

8.3.302 Heissluftmotor

1 Motivation

Ein Heissluft- bzw. Stirlingmotor erzeugt mechanische Arbeit. Dies funktioniert sowohl mit einer Beheizung als auch mit einem Kältebad. Durch Umkehrung der Laufrichtung wird der Motor zur Wärmepumpe.

2 Theorie

2.1 Der Stirlingmotor

Der **Stirlingmotor**¹ ist ein Heissluftmotor, der ohne Ventile auskommt. Der Kreislauf besteht aus zwei Isothermen und zwei Isochoren (siehe Abb. 1):

- a) **A:** (1 → 2): Isotherme Expansion bei $T = T_1$ mit Arbeitabgabe.
- b) **B:** (2 → 3): Isochore Abkühlung: Verdrängerkolben drängt Arbeitsgas in den Kaltraum. Dabei kühlt das Gas auf $T = T_3$ ab.
- c) **C:** (3 → 4): Isotherme Kompression bei $T = T_3$ durch Kolben, nimmt Arbeit auf.
- d) **D:** (4 → 1): Isochore Erwärmung: Verdrängerkolben drängt Arbeitsgas in den Heissraum. Dabei erwärmt sich das Gas auf $T = T_1$.

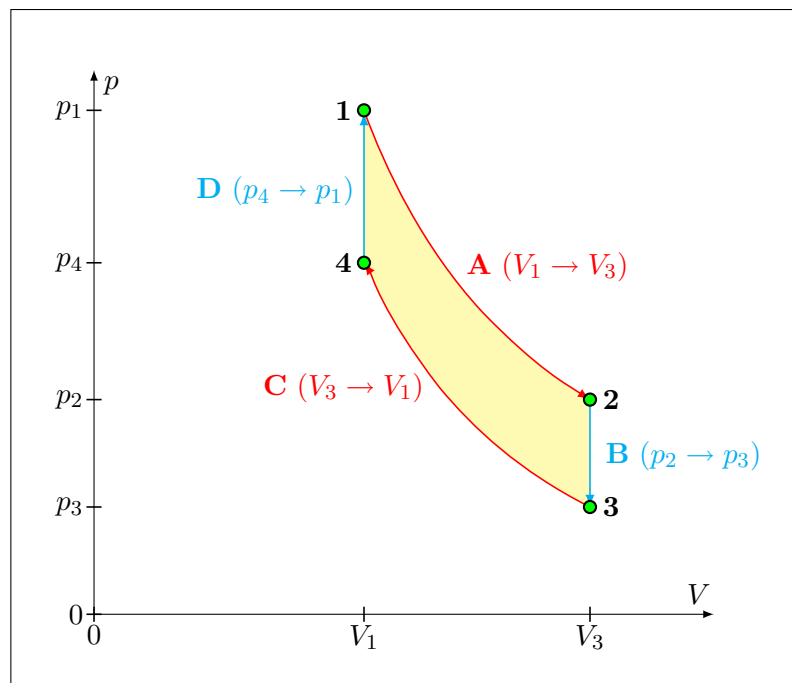


Abbildung 1: Schematisches pV -Diagramm des Stirlingmotors. Der Betrag der geleisteten Arbeit ist gleich der getönten Fläche.

