Versuch 222 - Heißluftmotor

PAP 2.1

Teilnehmender Student: **Harish Mahendran**

Gruppe des Teilnehmenden: **14**

Kurs: **Vormittags**

Inhaltsverzeichnis

0 Messprotokoll **1**

1 Einleitung **5**

1.1 Motivation 5

1.2 Grundlagen aus der Physik 5

1.2.1 Bestimmung des Wirkungsgrad 8

1.2.2 Betrieb als Wärmepumpe/Kältemaschine 9

1.2.3 Relevante Formeln für die Auswertung 9

2 Durchführung **12**

2.1 Versuchskizze 12

2.2 Messverfahren 12

3 Auswertung **13**

3.1 Betrieb als Kältemaschine 13

3.2 Betrieb als Wärmepumpe und als Kältemaschine 14

3.3 Betrieb als Wärmekraftmaschine 15

4 Zusamenfassung und Diskussion **18**

4.1 Zusammenfassung 18

4.2 Diskussion und Kritik 18

4.3 Fazit 19

0. Messprotokoll

Messprotokoll Versuch 222: Heißluftmotor

13.02.25
Harish Mahendran
Jonas Schweer

Messinstrumente:

- Heißluftmotor
- regelbares Netzteil für die Heizwendel
- Sensorsystem „Cassy“ mit Druck- Temperatur- und Wegsensor
- PC mit Drucker
- Dreikanal Thermometer
- Multimeter
- Elektrischer Antriebsmotor mit regelbarem Netzteil
- Durchflussmengen- Messgerät des Kühlwassers

Aufgabe 1: Bestimmung der Kälteleistung

In dieser Aufgabe betreiben wir den Stirling-Motor als Kältemaschiene, der obere Teil des Motors soll abgekühlt werden. Nachdem das erledigt ist, nutzen wir eine elektrische Heizung, um die Ursprungstemperatur wieder herzustellen. Wir notieren die Temperaturen, die Heizspannung, den Heizstrom, die Drehfrequenz und den Volumenstrom.

Heizstrom: $I_H = 5{,}85\ A$ Fehler: 5%
Heizspannung: $U_H = 5{,}7\ V$ Fehler: 5%
Drehfrequenz: $f = (292{,}0 \pm 2{,}0)\ min^{-1}$
Temperatur (Zufluss): $T_{zu} = (17{,}) \pm 0{,}10)°C$
Temperatur (Abfluss): $T_{ab} = (20{,}4 \pm 0{,}10)°C$
$\Delta T = (3{,}10 \pm 0{,}14)°C$ (mit Fehler: $\sqrt{\Delta T_{zu}^2 + \Delta T_{ab}^2}$)
Volumenstrom: $\dot{V} = (270 \pm 3)\ \frac{ml}{min}$

Die Fehler wurden aufgrund von Schwankungen abgeschätzt.

Aufgabe 2: Betrieb als Wärmepumpe und Kältemaschiene

Wir verwenden den Stirling-Motor erneut als Kältemaschiene, diesmal um 1 ml Wasser gefrieren zu lassen. Wir nehmen den Verlauf der Zu- und Abflusstemperatur des Kühlwassers auf und bestimmen die Dauer, bis das Wasser gefriert.

Daten

Nun nehmen wir den Temperaturverlauf auf, wenn der Motor als Wärmepumpe betrieben wird und machen ein Foto.

Aufgabe 3: Betrieb als Wärmekraftmaschiene

Nun betreiben wir den Heißluftmotor umgekehrt, das heißt, wir generieren Arbeit aus zugeführten Wärmedifferenzen. Die Wärme erhalten wir aus einer Heizwendel. Nachdem der Motor eingelaufen ist, notieren wir wieder folgende Daten:

$I_H = 13{,}8\,A$ Fehler: 5%
$U_H = 13{,}77\,V$ Fehler: 5%

$\dot{V} = (270 \pm 3)\ \frac{ml}{min}$
$T_{ab} = (22{,}20 \pm 0{,}10)\,°C$
$T_{zu} = (17{,}50 \pm 0{,}10)\,°C$
$\Rightarrow \Delta T = (4{,}70 \pm 0{,}14)\,°C$

$f = (282{,}0 \pm 2{,}0)\,min^{-1}$

Wir lassen uns mit CASSY-Lab ein pV-Diagramm plotten, und lassen uns davon den Flächeninhalt berechnen, Das machen wir 3x und mitteln das Ergebnis. Die Standardabweichung gibt dann unseren Fehler

$A_1 = 25400\ cm^3 \cdot hPa$
$A_2 = 26740\ cm^3 \cdot hPa$
$A_3 = 26830\ cm^3 \cdot hPa$
$\Rightarrow \bar{A} = (26300 \pm 700)\ cm^3 \cdot hPa$

Nun wollen wir in einer zweiten Messung die real abgegebene Arbeit bestimmen. Dazu messen wir das Drehmoment mit einem Zaumn. Wir schreiben 3x die Daten auf.

