

Protokoll zur Einheit PS9 Heißluftmotor - Stirlingprozess

Manuel Reisenbauer
Mathias Höld

27.05.2010

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Allgemeine Grundlagen | 3 |
| 1.1 | Das Prinzip von Wärmekraftmaschinen | 3 |
| 1.2 | Carnotprozess | 3 |
| 1.3 | Stirlingprozess und Stirlingmaschine | 5 |
| 1.4 | Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen | 6 |
| 2 | Der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine | 7 |
| 2.1 | Hintergrund | 7 |
| 2.2 | Versuchsaufbau und Durchführung | 8 |
| 3 | Die Stirling-Maschine als Kältemaschine | 10 |
| 3.1 | Hintergrund | 10 |
| 3.2 | Versuchsaufbau und Durchführung | 10 |

1 Allgemeine Grundlagen

1.1 Das Prinzip von Wärmekraftmaschinen

Wärmekraftmaschinen sind Maschinen, die im Stande sind Energieumwandlungsprozesse durchzuführen, wie zB der Transport von Wärme von einer Wärmequelle zu einer Wärmesenke oder die Umwandlung von Wärme in mechanische oder elektrische Energie. Somit ist es auch möglich mittels mechanischer oder Elektrischer Energie den Wärmetransport in die Umgekehrte Richtung durchzuführen.

Die *Wärmekraftmaschine* nimmt vom wärmeren Reservoir (= Wärmequelle) die Wärmemenge Q_1 auf und gibt an das kältere Reservoir (= Wärmesenke) die Wärmemenge Q_2 ab (wobei $T_1 > T_2$ und $Q_1 > Q_2$). Dabei wird die Differenz der beiden Wärmemengen zur nutzbarer mechanischer Energie W und (nicht nutzbarer) Reibungsenergie umgewandelt.

Die *Wärmepumpe* entnimmt dem kälteren Reservoir die Wärmemenge Q_2 durch Aufbringung mechanischer Energie W und gibt die Wärmemenge Q_1 an das wärmere Reservoir ab, wobei die mechanische Energie in Wärme und Reibungsenergie umgewandelt wird.

Damit Wärmekraftmaschinen rasch und effizient arbeiten können, ist es von Vorteil, wenn der Wärmetransport während eines periodischen Vorgangs abläuft, der beliebig oft wiederholt werden kann. Solche Vorgänge werden *thermodynamische Kreisprozesse* genannt. In diesen Prozessen wird ein Arbeitsstoff (meistens ein Gas bzw. Gasgemisch) einer Reihe von Zustandsänderungen unterzogen, bis am Ende des Zyklus wieder der Ausgangszustand hergestellt ist. Dabei unterscheidet man:

- Prozesse, bei denen der Arbeitsstoff (oder ein Teil davon) verbraucht wird und daher von Außen regelmäßig in das System eingespeist werden muss
- Prozesse, bei denen der Arbeitsstoff abgeschlossen ist

1.2 Carnotprozess

Der französische Physiker Nicolas Léonard Sadi Carnot definierte den fundamentalen Kiresprozess für Wärmekraftmaschinen, den sogenannten *Carnotprozess*. Die Maschine braucht Zylinder und Kolben um das Gas komprimieren und expandieren zu können, sowie ein wärmeres und ein kälteres Reservoir mit den Temperaturen T_1 und T_2 . Der Kreisprozess besteht auf 4 Schritten, wie in Abbildung 1 dargestellt:

1. Isotherme Expansion ($A \rightarrow B$)

Eine isotherme Expansion des Arbeitsgases erfolgt von Zustand A (mit P_A , V_A , T_1) nach Zustand B (mit P_B , V_B , T_1). Dabei ist der Gasbehälter in

