

Der Stirlingmotor –

ein Motor, der mit Luft läuft?

Inhalt

- 1. Wie funktioniert ein Stirlingmotor?**
 - 1.1 Einleitung**
 - 1.2 Thermodynamische Grundlagen**
 - 1.3 Der stirlingsche Kreisprozess**

- 2. Experimente**
 - 2.1 Kalibrierung für Temperatur- und Volumenmessungen**
 - 2.2 Wie groß ist die Leistung des Spiritusbrenners?
(Experiment 1)**
 - 2.3 Was ändert sich bei Variation des Drehmoments?
(Experiment 2)**
 - 2.4 Welchen realen Wirkungsgrad hat der Stirlingmotor?
(Experiment 3)**
 - 2.5 Wie groß ist der mechanische Wirkungsgrad?
(Experiment 4)**
 - 2.6 Wie groß ist der stirlingsche Wirkungsgrad?
(Experiment 5)**

- 3. Quellen**

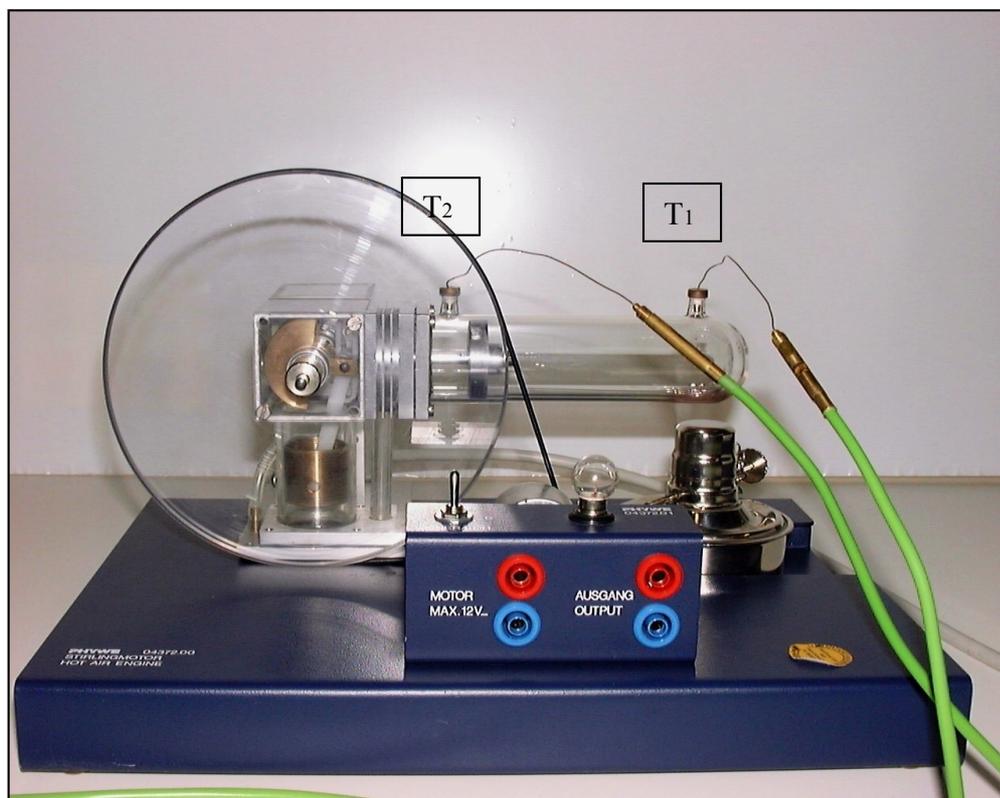
1. Wie funktioniert ein Stirlingmotor?

