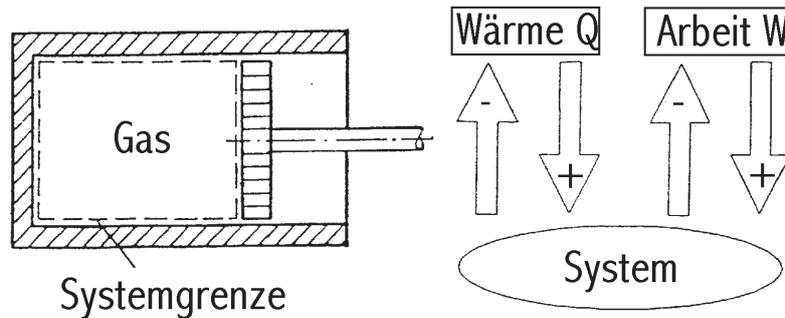


Abbildung 2: Geschlossene Systeme und Vorzeichenkonvention für Wärme- und Arbeitsumsatz.

bei 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 thermodynamischen Kreisprozess. Ein Ziel dieses Praktikumsversuchs besteht darin, sich im Umgang mit der Stirling-Maschine die Begriffe thermodynamisches System, Zustandsänderung und Kreisprozess zu erarbeiten. Dabei soll die Maschine als Wärmekraftmaschine betrieben werden.

#### 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 Wärme ( $-Q$ ) 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 verrichtet. 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 (Volumenverringern), ist positiv, also ( $+W$ ). Für die Arbeit  $dW$  bei Volumenveränderung um  $dV$  gilt:

$$dW = -pdV \quad (2)$$

Um die Arbeit als Funktion von Temperatur und Volumen auszudrücken,

wird  $p$  mit Hilfe von Gl. 1 aus Gl. 2 eliminiert. Damit gilt

$$dW = -nRT \frac{dV}{V} \quad (3)$$

Durch Wärmeaustausch mit der Umgebung und durch 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 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

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

Das gasförmige Arbeitsmedium Luft bewegt sich in einem abgeschlossenen Volumen, das durch den Arbeitskolben beschränkt wird. Der Verdrängerkolben teilt das Arbeitsvolumen in zwei Bereiche. Befindet sich das Gas im oberen Teil des Zylinders, wird es mit Hilfe eines Kältereservoirs gekühlt; befindet es sich im unteren Teil, wird es mit einem Wärmereservoir erhitzt. Der Verdränger schiebt das Gas zwischen den beiden Bereichen hin und her. Dabei strömt das Arbeitsgas durch den Regenerator im Verdrängerkolben, mit dem es Wärme austauschen kann.

Die Änderung des Arbeitsvolumens zwischen den Extremwerten  $V_{\min}$  und  $V_{\max}$  wird über einen Exzenter in eine Drehbewegung umgesetzt.

Während einer Motordrehung läuft idealisiert folgender, in Abb. 4 dargestellter thermodynamischer Prozess ab. Beginnen wir bei Phase I des Prozesses, wenn sich der Arbeitskolben 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.

### 1. Isotherme Expansion (1 → 2):

Unter Zuführung der Wärmemenge  $Q_{12}$  expandiert das Gas isotherm vom Volumen  $V_1$  nach  $V_2$  (Abb. 3a). Der Druck im Zylinder fällt entsprechend der idealen Gasgleichung ab. Da sich bei isothermen Zustandsänderungen die innere Energie  $U$  des Systems nicht ändert ( $dU = 0$ ), folgt aus dem