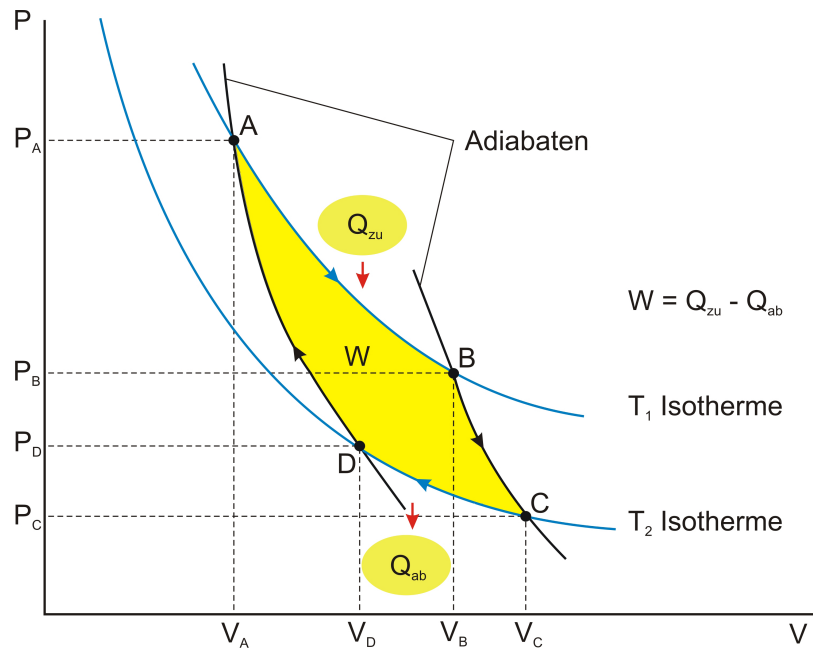


Abbildung 1: Carnotprozess
Quelle: Praktikumsangabe

Kontakt mit dem wärmeren Reservoir und das Arbeitsgas nimmt die Wärme Q_{zu} auf.

2. **Adiabatische Expansion** ($B \rightarrow C$)

Eine adiabatische Expansion des Arbeitsgases erfolgt von Zustand B (mit P_B, V_B, T_1) nach Zustand C (mit P_C, V_C, T_2). Dabei ist der Gasbehälter isoliert, sodass jeder Wärmefluss unterbunden ist. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas die Temperatur T_2 des kälteren Reservoirs.

3. **Isotherme Kompression** ($C \rightarrow D$)

Eine isotherme Kompression des Arbeitsgases erfolgt von Zustand C (mit P_C, V_C, T_2) nach Zustand D (mit P_D, V_D, T_2). Dabei ist der Gasbehälter in Kontakt mit dem kälteren Reservoir und das Arbeitsgas gibt die Wärme Q_{ab} ab.

4. **Adiabatische Kompression** ($D \rightarrow A$)

Eine adiabatische Kompression des Arbeitsgases erfolgt von Zustand D (mit P_D, V_D, T_2) nach Zustand A (mit P_A, V_A, T_1). Dabei ist der Gasbehälter isoliert, sodass jeder Wärmefluss unterbunden ist. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas die Temperatur T_1 des wärmeren Reservoirs.

1.3 Stirlingprozess und Stirlingmaschine

Der Stirlingprozess arbeitet mit einem abgeschlossenen Arbeitsgas (z.B. Luft). An Stelle der adiabatischen Zustandsänderungen treten im idealen Stirlingprozess *isochore* Zustandsänderungen auf, wie in Abbildung 2 gezeigt. Der Nachteil des Stirlingprozesses ist, dass für die Hebung der Arbeitstemperatur von T_2 auf T_1 die Wärmemenge Q_{reg} benötigt wird, was den Wirkungsgrad gegenüber der Carnot-Maschine erheblich senken würde. Man bedient sich daher einem kleinen Trick: die abgegebene Wärmemenge beim Schritt $B \rightarrow C$ in einem Kupferwolle-Regenerator zwischengespeichert und beim Schritt $D \rightarrow A$ wieder aufgenommen.