1.1. Einleitung

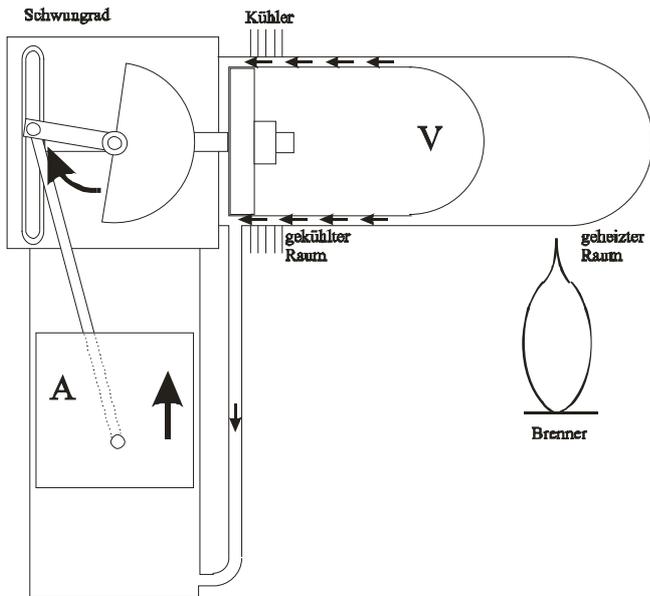
Der „Heißluft-Motor“ wurde 1816 vom Schotten Robert Stirling (1790-1878), erfunden und erreichte bereits die Leistung der damals üblichen Dampfmaschinen. Er arbeitet im Gegensatz zu Dampfmaschinen oder heutigen Dieselmotoren mit einem abgeschlossenen Arbeitsgas, das auf beliebige Weise erhitzt werden kann. Der erste Stirlingmotor wurde zur Entwässerung des Bergwerks in Ayrshire, Schottland eingesetzt, da bei seiner Verwendung die Explosionsgefahr viel geringer als bei einer Dampfmaschine war. Er lieferte 2 Jahre lang eine Leistung von 2 PS, bis er wegen zu hoher Temperaturen „durchbrannte“. Wegen der Minderwertigkeit des damaligen Materials, das den hohen Temperaturen bzw. Drücken nicht standhalten konnte, setzte sich dieser Motor nicht durch.

1937 waren die nötigen Materialien vorhanden. Der niederländische Philips-Konzern begann mit der Weiterentwicklung der Stirlingmaschine: Die Effizienz konnte zwar enorm gesteigert, doch die Marktreife nie erreicht werden. Philips erkannte aber früh das Potential der Stirlingmaschine bei umgekehrter Nutzung. Ein Stirlingmotor kann auch mechanisch angetrieben werden und erzeugt dann eine Temperaturdifferenz, wodurch sehr tiefe Temperaturen erreicht werden können. Dieser Einsatz entspricht dem einer Wärmepumpe. Bis heute ist das die häufigste Anwendung der Stirlingmaschine.

Sein theoretisch idealer Wirkungsgrad und der gleichmäßige Lauf machen ihn eigentlich sehr attraktiv. Das große Problem, das die Entwicklung eines Automotors in den siebziger Jahren scheitern ließ, ist aber, dass er sehr lange braucht, um gestartet zu werden (man sieht das auch bei diesem Versuch), und seine Drehzahl nur sehr schwierig geregelt werden kann. Im Kapitel 1.2 folgen die thermodynamischen Grundlagen, zu denen angemerkt werden muss, dass Stirling auch ohne sie auskam, da die wesentlichen Erkenntnisse und Zusammenhänge erst Jahrzehnte später formuliert wurden.

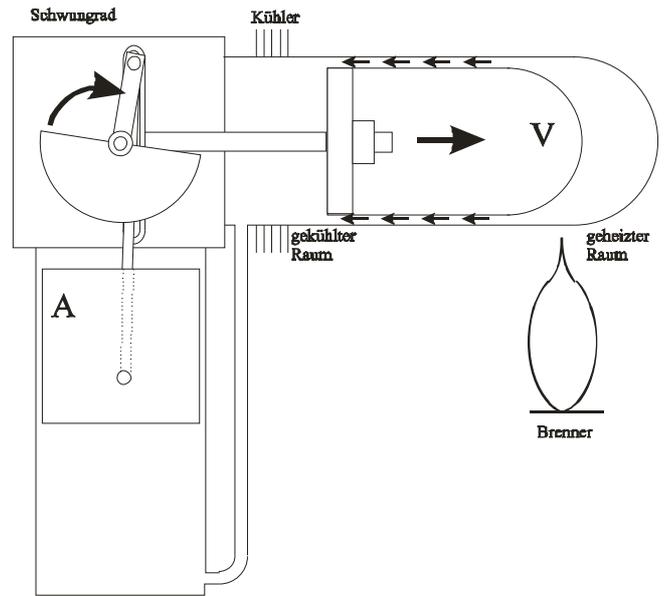


Das Funktionsprinzip des Stirlingmotors:



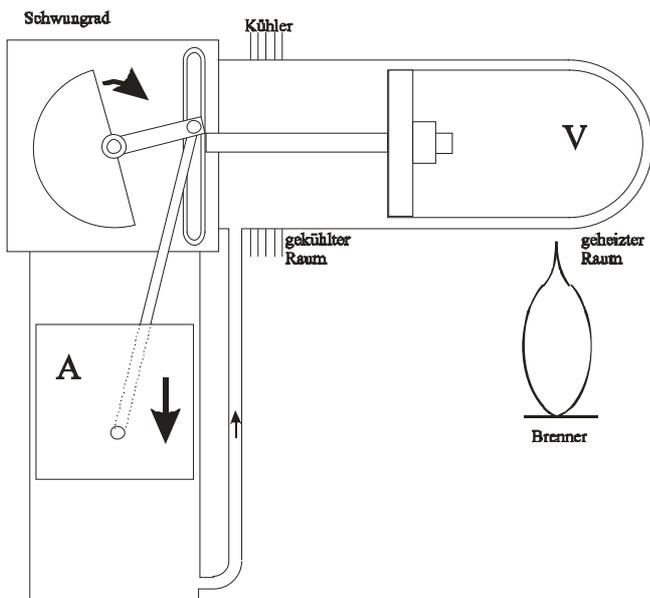
1. Arbeitstakt:

Das Arbeitsgas (Luft) wird erhitzt und dehnt sich aus. Der Arbeitskolben (A) wird nach oben gedrückt und gibt nach außen Arbeit ab.



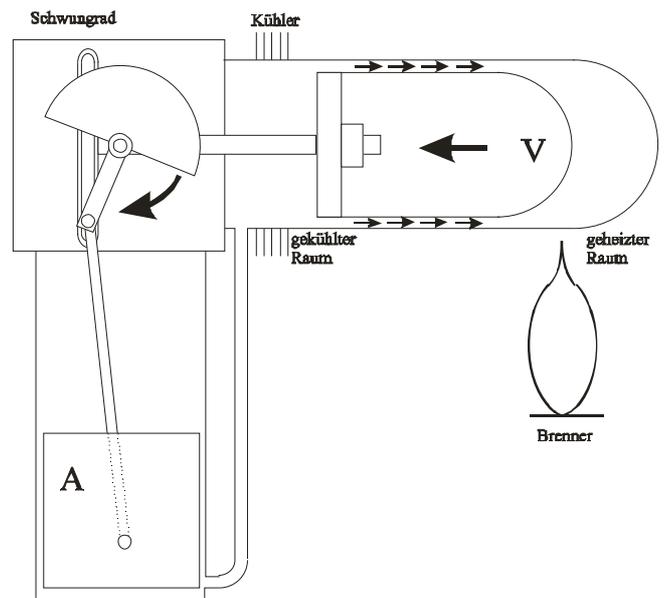
2. Verdrängungstakt I:

Der Verdrängerkolben (V) schiebt die heiße Luft in den gekühlten Bereich. Während sie an ihm vorbeiströmt, nimmt der Verdrängerkolben Wärme auf. Die Luft wird gekühlt, der Druck sinkt.



3. Kompressionstakt:

Der Arbeitskolben komprimiert die Luft. Er führt der Luft Arbeit zu, welche von außen (→ Schwungrad) geliefert wird.



4. Verdrängungstakt II:

Der Verdrängerkolben schiebt die kalte Luft in den geheizten Bereich. Während sie an ihm vorbeiströmt, gibt der Verdrängerkolben Wärme an die Luft ab. Die Luft wird erhitzt, der Druck steigt. Der Kreisprozess beginnt wieder von vorn.

Der Stirlingmotor gibt im Arbeitstakt eine größere Energiemenge nach außen ab, als er beim Kompressionstakt von außen erhält, da durch die zwischenzeitliche Abkühlung der Druck der Luft gesunken ist und sich diese daher leichter komprimieren lässt. Arbeits- und Verdrängerkolben bewegen

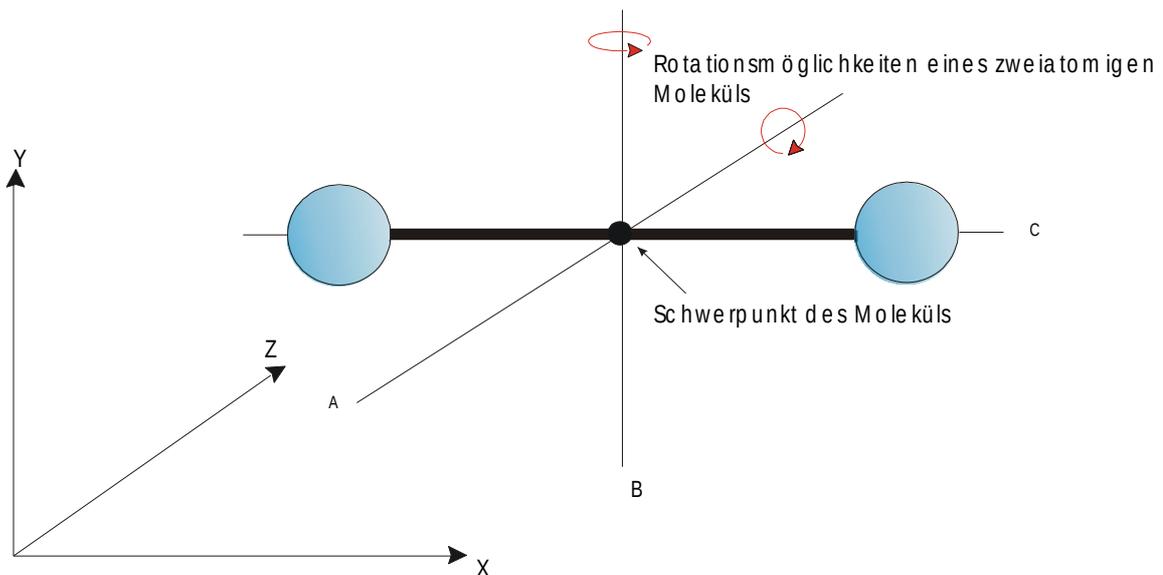
sich etwa 90° gegeneinander phasenverschoben, so dass sich die einzelnen Teilprozesse überlagern – die Takte lassen sich also nicht so streng wie beim Ottomotor trennen¹.