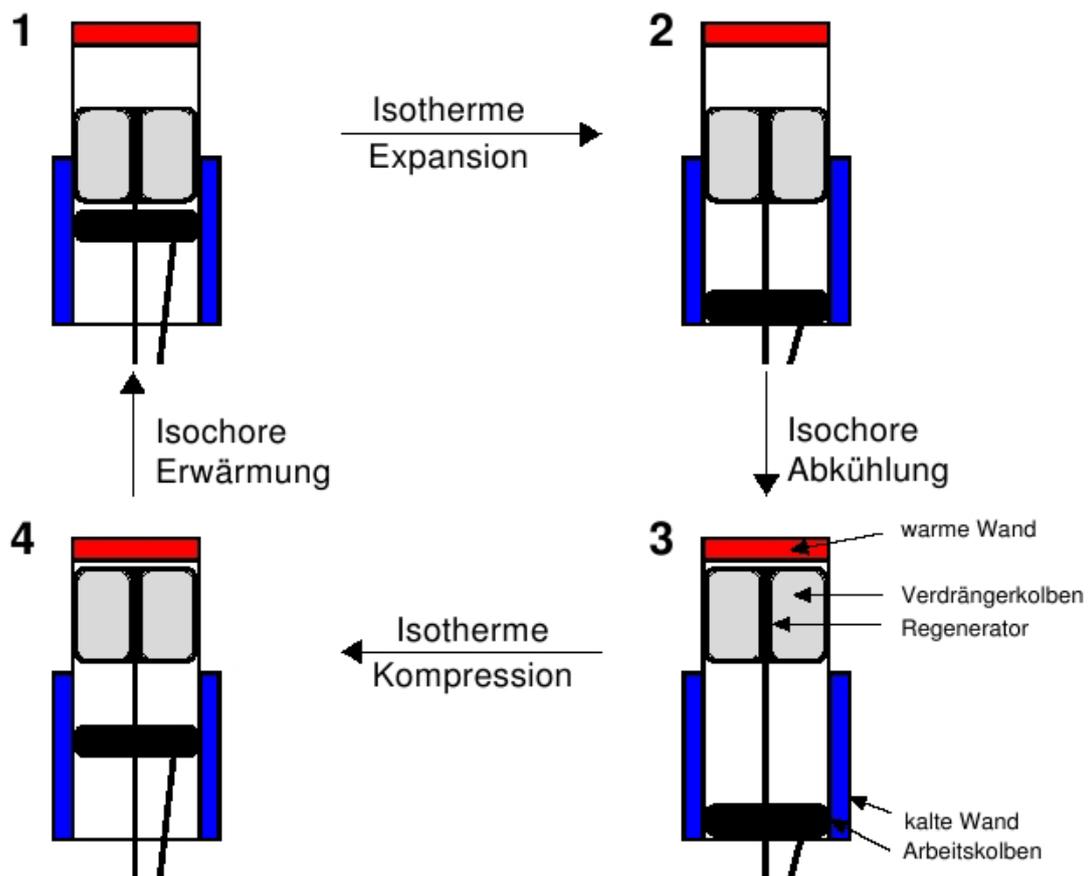


Abbildung 3: Kolbenstellungen bei 1) isothermer Expansion, 2) isochorer Abkühlung, 3) isothermer Kompression und 4) isochorer Erwärmung des Arbeitsgases. Quelle: [www.pit.physik.uni-tuebingen.de](http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de)

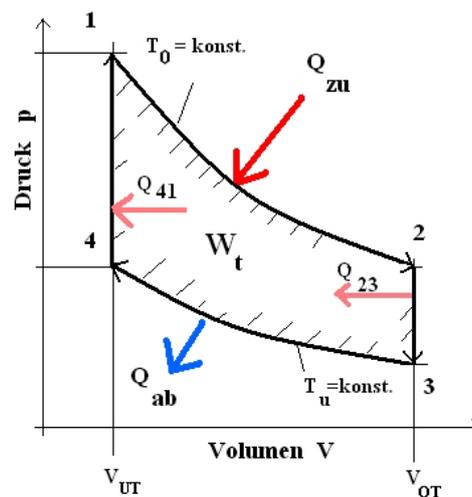


Abbildung 4:  $p$ - $V$ -Diagramm des Stirlingmotors. Quelle: [commons.wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org)