Der Stirling-Kreisprozess besteht aus 4 Schritten, wie aus dem pV-Diagramm in Abbildung 2 zu sehen ist:

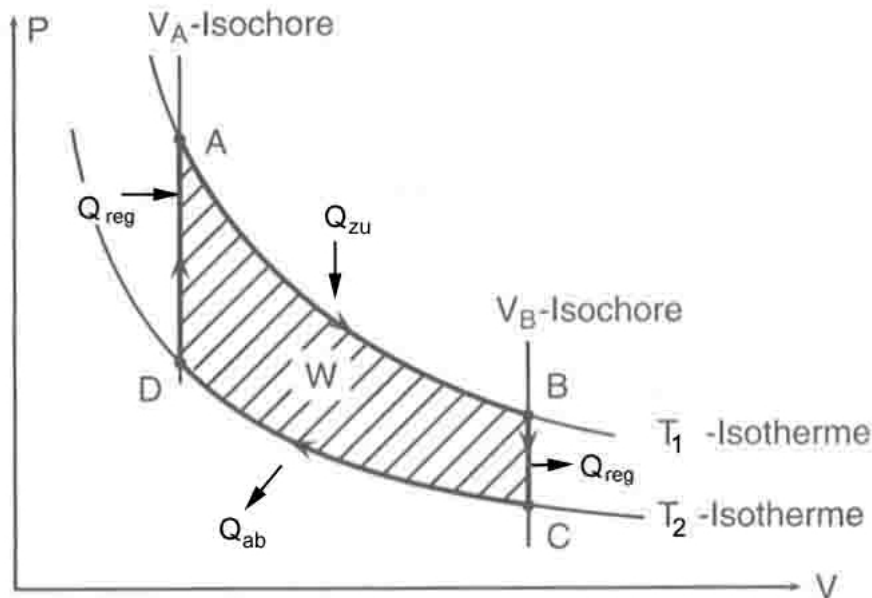


Abbildung 2: Sterlingprozess

Quelle: Praktikumsangabe

1. Isotherme Expansion ($A \rightarrow B$)

Eine isotherme Expansion des Arbeitsgases erfolgt von Zustand A (mit P_A , V_A , T_1) nach Zustand B (mit P_B , V_B , T_1). Dabei ist der Gasbehälter in Kontakt mit dem wärmeren Reservoir und das Arbeitsgas nimmt die Wärme Q_{zu} auf.

2. Isochore Abkühlung ($B \rightarrow C$)

Eine isochore Abkühlung des Arbeitsgases erfolgt von Zustand B (mit P_B ,

V_B, T_1) nach Zustand C (mit P_C, V_B, T_2). Dabei wird die Wärmemenge Q_{reg} an den Regenerator abgegeben. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas die Temperatur T_2 des kälteren Reservoirs.

3. **Isotherme Kompression** ($C \rightarrow D$)

Eine isotherme Kompression des Arbeitsgases erfolgt von Zustand C (mit P_C, V_B, T_2) nach Zustand D (mit P_D, V_A, T_2). Dabei ist der Gasbehälter in Kontakt mit dem kälteren Reservoir und das Arbeitsgas gibt die Wärme Q_{ab} ab.

4. **Isochore Erwärmung** ($D \rightarrow A$)

Eine adiabatische Kompression des Arbeitsgases erfolgt von Zustand D (mit P_D, V_A, T_2) nach Zustand A (mit P_A, V_A, T_1). Dabei wird die Wärmemenge Q_{reg} vom Regenerator wieder aufgenommen. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas die Temperatur T_1 des wärmeren Reservoirs.

