

Stirling Maschine (T8)

Ziel des Versuches

In diesem Versuch beschäftigen Sie sich mit der Funktionsweise der Stirling Maschine, einer periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschine. Nach der Kalibrierung der Apparatur werden p - V -Diagramme bei unterschiedlichen Belastungen der Stirling Maschine aufgezeichnet und ausgewertet. Dabei werden die Nutzarbeit und die Leistung der Stirling Maschine sowie verschiedene Wirkungsgrade ermittelt und verglichen.

Vorkenntnisse

Folgende Begriffe und deren Inhalte müssen Sie vor dem Versuch kennen:

- Temperatur und Wärme
- Arbeit und Leistung
- thermodynamische Zustandsgrößen und Zustandsänderungen
- Modell des idealen Gases
- den 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik
- reversible und irreversible Prozesse
- Kreisprozesse
- Wirkungsgrad

Theoretischer Hintergrund

Als Alternative zu den durch häufige Kesselexplosionen damals recht gefährlichen Hochdruckdampfmaschinen wurde von den schottischen Brüdern Stirling der Heißluftmotor, die sogenannte Stirling Maschine, entwickelt. Sie wurde 1816 von Robert Stirling zum Patent angemeldet und erreichte in der Folgezeit bereits Wirkungsgrade bis zu 18 %. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts existierten weltweit etwa 250 000 Stirling Maschinen. Durch die Entwicklung von Otto- und Dieselmotor erlosch jedoch das Interesse an einer Weiterentwicklung der Stirling Maschine. Seit einigen Jahrzehnten hat die Stirling Maschine für spezielle Anwendungen wieder an Bedeutung gewonnen.

Die Stirling Maschine verwendet eine im Motor eingeschlossene Gasmenge als Arbeitsmedium. Sie benötigt – im Gegensatz zum Otto- oder

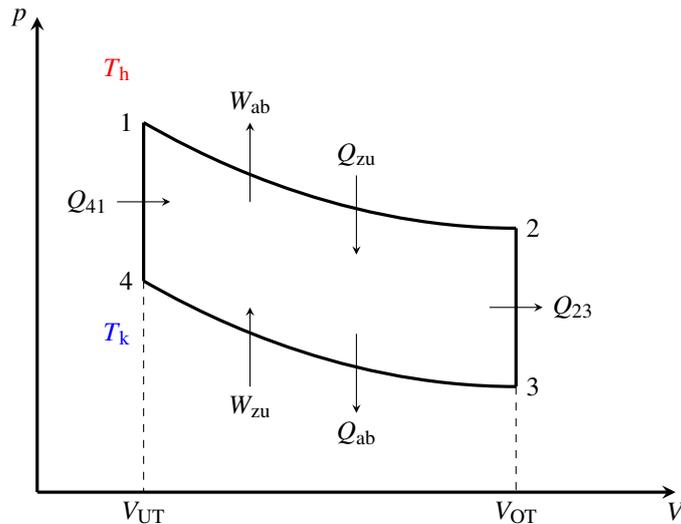


Abbildung 1: $p - V$ Diagramm des idealen Stirling Kreisprozesses

Dieselmotor – eine kontinuierliche Wärmezufuhr, sodass auch abgasfreie Wärmequellen (Sonne, Geothermie, Zerfallswärme) einsetzbar sind. Mit der Stirling Maschine lassen sich so z. B. luftunabhängige Antriebe für U-Boote oder Generatoren für die Raumfahrt als Alternative zur recht störanfälligen Brennstoffzelle realisieren. Mit der Stirling Maschine kann Sonnenenergie direkt in mechanische Energie umgewandelt werden. Ein großer Vorteil ist ihr geräuschloser Lauf. Die Stirling Maschine kann auch als Kraftwärmemaschine, also als Kältemaschine oder als Wärmepumpe, eingesetzt werden. Dabei wird die Stirling Maschine mechanisch angetrieben und kann so Wärme vom kälteren zum wärmeren Wärmereservoir übertragen. Ein Nachteil der Stirling Maschine ist, dass die zugeführte Wärmeenergie erst über Wärmeleitung durch die Zylinderwand auf das Arbeitsmedium übertragen werden muss.