1. Hauptsatz der Thermodynamik  $dW = -dQ$ , d. h. die zugeführte Wärme wird restlos in mechanische Arbeit umwandelt. Aus Gleichung 3 folgt

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} dW = -nRT_1 \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = -Q_{12} \quad (4)$$

### 2. Isochore Abkühlung (2 $\rightarrow$ 3):

Der Arbeitskolben befindet sich am oberen Umkehrpunkt ( $V = V_2 = V_3$ ). Nun wird der Verdränger nach unten bewegt (Abb. 3b), und das warme Gas strömt durch den „kalten“ Regenerator in den oberen gekühlten Bereich des Zylinders. Dabei wird es (vom Regenerator) von der Temperatur  $T_1$  auf  $T_2$  abgekühlt und verringert seine innere Energie um  $dU_{23} = C_V(T_2 - T_1)$ . Da bei isochoren Zustandsänderungen keine mechanische Arbeit verrichtet wird ( $W_{23} = 0$ ), folgt aus dem 1. Hauptsatz, dass die Wärme  $Q_{23} = dU_{23} < 0$  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 $\rightarrow$ 4):

Durch das Schwungrad wird der Arbeitskolben zum unteren Umkehrpunkt zurück bewegt (Abb. 3c). 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 der idealen Gasgleichung an. Die vom Schwungrad verrichtete mechanische Arbeit

$$W_{34} = \int_{V_3=V_2}^{V_4=V_1} dW = nRT_2 \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = Q_{34} \quad (5)$$

wird bei diesem Vorgang als Wärme  $Q_{34}$  an den Kühler abgegeben.

### 4. Isochore Erwärmung (4 $\rightarrow$ 1):

Der Arbeitskolben befindet sich am unteren Umkehrpunkt ( $V = V_4 = V_1$ ). Nun wird der Verdränger nach oben bewegt (Abb. 3d), und das kalte Gas strömt durch den „warmen“ Regenerator in den unteren beheizten Bereich des Zylinders. Dabei wird es (vom Regenerator) von der Temperatur  $T_2$  auf  $T_1$  erwärmt und erhöht seine innere Energie um  $dU_{41} = C_V(T_1 - T_2)$ . Die dazu benötigte Wärme  $Q_{41} = dU_{41} = -Q_{23}$  wird vom Regenerator entnommen, 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:

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

Tabelle 1: Tabellarische Zusammenfassung des Stirlingprozesses.

Takt	Zustandsänderung	Konstante	Konsequenz
1 → 2	isochore Erwärmung	$V = \text{konstant}$	$dW = pdV = 0 \rightarrow dU = dQ$ $dQ = c_v m dT = c_v m (T_2 - T_1)$
2 → 3	isotherme Expansion	$T = \text{konstant}$	$dQ = 0 \rightarrow dU = dW = pdV$ $\Rightarrow W = nRT_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right)$
3 → 4	isochore Abkühlung	$V = \text{konstant}$	$dW = pdV = 0 \rightarrow dU = dQ$ $dQ = c_v m dT = c_v m (T_2 - T_1)$
4 → 1	isotherme Kompression	$T = \text{konstant}$	$dQ = 0 \rightarrow dU = dW = pdV$ $\Rightarrow W = nRT_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right)$

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

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\oint pdV}{Q_{12}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1. \quad (7)$$

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 ( $W > 0$ ).

Allgemein gilt:

*Rechtsprozesse:* Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie

*Linksprozesse:* Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie.

### 4.3 Energieumwandlung und effektiver Wirkungsgrad beim Heißluftmotor

Durch folgende Gründe treten Verluste im „realen“ Stirling-Motor auf, die den idealen thermodynamischen Wirkungsgrad  $\eta_{\text{th}}$  verkleinern:

- Diskontinuierliche Kolbensteuerung nur begrenzt möglich.
- Isotherme Zustandsänderung ist aufgrund zu schneller Gasbewegung kaum möglich; es findet eher eine nahezu adiabatische Zustandsänderung statt, d. h. eine Wärmeübertragung findet kaum statt.
- Wärmeverluste durch das Material.