1.
$F = (0{,}70 \pm 0{,}03)\,N$
$I_H = 13{,}8\,A$ Fehler: 5%
$U_H = 13{,}75\,V$ Fehler: 5%
$f = (226{,}0 \pm 2{,}0)\,min^{-1}$

pV-Diagramm:
$A_1 = 28100\,cm^3 hPa$
$A_2 = 31400\,cm^3 \cdot hPa$
$A_3 = 25900\,cm^3 \cdot hPa$
$\bar{A} = (28500 \pm 2300)\,cm^3\,hPa$

2.
$F = (0{,}60 \pm 0{,}03)\,N$
$I_H = 13{,}8\,A$ Fehler: 5%
$U_H = 13{,}75\,V$ Fehler: 5%
$f = (234{,}0 \pm 2{,}0)\,min^{-1}$

pV-Diagramm:
$A_1 = 32500\,cm^3 hPa$
$A_2 = 32600\,cm^3\,hPa$
$A_3 = 31300\,cm^3\,hPa$
$\bar{A} = (32100 \pm 600)\,cm^3\,hPa$

3.

$F = (0{,}45 \pm 0{,}03)\,N$
$I_H = 13{,}8\,A$ Fehler: 5%
$U_H = 13{,}75\,V$ Fehler: 5%
$f = (247 \pm 2{,}0)\,min^{-1}$

pV-Diagramm:
$A_1 = 31800\,cm^3\,hPa$
$A_2 = 33600\,cm^3\,hPa$
$A_3 = 31900\,cm^3\,hPa$
$\bar{A} = (32400 \pm 800)\,cm^3\,hPa$

4.

$F = (0{,}10 \pm 0{,}03)\,N$
$I_H = 13{,}8\,A$ Fehler: 5%
$U_H = 13{,}75\,V$ Fehler: 5%
$f = (289{,}0 \pm 2{,}0)\,min^{-1}$

pV-Diagramm:
$A_1 = 28900\,cm^3\,hPa$
$A_2 = 28800\,cm^3\,hPa$
$A_3 = 29100\,cm^3\,hPa$
$\bar{A} = (28930 \pm 120)\,cm^3\,hPa$

13.02.25

Martin Cosic

Aufgabe 2: Betrieb als Kältemaschine und Wärmepumpe

Im Reagenzglas $(1{,}0 \pm 0{,}2)$ ml

$T_{zu} = (17{,}90 \pm 0{,}10)\,°C$ $\quad T_{ab} = (19{,}30 \pm 0{,}10)\,°C$

- Kältemaschine: Drehzahl: $f = (311{,}8 \pm 1{,}0)\ \frac{1}{min}$

  Am Motor: $U_M = (24{,}10 \pm 0{,}10)\ V$ $\quad I_M = (11{,}50 \pm 0{,}10)\ A$

  Gefrierzeit des Wassers im Reagenzglas aus dem Temperaturplateau: $t_f \approx 245\ s$

- Wärmepumpe: Drehzahl: $f = (300{,}8 \pm 1{,}0)\ \frac{1}{min}$

  Am Motor: $U_M = (24{,}10 \pm 0{,}10)\ V$ $\quad I_M = (12{,}00 \pm 0{,}10)\ A$

1. Einleitung

1.1 Motivation

In diesem Versuch wird der Heißluftmotor in verschiedenen Betriebsarten untersucht als Kältemaschine, Wärmepumpe und als Wärmekraftmaschine. Der Versuch ermöglicht uns ein grundlegendes Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen Arbeit und Wärme sowie für die Effizienzgrenzen bei einem Heißluftmotor näher zu bringen.

1.2 Grundlagen aus der Physik

Die Funktionsweise eines Heißluftmotors werden wir uns anhand eines γ-Typs betrachten. Ein Heißluftmotor des γ besteht aus zwei Zylinder die über ein Rohr verbunden sind. Im linken Zylinder wird der untere Teil erhitzt und der obere Teil gekühlt. Die Hälfte des Zylinders nimmt der Verdrängerkolben ein. Das Gas wird erhitzt oder gekühlt je nach Positions des Verdrängerkolbens. Hierbei wird das Gas nicht komprimiert, sondern nur vershcoben wird. Im zweiten Zylinder befindet sich ein Arbeitzylinder, der mit einer Kurbelwelle verbunden ist. Befindet sich der Verdrängerkolben im unteren Teil, so wird die Luft gekühlt, wodurch das Gas auch im Arbeitszylinder komprimiert wird. Wird nun durch den Verdrängerkolben, das Gas in den warmen Bereich verdrängt, so steigt der Druck, und es wird Arbeit verrichtet indem der Arbeitskolben nach oben gedrückt wird. Ein Teil der Arbeit wird wieder in die Verdrängung des Gases verwendet, damit der Zyklus aufrecht erhalten wird.

