

Physikalisches Praktikum für Anfänger - Teil 1
Gruppe 2 - Wärmelehre

2.7 Stirlingmaschine

***Stichwörter:** Stirlingmotor, Stirlingprozess, PV-Diagramm, Thermodynamische Prozesse, Trapezmethode, Arbeit, Wärme, Temperatur, Wärmepumpe, Leistungszahl, Wirkungsgrad, Wärmetransport durch Strahlung.*

***Hinweis:** zu diesem Versuch wird kein Laborbericht verlangt. Daher wird eine sehr gute Vorbereitung erwartet. Lesen Sie mindestens die am Ende angegebene Literatur gut durch, und recherchieren Sie in anderen Quellen (z.B. andere Aufbauten, Erwartungswerte, usw.) vor den Versuchstag.*

1 Vorbereitung

Vor dem Versuchstag, lesen Sie die angegebenen Bibliographie und suchen Sie auch eigenständig andere Quellen, um die Vorbereitungsfragen zu beantworten.

1. Erklären Sie die drei mögliche Wärmeübertragungsweisen.
2. Erläutern sie das Stefan-Boltzman-Gesetz.
3. Für die Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen zwei Oberflächen findet man den Begriff des Sichtfaktors (auf Englisch: view factor). Erklären Sie ihre Bedeutung.
4. Ein schwarzer Wärmestrahler mit Oberfläche A_1 und Temperatur T_1 überträgt Wärme an einen anderen schwarzen Körper mit Oberfläche A_2 und Temperatur T_2 (wobei $A_2 < A_1$ und $T_2 < T_1$) berechnen Sie die Wärmeleistung, \dot{Q} , angenommen der Sichtfaktor ist F_{12} .
5. Graphische Integration: Was ist die Trapezmethode?
6. In diesem Versuch werden Sie die Trapezmethode zur graphischen Integration brauchen. Mit Excel, Libreoffice calc, oder Python, wenden Sie die Trapezmethode an, um die Oberfläche eines Kreises mit Radius $R = 2$ m zu berechnen. Den Kreis können Sie in zwei Spalten definieren: eine für die x-Werte, die andere für die y-Werte. Dabei sind $x = R \cdot \cos \theta$, $y = R \cdot \sin \theta$ und $\theta = [0, 2\pi]$. Je kleiner die θ -Intervalle, desto genauer das Ergebnis.
7. Welche Thermodynamischen Kreisprozesse kennen Sie?
8. Definieren Sie den allgemeinen Ausdruck des Wirkungsgrades und der Leistungszahl einer Wärmekraftmaschine.
9. Erklären Sie den Stirlingprozess und den Aufbau eines Stirlingmotors. Definieren Sie dabei den Wirkungsgrad der Maschine.
10. In welche Richtung muss der Kreisprozess verlaufen, damit der Stirlingmotor in eine Kältemaschine umgewandelt wird? Definieren Sie die Leistungszahl für den Stirlingprozess.

11. Bestimmen Sie die benötigte Wärme ΔQ , um die Temperatur einer Masse m eines Materials mit Wärmekapazität C um ΔT zu verändern.
12. Suchen Sie Informationen zur historischen Bedeutung und aktuelle Anwendungen des Stirlingmotors.

2 Aufbau

Abb. 1 zeigt die Stirlingmaschine und ihre Arbeitsweise als Motor ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Das Modell besteht aus einem einzigen Arbeitskolben (im Gegensatz zu den typischen Maschinen, die man in der Literatur findet) und einem Verdrängerkolben, der die Luft auf der heißen bzw. kalten Seite verdrängt ohne dabei eine thermodynamische Arbeit zu verrichten. Dieser Verdrängerkolben fungiert auch als Regenerator, indem er in dem Glasskolben die Wärme speichert, und abgibt. Wegen der Bewegung beider Kolben sind isochore oder isotherme Prozesse in dem Modell überlagert [1].