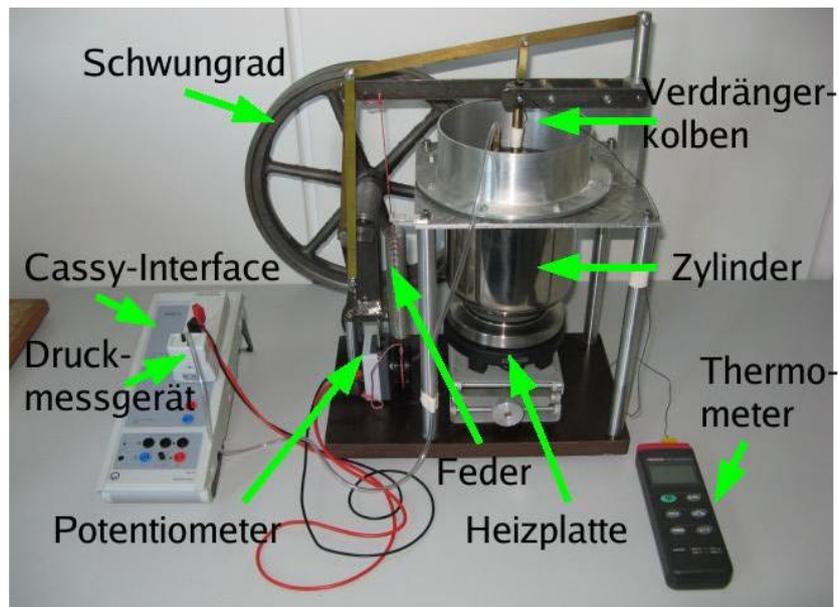


Abbildung 5: „Realer“ Stirling-Motor, Modell KF1-T180 von Walter Kufner, der im Versuch benutzt wird.

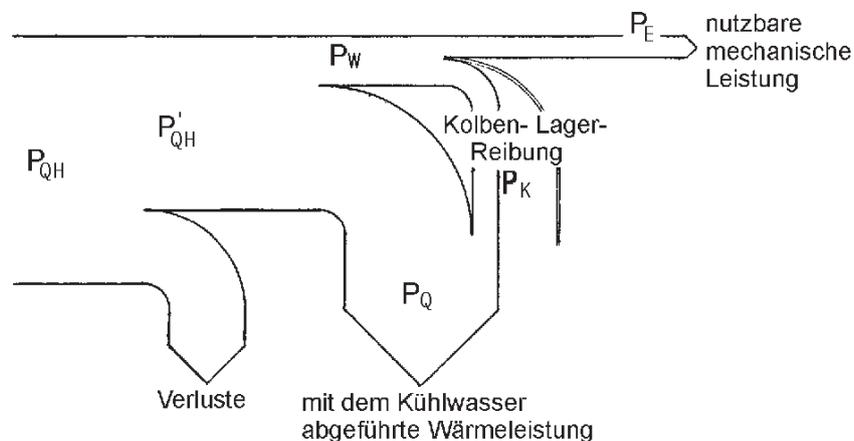


Abbildung 6: Energieflussdiagramm mit Verlusten im „realen“ Stirling-Motor

- Leistungsverringerung aufgrund mechanischer Reibung.
- Arbeitsgas- und Druckverluste wegen Lecks.
- Strömungsverluste (z. B. durch Verwirbelungen), innere Reibung des Arbeitsgases (da reales Gas!).