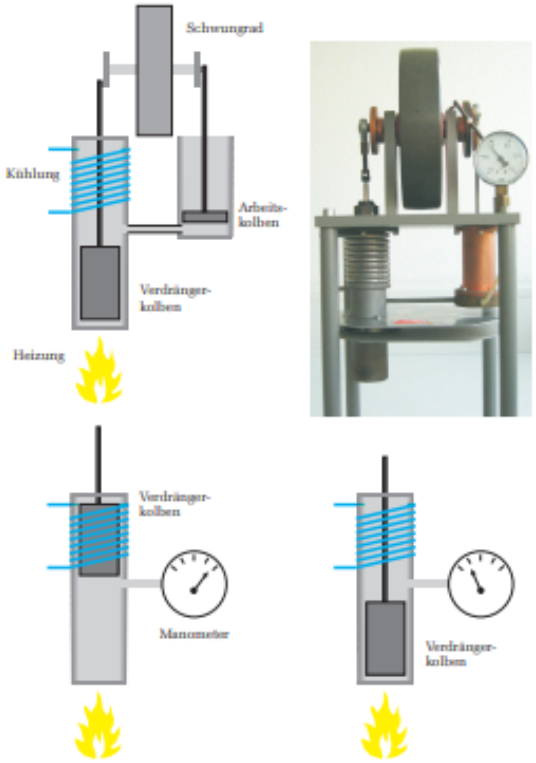


Abbildung 1: Skizze eines Motors vom Typ γ(Quelle: Jens Wagner, "Physikalisches Anfängerpraktikum PAP 2.1", Stand:2025

In diesem Versuch verwenden wir aber ein Heißluftmotor des Typs β. Dieser hat im Gegensatz zum Typ γ nur ein Zylinder. Dem Motor zugrundeliegend ist der Stirling-Motor. Dieser aus 2 isotherme und 2 isochore Zustandsänderungen.

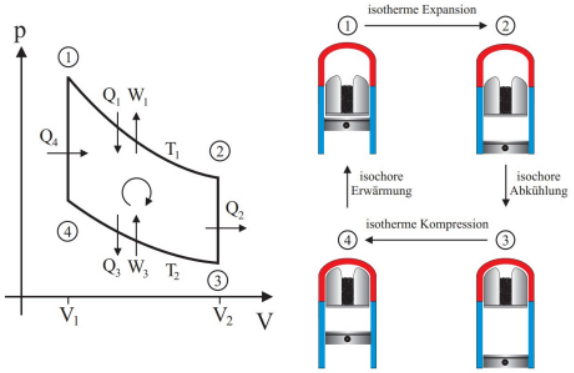


Abbildung 2: Skizze eines Motors vom Typ β(Quelle: Jens Wagner, "Physikalisches Anfängerpraktikum PAP 2.1", Stand:2025

Bei der isothermen Expansion nimmt das Gas die Wärmemenge Q_1, wodurch die Arbeit W_1 durch Expansion des Gases geleistet wird. Bei der isochoren Abkühlung wird die Wärmenege Q_2 an die Kühlung abgegeben und das Gas wird auf die Temperatur T_2 abgekühlt. Bei der isothermen Kompression, wird das kalte Gas komprimiert und es wird

die Arbeit W_3 am geleistet. Dabei wird die Wärmemenge Q_3 an die Kühlung abgegeben. Nun wird mit der isochoren Erwärmung die Wärmemenge aufgenommen, sodass das Gas wieder auf die Temperatur auf T_1 erhitzt wird.
Wir werden in diesem kein idealisierten Stirling-Motor verwenden da dieser nicht realisierbar ist, da dafür unstetige Kolbenbewegungen von Nöten sind. Die Kolbenbewegung ist Sinusförmig. Der Wirkungsgrad sinkt, zwar aufgrund dessen das verschiedene Zustände sich Überlappen. Dafür ist die Belastung des Motors minimal.
Um die Effizienz des Motors zu erhöhen kann man ein Regenerator verwenden. Dies ist in unserem Versuch eine Kupferwolle. Diese sorgt dafür, dass der Temperaturwechsel so schnell wie möglich passiert. Wird das Gas in den kalten Bereich verdrängt wird die Wärmemenge an die Kupferwolle abgegeben. Wird das Gas wieder in den wärmeren Bereich getrieben, wird die Wärmemenge wieder aufgenommen.

1.2.1 Bestimmung des Wirkungsgrad

Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, also dass eine Zufuhr einer Wärmemenge dQ zu einer Erhöhung der der inneren Energie dU und der Verrichtung der Volumenarbeit pdV.

$$dQ = dU + pdV \tag{1}$$

Der ideale thermische Wirkungsgrad η_{th} einer Wärmekraftmaschine ist wie folgt definiert

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{Q_+} \tag{2}$$

Wobei W_N die netto Nutzarbeit und die aufgenommene Wärmemenge Q_+. Bei der isothermen Expansion wird die Arbeit

$$W_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{3}$$

geleistet. Analog folgt für die Volumenarbeit bei der isothermen Kompression

$$W_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{4}$$

Das Vorzeichen ist dadurch zubegründen, dass in diesem Schritt Arbeit am Kolben verrichtet wird und nicht der Kolben Arbeit verrichtet. Es ergibt sich also folgende Nettoarbeit

$$W_N = W_1 + W_2 = \nu R (T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{5}$$

Die zugeführten Wärmemengen sind einmal

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{6}$$

, bei der isothermen Expansion und einmal

$$Q_3 = C_V \nu (T_1 - T_2) \tag{7}$$

bei der isochoren Erwärmung. Es ergibt sich also folgende aufgenommene Wärmemenge Q_+:

$$Q_+ = Q_1 + Q_3 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + C_V \nu (T_1 - T_2) \tag{8}$$

also einen thermischen Wirkungsgrad von

$$\eta_{th} = \frac{\nu R(T_1 - T_2)\ln\frac{V_2}{V_1}}{\nu R T_1 \ln\frac{V_2}{V_1} + C_V \nu (T_1 - T_2)} \tag{9}$$