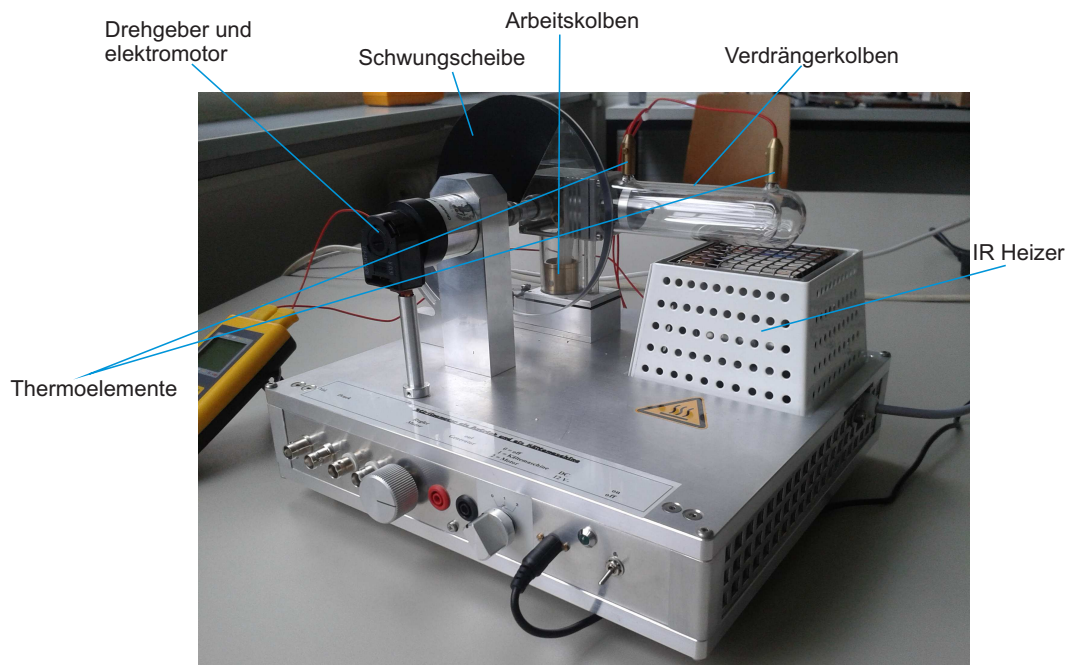


Abbildung 1: Die Stirlingmaschine im Praktikum

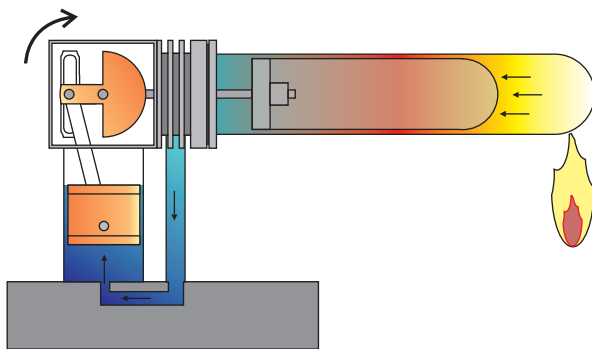
Die Wärme für den Betrieb als Motor wird von einem Infrarotstrahler (250 W, 750 °C) geliefert. Die Temperatur am kalten und warmen Teil des Modells wird mit zwei Thermoelementen gemessen. Der Druck wird direkt am Arbeitskolben mit einem elektronischen Drucksensor abgegriffen. Um das Volumen V innerhalb des Modells zu bestimmen, wurde ein Drehgeber (und auch Elektromotor) an der Achse der Schwungscheibe angebracht. Der Winkel wurde dann in einem Spannungssignal proportional zum Volumen elektronisch umgerechnet. Das Volumen setzt sich mit dem abgemessenen Winkel θ wie folgt zusammen:

$$V = V_0 + A_A \cdot \left(H - R \cos \theta - \sqrt{R^2 \cos^2 \theta - R^2 + L^2} \right) + A_V \cdot R (1 + \sin \theta) \quad (1)$$

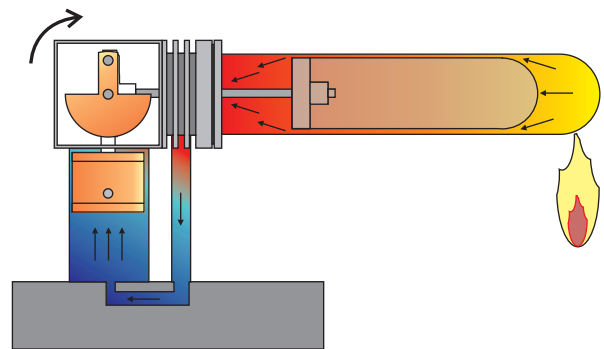
wo:

- $V_0 = (9,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-6} \text{m}^3$ Minimales Volumen im Verdrängerzylinder.
- $A_A = (4,88 \pm 0,04) \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ Oberfläche des Arbeitkolbens.
- $A_V = (7,12 \pm 0,05) \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ Oberfläche des Verdrängerkolbens.
- $H = (59,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{m}$ Länge der Pleuelstange.
- $L = (47,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{m}$ Länge des Arbeitkolbens.
- $R = (11,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{m}$ Radius der Kurbelwelle.