Für den technischen Einsatz des Motors ist von eigentlicher Bedeutung wieviel der eingesetzten elektrischen Heizleistung  $P_{th}$  letztlich in mechanisch abnehmbare Leistung  $P_{el}$  umgewandelt werden kann. Der effektive Wirkungsgrad

des Heißluftmotors ergibt sich damit zu

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{th}}} = \eta_{\text{mech}} \eta_{\text{th}} \eta_{\text{wv}}. \quad (8)$$

Für die Ermittlung der Teilwirkungsgrade können im Experiment die elektrische Heizleistung  $P_{\text{th}}$  und die Temperaturen der Heizplatte und des Kühlwassers gemessen werden. Die vom Gas verrichtete Arbeit lässt sich durch Integration des entsprechenden Indikatordiagramms bestimmen.

#### 4.4 Stirlingmotor als Kältemaschine und Wärmepumpe

Da die im Praktikum benutzte Stirling-Maschine des Modells KF1-T180 im Versuch nicht als Kältemaschine betrieben wird dient der folgende Abschnitt als theoretischer Ausblick, auf welche Weise Stirlingmotoren außerdem noch genutzt werden können.

Bisher wurde der Stirlingmotor als Wärmekraftmaschine dargestellt: Durch den Fluss von Wärmeenergie von einem warmen zu einem kalten Reservoir wird mechanische Arbeit erzeugt. Bringt man hingegen mechanische Arbeit in das System, 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  $p$ - $V$ -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.

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

$$\eta_{\text{th}}^{\text{K}} = \frac{Q_{34}}{\oint p dV} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} < 1 \quad (9)$$

und für die Wärmepumpe einen Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{th}}^{\text{W}} = \frac{Q_{12}}{\oint p dV} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} < 1 \quad (10)$$

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

$$\eta_{\text{eff}}^{\text{K/W}} = \frac{P_{\text{K/W}}}{P_{\text{Motor}}}. \quad (11)$$

## 5 Versuchsausstattung

### 5.1 Die Stirling-Maschine

Dieser Versuch wird mit der Stirling-Maschine KF1-T180 von W. Kufner durchgeführt. Um einen Temperaturunterschied zu erzeugen wird der Boden des Zylinders durch eine Heizplatte erhitzt und die Oberseite durch Wasser in einem Reservoir gekühlt. Zur Bestimmung der Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  sind sowohl an der Heizplatte als auch an dem Reservoir Temperaturfühler angebracht. Der Hub des Verdrängerkolbens beträgt 2,64 cm, das minimale Volumen beträgt  $V_{\text{min}} = 437 \text{ cm}^3$ , das maximale Volumen  $V_{\text{max}} = 820 \text{ cm}^3$ ; es ergibt sich ein mittleres Volumen  $V_{\text{mittel}}$  von  $628 \text{ cm}^3$ .