1.4 Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen

Allgemein ist der Wirkungsgrad einer Maschine definiert als:

$$\eta = \frac{\text{verwertete Energie}}{\text{zugeführte Energie}} \quad (1)$$

Wobei bei einer Wärmekraftmaschine die Energiezufuhr Q_{zu} in Form von Wärme erfolgt. Die Energieabgabe setzt sich zusammen aus der gewünschten Abgabe mechanischer Arbeit W sowie aus Reibungsenergie W_R und der ans Kühlmedium abgegebene Energie Q_{ab}

$$|Q_{zu}| = |Q_{ab}| + W + W_R \quad (2)$$

Der ideale Wirkungsgrad eines idealen Stirling-Motors errechnet sich mit Hilfe des pV-Diagramms zu:

$$\eta_{ideal} = \frac{|Q_{zu}| - |Q_{ab}|}{|Q_{zu}|} = \frac{\oint p \, dV}{Q_{zu}} \quad (3)$$

bzw.

$$\eta_{ideal} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (4)$$

Im Unterschied zum idealen Wirkungsgrad werden beim realen Wirkungsgrad keine reversiblen Prozesse vorausgesetzt, weil diese in Realität nicht gegeben sind. Ein weiterer Unterschied ist das Hinzukommen von Reibung, Konvektion und Wärmestrahlung, die den realen Wirkungsgrad wesentlich kleiner werden lassen.

Der reale Wirkungsgrad ist gegeben durch:

$$\eta_{real} = \frac{P_{Motor}}{P_{zu}} \quad (5)$$

2 Der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine

2.1 Hintergrund

Zur bestimmung der mechanischen Leistung von Motoren kann man einen *Bremszaum* (oder auch *Prony'scher Zaum*) verwenden. Ein solcher Bremszaum ist in Abbildung 3 zu sehen.

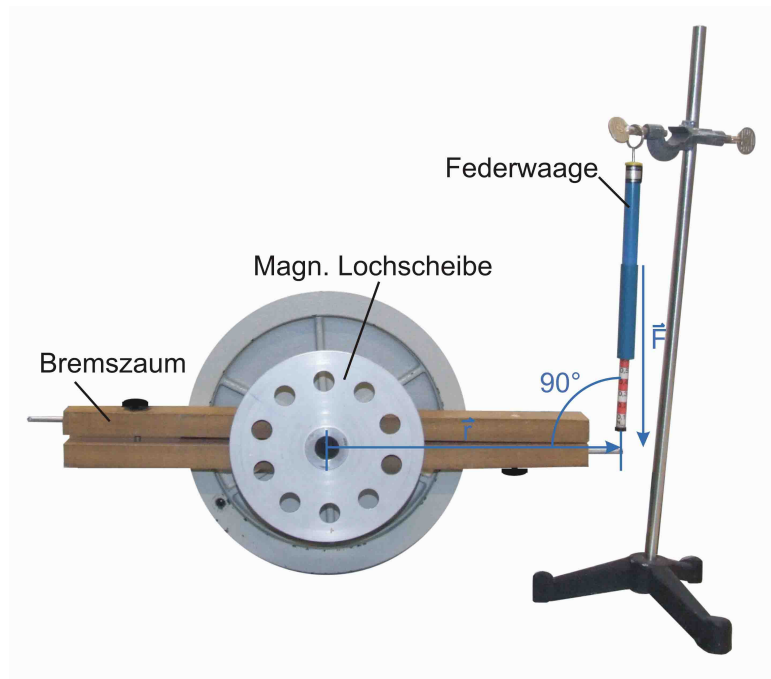


Abbildung 3: Prony'scher Zaum
Quelle:Praktikumsangabe

Die mechanische Leistung ergibt sich durch:

$$P = \vec{M} \cdot \vec{\omega} \quad (6)$$

Da die Leistung über ein Skalarprodukt bestimmt wird, können wir für das Bremsdrehmoment

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

und die Winkelgeschwindigkeit ω die Absolutbeträge nehmen, wenn mit dem Kreuzprodukt ein Vektor erzeugt wird, der parallel zu ω verläuft - es müssen also \vec{F} und \vec{r} normal zueinander stehen (siehe Abbildung 3).

