Versuch 222
Heißluftmotor

Viktor Ivanov

15. Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Ziel dieses Versuchs ist, einige thermodynamische Kreisprozesse zu untersuchen. Wir werden einen Stirlingmotor als Wärmepumpe und Kältemaschine verwenden und seine Eigenschaften in verschiedenen Einstellungen untersuchen und vergleichen.

1.2 Physikalische Grundlagen

Es existieren einige Typen von Stirlingmotoren. In diesem Versuch untersuchen wir nur die *gamma* und β Typen. Zunächst betrachten wir den γ-Typ Motor, der in Abbildung 1 dargestellt ist. Er besitzt zwei verbundene separate Zylinder, beide sind mit Luft gefüllt und nach außen verdichtet.
Die Luft im Zylinder wird mithilfe eines Verdrängerkolbens nach oben und unten bewegt, daher komprimiert sich das Gas nicht. Der γ-Motor besitzt auch Arbeitskolben, die sich in dem rechten Zylinder befinden, sie expandieren und kompressieren das Gas. Nach Erhitzung und Kühlung entstehen thermodynamische Prozesse und passiert ein Kreisprozess.
Der β-Typ Stirlingmotor besteht nur aus einem Zylinder, der sowohl mit einem Arbeitskolben, als auch mit einem Verdrängungskolben arbeitet. Dieser Motortyp ist in Abbildung 2 dargestellt.
In diesem Versuch untersuchen wir einen Motor von dem γ-Typ.

1.2.1 Hauptsätze der Thermodynamik

Der erste Satz der Thermodynamik besagt, dass die Energie eines geschlossenen Systems konstant ist:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W = \Delta U + p\Delta V \tag{1}$$

Der zweite Satz besagt, dass in einem geschlossenen System die Entropie konstant steigt. Der dritte sagt, dass der absolute Nullpunkt nicht erreichbar ist.

1.2.2 Thermodynamische Zustandsänderungen einer idealen Stirling-Prozess

1.2.2.1 Isotherme Expansion (1 →2)

Bei isothermen Expansion der befindet sich Verdrängungskolben in Zustellung 1 ganz unten, die Luft befindet sich im heißen Zylinderbereich (oben) und wird aufgeheizt. Das Arbeitsgas nimmt die Wärmemenge Q_1 auf, expandiert und den Arbeitskolben nach unten mit dem Arbeit W_1 bewegt. Die Temperatur T_1 bleibt konstant und die Enthalpie steigt. Die Arbeit ist gleich die Wärmemenge und lässt sich mit folgender Formel beschreiben:

$$W_1 = \nu R T_1 ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1 \tag{2}$$

1.2.2.2 Isochore Abkühlung (2 → 3)

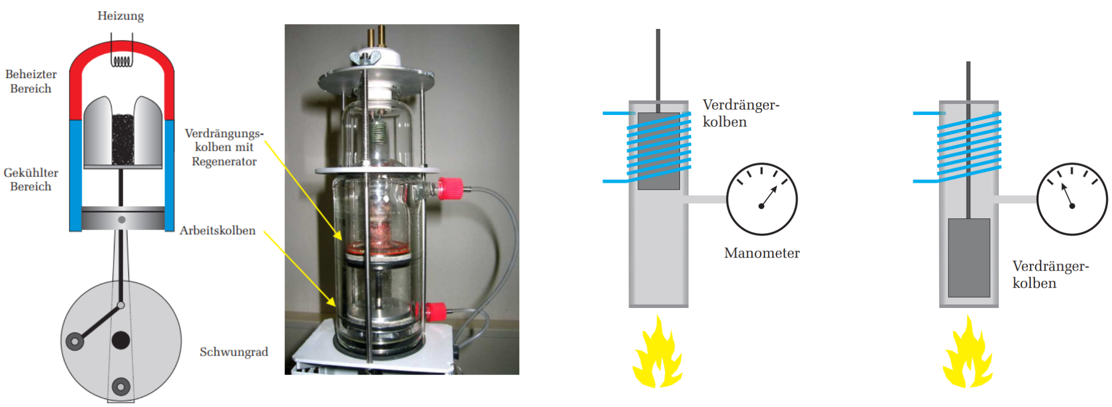
Bei isochoren Abkühlung bewegt sich der Verdrängungskolben nach oben und das Arbeitsgas verschiebt sich in den kalten Bereich. Die Luft wird auf die Temperatur T_1 abgekühlt und gibt die Wärmemenge Q_2 an das Kühlsystem. Für die Wärmemenge gilt:

$$Q_2 = -C_V \nu (T_1 - T_2) \tag{3}$$

$$\tag{4}$$

Da es eine isochore Zustandsänderung ist, ist keine Volumenarbeit verrichtet und es gilt für die Arbeit:

$$W_2 = 0 \tag{5}$$



(a) (b)

Abbildung 1: γ-Typ Stirlingmotor (links) und die Wirkungsweise des Verdrängers (rechts)