Mit einem idealen Regenerator wird die Wärmemenge, die bei der isochoren Abkühlung an die Kühlung abgegeben wird, wird im Regenerator zwischen gespeichert. Und wird wieder bei isochoren erwärmung frei, wodurch die gesamt aufgenommene Wärme nur Q_1 beträgt. Dadurch reduziert sich die Gleichung des thermischen Wirkungsgrad zu

$$\eta_{th}^{R} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{10}$$

1.2.2 Betrieb als Wärmepumpe/Kältemaschine

Der Stirlingprozess als umkehrbarer Kreisprozess kann sowohl zum Betrieb als Kältemaschine als auch als Wärmepumpe genutzt werden. Im pV-Diagramm bedeutet dies eine entsprechende Umkehrung der Laufrichtung, die Energieströme ändern ihre Richtung. Im Betrieb als Kältemaschine wird im kühlenden Teil die Wärmeenergie Q_2 entzogen und im wärmeren Teil die Wärmeenergie $Q_1 = W + Q_2$ zugeführt. Für die Kältemaschine lässt sich so auch ein Wirkungsgrad η als Verhältnis dieser abgegebenen Wärmeenergie Q_2 und der zugeführten Arbeit W definieren:

$$\eta = \frac{Q_2}{W_M} \tag{11.a}$$

$$= \frac{T_2}{T_1 - T_2} \tag{11.b}$$

Wobei die Effizienz der Kältemaschine durch die Leistungsziffer ε wiedergegeben wird:

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1 \tag{12}$$

1.2.3 Relevante Formeln für die Auswertung

In diesem Versuch werden wir die Kälteleistung P_K berechnen. Da diese Leistung mit einer Heizwendel kompensiert wird folgt

$$P_K = P_H = U_H + I_H \tag{13}$$

es folgt dadurch für Q_2

$$Q_2 = \frac{U_H I_H}{f} \tag{14}$$

Wobei U_H die Spannung und I_H der Strom mit der die Heizewendel betrieben wird. f ist hierbei die Drehfrequenz des Motors ist.
Im Idealfall gilt

$$Q_1 = Q_2 + W_M \tag{15}$$

Q_1 lässt sich durch kalorische Zustandsgleichung berechnen

$$Q_1 = Q_{ab} = \frac{c_w \rho_w V \cdot \Delta T}{f} \tag{16}$$

Hierbei ist c_w die Wärmekapazität von Wasser, welche gegeben ist als $c_w = 4180 \frac{J}{kg \cdot K}$ und ρ_w die Dichte von Wasser ist $\rho_w = 1000 \frac{kg}{m^3}$ (Quelle: Jens Wagner, "Physikalisches Anfängerpraktikum PAP 2.1", Stand:2025. Die Leistung des Motors W_M ist gegeben als

$$W_M = \frac{U_M I_M}{f} \tag{17}$$

Wobei U_M und I_M die Spannung und Strom mit, der der Motor betrieben wird.
Um die Kälteleistung des Motors im zweiten Teil zu bestimmen, benötigt man folgende Formel

$$P_K = f Q_2 = \frac{\lambda \cdot \rho_w V}{\Delta t} \tag{18}$$

Hierbei ist $\lambda = 335 \frac{J}{g}$ die Schmelzwärme des Wassers und Δt die Zeit die der Motor benötigt um das Wasser zu gefrieren.
Betreibt man im dritten Teil den Motor als Wärmekraftmaschine so kann man den Wirkungsgrad mit Hilfe eines pV- Diagramms berechnen. Die Fläche der Kurve entspricht dabei

$$Q_{pV} = W = \int p dV \tag{19}$$

Daraus folgt für den thermischen wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_{pV}}{Q_H} \tag{20}$$

Da dieser Versuch größtenteils zu demostartions zwecke dient, ist der Motor nicht ideal und hat Verluste von Wärmemengen an die Umgebung. Die verlorene Wärmemenge kann man wie folgt berechnen:

$$Q_v = Q_H - Q_{ab} - Q_{pV} \tag{21}$$

Mit der Bremszaum-Messung kann man auch noch die effektiven Wirkungsgrad berechnen. Der effektive Wirkungsgrad gibt an wie viel der zugeführten leistung in effektiv nutzbare Leistung umgewandelt wird. Die lässt sich wie folgt berechnen

$$W_D = 2\pi D = 2\pi l F \tag{22}$$

Wobei man F senkrecht zu l wirkt, sodass das Drehmoment D aus dem produkt beider berechnen lässt. Insgesamt ergibt sich

$$\eta_{eff} = \frac{2\pi l F}{Q_H} \tag{23}$$

2. Durchführung

2.1 Versuchskizze

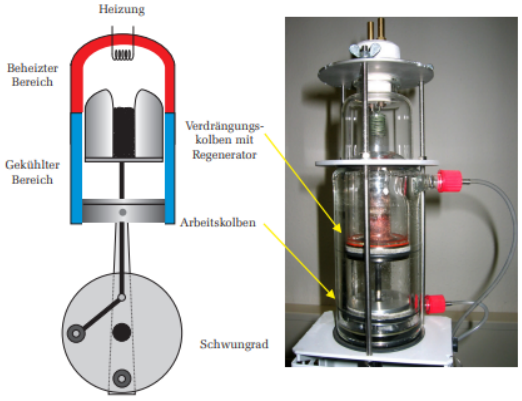


Abbildung 3:Versuchskizze (Quelle: Jens Wagner, "Physikalisches Anfängerpraktikum PAP 2.1", Stand:2025