1.2 Thermodynamische Grundlagen

Um die genaueren physikalischen Zusammenhänge des Stirlingmotors zu verstehen, müssen folgende Begriffe und Zusammenhänge eingeführt werden:

Die innere Energie: Die meisten realen Gase (H_2 , O_2) haben zwei- oder mehratomige Moleküle. Diese können neben einfachen Translationsbewegungen auch Rotationsbewegungen um die verschiedenen Achsen des Moleküls ausführen. Die Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten werden auch Freiheitsgrade genannt.

Beispiel: Ein zweiatomiges Molekül hat fünf Freiheitsgrade².



Es gibt drei voneinander unabhängige Bewegungsmöglichkeiten des Schwerpunktes innerhalb des Koordinatensystems und zwei verschiedene voneinander unabhängige Rotationsmöglichkeiten. Deshalb kommen zur einfachen Bewegungsenergie noch andere Energieformen hinzu. Die innere Energie ist die Summe aus den verschiedenen Bewegungsenergien (Schwerpunktsenergie und Rotationsenergie).

1. Hauptsatz der Wärmelehre: Die innere Energie eines Gases ist keine unveränderliche Größe. Wird das Volumen eines Gases verkleinert, so muss die Arbeit dW verrichtet werden. Da Arbeit eine Energieform ist und somit nicht verloren gehen kann, muss diese zu einer Erhöhung der kinetischen Energie bzw. Rotationsenergie und somit zu einem Anstieg der inneren Energie führen. Eine andere Möglichkeit, die innere Energie eines Gases zu erhöhen, besteht darin, dem Gas direkt eine Wärmemenge dQ zuzuführen. Der funktionale Zusammenhang zwischen der Änderung der inneren Energie dU , verrichteter Arbeit dW und zugeführter Wärmemenge dQ ist :

$$dU = dQ + dW .$$

Da es sich bei unseren Betrachtungen um ein Gas handelt, ist es sinnvoll, die Arbeit dW anders auszudrücken. Wenn ein Gas expandiert, so muss es gegen den äußeren Druck p die Arbeit dW aufbringen. Der Zusammenhang zwischen Energieänderung dW , äußerem Druck p und der Volumenänderung dV ist:

¹ So gesehen ist es sogar etwas ungenau, von „Takten“ zu sprechen.

² Bei sehr viel höheren Temperaturen, als sie bei uns verwendet werden, kann das Molekül zusätzlich Schwingungsbewegungen ausführen, so dass weitere Freiheitsgrade hinzukommen.

$$dW = -p dV .$$

Der 1. Hauptsatz kann dann folgendermaßen geschrieben werden:

$$dU = dQ - p dV .$$

Wichtige thermodynamische Zusammenhänge:

Isochore Erwärmung und Abkühlung:

Bei einer isochoren Erwärmung (d.h. Erwärmung bei konstantem Volumen) wird einem Gas die Wärmemenge dQ zugeführt. Das Gas dehnt sich somit, da das Volumen konstant bleibt, nicht aus und gibt demnach keine Arbeit an seiner Umgebung ab. Der Druck innerhalb des Gases steigt.

Aus dem 1. Hauptsatz folgt nun, dass die zugeführte Wärmemenge $dQ = dU$ ist. Die Wärmemenge dQ wird vollständig in innere Energie umgesetzt, was einen Temperaturanstieg bewirkt. Der umgekehrte Fall tritt bei einer isochoren Abkühlung ein. Der Druck sinkt bei konstantem Volumen. Auch hier verrichtet das Gas gegenüber seiner Umgebung keine Arbeit. Das Gas gibt somit die Wärmemenge $dQ = dU$ ab, was dazu führt, dass die innere Energie U abnimmt und das Gas sich abkühlt.