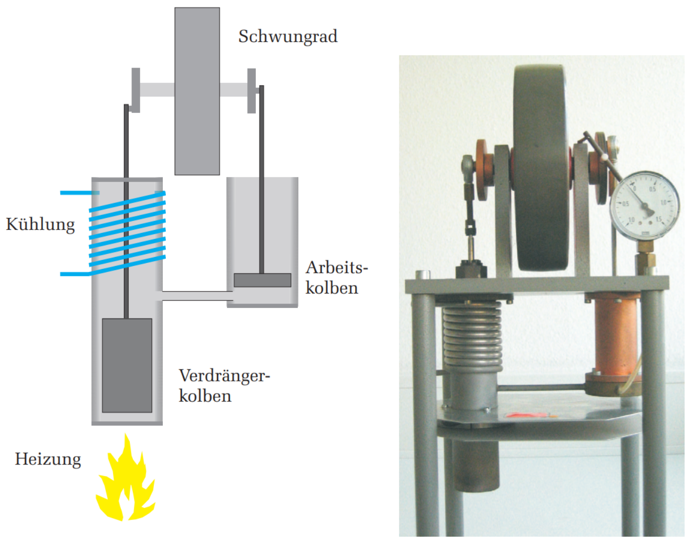


Abbildung 2: Aufbau eines β-Typ Stirlingmotors

1.2.2.3 Isotherme Kompression (3 $\rightarrow$ 4)

Die kalte Luft wird während der isothermen Kompression durch nach oben Verschieben des Arbeitskolbens komprimiert. Die Kolben verrichten die Arbeit W_3 und die Wärmemenge Q_3 wird abgeführt. Es gilt:

$$Q_3 = -\nu R T_2 ln \frac{V_2}{V_1} = W_3 \tag{6}$$

1.2.2.4 Isochore Erwärmung (4 $\rightarrow$ 1)

In diesem Schritt wird das Gas von dem Arbeitskolben in den warmen Bereich geschoben. Es nimmt die Wärme Q_4 und kommt wieder auf die Anfangstemperatur T_1. Für die Wärme und die Arbeit bei isochorer Erwärmung gelten:

$$Q_4 = -C_V \nu (T_1 - T_2) \tag{7}$$
$$W_2 = 0 \tag{8}$$

1.2.3 Nutzrbeit und Wirkungsgrad

Die geleistete Nutzarbeit W_N beträgt das Integral über den ganzen Kreisprozess:

$$W_N = \oint pdV = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = vRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - vRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = vR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{9}$$

Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis zwischen der Arbeit W_N und der aufgenommenen Wärmemenge Q^+:

$$\eta_{th} = \frac{W_N}{Q^+} \tag{10}$$

Wobei die aufgenommene Wärmemenge Q^+ die Summe von den zugeführten Wärmemengen bei der isothermen Expansion und der isochoren Erwärmung ist:

$$Q^+ = Q_1 + Q_4 = vRT_1 \ln \frac{V_2}{V_4} + C_V v(T_1 - T_2) \tag{11}$$

Für den Wirkungsgrad folgt dann:

$$\eta_{th} = \frac{\ln \frac{V_2}{V_1}(1 - \frac{T_2}{T_1})}{\ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{C_V}{R}(1 - \frac{T_2}{T_1})} \tag{12}$$

Wenn wir eine perfekte Maschine betrachten, wobei die Wärme in Takt 2 nicht ausgegeben wird, sondern gespeichert und bei Zyklus 4 zurück zugeführt, wird für die aufgenommene Wärme gelten:

$$Q^+ = Q_1 = vRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{13}$$

Und daraus für den Wikrungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{W_N}{Q^+} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{14}$$

1.2.4 Betrieb als Wärmepumpe oder Kältemaschine

Wenn der Motor im Uhrzeigersinn arbeitet, dient er als eine Wärmepumpe oder Kältemaschine. Bei der Kältemaschine wird unten erhitzt und oben abgekühlt und umgekehrt für die Wärmepumpe. Für den Wirkungsgrad gilt es:

$$\eta = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \tag{15}$$

Die Effizienz beträgt:

$$\epsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \tag{16}$$

2 Messprotokol und Durchführung des Versuchs

Das Messprotokoll befindet sich auf der nächsten Seite.

06.11.23

Messprotokol

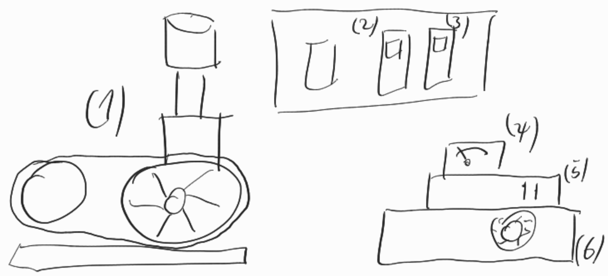
Viktor Ivanov
Danae Dountsas

Versuch 222 - Heißluftmotor

I. Geräte:

- Heißluftmotor (1)
- regelbares Netzteil für die Heizwendel (6)
- Sensorsystem "Cassy" mit Drucktemperatur- und Wegsensor
- PC mit Drucker
- Dreikanal Thermometer (3)
- Multimeter (4)
- Elektrischer Antriebsmotor mit regelbarem Netzteil (5)
- Durchfussmengen-Messgerät des Kühlwassers. (2)

II. Versuchsaufbau



Skizze 1: Versuchsaufbau

III Durchführung

1. Qualitative Bestimmung der Kälteleistung

Damit der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine Arbeitet, haben wir ein ein elektrisch beheizbarer Kopf montiert. Mithilfe von zwei Multimetern haben wir die Werte, die wir brauchen, um die Kälteleistung zu bestimmen gemessen.