2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Versuch messen wir den Wirkungsgrad eines Heißluftmotors im Leerlaufbetrieb und unter Belastung. Der Motor selbst ist am Arbeitsplatz schon fertig aufgebaut. Wir müssen nur noch die Heizwendel zur Heizung des Wärmereservoirs festschrauben und den Druck- und Volumssensor an den Messcomputer anschließen. Der Volumssensor ist genommen ein Sensor der die Wegverschiebung des Kolbens aufnimmt, aber da die Kolbenfläche bekannt ist kann man dies leicht in eine Volumsänderung umrechnen, was das verwendete Programm automatisch tut. Die verwendeten Sensoren nehmen nur relative Werte auf. Wir verschieben diese mit Offset-Korrekturen in den positiven Bereich damit wir die Fläche integrieren können. An der Motorwelle ist eine magnetische Lochscheibe angebracht mit der wir die Frequenz messen. Sie hat zehn Löcher und eine Marke. Nun nehmen wir den Motor in Betrieb. Dazu drehen wir die Heizwendel auf, warten ca 5 Sekunden und drehen danach am Schwungrad. Nachdem sich der Motor etwa 15 Minuten warmgelaufen hat beginnen wir mit der Messung. Kurz bevor wir das pV-Diagramm mit dem Messprogramm aufnehmen messen wir die zehnfache Leerlauf-Frequenz (um größere Genauigkeit zu erreichen) mit einem Stroboskop indem wir es so einstellen dass wir zehn Marken sehen und die Löcher scheinbar stillstehen. Wir lesen auch die Spannung und den Strom ab mit der die Heizwendel betrieben wird. Wir erhalten folgendes Diagramm:

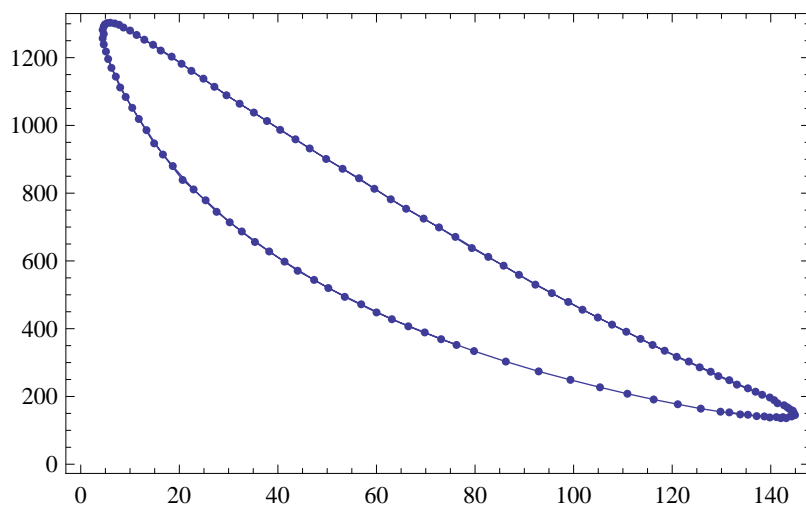


Abbildung 4: pV-Diagramm des Heißluftmotors

Das Programm kann die Kurve auch integrieren. Wir erhalten also die Mechanische

Energie W die der Motor aus Wärmeenergie umwandeln kann.:

$$\begin{aligned} W &= 3.6329 \pm 0.004 \\ I_{Heiz} &= 19.2 \pm 0.2 \text{ A} \\ U_{Heiz} &= 13.2 \pm 0.2 \text{ V} \\ P_{Heiz} &= 253 \pm 5 \text{ W} \\ f_{leer} &= 7.406 \pm 0.001 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Den Fehler von W haben wir aus den Messgenauigkeiten der Sensoren abgeschätzt wurde. Die Fehler für die anderen Werte erhalten wir aus der Ablesegenauigkeit der verwendeten Geräte. Wenn wir die mechanische Arbeit W mit der Frequenz f multiplizieren erhalten wir die ideale Leistung der Motors und somit nach der Formel

$$\eta_{ideal} = \frac{P_{ideal}}{P_{heiz}}$$

auch den idealen Wirkungsgrad:

$$\begin{aligned} P_{ideal} &= 26.91 \pm 0.03 \text{ W} \\ \eta_{ideal} &= 10.6 \pm 0.2 \% \end{aligned}$$