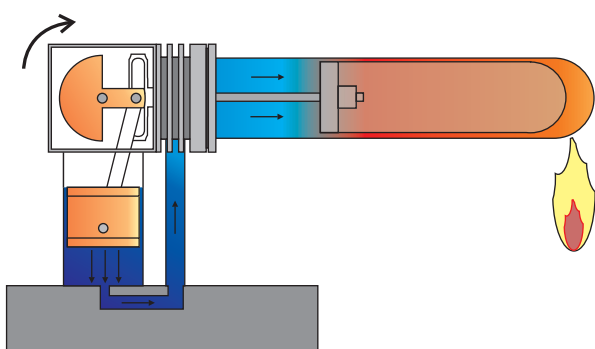
Das Modell kann sowohl als Motor als auch als Wärmepumpe betrieben werden, beide Kreisprozesse werden in diesem Versuch untersucht.



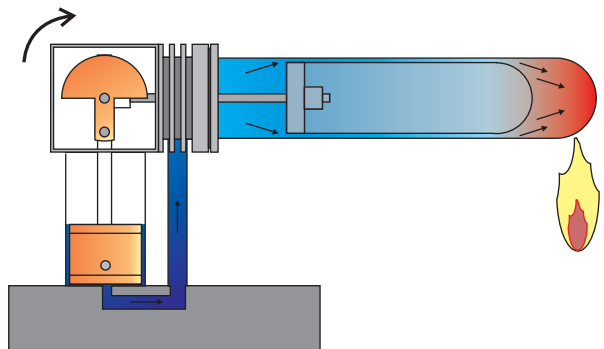
1 Die Luft an der Verdrängerseite nimmt Wärme auf und expandiert. Der Arbeitskolben bewegt sich nach oben.



2 Der Verdrängerkolben bewegt sich nach vorne und bringt warme Luft auf der kalten Seite.



3 Die warme Luft wurde auf der kalten Seite gebracht. Sie wurde abgekühlt, der Arbeitskolben bewegt sich nach unten.



4 Der Verdrängerkolben bringt die kalte Luft zur warmen Seite.

Abbildung 2: Arbeitsweise des Stirlingmotors [1]

3 Stirlingmaschine als Wärmepumpe

Die Leistungszahl ε kann nur größer als Eins sein, wenn durch das Kältemittel (in unserem Fall Luft) Wärme von der Expansionsseite auf die Kompressionsseite transportiert wird. Im ersten Versuchsteil soll untersucht werden, wie wichtig der Wärmenachschub auf der Expansionsseite für ε ist. Dazu wird der Einfluss der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_w - T_k$ auf die Leistungszahl bestimmt. Der Drehgeber wird als Antrieb benutzt und führt die nötige Arbeit zu.

Aufgaben:

1. Auf der linken Seite des Modells haben Sie die zwei Anschlüsse zur Strom und Spannungsmessung im Elektromotorantrieb. Stecken Sie dort die zwei Multimeter an.
2. Auf der Vorderseite des Modells sind zwei BNC-Anschlüsse zur Volumen- und Druckaufnahme mit dem Oszilloskop. Verbinden Sie das Oszilloskop Ch1 mit dem Volumen-Ausgang und Ch2 mit dem Druck-Ausgang.
3. Vergewissern Sie sich, dass der Regler am linken Anschlag ist.
4. Stellen Sie das Modell im Off-Modus ein (Nr. 0).
5. Schalten Sie den Computer an und melden Sie sich als Anfänger Praktikum User an. *Alle Diagramme und Tabellen können sie am nebenstehenden Computer vorbereiten, ausdrucken und dann in Ihr Laborbuch kleben.*
6. Schalten Sie die Elektronik des Modells an. **Die Maschine muss dabei noch im „Off-Modus“ sein, damit sie nicht in Bewegung kommen kann!!!**
7. Sie werden eine Spannung im Multimeter von ungefähr 5 V ablesen. Drehen Sie den Regler und erhöhen Sie die Spannung auf ungefähr 12 V. Der Strom sollte immer noch 0 A sein (wenn nicht, lesen Sie sofort das Fettgedruckte der vorigen Aufgabe).
8. Stellen Sie das Modell als Kältemaschine ein, indem Sie den entsprechenden Schalter auf 1 drehen.
9. Notieren Sie, über einen Zeitraum von ca. 15 min alle 120s die Temperatur T_k des kalten Reservoirs, die Temperatur T_w des warmen Reservoirs, die Spannung und den Strom des Elektromotors.
10. Schalten Sie das Modell aus.
11. Tragen Sie T_k und T_w in einem gemeinsamen Diagramm über der Zeit auf (am Computer).
12. Bestimmen Sie die geleistete Arbeit ΔW_n der Wärmepumpe für jeden Zeitintervall $(t_n - t_{n-1})$ aus der abgelesenen Leistung des Drehgebers (I_n und U_n).