- Da beim Versuch unsere Werte unrealistisch waren, und der Messprotokoll von meiner Versuchspartnerin verloren wurde, verwenden wir folgende Werte, die vom Tutor uns gegeben waren:

Heizstrom: $I_H = (1{,}000 \pm 0{,}005)\,A$

Heizspannung: $U_H = (5{,}060 \pm 0{,}005)\,V$

Rotordrehzahl: $F = (287{,}4 \pm 1{,}0)\,rpm$

Volumenstrom: $\dot{V} = (256 \pm 3)\,\frac{mL}{min}$

Kühlwasser Abfluss: $T_{ab} = (21{,}10 \pm 0{,}10)\,°C$

Kühlwasser Zufluss: $T_{zu} = (18{,}30 \pm 0{,}10)\,°C$

Zylindertopf: $t_{heiz} = (21{,}2 \pm 0{,}1)\,°C$

2. Bestimmung des Wirkungsgrades beim Betrieb als Kältemaschine und Wärmepumpe

Wir haben der Zylindertopf mit einem Zylindertopf mit Reagenzglas ersetzt. Wir haben anschließend mit Wasser das Reagenzglas gefüllt und mit einem Thermometer den zeitlichen Verlauf der Temperatur beobachtet.

Motordrehzahl: $f_1 = (263,5 \pm 1,0)$ rpm Antriebsstrom: $I_{m,2} = (3,25 \pm 0,10)$ A

Antriebsspannung: $U_{m,1} = (24,10 \pm 0,05)$ V

Wir haben die Drehrichtung geändert und den Motor als Wärmepumpe benutzt

Motordrehzahl: $f_1 = (28,0 \pm 1,0)$ rpm Antriebsstrom: $I_{m,2} = (1,65 \pm 0,10)$ A

Antriebsspannung: $U_{m,1} = (24,00 \pm 0,05)$ V

3. Betrieb als Wärmekraftmaschine

Wir haben ein Heizkopf mit versorgten elektrischen Heizleistung montiert. Wir haben gewartet, bis der Motor geheizt wird und erst dann es angeschaltet. Um die Abwärme zu bestimmen haben wir folgende Werte gemessen:

Drehzahl: $f = (285,0 \pm 1,0)$ rpm

Volumenstrom: $\dot{V} = (207 \pm 3)$ ml/min

Kühlwasser Abfluss: $T_{ab,2} = (22,90 \pm 0,05)$ °C

Kühlwasser Zufluss: $T_{zu,2} = (17,40 \pm 0,05)$ °C

Heizstrom: $I_{H,2} = (2,980 \pm 0,005)$ A

Heizspannung: $U_{H,2} = (13,550 \pm 0,005)$ V

Mithilfe des Volumenstromsensors und Drucksensors haben wir ein pV-Diagramm aufgenommen. Wir haben auch das Drehmoment gemessen, wobei wir zuerst ohne und danach mit einem Bremszaum an die Achse die Kraft gemessen haben.

Tabelle 1: Messung ohne Bremszaum

Messung#	Drehzahl [rpm]	Flächeninhalt [hPa · cm³]
1	295,5 ± 1,0	24,550
2	295,5 ± 1,0	24,770
3	296,5 ± 1,0	25,710

Tabelle 2: Messung mit Bremszaum

Bremskraft [N]	Strom [A]	Spannung [V]	Drehzahl [rpm]	Flächeninhalt [hPa · cm³]
0,80 ± 0,05	2,980 ± 0,005	13,50 ± 0,05	183,0 ± 1,0 188,0 ± 1,0 182,1 ± 1,0	31,820 32,400 31,660
0,68 ± 0,005	2,980 ± 0,005	13,52 ± 0,05	214,0 ± 1,0 220,0 ± 1,0 218,0 ± 1,0	30,260 30,420 30,440
0,89 ± 0,005	2,980 ± 0,005	13,50 ± 0,05	247,0 ± 1,0 245,0 ± 1,0 246,0 ± 1,0	28,360 29,040 28,670
0,20 ± 0,005	2,980 ± 0,005	13,50 ± 0,05	265,0 ± 1,0 264,0 ± 1,0 264,0 ± 1,0	27,660 27,430 27,800

3 Auswertung

3.1 Betrieb als Kältemaschine

In diesem Abschnitt berechnen wir die Kälteleistung P_k des Motors. Wir können es bestimmen, wobei wir die gemessene Leistung des Elektromotors betrachten. Es gilt:

$$P_k = P_H = U_H I_H \tag{17}$$

Wobei U_H und I_H die Heizspannung und Heizstrom aus Abschnitt 1 des Messprotokolls sind.
Nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung beträgt der Fehler der Kälteleistung:

$$\Delta P_k = P_k \sqrt{\left(\frac{\Delta U_H}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_H}{I_H}\right)^2} \tag{18}$$