2.2 Messverfahren

Im ersten Teil wird mit einer Heizwendel, die als Kompensation zur Kälteleistung, die Kälteleistung des Motors bestimmt.
Im zweiten Teil wird $1ml$ Wasser zum gefrieren gebracht, indem man den Motor als Wärmekraftmaschine verwendet. Danach wird das gefrorene Wasser aufgetaut und anschließend zum Sieden gebracht. Daraus kann man wieder die Kälteleistung bestimmen.
Im dritten Teil wird dann der Motor als Wärmekraftmaschine verwendet. Man macht hier zuerst eine Leerlaufmessung und anschließend 4 Messungen mit einem Bremszaum bei 4 verschiedenen Drehmomenten.

3. Auswertung

3.1 Betrieb als Kältemaschine

Es folgt aus Gleichung (13)

$$P_K = (33,3 \pm 2,4)W$$

Die Wärmemenge die pro Zyklus die ins System, durch die Heizwendel hinzugegeben werden, folgt aus Gleichung (14)

$$Q_2 = (8,9 \pm 0,5)J$$

Die Arbeit die pro Zyklus vom Motor verrichtet wird folgt analog aus Gleichung (17). Hier wurde I_M und U_M aus Aufgabe 2 verwendet. Da diese Werte von der anderen Gruppe an einem anderen Motor gemessen wurde, wird die plaubilität des wertes in der Diskussion besprochen.

$$W_M = (11,6 \pm 1,7)$$

Daraus folgt

$$W_M + Q_2 = (20,5 \pm 1,8)J > (12 \pm 7)J = Q_1$$

Wobei Q_1 nach (16) berechnet. Dieser Unterschied ist dem nicht idealen Motor zu verschulden. Durch thermische Strahlung verliert das System kontinuierlich Wärme. Deswegen ist Gleichung (15) nicht erfüllt. Die σ-Abweichung hier auszurechnen ist hier nicht sinnvoll, da die Diskrepanz der Werte zu erwarten war.
Der Wirkungsgrad des Motors lässt sich dann mit Gleichung (**??**) berechnen

$$\eta = (0,59 \pm 0,10)$$

Die Fehlerformeln folgen nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung:
P_K:

$$\Delta P_K = P_K \sqrt{(\frac{\Delta U_H}{U_H})^2 + (\frac{\Delta I_H}{I_H})^2} \tag{24}$$

Q_1:

$$\Delta Q_1 = Q_1 \sqrt{(\frac{\Delta V}{V})^2 + (\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T})^2 + (\frac{\Delta f}{f})^2} \tag{25}$$

$\mathbf{W}_M eta$:

3.2 Betrieb als Wärmepumpe und als Kältemaschine

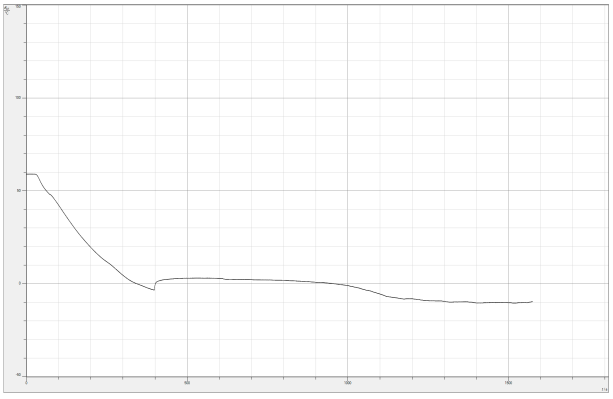


Abbildung 5:Temperaturverlauf von $1ml$ Wasser beim Betrieb als Kältemaschine

Man kann zu Beginn der Messung sehen, dass die Temperatur von dem $1,0 \pm 0,2ml$ Wasser sinkt. Sie geht auch unter die $0C^\circ$ bevor es zu einer Plateau-Phase kommt. Die ist dadurch du erklären, dass das Wasser zu diesem Zeitpunkt noch flüssig war. In der Kurve kann man ein Sprung zu diesem Zeitpunkt sehen. Die Temperatur steigt da auf etwa $0C^\circ$. Es wird also Wärme frei. Diese Wärme ist die latente Wärme oder die Schmelzwärme $\lambda = 335\frac{J}{g}$ die beim gefrieren frei wird. Man sieht auch gegen Ende der Kurve, dass die Kurve abflacht, dies ist dadurch zu bregründen, dass die Kälteleistung dann im Gleichgewicht mit der Wärmezufuhr von außen erreicht.