Isotherme Zustandsänderung:

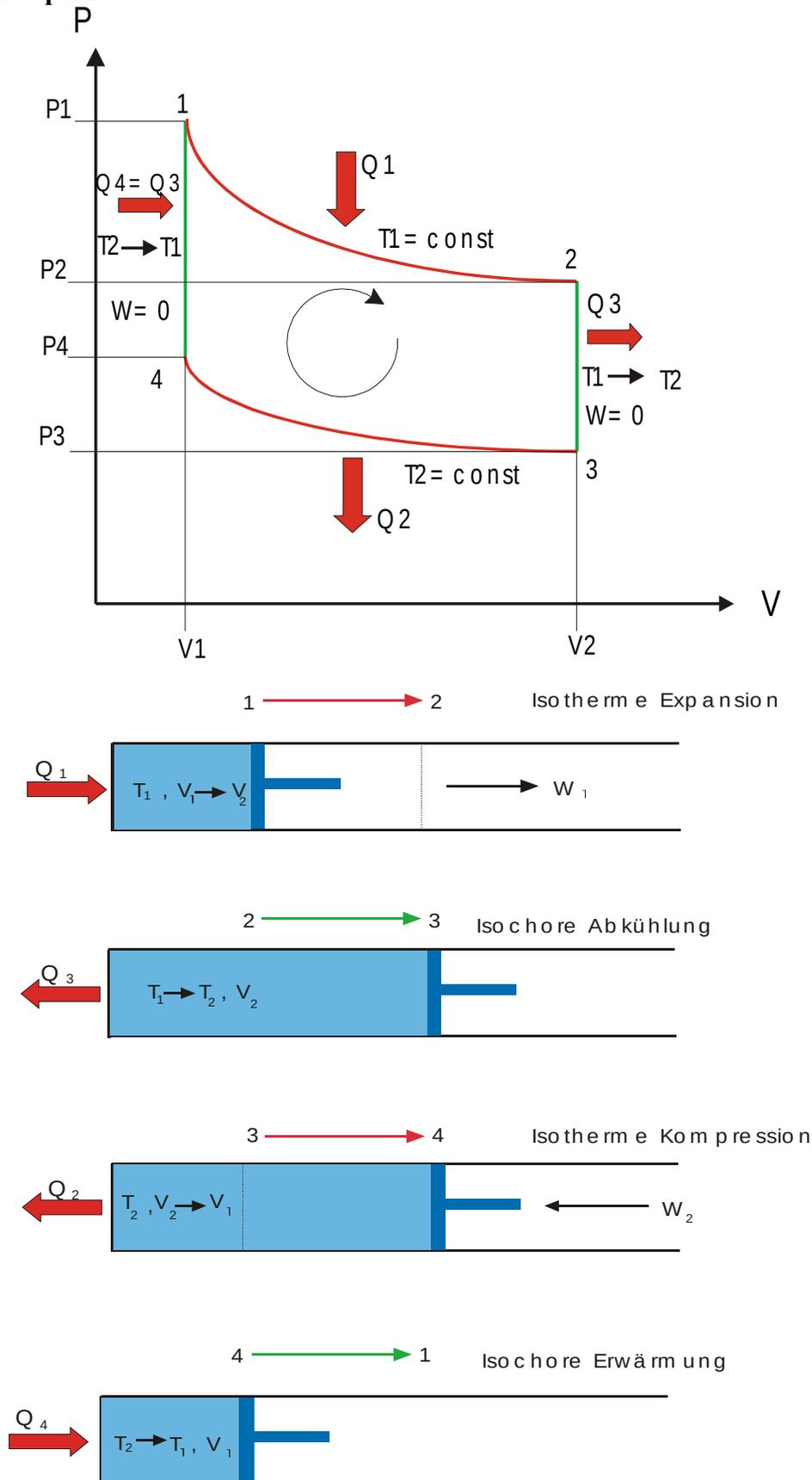
Bei einer isothermen Zustandsänderung bleibt die Temperatur T des Gases konstant. Eine Isotherme ist im p - V -Diagramm ein Hyperbelast. Da sich die Temperatur nicht ändert, bleibt die innere Energie des Gases konstant. Aus dem 1. Hauptsatz folgt nun $dQ = dW$. Damit sich bei der Ausdehnung des Gases die Temperatur nicht ändert, muss das Gas von außen Wärmeenergie aufnehmen. Die zugeführte Wärmeenergie dQ wird in mechanische Arbeit gegen den äußeren Druck umgewandelt. Diesen Vorgang nennt man isotherme Expansion. Der umgekehrte Fall tritt bei einer isothermen Kompression ein. Wird das Volumen des Gases bei konstanter Temperatur verkleinert, so muss das Gas die Wärmemenge dQ abgeben, damit die innere Energie U konstant bleibt. Auch hier entspricht die am Gas verrichtete Arbeit dW der abgegebenen Wärmeenergie dQ , d.h. $dW = dQ$.