Wir sollen die Werte mit 5 multiplizieren, da beim Messgerät der Messbereich um Faktor 5 erweitert wurde.
Das Endergebnis der Kälteleistung beträgt:

$$\boxed{P_k = (25,30 \pm 0,13) W} \tag{19}$$

Die Arbeit des Motors berechnet man mithilfe von folgender Formel:

$$W_m = \frac{U_m I_m}{f} \tag{20}$$

Der Fehler beträgt analog:

$$\Delta W_m = W_m \sqrt{\left(\frac{\Delta U_m}{U_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_m}{I_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} \tag{21}$$

Wobei U_m und I_m die Motorspannung und Motorstromstärke sind. f ist die Drehfrequenz.
Das endergebnis der Motorarbeit beträgt:

$$\boxed{W_m = (17,8 \pm 0,6) J} \tag{22}$$

Wir brauchen noch die Wärmemengen Q_1 und Q_2.
Die abgegebene Wärme berechnen wir mithilfe folgender Formel:

$$Q_1 = \frac{C_W \rho_W \Delta T \dot{V}}{f} \tag{23}$$

Wobei ΔT die Temperaturdifferenz ist, $\dot{V}$ den Volumenstrom, $C_W = 4180 \frac{J}{kg.K}$ die Wärmekapazität des Wassers und $\rho_W = 998 \frac{kg}{m^3}$ die Dichte des Wassers bei eine temperatur von $20^o C$. Analog zu oben berechenn wir den Fehler:

$$\Delta Q_1 = \sqrt{\left(\frac{C_W \rho_W \Delta T \Delta \dot{V}}{f}\right)^2 + \left(\frac{C_W \rho_W \dot{V} \Delta \Delta T}{f}\right)^2 + \left(\frac{C_W \rho_W \Delta T \dot{V} \Delta f}{f^2}\right)^2} \tag{24}$$

Der Fehler von der Temperaturdifferenz ist gleich:

$$\Delta(T_2 - T_1) = \sqrt{2} \Delta T = 0,14^o C \tag{25}$$

Die abgegebene Wärme beträgt:

$$\boxed{Q_1 = (10,4 \pm 0,5) J} \tag{26}$$

Die zugenommene Wärme berechnet man mit:

$$Q_2 = \frac{P_k}{f} \tag{27}$$

Der Fehler lautet:

$$\Delta Q_2 = Q_2 \sqrt{\left(\frac{\Delta P_k}{P_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} \tag{28}$$

Das Endergebnis beträgt:

$$\boxed{Q_2 = (5,28 \pm 0,03)J} \tag{29}$$

Der Wirkungsgrad berechnet man mithilfe Formel 16, der Fehler lautet:

$$\Delta\eta = \eta\sqrt{\left(\frac{\Delta W_m}{W_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_2}{Q_2}\right)^2} \tag{30}$$

Das Endergebnis des Wirkungsgrades beträgt:

$$\boxed{\eta = 0,296 \pm 0,009} \tag{31}$$

Alle Nebenrechnungen kann man im Anhang in dem Python-Code finden.

3.2 Betrieb als Kältemaschine und Wärmepumpe

In diesem Abschnitt sollen wir den Temperaturverlauf des Wassers im Reagenzglas qualitativ untersuchen. Wir werden den Wirkungsgrad der Kältemaschine abschätzen. Da wir ein Problem mit dem Versuchsaufbau hatten, analysieren wir die Dateien von unserem Betreuer.
Wir analysieren Abbildung 3 rechts und 4 rechts. Die Kühlung fängt an bei Temperatur $T_1 = (26 \pm 1)^oC$ und Zeit $t = 0$. Die Temperatur nimmt linear bis zur Temperatur $T_2 = (-4 \pm 1)^oC$ und Zeit $t_{g,1} = (180 \pm 10)s$, wobei wir einen kleinen Sprung nach oben beobachten. Das liegt daran, dass der Gefriervorgang angefangen hat. Im Idealfall sollte die Temperatur konstant bei c.a. 0 Grad bleiben, bislang der Aggregatzustandswechsel vorbei ist. Das ist hier nicht der Fall, was daran liegen kann, dass die Wassertemperatur nicht homogen verteilt ist (da das Wasser nicht berührt wird) und deshalb ist die Temperatur nicht richtig gemessen. Wenn wir die Einflusstemperatur (rot) und Ausflusstemperatur(grün) in Abbildung 3, links beobachten, sehen wir, dass die Ausflusstemperatur sich erwärmt, was daran liegt, dass die Temperatur, die vom Wasser im Raegenzglas entnommen wird, wird im gekühlten Bereich zugeführt.
Ich schätze ab, dass der Gefriervorgang bei c.a. $t_{g,2} = (390 \pm 10)s$ vorbei ist. Die Gefrierzeit wäre dann:

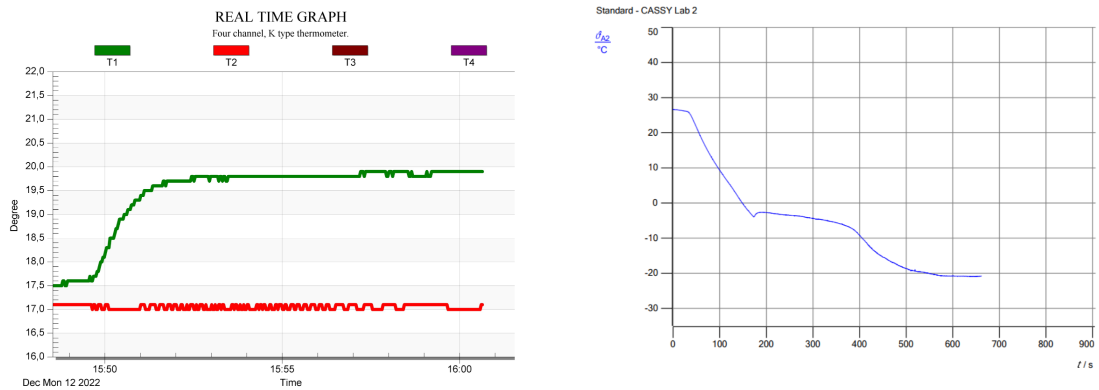
$$t_g = t_{g,2} - t_{g,1} = (210 \pm 20)s \tag{32}$$

Nachdem kühlt sich das Wasser bis zur einen Temperatur von c.a. $T_{min} = -(20 \pm 1)C$, wenn die Kälteleistung den Wärmezufuhr von der Umgebung annähert.
Bei der Erwärmung sehen wir, dass der Aggregatzustandswechsel viel schneller verläuft und auch, dass die Wassertemperatur im Allgemeinen schnell höher geht. Das liegt daran, sowohl dass in diesem Fall die Umgebung die Maschine "hilft", als auch dass die Reibungskräfte den Aufwärmungsprozess beschleunigen.
Detaillierter besprechen wir das in der Diskussion.
Die Kälte-Leistung können wir mithilfe folgender Formel bestimmen:

$$P_{k,2} = \frac{\lambda_{H_2O} V_W \rho_W}{t_g} \tag{33}$$

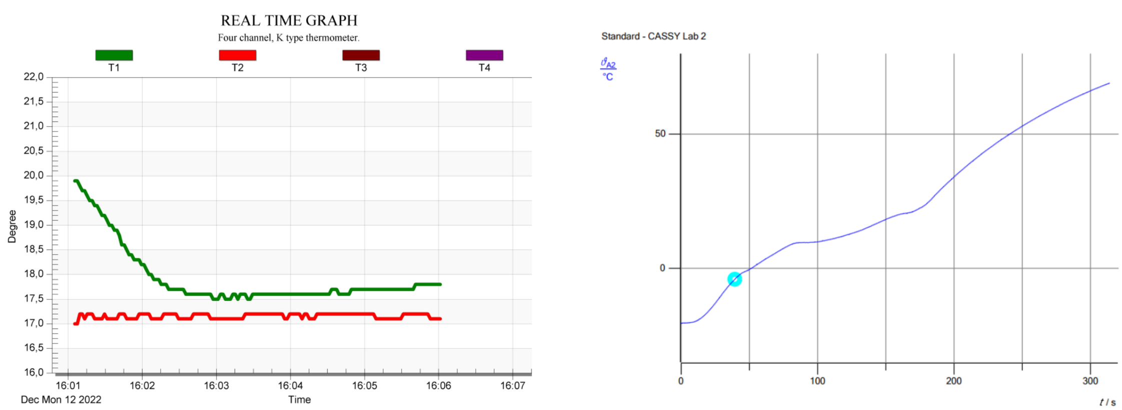
Wobei $\lambda_{H_2O} = 335\frac{J}{g}$ die spezifische Schmelzwärme ist und $V_W = (1 \pm 0,25)ml$ das Volumen.
Der Fehler lautet:

$$\Delta P_{k,2} = \sqrt{\left(\frac{\lambda_{H_2O}\Delta V_W \rho_W}{t_g}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_{H_2O} V_W \rho_W \Delta t_g}{t_g^2}\right)^2} \tag{34}$$



(a) (b)

Abbildung 3: Temperaturverlauf (links) Wassertemperaturverlauf (rechts) bei Kühlung



(a) (b)

Abbildung 4: Temperaturverlauf (links) Wassertemperaturverlauf (rechts) bei Erwärmung

Das Endergebnis der Kälte-Leistung beträgt:

$$\boxed{P_{k,2} = (1,59 \pm 0,15)W} \tag{35}$$

Der Wert beträgt 6% von der Messung im ersten Abschnitt, die σ-Abweichung zwischen beiden beträgt 119σ. Der Grund dafür besprechen wir in der Diskussion.

3.3 Betrieb als Wärmekraftmaschine

In diesem Teil des Versuchs sollen wir die folgenden Größen berechnen:

3.3.1 Leistung

Die Leistung P_{el} berechnet man mithilfe von Formeln 17 und 18.