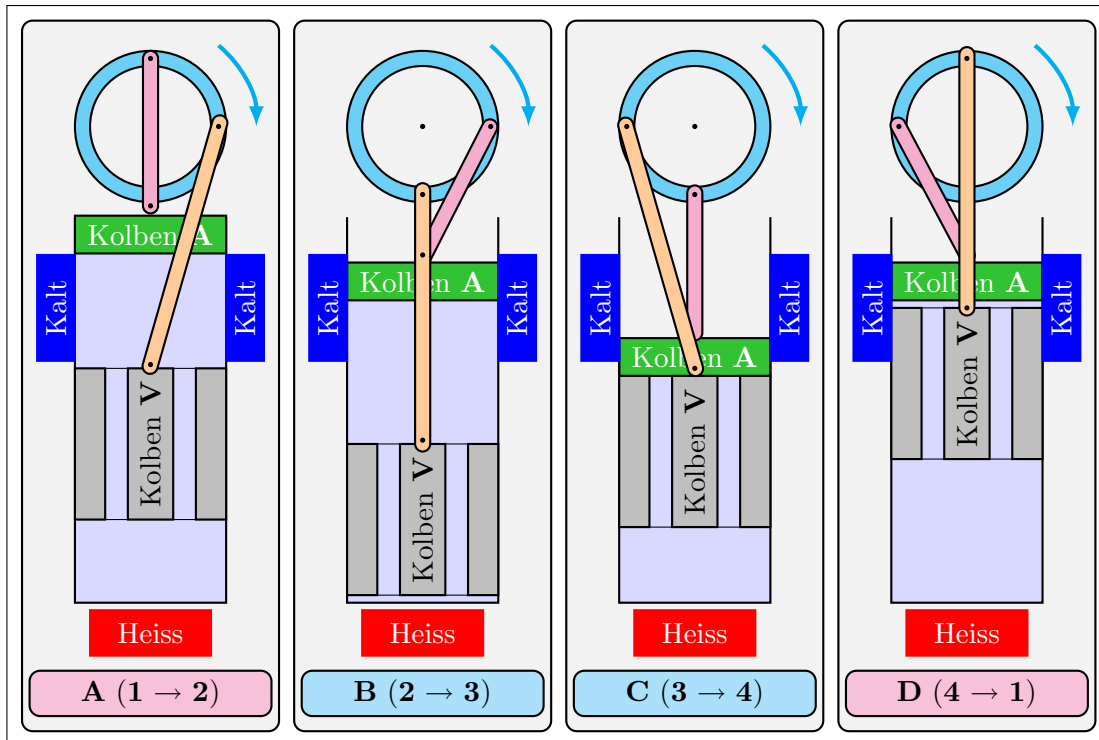


Abbildung 2: Illustration des Kreislaufs der Wärmemaschine von Stirling. **A** ($1 \rightarrow 2$): Isotherme Expansion, **B** ($2 \rightarrow 3$): Isochore Abkühlung, **C** ($3 \rightarrow 4$): Isotherme Kompression, **D** ($4 \rightarrow 1$): Isochore Erwärmung.

Diese vier Arbeitsschritte sind an dem schematischen Stirlingmotor in Abb. 2 dargestellt.

2.2 Energiebilanz des Stirlingmotors

Der Stirlingmotor entnimmt einem Wärmereservoir bei einer Temperatur T_1 Wärme und wandelt sie teilweise in Arbeit um. Die verbleibende Wärme wird an ein zweites Wärmereservoir der Temperatur $T_3 < T_1$ abgegeben (siehe Abb. 3). Nach einem Kreislauf befindet sich das Arbeitsgas wieder im Anfangszustand. Tabelle 1 fasst die einzelnen Arbeitsschritte zusammen.

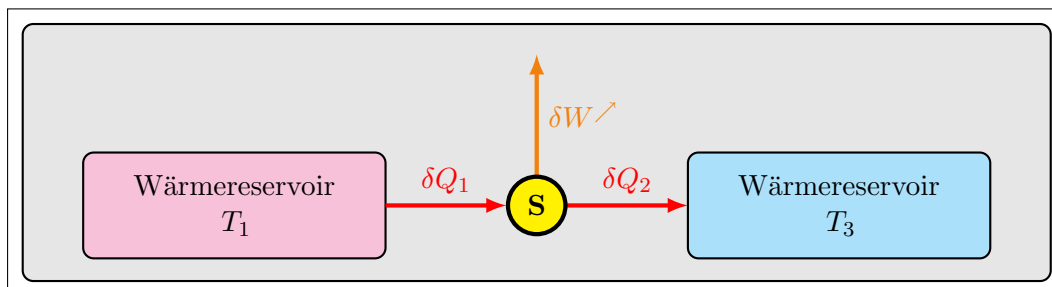


Abbildung 3: Energiebilanz des Stirlingmotors

Tabelle 1: Arbeitsschritte des Stirlingmotors. Wärmeres Wärmereservoir: $T_w \equiv T_1$, kälteres Wärmereservoir: $T_k \equiv T_3$. Energien (Wärme, Arbeit), welche vom Arbeitsgas aufgenommen werden, sind durch \nearrow gekennzeichnet; entsprechend gilt für Energien, die vom Arbeitsgas abgegeben werden, das Symbol \searrow .