Als nächstesbestimmen wir den realen Wirkungsgrad des Motors indem wir mit-hilfe eines Prony'schen Bremszaums Leistung abnehmen. Die Motorwelle übt über Reibung auf den Bremszaum ein Drehmoment aus. Der Bremszaum ist wiederum mit einem Ende an einer Federwaage befestigt an der wir die auftretende Kraft messen. Wir berechnen die abgenommene Leistung mit Hilfe von Formel (6).

Damit wir mit Beträgen rechnen können müssen wir wegen des Kreuzprodukts beachten dass immer ein rechter Winkel zwischen Bremszaum und Federwaage ist. Wir berechnen gleich den realen Wirkungsgrad aus Formel (5). Wobei wir den Radius r des Bremszaums mit dem Maßband ausgemssen haben:

$$r = 0.25 \pm 0.002m$$

Wir erhalten also für verschiedene abgenommene Leistungen:

| $F \pm 0.01 \text{ [N]}$ | $f \pm 0.001 \text{ [Hz]}$ | $P_{Motor} \pm 0.2 \text{ [W]}$ | $\eta_{real} \pm 0.09\%$ |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 0.1 | 7.222 | 1.1 | 0.45 |
| 0.28 | 6.689 | 2.9 | 1.16 |
| 0.5 | 5.742 | 4.5 | 1.78 |
| 0.55 | 5.683 | 4.9 | 1.94 |
| 0.66 | 5.078 | 5.3 | 2.08 |

Die Fehler für die abgenommene Leistung P_{Motor} und den Wirkungsgrad η_{real} wurden über Fehlerfortpflanzung berechnet. Der Fehler der Kraft F , der Frequenz f und des Radius r stammen von der Ablesegenauigkeit. Wie man sieht ist der reale Wirkungsgrad doch deutlich niedriger als der ideale.

Zuletzt berechnen wir noch den Wirkungsgrad des Motors. Dazu müssen wir nur die Umgewandelte Mechanische Leistung aus dem pV-Diagramm durch die maximal abnehmbare Leistung des Motors dividieren. Wir erhalten also:

$$\eta_{Motor} = \frac{P_{ideal}}{P_{Motor}} = 19.6 \pm 0.8\% \quad (7)$$

3 Die Stirling-Maschine als Kältemaschine

3.1 Hintergrund

Setzt man die Stirling-Maschine als Wärmepumpe ein, so wird durch Investition mechanischer Arbeit W Wärme aus einem kälteren in ein wärmeres Reservoir gepumpt. Hierbei wird der Kreisprozess jedoch gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen. Man kann die Maschine aber auch dazu benützen, um Wärme vom wärmeren in das kältere Reservoir zu bewegen, um dieses zu kühlen. Dabei wird die Maschine extern angetrieben und durchläuft den Kreisprozess - genau wie die Wärmekraftmaschine - im Uhrzeigersinn.

Der Theorie nach könnte man Wärmereservoirs weder kühlen noch erwärmen, da ideale Wärmereservoirs unerschöpfliche Wärmequellen bzw. -senken sind. In der Praxis macht man sich jedoch die Tatsache zunutze, dass die Reservoirs eben nicht ideal sind.