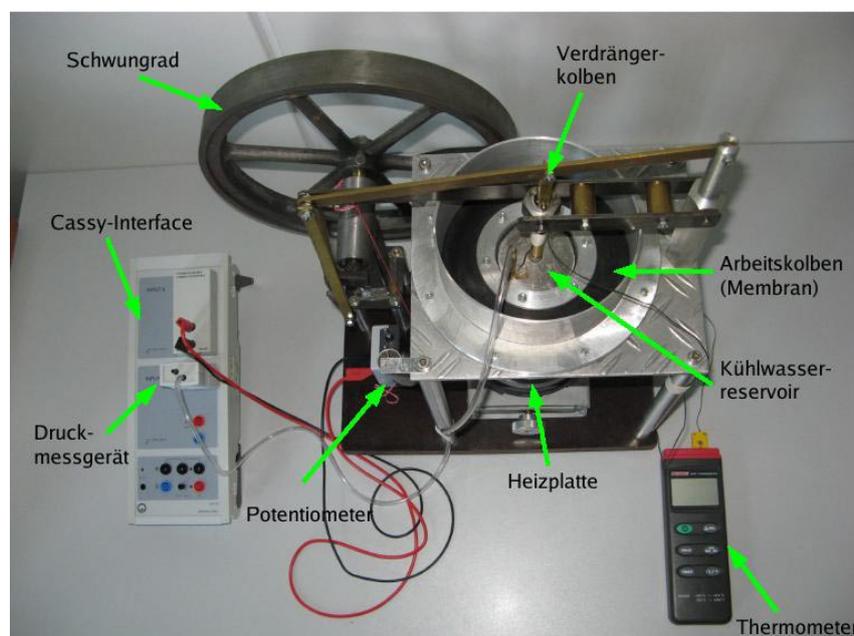


Abbildung 7: Stirling-Maschine Modell KF1-T180 von Walter Kufner

Am Cassy-Interface sind ein Potentiometer und ein Druckmessgerät, welches den Druckunterschied im Zylinder in Bezug auf den Atmosphärendruck misst, angeschlossen. Das Potentiometer ist über eine Schnur mit dem Arbeitskolben verbunden, wobei durch eine Feder die Spannung der Schnur aufrecht-

erhalten wird (siehe Abb. 8). Durch geeignete Eichung des Potentiometers kann somit die Volumenänderung des Zylinders bestimmt werden. Der Druck kann nun in Abhängigkeit der Volumenänderung mit Hilfe des Cassy-Interface am Computer graphisch dargestellt werden (Indikatorgramm).



Abbildung 8: Mittels dieser Feder bleibt der Faden auf der Potentiometer-Rolle gespannt.

## 5.2 Die computererfasste $p$ - $V$ -Messung mit dem CASSY-Adapter

Der in Abb. 4 dargestellte idealisierte Stirling-Kreisprozess wird nur annähernd 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. 9, 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  $90^\circ$  phasenverschoben ist. Ein tatsächlich gemessenes  $pV$ -Diagramm ist in Abb. 9 (links) abgebildet.

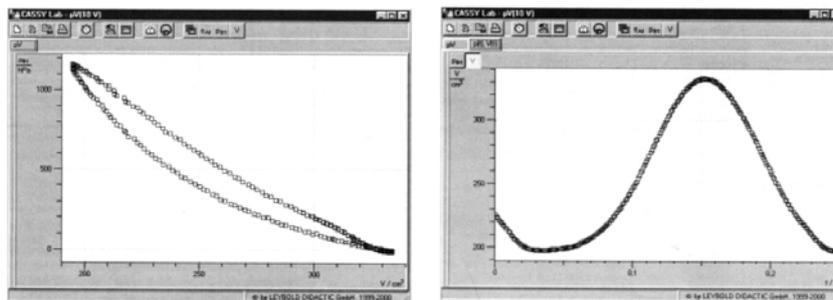


Abbildung 9: CASSY-Auschnitte:  $pV$ -Diagramm (links),  $V(t)$ -Diagramm (rechts)

Die Position des Arbeitskolbens wird über einen Schnurzug auf einen Wegmesser übertragen (siehe Abb. 8). Bei der Bewegung des Kolbens ändert sich das Zylindervolumen insgesamt um  $(140 \pm 0.5) \text{ cm}^3$ . 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. 9). 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 Messrechner geeignete Software (ORIGIN) zu Verfügung.

### 5.3 Sonstiges Zubehör

- Destilliertes Wasser zum Kühlen.
- Talkumpuder zur Pflege der Membran.
- Temperaturfühler der Firma Voltcraft zum Überprüfen der Kühlwassertemperatur.

### 5.4 Allgemeine Sicherheitshinweise

Das Gerät ist bei sachgerechter Handhabung zwar völlig ungefährlich, dennoch müssen einige Dinge beachtet werden. Um die Funktionen richtig zeigen und um Versuche durchführen zu können, ist eine völlig offene Bauweise zwingend erforderlich. Es kann also kein Berührungsschutz unmittelbar am Gerät vorhanden sein. Obwohl es sich eigentlich von selber versteht, wird also nochmals auf folgendes hingewiesen:

- Heiße Teile nicht anfassen (Heizplatte!).
- Nicht in das Kühlwasser greifen, wenn es heiß ist.
- Nicht in das laufende Gerät hineingreifen (Schwungrad, etc.).
- Vor jeder Inbetriebnahme des Motors das Schwungrad mit der Hand drehen und prüfen, ob Kolben und Verdränger frei beweglich sind.
- Nach Ausschalten der Heizplatte Motor NICHT sofort mit der Hand abbremsen, sondern einige Minuten auslaufen lassen.