Schritt:	A: (1 → 2)	B: (2 → 3)	C: (3 → 4)	D: (4 → 1)
Prozess:	isotherme Expansion	isochore Abkühlung	isotherme Kompression	isochore Erwärmung
Volumen	$V_1 \rightarrow V_3$	$V_2 = V_3$	$V_3 \rightarrow V_1$	$V_4 = V_1$
Temperatur	T_1	$T_1 \rightarrow T_3$	T_3	$T_3 \rightarrow T_1$
Arbeit	$\delta W_A^\nearrow = \nu R T_1 \ln \frac{V_3}{V_1}$	$\delta W_B^\nearrow = 0$	$\delta W_C^\searrow = \nu R T_3 \ln \frac{V_3}{V_1}$	$\delta W_D^\searrow = 0$
Wärmemenge	$\delta Q_A^\nearrow = \nu R T_1 \ln \frac{V_3}{V_1}$	$\delta Q_B^\nearrow = \nu C_V (T_1 - T_3)$	$\delta Q_C^\nearrow = \nu R T_k \ln \frac{V_3}{V_1}$	$\delta Q_D^\searrow = \nu C_V (T_1 - T_3)$

Die bei einem Kreislauf geleistete Arbeit δW^\nearrow beträgt

$$\delta W^\nearrow = \delta W_A^\nearrow - \delta W_C^\searrow = \nu R (T_1 - T_3) \ln \frac{V_3}{V_1} \quad (1)$$

Die dabei dem wärmeren Reservoir entnommene Wärmemenge δQ^\nearrow beträgt

$$\delta Q^\nearrow = \delta Q_A^\nearrow + \delta Q_D^\searrow = \nu R T_1 \ln \frac{V_3}{V_1} + \nu C_V (T_1 - T_3) \quad (2)$$

Für ein zweiatomiges Gas ($C_V = \frac{5}{2}R$) folgt der Wirkungsgrad η :

$$\eta := \frac{\delta W^\nearrow}{\delta Q^\nearrow} = \frac{(T_1 - T_3) \ln \frac{V_3}{V_1}}{T_1 \ln \frac{V_3}{V_1} + \frac{5}{2} (T_1 - T_3)} \quad (3)$$

Für $\ln(V_3/V_1) \gg 1$ erhält man den Carnot-Wirkungsgrad:

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_1} \quad (4)$$



Abbildung 4: Versuchsaufbau „Heissluftmotor“

2 Experiment

Stirling hat um 1816 eine periodische Maschine erfunden und gebaut. Wir führen eine solche Maschine vor (siehe Abb. 4) . Das Arbeitsgas ist Luft, dessen Temperatur mit einer Sonde gemessen wird.

Die Maschine arbeitet zwischen zwei Wärmereservoirs mit unterschiedlichen Temperaturen. Zwei Kolben (der Verdrängerkolben **V** und der Arbeitskolben **A**) werden vom Schwungrad **S** bewegt (siehe Abb. 2). Der Kolben **V** ist um eine Phasendifferenz von 90° gegenüber dem Kolben **A** verschoben.

Dadurch wird das Gas periodisch zwischen dem „heissen“ ($T_w = T_1$) und dem „kalten“ ($T_k = T_3$) Teil der Maschine verschoben.

Der idealisierte Verlauf des Stirlingmotors ist in Abb. 1 als pV -Diagramm wiedergegeben.

In der Praxis können das kalte Wärmereservoir Kühlwasser und das heisse Wärmereservoir die Flamme eines Bunsenbrenners sein.

Wir messen die Temperatur im unteren Teil des Gasbehälters. Sie beträgt ca. 400°C . Das Kühlwasser hat eine Temperatur von ca. 20°C . Wir beobachten:

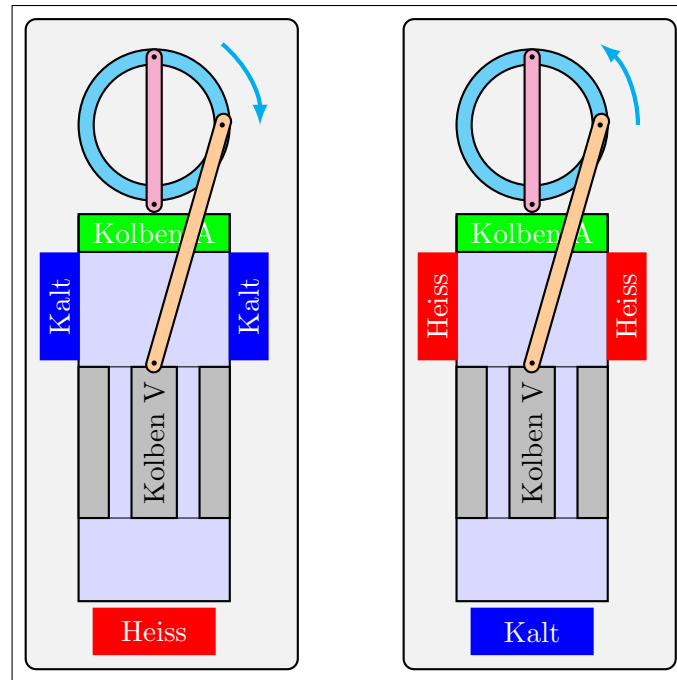


Abbildung 5: Die Stirling-Maschine kann auch umgekehrt laufen.