3.3.2 Frequenz

Die Frequenz f könnte man einfach in Hertz umformen:

$$f[Hz] = \frac{f[rpm]}{60} \tag{36}$$

mit dem Fehler:

$$\Delta f[Hz] = \frac{f[rpm]}{60} \tag{37}$$

3.3.3 Abgeführte Wärme

Die abgeführte Wärme Q_{ab} berechnet man mithilfe von Formeln 23 und 24.

3.3.4 Zugeführte Wärme

Die zugeführte Wärme Q_{el}berechnet man mithilfe von Formeln 27 und 28.

3.3.5 Flächeninhalt

Der Flächeninhalt Q_{pV} berechnet man mithilfe von den Daten in Tabelle 1:

$$Q_{pV} = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} Q_{pV,i} \tag{38}$$

$$\Delta Q_{pV} = \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{3}(\Delta Q_{pV,i})^2} \tag{39}$$

3.3.6 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η_{th} bestimmt man mithilfe von Formeln 29 und 30.

3.3.7 Zusammengefasste Ergebnisse

In Tabelle 3 sind die zusammengefassten Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 3: Zusammengefasste Werte Wärmekraftmaschine

Größe	Wert	Fehler
$f[Hz]$	4.75	0.03
$P_[l[W]$	201.9	0.4
$Q_{el}[J]$	42.5	0.3
$P_{ab}[W]$	102.3	1.8
$Q_{ab}[J]$	21.5	0.4
$P_{pV}[W]$	11.97	0.19
$Q_{pV}[J]$	2.52	0.04
η_{th}	0.0593	0.0010

Um den Motorverlust Q_V zu berechnen verwenden wir den Formel:

$$Q_V = Q_{el} - Q_{ab} - Q_{pV} \tag{40}$$

Nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung erhalten wir den Fehler:

$$\Delta Q_V = \sqrt{(\Delta Q_{el})^2 + (\Delta Q_{ab})^2 + (Q_{pV})^2} \tag{41}$$

Das Ergebnis der Motorverlust beträgt:

$$\boxed{Q_V = (18,5 \pm 0,5)J} \tag{42}$$

In der Diskussion besprechen wir die Ergebnisse.

Die mechanische Arbeit W_D berechent man durch:

$$W_D = 2\pi l F \tag{43}$$

Mit dem fehler:

$$\Delta W_D = 2\pi l \Delta F \tag{44}$$

Der effektive Wirkungsgrad η_{eff} berechnet man mithilfe der Formel:

$$\eta_{eff} = \frac{W_D}{Q_e l} \tag{45}$$

mit dem Fehler:

$$\Delta\eta_{eff} = \sqrt{\left(\frac{\Delta W_D}{Q_{el}}\right)^2 + \left(\frac{W_D \Delta Q_{el}}{Q_{el}^2}\right)^2} \tag{46}$$

Wir haben folgende Tabelle erstellt:

Tabelle 4: Endergebnisse

$F[N]$	$\Delta F[N]$	$W_D[J]$	$\Delta W_D[J]$	$W_{pV}[J]$	$\Delta W_{pV}[J]$	$Q_{el}[J]$	$\Delta Q_{el}[J]$	η_{th}	$\Delta\eta_{th}$	η_{eff}	$\Delta\eta_{eff}$
0.80	0.05	1.26	0.03	3.20	0.03	65.5	0.9	0.0489	0.0008	0.0192	0.0013
0.68	0.05	1.07	0.03	3.037	0.008	55.5	0.5	0.0547	0.0005	0.0193	0.0013
0.39	0.05	0.61	0.03	2.87	0.03	49.1	0.4	0.0585	0.0008	0.0124	0.0016
0.20	0.05	0.31	0.03	2.763	0.015	45.7	0.4	0.0605	0.0006	0.0067	0.0007

Mit den Wirkungsgradwerten aus der Tabelle haben wir Abbildung 5 erstellt. Es ist zu erkennen, dass mit höherer Drehzahl η_{th} zunimmt, wobei η_{eff} sinkt.

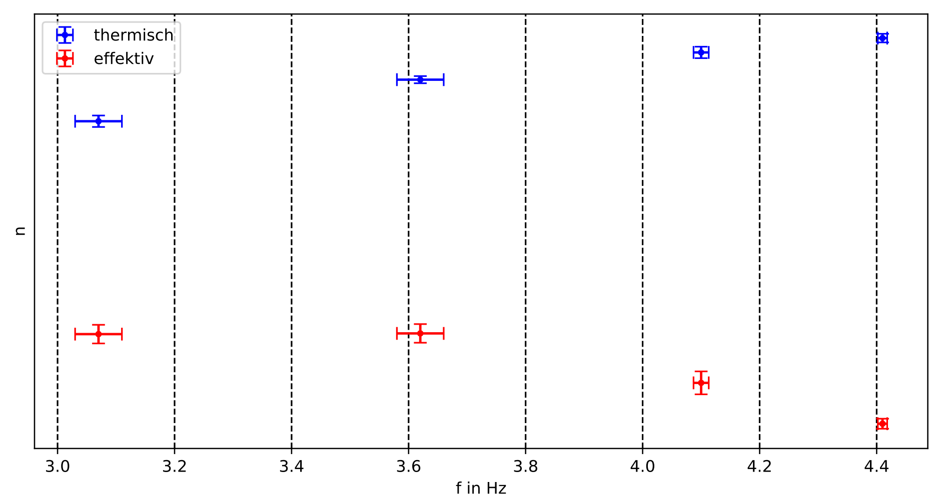


Abbildung 5: Wirkungsgradvergleich

Alle Ergebnisse besprechen wir in der Diskussion.