## 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.5.4) vertraut gemacht haben. Bei Unklarheiten oder offenen Fragen wenden Sie sich stets an den Betreuer. Gehen Sie vorsichtig mit der Maschine um!*

### 6.1 Vorbereitungen

1. *Machen Sie sich mit den wichtigsten Bauteilen des Motors vertraut!*  
Wichtige Bauteile sind Verdränger- sowie Arbeitskolben (Membran), Zylinder, Schwungrad, Kurbelwelle, Temperaturfühler, Potentiometer, Barometer und das CASSY-Interface.
2. *Überprüfen Sie:*
  - die Membran auf defekte Stellen:  
Vor jeder Inbetriebnahme ist unbedingt die Funktionstüchtigkeit der Membran zu überprüfen. Kontrollieren Sie sie auf Risse und poröse Stellen, damit die Funktion des Stirling-Motors gewährleistet ist.
  - die Feder und die Spannung des Fadens:  
Ist die Fadenspannung zu hoch ergeben sich Messfehler. Der Faden sollte durch die Feder gerade so unter Spannung gehalten werden, dass er weder durchhängt und von der Rolle rutscht, noch zu fest gespannt ist und durch die Rückstellkraft der Feder die Haftung auf der Rolle verliert und durchrutscht.
  - den korrekten Anschluss aller Messgeräte

3. Füllen Sie das Reservoir in der Membran mit destilliertem Wasser
4. Passen Sie das Stativ so an, dass die Heizplatte den Zylinderboden berührt und schalten Sie sie an.
5. Starten Sie den Motor, indem Sie das Schwungrad drehen. Sobald das Kühlwasser eine konstante Temperatur besitzt, können die Messungen gestartet werden.
6. Anschluss und Funktionsprüfung des CASSY-Adapters zur  $pV$ -Messung
  - Schalten Sie den CASSY-Adapter ein und starten die zugehörige Software.
  - Machen Sie sich zusammen mit dem Betreuer mit der Software vertraut und testen diese auf Funktion.
  - Achtung: Eichen Sie unbedingt das Potentiometer, damit die gemessene Wegstrecke korrekt in die Volumenberechnung eingeht!

## 6.2 Aufgaben

**Aufgabe 1:** Messen Sie die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  des laufenden Motors und bestimmen Sie rechnerisch den thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  der Stirling-Maschine!

**Aufgabe 2:** Nehmen Sie gleichzeitig das Indikatordiagramm auf und bestimmen Sie durch Integration der Indikatorkurve den mechanischen Wirkungsgrad  $\eta_{mech}$  der Stirling-Maschine! Vergleichen Sie diesen Wert mit dem in Aufgabe 1 berechneten Wirkungsgrad und nennen Sie Ursachen für die Abweichung!

**Aufgabe 3:** Nehmen Sie ein  $V(t)$ -Diagramm des laufenden Motors auf und bestimmen Sie aus dem Verlauf der Funktion die Drehzahl des Motors!

**Aufgabe 4:** Bestimmen Sie den elektrischen Wirkungsgrad  $\eta_{el}$  der Stirling-Maschine. Vergleichen Sie diesen Wert wieder mit den Ergebnissen aus Aufgabe 1 und 2 und erklären Sie das Ergebnis!

**Aufgabe 5:** Schalten Sie den Motor aus (auslaufen lassen, nicht am Schwungrad abbremsen), entfernen Sie das Wasser aus dem Reservoir, schließen Sie alle Programme, schalten Sie alle benutzten Geräte ab und verlassen Sie Ihren Arbeitsplatz so, wie Sie ihn gerne aufgefunden hätten! Vielen Dank!