$$\Delta W_n = \frac{(I_n \cdot U_n + I_{n-1} \cdot U_{n-1})}{2} \cdot (t_n - t_{n-1}) \quad (2)$$

13. Bestimmen Sie die entzogene Wärme ΔQ_n an der kalten Masse der Kältemaschine für jeden Zeitintervall (Vorbereitungsaufgabe 11).

$$\Delta Q_n = m \cdot c \cdot (T_{kalt(n)} - T_{kalt(n-1)}) \quad (3)$$

wo

$$\begin{aligned} m &= 9,01\text{g} \\ c_{\text{Messing}} &= 0,377\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

14. Bestimmen Sie die Leistungszahl $\varepsilon_n = \Delta Q_n / \Delta W_n$ für jeden Zeitintervall und tragen Sie sie als Funktion von $\Delta T_n = T_{warm(n)} - T_{kalt(n)}$ auf.

4 Stirlingmaschine als Motor

Den Wirkungsgrad des Motors wird in diesem Teil gemessen. Dafür wird der Infrarot Heizer die nötige Wärme zuführen, und die Arbeit wird aus dem p-V Diagramm berechnet.

Aufgaben:

1. Stecken Sie die Multimeter ab und drehen Sie das Modell auf Motor-Modus.
2. Stellen Sie das Oszilloskop ein:
Ch1 und Ch2: „DC-Mode“, nicht invertiert, Dämpfung „1X“.
Trigger:Source „Ch1“, DC-Coupling.
Acquire-Menu: Average, Averages 4.
Display-Menu: Format YT, Type Vectors.
Utility-Menu:—>“Options“—>“Rear USB Port“—>“Computer“.
3. Schalten Sie den Infrarot Heizer an. **Der Heizer erreicht eine Temperatur von 750°C!**
4. Kontrollieren Sie die Temperatur der beiden Seiten und warten Sie bis die Temperatur der warmen Seite ungefähr 100 °C beträgt, um die Schwungscheibe zu drehen. Sollte sich die Bewegung nicht selbst fortfahren, warten Sie einige Minuten und versuchen Sie erneut die Maschine in Bewegung zu bringen. Wiederholen Sie den Vorgang bis die Bewegung anhält.
5. Drücken Sie im Oszilloskop zweimal auf den RUN/STOP Knopf, damit die Mittelung auf dem Bildschirm mit den richtigen Daten arbeiten kann, achten Sie darauf, dass Sie mindestens zwei Perioden im Oszilloskop sehen sollten.
6. Warten Sie für jeweils fünf und fünfzehn Minuten und nehmen Sie ein p-V Dataset mit dem Computer auf. Notieren Sie dabei die Frequenz des Motors und die Temperaturen T_k und T_w .
 - a) Öffnen Sie den terminal.
 - b) Schreiben Sie ipython.
 - c) Schreiben Sie run /home/ap/Stirling/StirlingScope.py
 - d) Folgen Sie die Anweisungen des Programms.
 - e) die Datei hat drei Spalten: Zeit in s, Volumen in l und Druck in kPa. Sie können sie mit z.B. Libreoffice->calc ablesen.
7. Schätzen Sie für beide Fälle die gelieferte Wärmeleistung des Strahlers mit den Werten

$$\begin{aligned}
 A_{\text{Strahler}} &= 4,0 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \\
 T_{\text{Strahler}} &= 750^\circ\text{C} \\
 A_{\text{Zylinder}} &= 5,3 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \\
 F_{12} &= 0,31
 \end{aligned}$$

Nehmen Sie dafür an, dass sowohl die Heizeroberfläche als auch das Glass des Verdrängerzylinders Schwarze Strahler sind. Ist Glass überhaupt schwarz? warum dürfen wir diese „wilde“ Annahme machen?

8. Schalten Sie den Motor ab.
9. Berechnen Sie die Arbeit des Motors aus den p-V Diagrammen und berechnen Sie den Wirkungsgrad des Stirlingmotors (achten Sie darauf, dass Wärmeleistung Wärme pro Zeiteinheit ist). Vergleichen sie es mit dem Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses.

Literatur:

[1]-H. Müller-Steinhagen *Praktikum Versuch 10: Elektronische Bestimmung des Indikatorgramms an einem Modell-Stirling-Motor*, ITW Universität Stuttgart.

K. Stierstadt *Thermodynamik: von der Mikrophysik zur Makrophysik*, Kap. 7 und 10.8, 1. Ausgabe, Springer eBook(2010).

H. Herwig *Wärmeübertragung: ein nahezu allgegenwärtiges Phänomen*, Kap 4, 1. Ausgabe, Springer eBook. (2017).

N. Markus *Anschauliche Höhere Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler 1*, Kap. 19.1, 1. Ausgabe Springer eBook (2018).

7.2019/ VdM