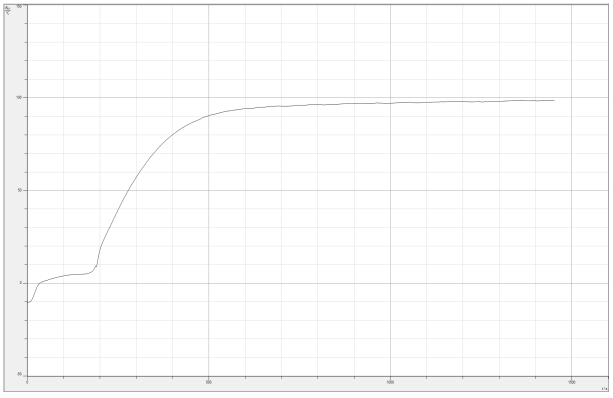


Abbildung 6: Temperaturverlauf von $1ml$ Wasser beim Betrieb als Wärmemaschine

Betreibt man den Motor als Wärmepumpe sieht, dass die Kurve viel schneller steigt. Was verwunderlich an der Kurve ist, ist dass bei $0C^\circ$ kein Plateau-Bereich zu sehen ist. Dies ist zu erwarten, das die latente Wärme ins Wasser hinzu gefügt werden muss. Mögliche Gründe werden dann in der Diskussion besprochen. Danach nähert sich die Kurve exponentiell die $100C^\circ$ Grenze an. Hier beginnt das Wasser zu sieden. Die Temperatur übersteigt hier nicht

die $100C°$, da analog zu Schmelzwärme eine Verdunstungswärme ins System aufgebracht werden muss.
Man sieht auch in beiden Verläufen, dass das Erhitzen schneller verläuft als das Kühlen. Dies ist wohl durch die Interaktion mit der Umgebung zurückzuführen: Beim Aufwärmen unterstützt die relative Wärme der Umgebung, beim Abkühlen wirkt sie dem Prozess entgegen, und ihre Wärme muss zusätzlich durch die Kältemaschine abgeführt werden.

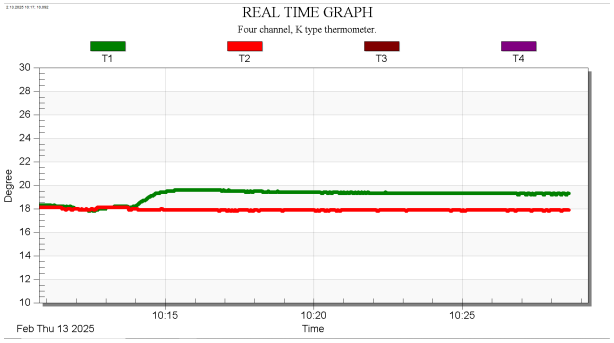


Abbildung 7: Tempearturverlauf des Kühlwassers beim Betreib als Kältemaschine

Die Zulauftemperatur bleibt dauerhaft konstant, die des Ablaufes steigt schon zu Beginn auf einen leicht erhöhten Wert, bleibt dann aber dort ebenso stabil – daher ist die Kühlleistung über den gesamten Versuch hinweg konstant.
Auch hier kann man eine Kälteleistung P_K bestimmen. Mit Gleichung (18) folgt

$$P_K = (30,4 \pm 0,7)W$$

Vergleicht man diesen Wert mit der Kälteleistung die zuvor bestimmt wurde erhält man eine σ-Abweichung von $1,16$.

3.3 Betrieb als Wärmekraftmaschine

Die Wärme die an die Kühlung abgegeben wird Q_ab lässt sich mit Gleichung (16) berechnen. Die Wärmemenge Q_el die von der elektrischen Heizwendel ins System zugeführt wird, lässt sich mit Gleichung (13) berechnen. Die Leistung für Q_ab und Q_el lässt sich durch multiplizieren von der Drehfrequenz f berechnen. Der thermische Wirkungsgrad η_{th} lässt sich mit (20) berechnen. Q_V lässt sich mit (21) berechnen. Die Werte sind in folgender Tabelle eingetragen:

Größen	Werte
f[Hz]	$4,70 \pm 0,03$
P_{el}	$189,9 \pm 2,9$
Q_{el}	$40,4 \pm 2,9$
P_{ab}	$88,4 \pm 1,2$
Q_{ab}	$18,8 \pm 1,2$
P_{pV}	$12,36 \pm 0,07$
Q_{pV}	$2,63 \pm 0,07$
eta_{th}	$0,065 \pm 0,005$
Q_V	$21,6 \pm 2,1$

Tabelle 1:Errechnete Größen für die Wärmekraftmaschine

Die Fehler Formel für Q_ab ist (25), für Q_{el} gilt

$$\Delta Q_{el} = Q_{el}\sqrt{(\frac{\Delta I_H}{I_H})2^{+}(\frac{\Delta U_H}{\Delta U_H})^2 + (\frac{\Delta f}{\Delta f})^2} \tag{28}$$

Für η_{th}

$$\Delta \eta_{th} = \eta_{th}\sqrt{(\frac{\Delta W_D}{W_D})^2 + (\frac{\Delta Q_{el}}{Q_{el}})^2} \tag{29}$$

Für Q_v

$$\Delta Q_V = Q_V\sqrt{(\frac{\Delta Q_{el}}{Q_{el}})^2 + (\frac{\Delta Q_{ab}}{Q_{ab}})^2 + (\frac{\Delta Q_{pV}}{Q_{pV}})^2} \tag{30}$$