- Bewegen wir das Schwungrad **S** im Gegenuhrzeigersinn, dann *läuft die Maschine nicht*. →
- Bewegen wir das Schwungrad **S** dagegen im Uhrzeigersinn, dann beginnt die Maschine frei zu laufen. Die Laufgeschwindigkeit wird schliesslich durch Reibungsverluste begrenzt.
- Wir nehmen ein pV -Diagramm auf. Dazu heizen wir mit der Flamme und lassen zunächst die Maschine einige Male nicht zu schnell drehen, ohne zu schreiben. Anschliessend lassen wir während 2-3 Umdrehungen schreiben. Das Volumen wird aus der Position des Schwungrades ermittelt, der Druck von einem Drucksensor gemessen (siehe Abb. 6). Das gemessene pV -Diagramm unterscheidet sich wegen Wärme- und Reibungsverlusten deutlich vom idealen Diagramm.

Natürlich kann die Stirling-Maschine auch „umgekehrt“ laufen:

- Wir ersetzen die Flamme durch flüssigen Stickstoff mit einer Temperatur von ca. $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (siehe Abb. 5).
Schliesslich kann die Maschine auch als eine Wärmepumpe verwendet werden:
- Wir halten nun die Maschine an und bewegen das Schwungrad mittels eines Griffes. Wir leisten Arbeit von aussen, und die Maschine wird als Wärmepumpe betrieben: Sie entnimmt Wärme aus dem kälteren Reservoir, um sie an das wärmere abzugeben.

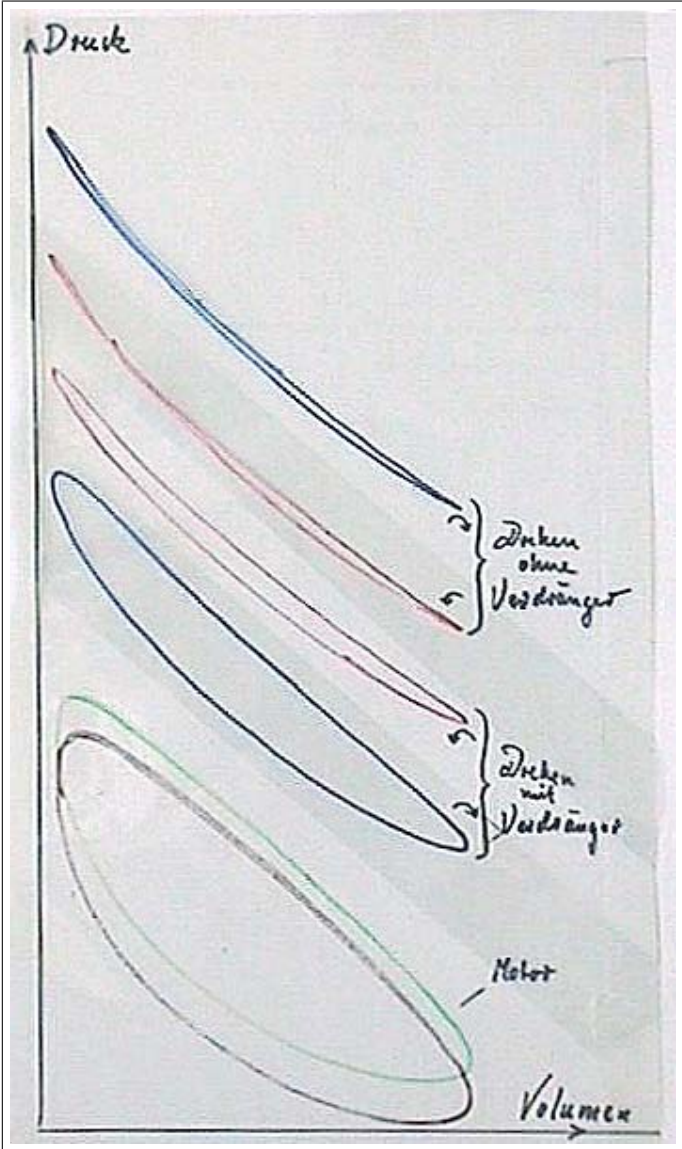


Abbildung 6: Gemessenes pV-Diagramm der Stirlingmaschine