1.3 Der stirlingsche Kreisprozess

Der Motor durchläuft im Idealfall einen reversiblen, das heißt umkehrbaren, Kreisprozess. Dieser so genannte Stirlingprozess besteht aus vier Abschnitten (vgl. Abbildung auf der nächsten Seite):

1. **Arbeitstakt:** Das Arbeitsgas dehnt sich isotherm ($T_1 = \text{const.}$) von $(V_1 | p_1)$ nach $(V_2 | p_2)$ aus. Dabei verrichtet das Gas Arbeit und nimmt eine äquivalente Wärmemenge Q_1 aus der Umgebung auf.
2. **Verdrängungstakt I:** Das Arbeitsgas erfährt von $(V_2 | p_2)$ nach $(V_2 | p_3)$ eine isochore Abkühlung. Vom Gas wird dabei die Wärmemenge Q_3 abgegeben, wobei das Gas keine Arbeit gegenüber seiner Umgebung verrichtet. Dies führt dazu, dass die Temperatur des Gases von T_1 nach T_2 sinkt.
3. **Kompressionstakt:** Das Arbeitsgas wird isotherm von $(V_2 | p_3)$ nach $(V_1 | p_4)$ komprimiert. Die dabei am Gas verrichtete Arbeit wird bei konstanter Temperatur T_2 als Wärme Q_2 abgegeben.
4. **Verdrängungstakt II:** Das Arbeitsgas wird isochor von $(V_1 | p_4)$ nach $(V_1 | p_1)$ komprimiert. Da an dem Arbeitsgas keine Arbeit verrichtet wird und somit das Volumen konstant bleibt, muss das Arbeitsgas die Wärmemenge $Q_4 = Q_3$ aufnehmen. Die Temperatur des Gases steigt von T_2 nach T_1 .

Stirlingscher Kreisprozess³:



Um die Funktionsweise einer Wärmekraftmaschine theoretisch erklären zu können, hat der Physiker Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) einige Idealisierungen vorgenommen. So ist der von ihm berech-

³ In der Abbildung ist der Druck p mit einem Großbuchstaben (P) bezeichnet. Auch die Indizes stehen aus drucktechnischen Gründen manchmal zu hoch.

nete Wirkungsgrad (vgl. Kapitel 2.6) unabhängig vom verwendeten Arbeitsgas. Dieser ist das theoretische Optimum und kann in der Praxis kaum erreicht werden.

2. Die Experimente

2.1 Kalibrierung für Temperatur- und Volumenmessungen

Schließen Sie das Stirlingmotorkabel an das Messgerät an. Schließen Sie die beiden Temperaturmessfühler an das Messgerät an, schrauben sie deren beide Schutzhüllen ab stecken Sie die darunter befindlichen Drähte in die dafür vorgesehenen Öffnungen des Stirlingmotors (siehe dazu Abb. Auf S. 2).

Direkt nach dem Einschalten führt das Messgerät einen kurzen Selbsttest durch. Nach erfolgreichem Abschluss dieses Tests erscheint in der mittleren Anzeige die Aufforderung „CAL“.

Die beiden angeschlossenen Temperaturfühler müssen nun auf die gleiche Temperatur gebracht werden (z.B. in einem Wasserbad). Dann ist die Taste „Kalibrieren ΔT “ zu drücken. Das Gerät erfasst beide Messwerte und speichert ihre Differenz bis zum Ausschalten des Gerätes.

Nach der Temperatur-Kalibrierung erscheint im oberen Display die Kennung „ot“. Es ist darauf zu achten, dass die Sensoreinheit des Stirlingmotors mit der 8-poligen Buchse des Messgeräts verbunden ist. Der Arbeitskolben wird nun in die Stellung gebracht, bei der im Stirlingmotor das kleinste Volumen zur Verfügung steht, d.h. der Arbeitskolben befindet sich in seinem tiefsten Punkt. In dieser Stellung ist die Taste „Kalibrierung V“ zu drücken.

Die Tasten für die Kalibriervorgänge haben während des weiteren Betriebes keine Funktionen mehr. Ein neuer Kalibriervorgang kann nur nach Aus- und Einschalten des Messgerätes vorgenommen werden.