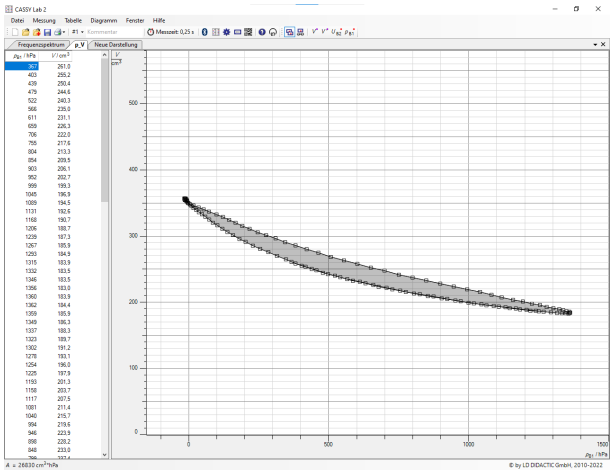


Abbildung 8: Darstellung eines pV-Diagramms

Bei der Bremszaummessung kann man jetzt noch den effektiven Wirkungsgrad eta_{eff} mit Gleichung (23) berechnen. Die Fehlerformel für eta_{eff} lautet

$$\Delta\eta_{eff} = \eta_{eff}\sqrt{(\frac{\Delta l}{l})^2 + (\frac{\Delta F}{F})^2 + (\frac{\Delta Q_H}{Q_H})^2} \tag{30}$$

Hierbei wurde der Fehler des Bremszaum $l = 25cm$ (Quelle: Jens Wagner, "Physikalisches Anfängerpraktikum PAP 2.1", Stand:2025auf $\Delta l = 0,5cm$ geschätzt. W_D lässt sich mit (22) berechnen. Der Fehler lässt sich dann mit quadratischer Addition berechnen.

Größen	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4
F[N]	$0,7 \pm 0,05$	$0,6 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,05$	$0,1 \pm 0,05$
f[Hz]	$3,77 \pm 0,03$	$3,9 \pm 0,03$	$4,12 \pm 0,03$	$4,82 \pm 0,03$
W_D[J]	$1,09 \pm 0,08$	$0,94 \pm 0,08$	$0,71 \pm 0,08$	$0,16 \pm 0,08$
$W_{pV}[j]$	$2,85 \pm 0,08$	$3,21 \pm 0,08$	$3,24 \pm 0,08$	$2,89 \pm 0,08$
$eta_{th}[-]$	$0,0704 \pm 0,0028$	$0,0794 \pm 0,0026$	$0,0801 \pm 0,0023$	$0,0716 \pm 0,0020$
eta_{eff} [-]	$0,0272 \pm 0,0028$	$0,02331 \pm 0,0026$	$0,0175 \pm 0,0023$	$0.0039 \pm 0,0020$

Tabelle 2: Werte mit fur die Messungen mit Bremszaum

Trägt man den thermischen und effektiven Wirkungsgrad gegenüber die Frequenz auf so ergibt sich folgender Plot

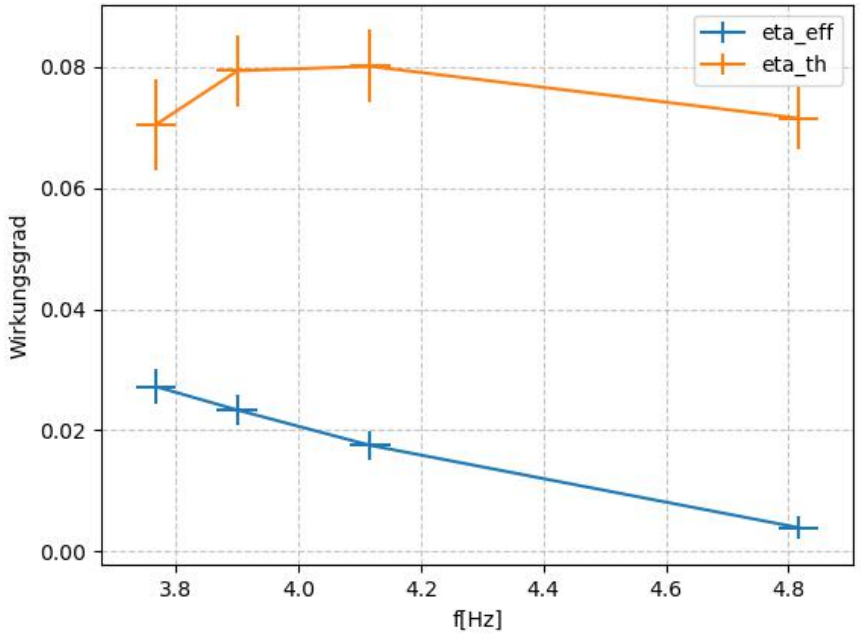


Abbildung 9: Thermischer und Effektiver Wirkungsgrad gegen Frequenz

4. Zusamenfassung und Diskussion

4.1 Zusammenfassung

Zu Beginn wurde der Heißluftmotor als Kältemaschine konfiguriert, und durch Verrechnung des Heizstromes und der Heizspannung die Kälteleistung bestimmt. Nun wurde die Energiebilanz aufgestellt, und der thermische Wirkungsgrad ermittelt.
Auch im zweiten Teil wurde zunächst die Kälteleistung bestimmt, diesmal allerdings mittels einer Zeitmessung am gefrierenden Wasser. Außerdem wurde hier der Motor als Wärmepumpe betrieben, und die Messdaten qualitativ ausgewertet.
Im dritten Versuchsteil wurde eine Leerlaufmessung am Motor vorgenommen, danach eine Messung mit angelegtem Bremszaum. Es wurden im Falle des Leerlaufs Werte wie der Durchfluss oder die Zu- und Ablauftemperatur gemessen, um daraus verschiedene Leistungen und Energien zu bestimmen, auch wurde der Motorverlust berechnet. Im Falle des Bremszaums wurden lediglich W_D und W_{pV} , sowie der thermische und effektive Wirkungsgrad bestimmt.