3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Versuch verwenden wir den Stirlingmotor als Wärmepumpe. Wir bringen anstelle der Heizwendel aus dem ersten Versuch eine andere Heizwendel an die mit einem Thermoelement ausgestattet ist um die Temperatur im Motordeckel zu messen. Das Thermoelement ist wieder ein CASSY-Sensor - wir arbeiten also mit dem selben Programm wie im ersten Versuch. Jetzt treiben wir das Schwungrad des Motors mit einem externen Elektromotor im Uhrzeigersinn an. Wir heizen den zu kühlenden Raum so dass er auf einer konstanten Temperatur bleibt. Wir können also die Heizleistung mit der Kühlleistung des Motors gleichsetzen. Zusätzlich müssen wir darauf achten dass wir nicht unter 0°C kühlen da sonst das Kühlwasser gefrieren kann. Die Heizwendel ist mittels eines Transformators stufenlos regelbar. Zuerst stellen wir sie so ein dass der Motordeckel auf $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$ gekühlt wird. Wir warten so lange bis sich die Temperatur eingependelt hat und um 5°C

schwankt. Den Fehler haben wir über diese Schwankung abgeschätzt. Nun lesen wir die Spannung und den Strom mit dem Heizwendel und Elektromotor betrieben werden ab. Wir berechnen die Leistungen und den Wirkungsgrad mittels Formel (1) und bestimmen die Frequenz mit dem Stroboskop wie in ersten Versuch:

$$\begin{aligned}
 f_{5^\circ} &= 3.803 \pm 0.001 \\
 U_{Heiz} &= 6.6 \pm 0.5V \\
 I_{Heiz} &= 1.45 \pm 0.1A \\
 P_{Heiz} &= 10 \pm 1W \\
 U_{Motor} &= 230 \pm 5V \\
 I_{Motor} &= 0.34 \pm 0.02A \\
 P_{Motor} &= 78 \pm 5W \\
 \eta_{5^\circ} &= 12 \pm 1.2\%
 \end{aligned}$$

Die Fehler für die Spannungen und Ströme haben wir aufgrund der Schwankung der Analogen Messgeräte abgeschätzt. Der Fehler der Frequenz resultiert auf der Ablesegenauigkeit. Die restlichen Fehler wurden mit Gauß'scher-Fehlerfortpflanzung bestimmt.

Da wir mit diesem Versuch sehr schnell fertig waren haben wir zusätzlich noch eine Messung durchgeführt. Wir haben also versucht den Motordeckel auf Zimmertemperatur ($24.5^\circ C$) zu heizen. Allerdings unterlag der zu kühlende Bereich sehr starken Temperaturschwankungen. Bei unveränderten Einstellungen und langen Wartezeiten schwankte die Temperatur zwischen 24.5 und $29.4^\circ C$. Diese Messung ist also eher Qualitativ zu sehen. Wir erhalten folgende Werte:

$$\begin{aligned}
 f_{Raumtemp} &= 3.995 \pm 0.001 \\
 U_{Heiz} &= 9.0 \pm 0.5V \\
 I_{Heiz} &= 2.0 \pm 0.1A \\
 P_{Heiz} &= 18 \pm 1.4W \\
 U_{Motor} &= 230 \pm 5V \\
 I_{Motor} &= 0.39 \pm 0.02A \\
 P_{Motor} &= 90 \pm 5W \\
 \eta_{Raumtemp} &= 20 \pm 2\%
 \end{aligned}$$

Die Fehler für Spannungen, Ströme und Frequenz sind wie vorhin aus der Ablesegenauigkeit abgeschätzt, alle anderen Fehler über Gaus'sche-Fehlerfortpflanzung. Wie man klar erkennen kann ist der Wirkungsgrad der zweiten Messung deutlich höher als der der Ersten. Dies ist allerdings nicht verwunderlich da der Wirkungsgrad beim Stirlingmotor stark von der Temperaturdifferenz der beiden Reservoirs

abhängt. Man muss bei der ersten Messung anmerken dass der zu kühlende Bereich nicht allzugut isoliert ist, was eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt. Bei der zweiten Messung ist dieser Effekt nicht so wichtig da Außentemperatur und die Temperatur des Motordeckels nahe beieinander liegen.