2.2 Wie groß ist die Leistung des Brenners? (Experiment 1)

Beschreibung des Aufbaus und der Durchführung:

- Ein Becherglas wird mit 200 ml Wasser gefüllt und mit einem Asbestnetz auf einen Dreifuß gestellt.
- Der Brenner wird auf zwei Holzklötze oder einen „Laborboy“ unter den Dreifuß gestellt.
- Das Wasser wird erwärmt. Mit einem Thermometer wird die Temperatur gemessen. Die Differenz zwischen Anfangs- und Endtemperatur sollte ca. 20°C bis 30°C betragen. Die für die Erwärmung benötigte Zeit wird ebenfalls gemessen.
- Gegebenenfalls kann durch eine Kontrollmessung überprüft werden, ob sich die Messergebnisse reproduzieren lassen

Auswertung:

Aus den gesammelten Daten wird die mittlere wirksame Brennerleistung berechnet.

$$\Delta Q = m_w \cdot c_w \cdot \Delta T \qquad P_{\text{Brenner}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

mit:

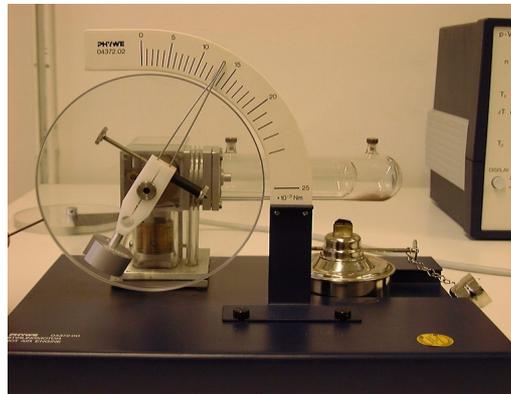
ΔQ : Wärmeenergie / Wärmemenge, m_w : Masse des Wassers,
 c_w : spezifische Wärmekapazität des Wassers (4,18 J/(g K)),
 ΔT : Temperaturdifferenz, P: Leistung

Aufgabe: Überlegen Sie, welche Fehlerquellen bei diesem Experiment auftreten! An welchen Stellen wird genähert? Wie könnte man den Messprozess bzw. die Auswertung optimieren?

2.3 Was ändert sich bei Variation des Drehmoments? (Experiment 2)

Beschreibung des Aufbaus und der Durchführung:

- Die Generatoreinheit wird durch die Drehmomentskala ersetzt.
- Vor die Schwungscheibe wird die Aufnahme für den Drehmomentmesser montiert.
- Der Motor wird in Betrieb genommen.
- Der Drehmomentmesser wird auf die Aufnahme gesetzt. Die Reibung kann mittels der Stell- schraube variiert werden. Bis sich der genaue Wert eingestellt hat, vergehen ca. 3 Minuten.



Aufgabe:

Stellen Sie eine qualitative Beziehung zwischen den Größen Drehmoment, Temperatur und Drehfrequenz her!

2.4 Welchen realen Wirkungsgrad hat ein Stirlingmotor? (Experiment 3)

Der reale Wirkungsgrad des Stirlingmotors spiegelt die Qualität des gesamten Systems wider. Er gibt an, wie effizient die zugeführte Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt wird.

Beschreibung des Aufbaus und der Durchführung:

- Aufbau wie bei Experiment 2.
- Nehmen Sie die Werte von f in min^{-1} , ΔT und T_2 für die Drehmomente 5, 10 und 15 mNm in der folgenden Tabelle auf. Jeder Wert ist dreimal zu ermitteln und der Mittelwert zu berechnen.
Tipp: 15 mNm langsam einstellen, da der Motor sonst „abgewürgt“ wird.

M in mNm	f in min^{-1}	f in Hz	ΔT in K	T_2 in $^{\circ}\text{C}$	P_{mech} in W	η

Auswertung:

Mit dem Drehmoment M und der Drehfrequenz („Drehzahl“) f wird die (mechanische) Leistung des Stirlingmotors gemäß der nachfolgenden Gleichung⁴ berechnet.

$$P_m = 2\pi \cdot M \cdot f$$

⁴ Diese Gleichung lässt sich mit etwas Mühe aus „Arbeit gleich Kraft mal Weg“ und „Leistung gleich Arbeit pro Zeit“ herleiten, wenn man zusätzlich grundlegende Beziehungen bei Kreisbewegungen beachtet.

Die berechnete Leistung wird mit der Brennerleistung ins Verhältnis gesetzt:

$$\eta = \frac{P_m}{P_B}$$

Aufgabe:

Vergleichen Sie die Leistungen miteinander! Was sagt dies über den Wirkungsgrad aus? Erklären Sie dies !

2.5 Wie groß ist der mechanische Wirkungsgrad? (Experiment 4)

Man kann die einzelnen Schritte der Energieumwandlung weiter untersuchen:

1. Der real ablaufende Kreisprozess ist nicht ideal, d.h. hier geht Energie verloren.
2. Reibungsverluste im Motor führen zu weiteren Energieverlusten.

Hier soll nun bestimmt werden, welcher Anteil der vom realen Kreisprozess gelieferten Energie vom Stirlingmotor letztendlich in Form mechanischer Energie nach außen abgegeben wird.

Beschreibung des Aufbaus und der Durchführung:

- Aufbau wie bei Experiment 2.
- An der Sensoreinheit wird zusätzlich das Oszilloskop angeschlossen: V an den horizontalen Eingang (Kanal II) p an den vertikalen Eingang (Kanal I). Die rote Taste „Hor.ext.“ ist gedrückt.
- Die Geräte werden eingeschaltet.
- Das Oszilloskop wird so eingestellt, dass der Kreisprozess auf dem Bildschirm gut zu erkennen ist: V auf 1 V/cm, p auf 0,2 V/cm.
- Die Einstellungen des Oszilloskops werden abgelesen und notiert. Fotografieren Sie den Bildschirm mit Ihren Smartphones ab. Der Inhalt der vom Kreisprozess eingeschlossen Fläche wird z.B. mit Hilfe von Millimeterpapier ausgemessen und notiert.

Auswertung:

Zur Bestimmung der Leistung werden die Einstellungen des Oszilloskops und der Flächeninhalt des p-V-Diagramms in die folgende Gleichung⁵ eingesetzt:

$$P_{pV} = k \cdot x \cdot y \cdot A \cdot f$$
$$\text{mit } k = 7,94 \cdot 10^{-6} \frac{W \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^2}{V^2 \cdot \text{mm}^2}.$$

Zur Berechnung des mechanischen Wirkungsgrads wird die berechnete Leistung P_{pV} mit der mechanischen Leistung P_m ins Verhältnis gesetzt:

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_{pV}}.$$

P: Leistung (Einheit: W); die Indizes stehen für m(echanisch), pV(Druck, Volumen; stellvertretend für den Kreisprozess), B(renner), C(arnot)

M: Drehmoment (Einheit: Nm)

f: Drehfrequenz (Einheit: min^{-1})

⁵ Die Herleitung dieser Gleichung ist relativ aufwändig. Sie basiert auf der Tatsache, dass die vom Kreisprozess verrichtete Arbeit der Fläche im p-V-Diagramm entspricht und näherungsweise als Summe aller Quadrate $\Delta p \cdot \Delta V$ angesehen werden kann. Zusätzlich gehen die Empfindlichkeiten des Druck- und des Volumensensors sowie Einheitenrechnungen ein.

A: Flächeninhalt (Einheit: mm²)

x: Ablenkung in x-Richtung am Oszilloskop (Einheit: V/cm)

y: Ablenkung in y-Richtung am Oszilloskop (Einheit: V/cm)

2.6 Wie groß ist der stirlingsche Wirkungsgrad? (Experiment 5)

Der Stirlingprozess⁶ ist, ebenso wie der Carnotprozess, ein *idealer* Kreisprozess. Der so genannte stirlingsche Wirkungsgrad gibt also den theoretischen Maximalwert an, der auch unter optimalen Bedingungen niemals übertroffen werden kann. Der real erreichte Wirkungsgrad (vgl. 2.4 und 2.5) ist deutlich kleiner.

Auswertung:

Der stirlingsche Wirkungsgrad⁷ berechnet sich nur aus den absoluten Temperaturen (in Kelvin, wobei 273 K = 0 °C) gemäß der Gleichung:

$$\eta_s = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Benutzen Sie Ihre Messwerte aus 2.4.

3 Quellen⁸

Ein Universitätskript, das mathematisch anspruchsvoller ist und weitergehende grundlegende Informationen zum Stirlingmotor und –prozess enthält:

<https://ap.physik.uni-konstanz.de/AP-public/Anleitungen/Heissluftmotor.pdf>

Eine Adresse, unter der man sehr viele verschiedene kleine Stirlingmotoren bestellen kann:

<http://www.boehm-stirling.com/>

Im Internet sind zahlreiche weitere Materialien zum Stirlingmotor zu finden. Geben Sie bei „www.google.de“ oder einer anderen Suchmaschine den Begriff „Stirlingmotor“ ein und recherchieren Sie selbst!

Stand 5.1.2018

⁶ Um es ganz deutlich zu sagen: Ein Stirlingmotor führt also in Wirklichkeit gar keinen Stirlingprozess aus! Vielmehr ist dieser eine Idealisierung des real ablaufenden Kreisprozesses, mit der man einfacher rechnen kann.

⁷ Carnot- und Stirlingprozess haben übrigens den gleichen Wirkungsgrad, da beides ideale Kreisprozesse sind.

⁸ Internetquellen veralten oft sehr schnell. Schon nach kurzer Zeit können bestimmte Links nicht mehr erreichbar oder Inhalte geändert sein. Darum ist es sinnvoll, mit Hilfe von Suchmaschinen (z.B. www.google.de) immer aktuell zu recherchieren. Interessante Texte sollte man sich herunterladen.