4.2 Diskussion und Kritik

Der Wirkungsgrad de Heißluftmotors als Kältemaschine ist an sich sehr hoch, was durch die geringe Verlustwärme erklärbar ist. Erwartungsgemäß wird allerdings nicht der maximal mögliche Carnot-Wirkungsgrad erreicht. Dies wird zum einen durch die aufgrund der nicht idealen Isolation von außen zugeführte Wärme verhindert, zum anderen am Verlust mechanischer Arbeit durch Reibung der Motorkomponenten.
Die im ersten Teil berechnete Kälteleistung wird mit den entsprechenden Ergebnissen des zweiten Versuchsteils verglichen: Die durch die Gefrierzeitmessung erhaltene Kälteleistung weicht um etwa $1,16\sigma$ vom zuvor bestimmten Wert ab. Dies ist zwar keine signifikante Abweichung. Da der Motor nicht idealisiert ist gibt es aber trotzdem systematische Fehler. Die Kälteleistung wurde im ersten Teil durch eine Kompensationsleistung von einer Heizwendel. Da das System nicht isoliert ist, kann ein Teil der Heizleistung durch Wärmestrahlung nach außen getragen werden. Dadurch ist eine größere Leistung der Heizwendel nötig um die Kühlung zu kompensieren, da ein Teil der Leistung "verloren"geht. Dies erklärt, dass die Heizleistung im ersten Teil höher ist als im zweiten Teil. Die größte Fehlerquelle ist hier wahrscheinlich, dass durch das Aufteilen der Aufgaben 1 und 2, beim ersten Teil die Motor Spannung U_M und Strom I_M nicht gemessen worden ist, da dies erst im zweiten Aufgabenteil durchgeführt werden muss. Da man hier verschiedene Motoren verwendet haben, sind diese Werte wahrscheinlich nicht identisch. Da es sich um ähnliche Motoren handelt sind die Werte aber vergleichbar. Dies ist zwar ärgerlich, man kann aber trotzdem aus den Aufgaben die wichtigsten Aspekte mitnehmen.
Beim Betrieb als Wärmekraftmaschine sieht man, dass der thermische und effektive Wirkungsgrad niedriger ist, als beim Betrieb als Kältemaschine. Dies ist zu erwarten,

da eine Wärmepumpe/Kältemaschine eine größere Effizienz hat, wenn die Temperaturen möglichst gleich sind. Auch ist bei einem optimalen Kältemaschine/Wärmepumpe der Wirkungsgrad nach (11.b) bei den Temperaturen von T_{ab} und T_{zu} ein Wirkungsgrad von höher als 1 hat. Dies ist dadurch zu erklären, dass eine Wärmemenge der Umgebung entzogen wird , bei einer Wärmepumpe und abgegeben wird bei einer Kältemaschine. Beim Betrieb als Wärmekraftmaschine ist ein Betrieb bei möglichst großer Temperaturdifferenz am besten. Jedoch kann der Motor nicht an den idealen Carnot-Prozess nahe kommen, da der Motor sehr viele Verluste aufweist. Dies ist auch am Q_V Wert ersichtlich, welcher um ein Faktor von etwa 8 größer ist.
Betrachtet man das Abbildung 9 (**??**), so wird für den thermischen Wirkungsgrad ein Anstieg bei höheren Frequenzen ersichtlich. Die Fehlerbereiche scheinen relativ groß, jedoch ist dies auf die stark streckende Skalierung zuruckzuführen, der Trend ist auch unter Beachtung der Fehlerbereiche erkenntlich. Die Steigung des Wirkungsgrades mit der Frequenz ist eventuell auf die geringeren Verluste pro Motorzyklus, aufgrund der geringeren Dauer zurück zu führen. Man kann auch die Abnahme des effektiven Wirkungsgrades mit der Frequenz zu erkennen. Dies rührt wohl aus den geringeren absoluten Verlusten durch Reibung etc. bei geringeren Geschwindigkeiten der Komponenten. Insgesamt lässt sich auch hier die Messung durch bessere Isolation verbessern. Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist die Haftreibung am Zaum. Um diese zu minimieren hätte man wie nach S.44 im Skript den Bremszaum ölen können. Beim erneuten Durchführen des Versuchs wäre es ratsam dies zu beachten.

4.3 Fazit

In diesem Versuch war es uns möglich ein besseres Verständnis die Funktionsweise eines Motors vom Typ β zu erhalten. Auch konnten wir die Umkehrbarkeit einer Wärmekraftmaschine sehen, sodass man den Motor auch als Kältemaschine oder auch als Wärmepumpe betreiben kann.