4 Zusammenfassung und Diskussion

4.1 Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung der Durchführung des Versuchs befindet sich in dem Messprotokoll.
In der Auswertung haben wir die Kälteleistung P_k, Motorarbeit W_m und die abgegebenen und zugenommenen Wärmen Q_1 und Q_2 der Kältemaschine aus den Werten vom Elektromotor bestimmt. Endlich haben wir den Wirkungsgrad berechnet. Die Ergebnisse kann man in Tabelle 5 finden.

Tabelle 5: Zusammengefasste Werte aus Abschnitt 1

Größe	Wert	Fehler
$P_k[W]$	25.30	0.13
$W_m[J]$	17.8	0.6
$Q_1[J]$	10.4	0.5
$Q_2[J]$	5.28	0.03
η_{th}	0.296	0.009

Im zweiten Teil haben wir den Motor zunächst als Kältemaschine und anschließend als Wärmepumpe untersucht. Erstens haben wir die Temperaturverläufe untersucht und daraus die Gefrierzeit bestimmt. Daraus haben wir die Kälteleistung mithilfe der Wassereigenschaften berechnet.
Die Kälte-Leistung beträgt:

$$\boxed{P_{k,2} = (1,59 \pm 0,15)W} \tag{47}$$

Im dritten Abschnitt haben wir den Motor als Wärmekraftmaschine sorgfältig untersucht und Tabellen 3 und 4 erstellt. Wir haben schlussgefolgert, dass mit höherer Drehzahl der Wirkungsgrad η_{th} zunimmt, wobei η_{eff} sinkt.

4.2 Diskussion

Die Kälteleistung des Stirlingmotors, die wir aus der Leistung des Elektromotors berechnet haben, weicht von dem in Abschnitt 2 gemessenen Wert mit mehr als 100σ ab, was eine enorme Abweichung ist. Die relativen Fehler liegen zwischen 3% und 9%. Die sind auch ziemlich groß. Ein Grund für die große Abweichung ist, dass wir im ersten Fall die gesamte Kälteleistung betrachtet haben und im zweiten nur diese im Reagenzglas. In der Kältekraftmaschine gibt es viele Reibung und daher Energieverlust, den wir nicht berücksichtigt haben. Wie schon in Abschnitt 3.2 erwähnt, das Wasser im Gefäß ist nicht komplett homogen und systematische Fehler bei der Bestimmung der Temperatur konnten auch entstehen. Dieselben Gründe verursachen die großen Abweichungen zwischen den Wirkungsgraden.
Wenn wir den Wassertemperaturverlauf betrachten, sehen wir nicht wirklich das erwartete Einfrieren bei konstanter Temperatur, deshalb glaube ich, dass der Thermometer zu nah zu der Maschine gestellt wurde und er hat nicht die richtige Temperatur von Wasser gemessen. Etwas anderes, was fällt mir auf, ist dass das Diagramm, das wir verwendet haben (Abbildung 3), zeigt, dass die Schmelztemperatur von Wasser c.a. -3^oC ist. Das wäre richtig wenn wir einen Druck von c.a. $365atm$ auf der Erde hatten, was sicherlich nicht der Fall ist. Das zeigt wieder, dass es ein systematischer Fehler entweder mit dem Thermometer, oder mit der Software gab.
Die kleinen Wirkungsgradkoeffizienten von dem letzten Abschnitt der Auswertung bestätigen, dass ziemlich viel Energie verloren geht.
Dieser Versuch war nicht erfolgreich, da während der Durchführung die Maschinen und die Software nicht richtig funktioniert haben und wir fremde Werte auswerten sollten. Ansonsten war es ziemlich interessant mit etwas Praktisches wie einem Motor zu arbeiten und zu sehen wie groß der Energieverlust eigentlich sein kann.

5 Anhang

5.1 Quellen

Alle Informationen, die ich im Protokoll verwendet habe, stammen aus der Praktikumsanleitung, Ausgabe 4.2023 oder Messprotokoll Jonathan Notter, Jan Höfer, 12.12.2022 .

5.2 Python-Code

Der Python-Code befindet sich auf der nächsten Seite.