Die Stirling Maschine besteht aus einem Verdrängerkolben und einem Arbeitskolben, die um 90° versetzt auf die Kurbelwelle wirken. Bei dem im Versuch verwendeten sogenannten β -Typ befinden sich beide Kolben innerhalb eines Zylinders, der von unten beheizt und von oben gekühlt wird. Der Verdrängerkolben ist in der heißen und der Arbeitskolben in der kalten Zone angeordnet. Der Arbeitskolben wird von der eingeschlossenen Luft angetrieben. Der Verdrängerkolben schließt nicht dicht mit der Zylinderwand ab und besitzt in Längsrichtung mehrere zusätzliche durchgehende Bohrungen. Durch seine Bewegung treibt er die eingeschlossene Gasmenge abwechselnd in die heiße und in die kalte Zone des Zylinders. Im ersten Fall steigt mit der Temperatur auch der Druck, im zweiten Fall sinkt der Druck. Durch die Druckdifferenz wird der Arbeitskolben hin und zurück bewegt. In den Bohrlöchern des Verdrängerkolbens befindet sich ein Wärmespeicher, auch Regenerator genannt, der als Gegenstrom-Wärmeübertrager wirkt. In unserem Versuch besteht der Verdrängerkolben aus Holz und der Regenerator aus Stahlwolle.

Ideale Stirling Maschine

Die ideale Stirling Maschine durchläuft einen Kreisprozess, der gemäß Abb. 1 aus vier Schritten besteht:

- (1 → 2) Isotherme Expansion (Temperatur T_h), bei der das Gas die Arbeit W_{ab} leistet und dafür die Wärmemenge Q_{zu} aus dem Wärmereservoir mit der Temperatur T_h aufnimmt. Es gilt:

$$Q_{zu} = W_{ab} = nRT_h \ln \frac{V_{OT}}{V_{UT}} \quad , \quad (1)$$

wobei n die Stoffmenge, R die Gaskonstante, V_{OT} das Gasvolumen beim oberen und V_{UT} das Gasvolumen beim unteren Totpunkt des Arbeitskolbens sind.

- (2 → 3) Isochore Abkühlung (Volumen V_{OT}). Bei der Durchströmung (Verdrängerkolben bewegt sich) gibt das warme Gas die Wärmemenge Q_{23} ab, die im Regenerator gespeichert wird.
- (3 → 4) Isotherme Kompression (Temperatur T_k), bei der am Gas die Arbeit W_{zu} geleistet werden muss. Dabei wird die Wärmemenge Q_{ab} an das Wärmereservoir mit der Temperatur T_k abgegeben. Es gilt:

$$Q_{ab} = W_{zu} = nRT_k \ln \frac{V_{OT}}{V_{UT}} \quad . \quad (2)$$

- (4 → 1) Isochore Erwärmung (Volumen V_{UT}). Das kalte Gas nimmt bei der Durchströmung (Verdrängerkolben bewegt sich) die Wärmemenge Q_{41} vom Regenerator auf.

Beim idealen Stirling Prozess ist $|Q_{23}| = |Q_{41}|$, so dass sich die Nutzarbeit W sofort aus Gl. (1) und Gl. (2) ergibt:

$$W = W_{ab} - W_{zu} = nR(T_h - T_k) \ln \frac{V_{OT}}{V_{UT}} \quad . \quad (3)$$

Wie man leicht nachrechnen kann, ist der theoretische Wirkungsgrad einer idealen Stirling Maschine mit einem idealen Gas als Arbeitsmedium gleich dem der Carnot Maschine:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_{zu}} = 1 - \frac{|Q_{ab}|}{Q_{zu}} = 1 - \frac{T_k}{T_h} \quad . \quad (4)$$

Die Nutzarbeit pro Umdrehung entspricht dem Flächeninhalt der umlaufenden Fläche im p - V -Diagramm.

Ein Schwungrad wird benötigt, um die Arbeit W_{zu} zu leisten. Eine höhere Nutzarbeit bei einer vorgebenen Stirling Maschine könnte man erzielen, wenn man mit einer größeren Temperaturdifferenz zwischen den Reservoiern arbeitet (Druckdifferenz), ein einatomiges Gas verwendet (Anzahl der am Energieaustausch beteiligten Freiheitsgrade), den Kreisprozess bei einem höheren mittleren Druck durchführt (Stöße, freie Weglänge) oder die Drehzahl so klein wie möglich wählt (mehr Zeit für Wärmeaufnahme und Abgabe über Wärmeleitung über die Zylinderwand). Wie jeder Motor hat auch die Stirling Maschine einen optimalen Drehzahlbereich, in dem das maximale Drehmoment erreicht wird.

Reale Stirling Maschine

Im Versuch wird mit einer realen Stirling Maschine experimentiert, deren Wirkungsgrad aus folgenden Gründen kleiner als der theoretisch erwartete sein muss:

- Die Wärmeleitung über die Zylinderwand führt zur Abnahme der Temperatur und damit zur Abnahme der Druckdifferenz.
- Es findet eine kontinuierliche, sinusförmige Bewegung beider Kolben mit einer Phasenverschiebung von 90° statt. Ein sprunghafter Übergang zwischen den thermodynamischen Prozessen (isotherm-isochor-isotherm-isochor) ist deshalb nicht möglich und technisch kaum realisierbar.
- Eine reine isotherme Zustandsänderung ist bei ca. 300 U/min nicht mehr möglich, da nicht genügend Zeit zur Verfügung steht, um die Wärmemengen Q_{ab} und Q_{zu} vollständig auszutauschen. Durch diesen unzureichenden Wärmeübergang nähert sich der Prozess einer adiabatischen Zustandsänderung an. Bei einer adiabatischen Kompression bzw. Expansion wird Arbeit am bzw. vom Arbeitsmedium verrichtet, die zu einer Erhöhung/Erniedrigung der inneren Energie führt. Die Nutzarbeit wird dadurch kleiner.
- Der Regenerator kann die ausgetauschten Wärmemengen Q_{23} und Q_{41} nicht vollständig zwischenspeichern. Der Temperaturgradient zwischen Expansions- und Kompressionsraum wird dadurch kleiner. Das Arbeitsmedium hat im Expansionsraum bzw. im Kompressionsraum eine niedrigere (als T_h) bzw. höhere Temperatur (als T_k).
- Der Wärmeübergang zwischen Erhitzer und Zylinder bzw. zwischen Kühler und Umgebung ist verlustbehaftet.
- Ein nicht unwesentlicher Teil des Arbeitsmediums befindet sich nicht im Expansions- und im Kompressionsraum, sondern durchströmt den Regenerator.
- Verwirbelungen des bewegten Arbeitsmediums führen zu inneren Reibungsverlusten.

Die von einer realen Stirling Maschine tatsächlich geleistete Nutzarbeit sei nun W_t . Der technische Wirkungsgrad wird definiert als

$$\eta_t = \frac{W_t}{Q_{zu}} = \frac{P_t}{P_{th}} = C(1 - T_k/T_h) \quad ,$$

wobei P_t die von der Stirling Maschine erbrachte Nutzleistung und P_{th} die zugeführte Wärmeleistung ist. Der technische Wirkungsgrad ist damit um den Faktor C kleiner als der theoretische. Je nach Effizienz der verschiedenen Stirling Maschinen liegt C zwischen 0,2 und 0,7.

Der Wirkungsgrad der Heizplatte wird definiert als $\eta_H = Q_{Wasser}/E_H$, wobei Q_{Wasser} die aufgenommene Wärmemenge des Wassers (Aufgabe 1) und E_H die durch die Heizplatte aufgenommene elektrische Energie (siehe Energiemessgerät) ist. Die während des Betriebes der Heizplatte an den Stirlingmotor abgegebene Wärmeleistung P_{th} beträgt dann: $P_{th} = \eta_H \cdot P_H$, wobei die Leistung der Heizplatte P_H , die in einer Zeit t aufgenommene elektrische Energie E_H ist ($P_H = E_H/t$).

Versuchsaufbau und -durchführung

Die im Versuch verwendete Stirling Maschine vom β -Typ kann von unten mit einer kleinen Heizplatte beheizt werden. Dadurch wird die aus dickerem Stahl gefertigte Bodenplatte des Zylinders gleichmäßig erwärmt und auf die Temperatur T_h gebracht. In der Platte befindet sich eine kleine Bohrung, in der ein Temperatursensor befestigt ist. Mit Hilfe eines Messgerätes kann die Temperatur T_h abgelesen und überwacht werden. Auf dem Zylinder der Stirling Maschine befindet sich ein Behälter, der mit Eiswasser befüllt wird und das Reservoir mit der Temperatur T_k darstellt. Um die Temperatur T_k konstant zu halten, muss geschmolzenes Eis rechtzeitig ersetzt werden. Überschüssiges Wasser läuft durch den Überlauf am Behälter in ein Becherglas. Um den Druck und die Druckänderungen des Arbeitsmediums (eingeschlossene Luftmenge) messen zu können, ist aus dem Innenraum ein dünnes Rohr nach oben herausgeführt worden. An der Rohröffnung ist über eine Schlauchverbindung ein Drucksensor angeschlossen. Ein sich eventuell im Laufe des Experimentes einstellender Überdruck kann durch kurzes Abziehen des Schlauches von der Rohröffnung abgelassen werden.

Die Pleuelstange, die an der Membran des Arbeitskolbens befestigt ist, bewegt einen Hebel, an dessen Drehpunkt ein Winkelsensor angeschlossen ist. Nach dessen Kalibrierung kann die Volumenänderung des Arbeitsmediums erfasst werden. Zur Kalibrierung des Winkelsensors muss die maximal mögliche Volumenänderung mit Hilfe des Überlaufrohrs bestimmt werden. Die beiden Sensorsignale können als p - V -Diagramm mit dem CASSY-Interface aufgezeichnet werden.

Das Schwungrad der Stirling Maschine kann einen Fahrraddynamo betreiben, dessen Wirkungsgrad laut Hersteller ca. 40 % bei hoher Drehzahl beträgt. Mit der erzeugten Elektrizität kann ein Lämpchen zum Leuchten gebracht werden. Zur Messung von Strom und Spannung stehen Ihnen Multimeter zur Verfügung.

Aufgabenstellung

Teil A: Kalibrierungen bei unbeheiztem Motor:

1. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad der Heizplatte. Messen Sie dazu die Zeit, die benötigt wird um eine bestimmte Menge Wasser (ca. 200 ml) um eine bestimmte Temperatur (ca. 20 K) zu erwärmen. Aus diesen Parametern kann Q_{Wasser} berechnet werden ($c_{\text{Wasser}} = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$). Zusätzlich benötigen Sie noch die, durch die Heizplatte in einer bestimmten Zeit aufgenommene elektrische Energie E_H . Dabei ist die Bestimmung über einen längeren Zeitraum genauer, wie z. B. beim Betrieb des Stirlingmotors.
2. Bestimmen Sie rechnerisch die, von der Heizplatte an den Stirlingmotor abgegebene Wärmeleistung P_{th} unter der Annahme, dass der Wirkungsgrad für die Erwärmung des Wassers im Becherglas und im Stirlingmotor vergleichbar ist.
3. Bestimmen Sie die Volumenänderung ΔV innerhalb der Stirling Maschine mit Hilfe der Überlaufmethode.

4. Zeichnen Sie den Druck in Abhängigkeit vom Winkel (Winkelsensor) mit CASSY auf, wenn Sie die Stirling Maschine langsam¹ (fast keine Temperaturänderung) mit der Hand wenige Zyklen drehen. Aus der Grafik erhalten Sie die Druckänderung Δp und die Winkeländerung $\Delta \alpha$.
5. Berechnen Sie aus Δp und ΔV über die ideale Gasgleichung das Gesamtvolumen V des Arbeitsmediums der Stirling Maschine.
6. Volumenkalibrierung: Kalibrieren Sie den Winkelsensor unter Nutzung der für V und ΔV ermittelten Werte.

¹ Langsam heißt: ca. 1/2 Umdrehung pro Sekunde.

Teil B: Messungen an der kalibrierten und beheizten Stirling Maschine:

1. Nehmen Sie für die unten genannten Fälle die p - V -Diagramme auf. Notieren Sie bei allen Messungen jeweils auch die Temperaturen T_h und T_k und bestimmen Sie jeweils die von der Stirling Maschine bei einem Umlauf abgegebene Arbeit und die Leistung.
 - (a) Für die unbelastete Stirling Maschine.
 - (b) Für die mit dem Dynamo belastete Stirling Maschine.
 - (c) Für die mit dem Dynamo und dem Verbraucher (Glühlampe) belastete Stirling Maschine. Messen Sie die von der Glühlampe aufgenommene Leistung.
2. Bestimmen Sie den theoretischen und den technischen Wirkungsgrad. Bestimmen Sie zusätzlich den Wirkungsgrad des Dynamos.

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Teil A:

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Heizplatte erhitzen Sie ca. 200 ml Wasser um ca. 20 K. Stellen Sie dazu die Heizplatte auf Stufe 8,5. Ändern Sie die Heizstufe während aller nachfolgenden Messungen nicht mehr. Um den Einfluss der zunächst kalten Heizplatte und des kalten Becherglases (500 ml Gefäß) zu vermindern, lassen Sie das Wasser sich zunächst um ca. 10 K erwärmen, bevor Sie die Messung starten. Die Messung des Energiemessgerätes wird mit Drücken der R-Taste (ca. 2s) resettet. Da sich die Heizplatte regelmäßig ein- und ausschaltet, lässt sich die durchschnittlich aufgenommene elektrische Leistung der Heizplatte genauer über einen längeren Zeitraum beim späteren Betrieb des Stirlingmotors bestimmen. Durch mehrmaliges drücken der Taste [V] können Sie sich auch die Messzeit anzeigen lassen.

Die Volumenänderung des Arbeitsmediums bestimmen Sie mit der Überlaufmethode. Heben Sie die Membran des Arbeitskolbens durch langsames Drehen des Schwungrads aus ihrer unteren Position in die obere Position an und messen Sie die Menge des dabei durch den Überlauf abfließenden Wassers. Die Masse dieser Wassermenge kann durch Auswiegen bestimmt werden. Das Volumen dieser Wassermenge entspricht der Volumenänderung des Arbeitsmediums der Stirling Maschine bei einem vollen Umlauf.

Wenn Sie die Stirling Maschine mit der Hand durchdrehen und dabei Druck

und Winkel mit CASSY aufzeichnen, können Sie aus der Grafik die maximale Druckänderung und die maximale Winkeländerung bestimmen. Beide Werte benötigen Sie für die weitere Kalibrierung des später zu messenden p - V -Diagramms. Der Drucksensor arbeitet als Differenzsensor gegen den äußeren Luftdruck. Das Durchdrehen von Hand sollte bei Aufgabe 4 mit ca. $1/2$ Umdrehung pro Sekunde erfolgen, damit keine Temperaturänderung auftritt. Nutzen Sie für Aufgabe 5 die Beziehung $V = p_0 \Delta V / \Delta p$ und begründen Sie diese. Die Größe p_0 sei der äußere Luftdruck. Bestimmen Sie bei Aufgabe 6 den Kalibrierungsfaktor c z. B. in $\text{dm}^3 / \text{Winkelgrad}$. Das Volumen ergibt sich dann als $V(\alpha) = \alpha c + V$, da $-\Delta V \leq \alpha c \leq \Delta V$ ist.

Teil B:

Die Stirling Maschine beginnt etwa bei $T_h \geq 150^\circ\text{C}$ zu arbeiten, wenn das Schwungrad leicht angestoßen wird. Zuerst sollten Sie sich jeweils mehrere Umläufe im p - V -Diagramm darstellen lassen (Wahl einer geeigneten Messzeit bei CASSY). Um die abgegebene Arbeit zu bestimmen, sollten Sie die Messzeit dann so einstellen, dass Sie möglichst genau einen Umlauf aufzeichnen, um dann über die CASSY-Integralfunktion die eingeschlossene Fläche zu bestimmen. Zur Ermittlung der Leistung ist immer die Kenntnis der Zeitdauer eines Umlaufes notwendig. Die Umlaufzeit ändert sich bei Belastung.