Untitled

February 17, 2024

[2]:
```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
```

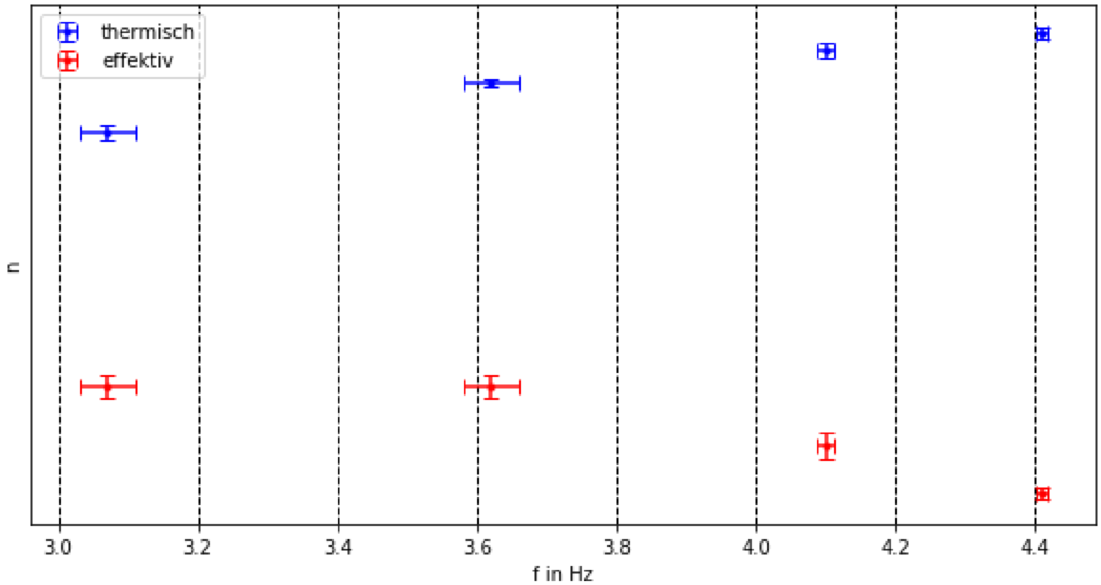
[17]:
```
#Kälteleistung
U=5.06 #V
dU=0.005
I=1*5 #A
dI=0.005*5
P_k=U*I #J/s
dP_k=P_k*np.sqrt((dU/U)**2+(dI/I)**2)
print("P_k=", P_k, dP_k)
#Temperaturdifferenz
T_ab=18.3
dT_zu=0.1
T_zu=21.1
dT_ab=0.1
DT=T_zu-T_ab #K
dDT=np.sqrt(dT_zu**2+dT_ab**2)
print("DT=", DT, dDT, "C")
#Q_1
c=4180 #J/kgK
p=998.2 #kg/m^3
V=256*0.000001 #ml/min
dV=3*0.000001
f=287.4 #1/min
df=1
# J kg K ml min J ml 1ml = 0.001l = 0.001dm^3 = 0.00
Q_1=(c*p*DT*V)/f # kg K m^3 min m^3
dQ_1=Q_1*np.sqrt((df/f)**2+(dDT/DT)**2+(dV/V)**2)
print("Q_1=", Q_1, dQ_1, "J")
#Q_2
Q_2=P_k/(f/60) #W/s = J
dQ_2=Q_2*np.sqrt((dP_k/P_k)**2+(df/f)**2)
print("Q_2=", Q_2, dQ_2,"J")
#Motorleistung W_m
U_m=24.1 #V
```

```python
dU_m=0.05
I_m=3.25 #A
dI_m=0.1
F=263.5 #1/min
dF=1
W_m=(U_m*I_m)/(F/60)
dW_m=W_m*np.sqrt((dU_m/U_m)**2+(dI_m/I_m)**2+(dF/F)**2)
print("W_m=", W_m, dW_m, "J")
#Wirkungsgrad eta
eta=Q_2/W_m
deta=eta*np.sqrt((dW_m/W_m)**2+(dQ_2/Q_2)**2)
print("eta=", eta, deta)
```

```
P_k= 25.299999999999997 0.12894669441284642
DT= 2.8000000000000007 0.14142135623730953 C
Q_1= 10.406509383437719 0.5407837727761464 J
Q_2= 5.281837160751565 0.03259503170994812 J
W_m= 17.834914611005694 0.5541616569983613 J
eta= 0.29615152502564895 0.009381674447837284
```

[21]:
```python
#werte bei Wirkungsgrad Berechnung
eta_th = np.array ([0.0489, 0.0547, 0.0585, 0.0605 ])
d_eta_th = np.array ([0.0008, 0.0005, 0.0008, 0.0006])
eta_eff = np.array ([0.0192, 0.0193, 0.0124, 0.0067])
d_eta_eff = np.array ([0.0013, 0.0013, 0.0016,0.0007,])
f= np.array([3.07, 3.62, 4.1, 4.41])
d_f = np.array ([0.04, 0.04, 0.013, 0.008])
```

[28]:
```python
#plot
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.errorbar(f, eta_th, yerr=d_eta_th, xerr=d_f, capsize=4, fmt='.',␣
 ↪color="blue", label="thermisch")
plt.errorbar(f, eta_eff, yerr=d_eta_eff, xerr=d_f, capsize=4, fmt='.',␣
 ↪color='red', label='effektiv')
plt.xlabel("f in Hz")
plt.ylabel('n')
plt.yticks(np.arange(1,1,step=5))
plt.title('')
plt.grid(color="black",linestyle="--",linewidth=1)
plt.legend();
plt.savefig('A3.pdf',format='pdf')
```


thermisch
effektiv
n
3.0
3.2
3.4
3.6
3.8
4.0
4.2
4.4
f in Hz

[ ]: