

**Heißluftmotor**

Physikalisches Anfängerpraktikum 2.1

Jan A. Kesting

Betreuer/in: Niklas Merz

---

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1 Ziel/Motivation . . . . .	2
1.2 Aufgaben . . . . .	2
1.3 Versuchsaufbau . . . . .	2
1.4 (physikalische) Grundlagen . . . . .	3
<b>3 Auswertung</b>	<b>18</b>
3.1 Betrieb als Kältemaschine . . . . .	18
3.2 Betrieb als Kältemaschine und Wärmepumpe . . . . .	19
3.3 Betrieb als Wärmekraftmaschine . . . . .	20
3.4 Vergleich der ermittelten Werte . . . . .	23
<b>4 Zusammenfassung und Diskussion</b>	<b>24</b>
4.1 Zusammenfassung . . . . .	24
4.2 Diskussion . . . . .	25
<b>5 Anhang</b>	<b>27</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziel/Motivation

Motoren; eine Möglichkeit thermische Energie in Mechanische umzuwandeln. Sie haben die Industrialisierung vorangetrieben und auch heute noch läuft die Welt nur dank ihnen. In diesem Versuch setzt man sich mit dem Heißluftmotor auseinander.

## 1.2 Aufgaben

1. Qualitative Untersuchung der Wirkungsweise des Heißluftmotors als Kältemaschine und Wärmepumpe.
2. Bestimmung des Wirkungsgrades des Heißluftmotors mittels eines pV-Diagramms.
3. Ermittlung des Wirkungsgrades anhand der abgegebenen Arbeit bei einer Drehmomentmessung.

## 1.3 Versuchsaufbau

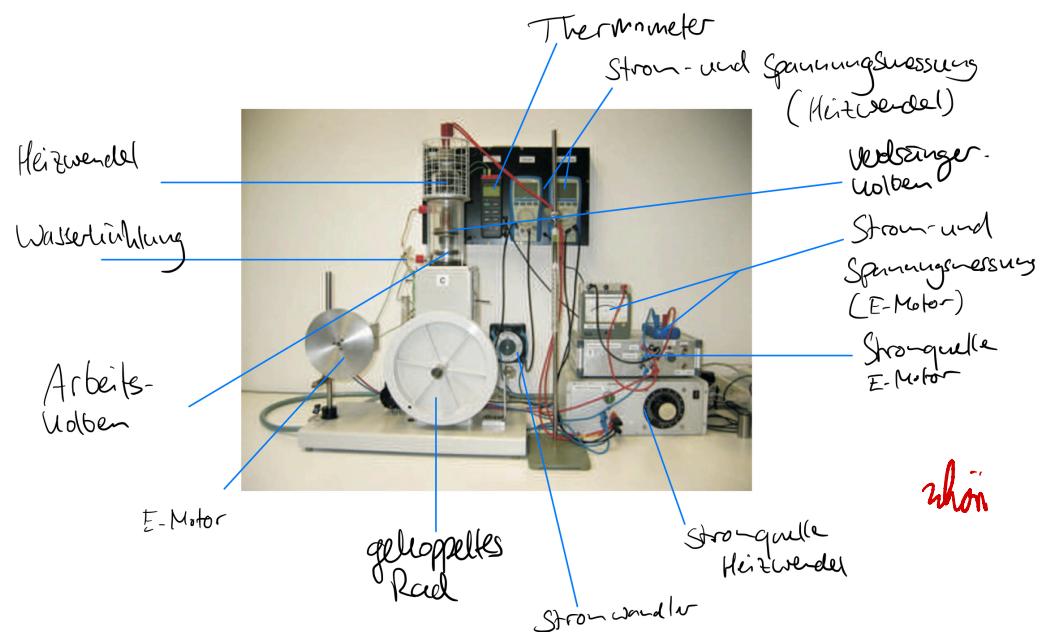


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit angeschlossener Heizwendel

## 1.4 (physikalische) Grundlagen

Die wesentlichen adiabatischen Zustandsänderungen, auf denen der Heißluftmotor basiert, finden alle im Zylinder des Motoren ab. Hierdrin befinden sich zwei verschiedene Kolben: der **Arbeits- und Verdrängerkolben**. Der Verdrängerkolben ist hierbei an dem Arbeitskolben gekoppelt. Die benötigte mechanische Energie zum Betreiben des Motoren wird demnach vom Motor selbst geliefert.

Zum Verstehen der Arbeitsweise des Heißluftmotore schaut man sich erstmal folgende Abbildung an, anhand derer sich der Prozess des Motoren in einzelne Schritte zerlegen lässt.

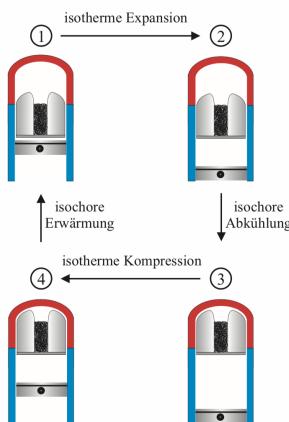


Abbildung 2: Stellungen des Arbeits- und Verdrängerkolbens bei laufendem Heißluftmotor

Der Arbeitskolben ist unterhalb des Verdrängerkolbens gelagert und sind über ein Rad aneinander antizyklisch gekoppelt. Damit ist gemeint, dass wenn sich der Arbeitskolben nach oben bewegt fängt der Verdrängerkolben damit an sich nach oben zu bewegen. Im Verdrängerkolben selbst ist noch ein sogenannter **Regenerator** gelagert. Dieser (in diesem Falle Kupferwolle) besteht aus einem Gasdurchlässigen Material mit großer Oberfläche und Masse, sodass passierendes Gas einen möglichst effizienten Wärmetausch mit dem Regenerator eingehen kann, welches die Effizienz des Motors erhöht. Dazu später mehr.

In Zustand 1 ist der Gesamtanteil des Gases in dem erhitzten Bereich Zylinders. Hierdurch nimmt es die Wärmemenge  $Q_1$  auf und expandiert, wodurch

es den Arbeitskolben nach unten drückt (das Arbeitsvolumen wird dementsprechend größer). Hierfür leistet es die Arbeit  $W_1$ , und der zweite Zustand ist erreicht. In diesem Schritt der isothermen Expansion wird also thermische Energie in Mechanische umgewandelt, nun müssen mehrere Teilprozesse angewandt werden, damit man wieder den Ausgangszustand erreicht.

Nach der Expansion des Arbeitsgases folgt die Bewegung des Verdrängerkolbens. Dieser schiebt die nun heiße Luft nach unten, indem er sich selbst nach oben bewegt. Hierbei gibt das Gas schon einen Teil seiner thermischen Energie in einem Wärmetauschprozess an den Regenerator (Zwischen-speicher!) ab. Im aktiv gekühlten Bereich des Zylinders kühlt sich dann in Zustand 3 das Gas wieder ab, wobei die Wärme  $Q_2$  an jenes Kühlssystem verloren geht.

Nun wird vom Arbeitskolben die Arbeit  $W_3$  geleistet, indem er sich nach oben bewegt und dabei die Luft im Zylinder komprimiert. Dabei erhitzt sich das Gas wieder, und jene Wärme  $Q_3$  wird auch wieder an das Kühlssystem abgegeben.

Dank der Kopplung der beiden Kolben bewegt sich nun der Verdrängerkolben wieder nach unten; das Gas strömt somit durch den Regenerator, wobei es die zwischengespeicherte Wärme wieder aufnimmt, und nun von der Hitzequelle weiter erhitzt wird und ihm insgesamt die Wärme  $Q_4$  zugeführt wird. Somit ist man wieder zum Anfangszustand zurückgekehrt. Die Adiabatischen Prozesse sind nochmal in folgender Abbildung gezeigt:

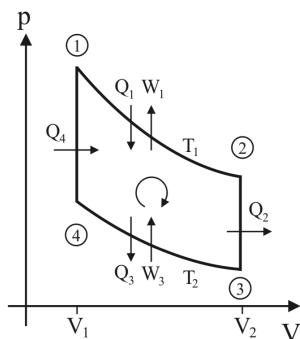


Abbildung 3: pV-Diagramm des laufenden Heißluftmotors

Da die einzelnen Kolben über ein Rad aneinander gekoppelt sind, lassen sich eben genannte Schritte auch durch mechanische Arbeit erzwingen. Man kann somit im oberen Teil des Zylinders hohoe Temperaturen erzeugen bzw. eine Temperaturabnahme erzwingen. Im ersten Fall spricht man dann von einer

**Wärmepumpe**; im letzteren Fall von einer **Kältemaschine**.

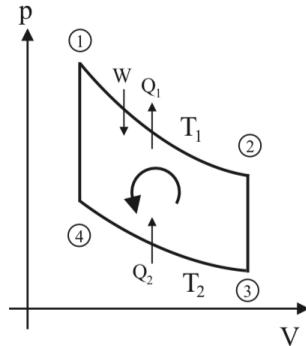


Abbildung 4: pV-Diagramm der Kältemaschine bzw. der Wärmepumpe

Lässt man nun den Heißluftmotor als Kältemaschine laufen so soll im Idealfall die Energieerhaltung gelten ( $W_M \equiv W_1$ ):

$$Q_1 = Q_2 + W_1 \quad (1)$$

$$\Rightarrow \frac{c_W \rho_W \dot{V} \Delta T}{f} = \frac{U_H I_H}{f} + \frac{U_M I_M}{f_M} \quad (2)$$

Die Größen  $c_W$ ,  $\rho_W$ ,  $\dot{V}$ ,  $\Delta T$ ,  $f$ ,  $f_M$ ,  $U_H$ ,  $U_M$ ,  $I_H$ ,  $I_M$  entsprechen jeweils der spezifischen Wärmekapazität von Wasser, der Dichte Wassers, der Durchflussrate des Kühlwassers, der Temperaturdifferenz des zu- und abfließenden Wassers, der Frequenz des Motors, der Frequenz des Antriebsmotors, der Heizspannung der Heizwendel, der Spannung des Antriebmotors, der Stromstärke in der Heizwendel und der Stromstärke des Antriebsmotors.

Die Kälteleistung  $P_K$  entspricht in diesem Fall  $P_H$ , da die Heizleistung der Wendel der Kälteleistung des Motoren entrpicht:

$$P_H = U_H I_H \quad (3)$$

Der Wirkungsgrad der Kältemaschine *eta* lässt sich mittels des Quotientens aus  $Q_2$  und  $W_M$  bestimmen:

$$\eta = \frac{Q_2}{W_1} \quad (4)$$

Außerdem lässt sich die Heizleistung der Kältemaschine anhand Wasser bestimmen. Bringt man im gekühlten Teil des Zylinders eine Probe an Wasser (spezifische Schmelzwärme  $\lambda_W$ ) mit Volumen  $V$  ein, so kann man anhand der Gefrierzeit  $t$  dieser Probe die Kälteleistung  $P_K$  folgendermaßen bestimmen:

$$P_K = \frac{\lambda_W m_W}{t} = \frac{\lambda_W \rho_W V_W}{t} \quad (5)$$

Zur weiteren Analyse des Heißluftmotors widmet man sich nun der Funktion der obig besprochenen als Wärmekraftmaschine. Eine Heizwendel führt dem System Wärme die Wärme  $Q_{el}$  zu mit der Leistung  $P_{el}$ . Diese Größen berechnen sich analog zu  $Q_1$  und  $P_H$ . Der Flächeninhalt des pV-Diagrammes entspricht der geleisteten Arbeit  $W_{pV}$ ; die Leistung  $P_{pV}$  lässt sich folgendermaßen ermitteln:

$$P_{pV} = W_{pV} f \quad (6)$$

Außerdem ist man interessiert, welche Wärme  $Q_{ab}$  vom Kühlwasser abtransportiert wird bzw. was dieses leistet ( $P_{ab}$ ).

$$P_{ab} = c_W \rho_W \Delta T \dot{V} \quad Q_{ab} = \frac{P_{ab}}{f} \quad (7)$$

Der realen thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\eta_{th} = \frac{W_{pV}}{Q_{el}} \quad (8)$$

Da der Heißluftmotor nicht richtig isoliert ist und auf keinen Fall reibungsfrei ist, gibt es eine große Menge an Energieverlust, in Form von Wärme  $Q_V$ , an die Umgebung (pro Zyklus). Diese Verlustwärme lässt sich folgendermaßen approximieren:

$$Q_V = Q_{el} - W_{pV} - Q_{ab} \quad (9)$$

Zuletzt will man noch mittels Messungen mithilfe eines Bremszaumes die mechanische Arbeit  $W_D$  des Motores bestimmen. Hierzu legt man eine Bremse

mit variabler Bremskraft an das an den Motor gekoppelte Rad und kann somit eine externe Reibungskraft hinzufügen und unter dessen Einfluss ändert sich auch das pV-Diagramm (somit dessen Fläche, somit die Arbeit  $W_{pV}$ ). Aus der mechanischen Arbeit lässt sich im Anschluss dann auch der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th_{Dreh}}$  anders berechnen. Zusätzlich ist noch der effektive Wirkungsgrad  $\eta_{eff}$  des Motors mit jenen Werten zu bestimmen.

$$W_D = 2\pi lF \quad (10)$$

$$\eta_{th_{Dreh}} = \frac{W_{pV}}{Q_{el}} \quad \text{V} \quad (11)$$

$$\eta_{eff} = \frac{W_D}{Q_{el}} \quad \text{V} \quad (12)$$

Victoria Muhn, Jan A. Nesting

- Geräteliste:
- Heißeplattmotor
  - regelbares Metallteil für die Heizwende
  - Sensorsystem „CASSY“ mit Druck-, Temp.- und Wegsensor
  - Dreikanalthermometer
  - Multimeter
  - elektrischer Antriebsmotor mit regelbarem Metallteil
  - Durchflussmengen-Messgerät des Wühlwassers

1) Betrieb des Heißeplattmotors als Wärmemaschine und quantitative Bestimmung der Wärmeleistung:

Man verwendet den Heißeplattmotor als Wärmemaschine und die Wärme  $Q_2$  wird mittels einer Kompensationsmessung bestimmt. Zudem ist man an der den Wühlwasserlaut zugeführte Wärme  $Q_1$  und der mech. Arbeit  $W_m$  interessiert um den Wirkungsgrad  $\eta$  des Motors zu bestimmen.

Für die Kompensationss-messung misst man zu Beginn zunächst die Temperatur des Wühlwassers und die des oberen Teils des Motors.

$$T_h = \cancel{17,2} \pm 0,1^\circ\text{C} \quad (18,1 \pm 0,2)^\circ\text{C}$$

$$T_o = \cancel{22,4} \pm 0,1^\circ\text{C} \quad (22,8 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

In Anschluss startet man den Motor und kompensiert die nun sinkende Temp. im  $\frac{1}{5}$

oberen Teil mit ein Heizwendel. Zur Bestimmung der Heizleistung  $W_H$  nimmt man die Spannung, den Strom der Heizwendel und die Motordrehzahl  $f$  an:

$$U_H = (5,44 \pm 0,02) V$$

$$I_H = (5,4 \pm 0,05) A$$

$$f = \cancel{1200 \pm 2} \text{ min}^{-1} (318 \pm 10) \text{ min}$$

Zudem bildet man den Mittelwert der Durchflussmenge des Kühlwassers

$$\dot{V} = (237 \pm 2) \frac{m^3}{min}$$

Und bestimmt die Temp. Diff aus dem Graphen (vgl. Diagramm 1)

$$\Delta T_H = (3,5 \pm 0,1) ^\circ C$$

Mit hiermit lässt sich anschließend mit der kubischen Zustandsgleichung die Wärme  $Q_1$  bestimmen.

Die mech. Arbeit  $W_M$  wird in beide Versuchskil bestimmt.

## 2) Betrieb als Wärmemaschine und Wärmepumpe

In diesem Versuchskil will man den Betrieb des Kleiplattmotors als Wärmemasch. und Wärmepumpe qualitativ beobachten und durch Bestimmung der "Betriebszeit" von Wasser den Wirkungsgrad  $\eta$  der Wärmemaschine abschätzen.

Dazu steckt man den Zylinderkopf mit dem Reagensglas auf den Motor und füllt dieses mit 1 ml Wasser und geben einen Temperatursensor hinein.

Man zeichnet nun die Temperatur des Wassers für einige Minuten auf und startet dann den Motor. Zudem werden Strom, Spannung und Drehzahl notiert um die Motorleistung ermitteln zu können:

$$U = (24,1 \pm 0,1) V$$

$$I = (3,3 \pm 0,2) A$$

$$f = 3(300 \pm 10) \text{ Hz}$$

Sobald die Temp. deutlich unter  $0^{\circ}\text{C}$  gefallen ist und sich nicht mehr ändert, stoppt man die Temp.-messung (vgl. Diagramm 3). Ansonsten durch man den Temp.-Verlauf des Kühlwassers auf, welcher aufgezeichnet wurde (Diagramm 2). Man misst erneut die Durchflussmenge des Kühlwassers.

$$\dot{V} = (23 L \pm 2) \text{ min}^{-1}$$

und dessen Temperatur,

$$T_{\text{Zufloss}} = (18,0 \pm 0,1) ^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Abfluss}} = (22,5 \pm 0,1) ^{\circ}\text{C}$$

In Anschluss betreibt man den Heißluftmotor als Wärmequelle und zeichnet erneut den Temp.-Verlauf des Wassers im Reagenzglas (Diagramm 4) auf.

### 3) Betrieb als Wärmeleistungsmaschine

Um den Motor als Wärmeleistungsmaschine zu betreiben, wird der Keramik-Zylinderkopf mit einer Heizwendel versehen und nach ca. 5s vorglühen werden. Anschließend gestartet, bis der Motor von allein läuft. Danach wird der Heizstrom

reduziert. Zur Dokumentation des Funktionsprinzip lässt man ein p(t)-, ein U(t)- und ein pV-Diagramm anstreifen (Diagramme 6 - 9)

Sobald der Motor eingelaufen ist, protokolliert man wieder alle relevanten Werte.

$$I_H = (13,8 \pm 0,05) \text{ A}$$

$$U_H = (11,91 \pm 0,02) \text{ V}$$

$$\nu = (296 \pm 10) \text{ 1/min} / (290 \pm 10) \text{ 1/min} / (292 \pm 10) \text{ 1/min}$$

$$\dot{v} = (2336 \pm 2) \text{ m/min}$$

$$T_BH = (18,1 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

$$T_AH = (24,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

Mithilfe des PC's wird die Fläche des pV-Diagrammes 3-mal gemessen:

Tabelle 1: Fläche des pV-Diagrammes

Messung	1	2	3
Fläche pV-Diagramm	25730	27930	26610
[hPa cm <sup>3</sup> ]			

Schließlich wird durch eine Dreihomentmessung die reale abgegebene Arbeit  $W_0$  bestimmt. Dazu wird ein Bremsbaum (Prong-Bremse) montiert, an dessen Schrauben sich die Bremskraft einstellen lässt, welche an einer Federwaage abgelesen werden kann.

Man misst für 4 unterschiedliche Bremskräfte den Heizstrom, Heizspannung, die Drehzahl und je dreimal die Fläche des pV-Diagramms.

Tabelle 2: Messungen zur Bestimmung der real abgegebenen Arbeit

Arbeit [N]	$0,8 \pm 0,03$	$0,6 \pm 0,03$	$0,4 \pm 0,03$	$0,2 \pm 0,03$
$I_H [A]$	$13,8 \pm 0,05$	$13,8 \pm 0,05$	$13,8 \pm 0,05$	$13,8 \pm 0,05$
$U_H [V]$	$11,85 \pm 0,02$	$11,83 \pm 0,02$	$11,88 \pm 0,02$	$11,86 \pm 0,02$
$t_1 [\text{min}]$	$202 \pm 10$	$231 \pm 10$	$200 \pm 10$ 58	$295 \pm 10$
Achse [kPa cm <sup>3</sup> ]	31090 31430 31820	30590 31010 30740	29770 29280 29360	29310* 28770 28770
$f_2 [1/\text{min}]$	$196 \pm 10$	$227 \pm 10$	$252 \pm 10$	$297 \pm 10$
$f_3 [1/\text{min}]$	$199 \pm 10$	$229 \pm 10$	$250 \pm 10$	$295 \pm 10$

10.11.21 Milka Mer

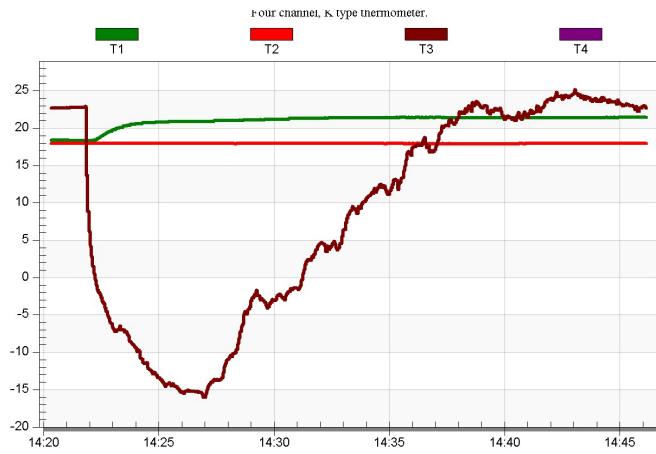


Diagramm 1: Temperaturverläufe des ab- und zufließenden Kühlwassers ( $T_1$  und  $T_2$ ) und des zu kühlenden Bereiches (mit Stromdurchflossender Heizwendel)( $T_3$ ) ✓

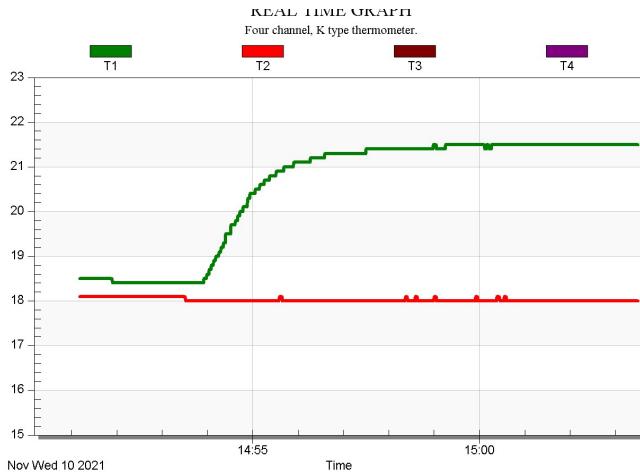


Diagramm 2: Temperaturverläufe des ab- und zufließenden Kühlwassers ( $T_1$  und  $T_2$ ) bei Betrieb als Kältemaschine ✓

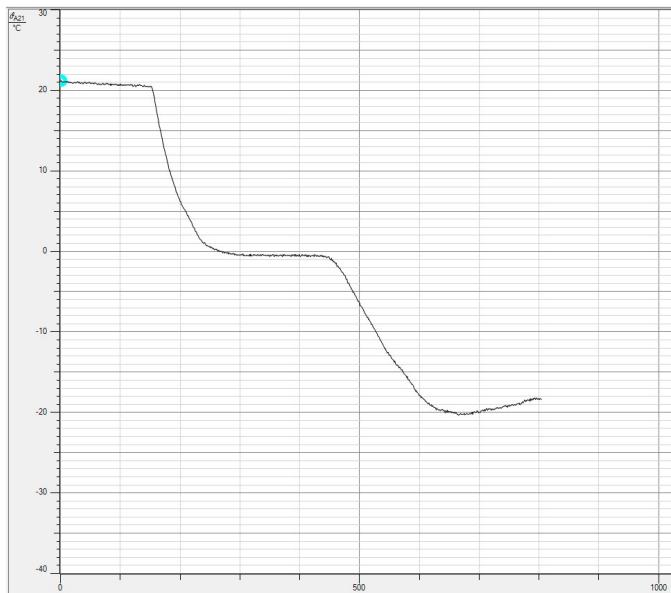


Diagramm 3: Temperatur als Funktion der Zeit beim Betrieb als Kältemaschine

✓

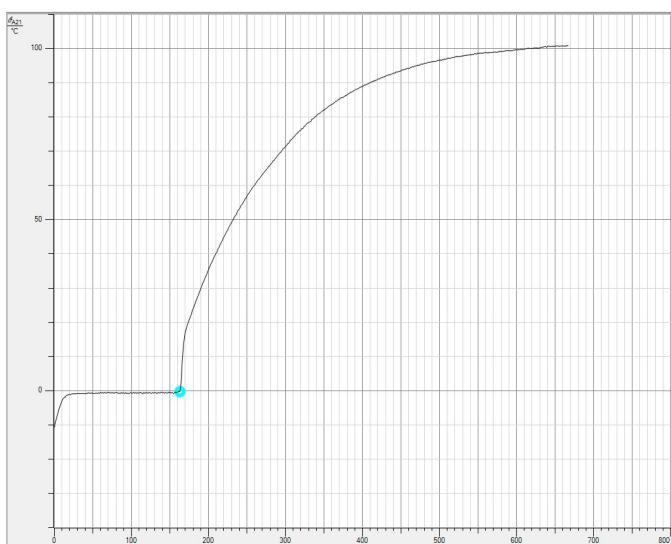


Diagramm 4: Temperatur als Funktion der Zeit beim Betrieb als Wärmepumpe

✓

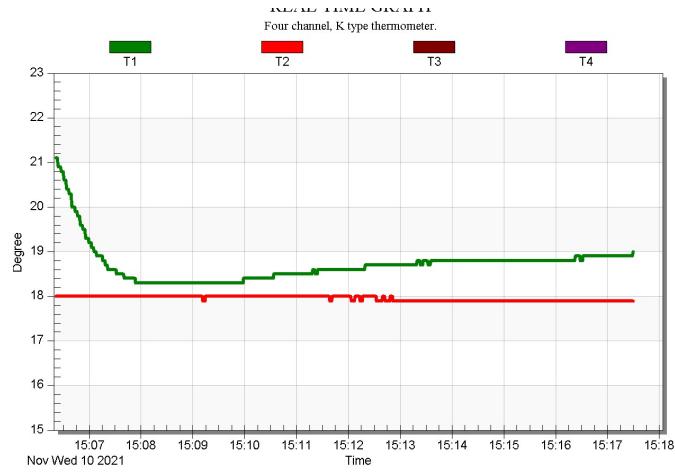


Diagramm 5: Temperaturverläufe des ab- und zufließenden Kühlwassers ( $T_1$  und  $T_2$ ) bei Betrieb als Wärmepumpe

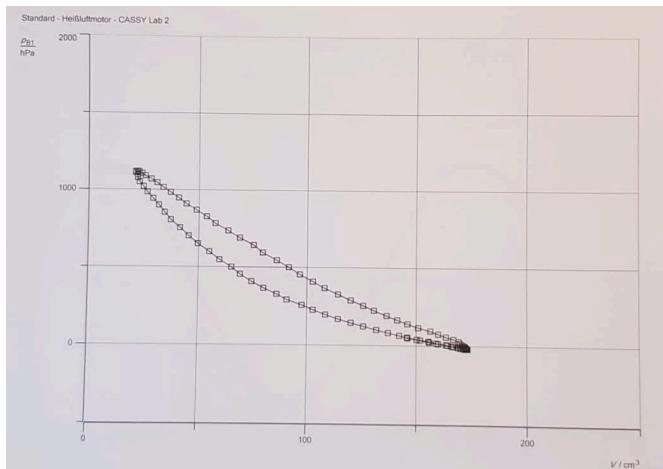


Diagramm 6: pV-Diagramm des Heißluftmotors im Leerlauf

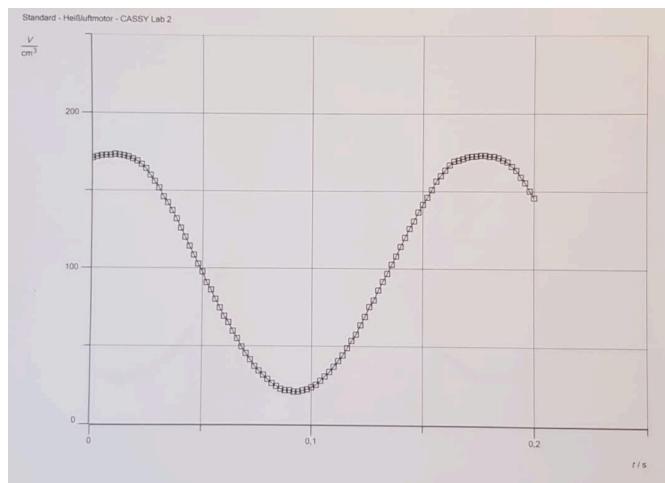


Diagramm 7: Volumen  $V$  im Heißluftmotor beim Leerlauf als Funktion der Zeit

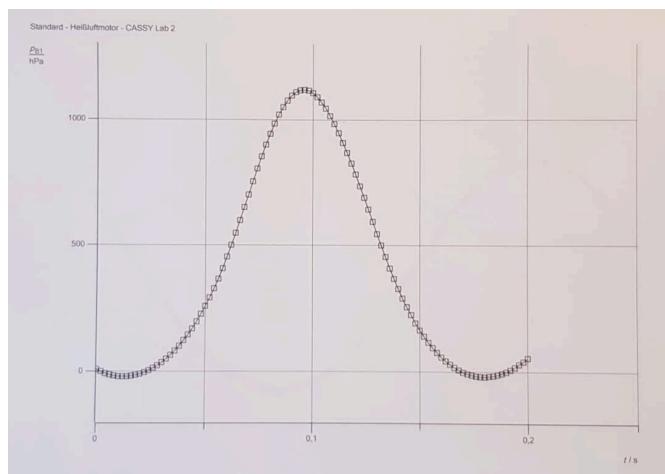


Diagramm 8: Druck  $p$  im Heißluftmotor beim Leerlauf als Funktion der Zeit

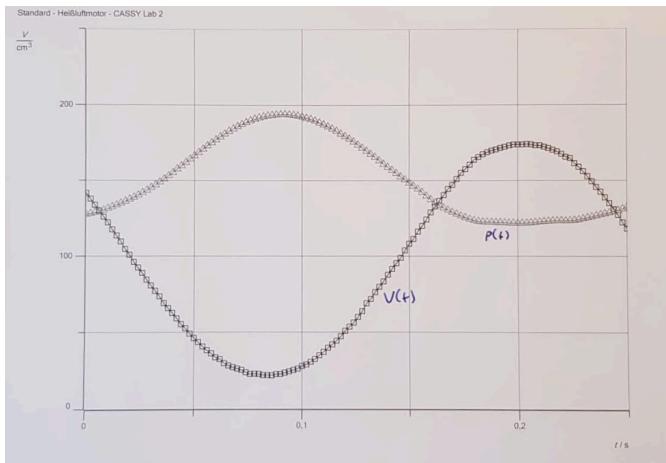


Diagramm 9: Druck  $p$  und Volumen  $V$  im Heißluftmotor beim Leerlauf als Funktion der Zeit; überlagert

### 3 Auswertung

Die Berechnungen der Auswertung finden in einem Python Skript und dementsprechendem Programm statt. Jenes ist im Anhang verzeichnet; in der Auswertung werden somit nur wesentliche Rechenwege und Ergebnisse angegeben. Außerdem werden alle Fehler nach der Fehlerfortpflanzung nach Gauß bestimmt und in trivialen oder unwesentlichen Fällen die Rechnung nicht angegeben; das Ergebnis nur endgültig präsentiert. ✓

#### 3.1 Betrieb als Kältemaschine

Im ersten Versuchsteil wartet man darauf, dass die Heizwendel die Zylinder-temperatur ausgleicht (Diagramm 1). In diesem Punkt entspricht die Heizleistung  $P_H = P_K$  bzw. die abgegebenden Wärmemengen  $Q_H = Q_2$ . Außerdem bestimmt man mittels Diagramm 2  $\Delta T = (4,5 \pm 0,14)$  K. Aus (1), (2),  $c_W = 4190 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$  und  $\rho_W = 997 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$  folgen für  $Q_1, Q_2$  und  $W_1$ :

$$Q_1 = \frac{c_W \rho_W \dot{V} \Delta T}{f} \quad \checkmark \quad (13)$$

$$Q_2 = \frac{I_H U_H}{f} \quad \checkmark \quad (14)$$

$$W_M = \frac{I_M U_M}{f_M} \quad \checkmark \quad (15)$$

(16)

Mit der Fehlerfortpflanzung nach Gauß ergeben sich für die Fehler:

$$\Delta Q_1 = Q_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} \quad \checkmark \quad (17)$$

$$\Delta Q_2 = Q_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta I_H}{I_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_H}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} \quad \checkmark \quad (18)$$

$$\Delta W_M = W_M \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta I_M}{I_M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_M}{U_M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f_M}{f_M}\right)^2} \quad \checkmark \quad (19)$$

Setzt man nun die Werte aus dem Messprotokoll und dem Skript ein, so erhält man:

*zu groß Abnahme mit den Werten aus*

$$\Rightarrow Q_1 = \underline{\underline{(14 \pm 3) J}} \quad 0,6 \quad (20)$$

$$\Rightarrow Q_2 = \underline{\underline{(5,54 \pm 0,18) J}} \quad (21)$$

$$\Rightarrow W_M = \underline{\underline{(15,9 \pm 1,1) J}} \quad (22)$$

Aus diesen Werten lässt sich nun der Wirkungsgrad  $\eta$  nach (4) bestimmen, wobei die Fehlerrechnung auf der Fehlerfortpflanzung von Gauß basiert. Man erhält:

$$\eta = \underline{\underline{(34,8 \pm 2,7)\%}} \quad (23)$$

Man sieht, dass es deutliche Energieverluste gibt. Diese lassen sich mittels (1) bestimmen:

*Fehlerformel*

$$\Delta E = Q_2 + W_1 - Q_1 = \underline{\underline{(7 \pm 3) J}} \quad (24)$$

Zuletzt ist man noch an der Kälteleistung des Motors interessiert. Wie oben bereits erwähnt muss man aufgrund des Versuchsaufbaus nur die Heizleistung der Heizwendel bestimmen.

$$P_K = P_H = I_H U_H = \underline{\underline{(29,38 \pm 0,29) \frac{J}{s}}} \quad \checkmark \quad (25)$$

### 3.2 Betrieb als Kältemaschine und Wärmepumpe

In Diagramm 3 ist der Verlauf der Temperatur der Wasserprobe in der Kältemaschine zu erkennen. Man beobachtet eine rasante Abnahme der (ursprünglichen Zimmer-) Temperatur. Bei knapp unter  $0^\circ\text{C}$  bleibt dann die Temperatur für eine Zeit  $t \approx 140\text{ s}$  konstant. In diesem Zeitintervall gefriert das Wasser. Solange das Wasser am gefrieren ist wird die thermische Energie dem Wasser zwar entzogen; es äußert sich aber nicht in einer Temperaturabnahme, sondern in einer Zustandsänderung (von flüssig zu fest). Erst nachdem das Wasser vollständig zu Eis gefroren ist, sinkt die Temperatur wieder weiter, allerdings langsamer als im flüssigen Zustand. Der Grund: Eis ist nicht so wärmeleitend wie Wasser. ✓

Die Kälteleistung der Kältemaschine lässt sich auch noch anhand gefrorenen Wassers ermitteln. Aus Diagramm 3 lässt sich die Gefrierzeit  $t$  ermitteln.

*wie groß ist + ?*

Mit der spezifischen Schmelzwärme  $\lambda = 335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  ergibt sich aus (5) (da das Wasser schon abgefüllt vorgefunden wurde, geht man davon aus, dass die Menge quasi Fehlerfrei ist):

$$P_K = \frac{\lambda_W \rho_W V_W}{t} \quad \Delta P_K = P_K \cdot \frac{\Delta t}{t} \quad (26)$$

$$\Rightarrow P_K = (2,09 \pm 0,26) \frac{\text{J}}{\underline{\underline{\text{s}}}} \quad \checkmark \quad (27)$$

Dass die Zeit des Gefrierens deutlich größer ist als die Zeit des Schmelzens, ist ganz der Konstruktion des Motors geschuldet. Dadurch, dass es solch großen Wärmeaustausch mit der Umgebung (Zimmertemperatur  $> 0^\circ\text{C}$ ) gibt (schlecht isolierter Motor), sorgt diese für eine relativ konstante Wärmezufuhr, wodurch der Motor mehr Leistung aufbringen muss um dies beim Abkühlen zu kompensieren als beim Erhitzen, wobei die wärmere Umgebung vorteilhaft zum Schmelzen des Eises ist, wodurch dieser Prozess (durch mehr Energiezufuhr) schneller geht.  $\checkmark$

### 3.3 Betrieb als Wärmekraftmaschine

Nun widmet man sich der Verwendung des Heißluftmotors als Wärmekraftmaschine. Zuerst berechnet man aus den einzelnen Messreihen die Durchschnittsfrequenz  $\bar{f}$  und -arbeit  $\bar{W}_{pV}$  des Motoren. Für jene erhält man:

$$\bar{f} = (4,88 \pm 0,17) \text{ s}^{-1} \quad \checkmark \quad (28)$$

$$\bar{Q}_{pV} = \bar{W}_{pV} = (2,4 \pm 0,3) \text{ J} \quad (29)$$

Als nächstes Berechnet man  $P_{el}$ ,  $Q_{el}$ ,  $P_{ab}$ ,  $Q_{ab}$ ,  $P_{pV}$  und zuletzt noch den realen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$ . Dazu macht man sich (3), (6), (7) und (8) zunutze. Hierbei gilt, dass  $P_{el} = P_H$  und  $Q = \frac{P}{f}$ :

$$P_{el} = U_H I_H = (164,4 \pm 0,7) \frac{\text{J}}{\underline{\underline{\text{s}}}} \quad \checkmark \quad (30)$$

$$Q_{el} = \frac{P_{el}}{\bar{f}} = (33,7 \pm 0,03) \text{ J} \quad \checkmark \quad (31)$$

$$P_{ab} = c_W \rho_W \Delta T \dot{V} = (96,9 \pm 2,5) \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad \checkmark \quad (32)$$

*Fehler -* →  $Q_{ab} = \frac{P_{ab}}{f} = \underline{(19,9 \pm 0,9) \text{ J}} \quad \checkmark \quad (33)$

$$\bar{P}_{pV} = \bar{Q}_{pV} \bar{f} = (13,1 \pm 0,5) \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad \checkmark \quad (34)$$

$$\eta_{th} = \frac{\bar{Q}_{pV}}{Q_{el}} = \underline{(7,94 \pm 0,15)\%} \quad \checkmark \rightarrow \text{Tabelle wäre überichtlicher gewesen} \quad (35)$$

Als nächstes will man die Energieverluste des Motors in Form von Wärme  $Q_V$  abschätzen. Dazu nutzt man (9), und setzt alle relevanten Größen ein.

$$Q_V = Q_{el} - \bar{W}_{pV} - Q_{ab} = \underline{(11,1 \pm 0,9) \text{ J}} \quad \checkmark \quad (36)$$

Zuletzt widmet man sich den Messungen mit dem Bremszaum. Das Ziel hier ist die Bestimmung der geleisteten mechanischen Arbeit  $W_m$  unter Belastung, sowie die Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades  $\eta_{th,dreh}$  und des effektiven Wirkungsgrades  $\eta_{eff}$  des Motors. Dazu bildet man zuerst den Mittelwert der einzelnen  $W_{pV}$ -Werten und der gemessenen Frequenzen  $f$  der jeweiligen Messungen unter der Bremskraft  $F_i$  (und dessen Fehler  $\Delta \bar{W}_{pV}$  und  $\Delta f$ ). Mit jenen Werten kann dann  $W_{D_i}$ ,  $\eta_{th,dreh}$  und  $\eta_{eff}$  errechnet werden. Dazu macht man sich (10), (11) und (12) zunutze:

$$W_{D_i} = 2\pi l F_i \quad \checkmark \quad (37)$$

Die Ergebnisse werden in folgender Tabelle zusammengetragen:

Das gleiche Prozedere wird nun für den thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th,dreh}$  und den effektiven Wirkungsgrad  $\eta_{eff}$  durchgeführt:

$$\eta_{th,dreh} = \frac{\bar{W}_{pV}}{Q_{el}} \quad (38)$$

$$\eta_{eff} = \frac{W_{D_i}}{Q_{el}} \quad \leftarrow \text{Fehlerformeln!} \quad (39)$$

$F_i[\text{N}]$	0,8	0,6	0,4	0,2
$W_{D_i}[\text{J}]$	0,503	0,3770	0,2513	0,1257
$\Delta W_{D_i}[\text{J}]$	0,019	0,019	0,019	0,019
$\bar{f}_i[\text{Hz}]$	3,32	3,82	4,22	4,93
$\Delta \bar{f}_i[\text{Hz}]$	0,17	0,17	0,17	0,17

Tabelle 1: Geleistete mechanische Arbeit  $W_D$  als Funktion der wirkenden Bremskraft  $F$  (und der entsprechende Frequenz  $\bar{f}$ )

Die Ergebnisse werden zunächst in Tabellen eingetragen, welche daraufhin graphisch in Diagrammen dargestellt werden.

$F_i[\text{N}]$	0,8	0,6	0,4	0,2
$\eta_{th_{dreh}}$	0,0933	0,0913	0,0875	0,0859
$\Delta \eta_{th_{dreh}}$	0,0005	0,0003	0,0004	0,0004
$f_i[\text{Hz}]$	3,32	3,82	4,22	4,93
$\Delta f_i[\text{Hz}]$	0,17	0,17	0,17	0,17

✓

Tabelle 2: Thermischer Wirkungsgrad  $\eta_{th_{dreh}}$  als Funktion der wirkenden Bremskraft  $F$  (bzw. der Frequenz  $f$  des laufenden Motors)(tabellarisch dargestellt)

$F_i[\text{N}]$	0,8	0,6	0,4	0,2
$\eta_{eff}$	0,0149	0,0112	0,0075	0,0037
$\Delta \eta_{eff}$	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
$f_i[\text{Hz}]$	3,32	3,82	4,22	4,93
$\Delta f_i[\text{Hz}]$	0,17	0,17	0,17	0,17

✓

Tabelle 3: Effektiver Wirkungsgrad  $\eta_{eff}$  als Funktion der wirkenden Bremskraft  $F$  (bzw. der Frequenz  $f$  des laufenden Motors)(tabellarisch dargestellt)

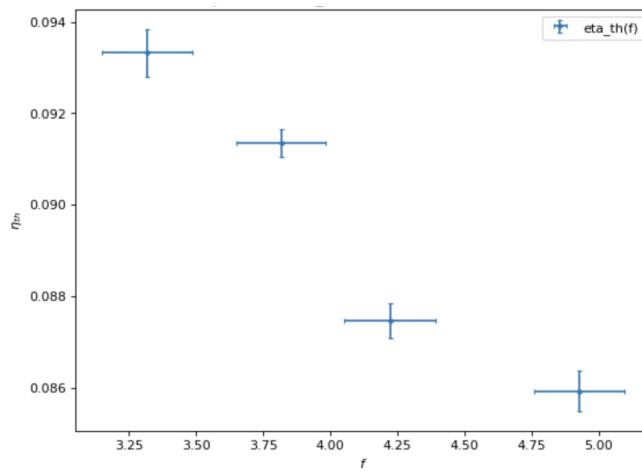


Diagramm 10: Thermischer Wirkungsgrad  $\eta_{th,dreh}$  als Funktion der Frequenz  $f$  des laufenden Motors

ein Plot für  
Vergleich wäre  
nützlich

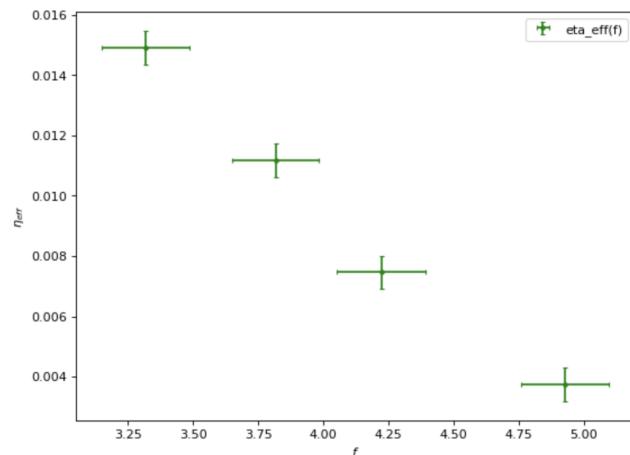


Diagramm 11: Effektiver Wirkungsgrad  $\eta_{eff}$  als Funktion der Frequenz  $f$  des laufenden Motors

### 3.4 Vergleich der ermittelten Werte

Zuerst lässt sich feststellen, wie sehr der reale Energieverlust der Kältemaschine vom theoretischen Nullwert abweicht:

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta \Delta E} = \underline{\underline{2,22}} \quad , \text{interpretation der Werte?} \quad (40)$$

Daraufhin vergleicht man die beiden, auf unterschiedliche Art und Weise bestimmten, Kälteleistungen:

$$\sigma = \frac{|P_H - P_K|}{\sqrt{\Delta P_H^2 + \Delta P_K^2}} = \underline{\underline{60,1}} \quad (41)$$

Es fällt auf, dass die Werte sehr weit auseinanderliegen. Schnell gesagt liegt hier der gleiche Mechanismus wie in Kapitel 3.2 besprochen zugrunde; dazu mehr in der Diskussion.

Zuletzt beobachtet man qualitativ, dass der effektive Wirkungsgrad des Heißluftmotors deutlich geringer ist (ca. 8-fache) als der Thermische. Dies liegt daran, dass die Wärme  $Q_{pV}$  wiederum nicht gänzlich als mechanische Arbeit genutzt werden kann, denn bis zur Bewegung des Rads kommen noch weitere Reibungseffekte und sonstige Wärmeverluste ins Spiel, die dann den effektiven Wirkungsgrad  $\eta_{eff}$  noch weiter senken.

*Karlsruher Verlust von  $\eta_{th}$  und  $\eta_{eff}$ ?*

## 4 Zusammenfassung und Diskussion

### 4.1 Zusammenfassung

Zuerst haben wir, nachdem wir uns den Motor genauer unter die Lupe genommen haben, ihn als Kältemaschine genutzt. Hier wurde durch ein Elektromotor, über ein Rad, der Arbeitskolben im Zylinder so angetrieben, sodass der obere Teil des Zylinders gekühlt wurde.

In der ersten Versuchsreihe wurde in diesem Abschnitt des Zylinders dann eine Heizwendel in Betrieb genommen, welche Wärme in den Zylinder abgab. Die Heizleistung der Wendel wurde dann so angepasst, sodass im Zylinder Raumtemperatur herrschte; die Kälteleistung entsprach der Heizleistung. Da nun Heizleistung und Kälteleistung äquivalent waren, ließ sich das Eine über das Andere bestimmen. ✓

Als nächstes wurde dann der Motor nochmals als Kältemaschine genutzt, nur anstatt einer Heizwendel wurde ein Gefäß mit Wasser installiert. Anhand der Gefrierzeit ließ sich abermals die Kälteleistung bestimmen. Durch ändern der Rotationsrichtung des Elektromotors wurde danach die Kältemaschine zu einer Wärmepumpe umfunktioniert, mit der dann das Wasser zum Vergleich auf Siedetemperatur erhitzt wurde. Bei allen Messungen wurden, wenn relevant, noch die Temperaturen des zu- und ablaufenden Kühlwassers aufgezeichnet.

Zuletzt haben wir dann den Motor als Wärmekraftmaschine genutzt und auch hier wieder unterschiedliche Messungen durchgeführt; zuerst haben wir die zu den Berechnungen relevanten Größen im Leerlauf bestimmt. Danach wurde an das Arbeitsrad ein Bremszaum installiert, mit dem sich eine variable Bremskraft einstellen ließ. Durch verstetigen jener Bremskraft ließ sich eine Messreihe erstellen, bei dem sich unter unterschiedlichen Bremskräften unterschiedliche Frequenzen und mechanische Arbeiten feststellen ließen. Aus diesen Größen konnten wir dann die unterschiedlichen Wirkungsgrade des Motors bestimmen.

L) wichtig ist normal anzählen was gemacht wurde

## 4.2 Diskussion Die Interpretation der Werte

Bevor man groß ins Diskutieren kommt; die meisten Abweichungen stammen von der geringen Isolierfähigkeit des verwendeten Motoren. Der Unterschied zwischen der Schmelz- und Gefrierzeit wurden bereits erläutert; und auf dem gleichen Prinzip beruht auch die unheimlich große  $60,1\sigma$ -Abweichung der unterschiedlich bestimmten Kälteleistungen.

Im ersten Fall wurde die Wärmeleistung einer Heizwendel kompensiert, wobei eine ziemlich große Kälteleistung bei rauskam. Im zweiten Fall wurde anhand der Gefrierzeit von 1ml Wasser die Kälteleistung der Kältemaschine ermittelt. Da der Motor allerdings sehr schlecht isoliert ist, kann relativ ungehindert mit der Umgebung (Zimmertemperatur) ein Wärmeaustausch stattfinden. Bei der Kompensationsmessung hilft die Umgebung also bei der Kompensation der Heizleistung der Heizwendel mit, wodurch scheinbar die Kälteleistung (deutlich) größer erscheint, als das sie tatsächlich ist. Beim gefrieren des Wassers ist hier genau das Gegenteil der Fall; die Kältemaschine entzieht nicht nur dem Wasser seine thermische Energie, sondern auch der Umgebung, wodurch die Kälteleistung (deutlich) geringer erscheint, als dass sie eigentlich ist. Wie groß jene Abweichung ist lässt sich leider schwer bestimmen. *der Unterschied resultiert eher davon was betrifft wird (genauer obere Bereich vs. unten Wasser)*

Auch bei den Unterschieden der ermittelten Wirkungsgrade kommen nicht-quantifizierbare Wärme- und Reibungsverluste vor, die die Ergebnisse verzerrn. Am besten ist dies bei der Energiebilanz der Kältemaschine zu sehen, bei der pro Zyklus ca. 7J an die Umgebung verloren gehen, allerdings ist auch dieser Wert mit einem relativ großem Fehler versehen, also wie vielsagend die  $\sigma$ -Abweichung von 2,22 vom idealen Nullwert ist, lässt sich nicht leicht sagen.

*(kommt von Fehlern  $\sigma$ )*

All diese Abweichungen sind somit Reibungs- und Energieverlusten an die Umgebung zu verschulden. Somit würde man all jene Probleme beiseitigen, wenn man bei der Konstruktion mehr acht auf Isolation und Reibungsre-

duktion gäbe (bei modernen Heißluft- und Verbrennungsmotoren erreicht man Wirkungsgrade von max. 38%), allerdings würde dies dazu führen, dass man die Versuche schlechter durchführen könnte und - noch wichtiger - es wäre schwieriger die ablaufenden Prozesse zu sehen und somit zu verstehen. Da diese Sachen im Endeffekt erfüllt worden sind, kann man trotz hoher Abweichungen bei den Kälteleistungen immernoch von einem gelungenem Experiment sprechen.

## 5 Anhang

```
In [ ]: # Messdaten:  
f_km = 318 / 60 #Drehzahl in 1/s  
f_km_err = 10 / 60  
  
U_H_km = 5.44  
U_H_km_err = 0.02  
  
I_H_km = 5.4  
I_H_km_err = 0.05  
  
V_punkt_km = 237 / (60 * 10**(6)) # l/s  
V_punkt_km_err = 2 / (60 * 10**(6))  
  
U_M_km = 24.1  
U_M_km_err = 0.1  
  
I_M_km = 3.3  
I_M_km_err = 0.2  
  
f_M_km = 300/60  
f_M_km_err = 10 /60  
  
T_1_km = 22.5 + 273.15  
T_1_km_err = 0.1  
  
T_2_km = 18.0 + 273.15  
T_2_km_err = 0.1  
  
Delta_T_km = T_1_km - T_2_km  
Delta_T_km_err = np.sqrt(T_1_km_err**2 + T_2_km_err**2)  
  
c_W = 4190 # J/kgK  
rho_W = 997 # kg/m^3
```

Abbildung 5: Pythonskript zur Definition der Variablen und die Angaben der verwendeten Messwerte

```
In [3]: # Man berechne Q_1
Q_1_km = (c_W * rho_W * V_punkt_km * Delta_T_km)/(f_km)
Q_1_km_err = np.sqrt((V_punkt_km_err/V_punkt_km)**2 + (Delta_T_km_err/Delta_T_km)**2 + (f_km_err/f_km)**2) * Q_1_km
print("Q_1:", Q_1_km, "+-", Q_1_km_err, "[J]")
Q_1: 14.010154386792452 +- 3.1619724058738536 [J] wenn ich deine Werte eintige hineinfüge kommt 0,63 Crüm raus
```

```
In [4]: # Man berechne Q_2 und die Kälteleistung
Q_2_km = (U_H_km * I_H_km)/f_km
P_H_km = (U_H_km * I_H_km)

Q_2_km_err = np.sqrt((U_H_km_err/U_H_km)**2 + (I_H_km_err/I_H_km)**2 + (f_km_err/f_km)**2) * Q_2_km
P_H_km_err = np.sqrt((U_H_km_err/U_H_km)**2 + (I_H_km_err/I_H_km)**2) * P_H_km

print("Q_2:", Q_2_km, "+-", Q_2_km_err, "[J]")
print("Kälteleistung:", P_H_km, "+-", P_H_km_err, "[J/s]")
Q_2: 5.542641509433963 +- 0.182834534302918 [J]
Kälteleistung: 29.376000000000005 +- 0.2926567955814456 [J/s]
```

```
In [5]: # Berechne W_M
W_M_km = (U_M_km * I_M_km)/f_M_km

W_M_km_err = np.sqrt((U_M_km_err/U_M_km)**2 + (I_M_km_err/I_M_km)**2 + (f_M_km_err/f_M_km)**2) * W_M_km
print("W_M:", W_M_km, "+-", W_M_km_err, "[J]")
W_M: 15.906 +- 1.1021633454257134 [J]
```

```
In [6]: # Es soll sein: Q_1 = Q_2 + W_M. Man prüfe:
E_km_diff = Q_2_km + W_M_km - Q_1_km
E_km_diff_err = np.sqrt(Q_2_km_err**2 + W_M_km_err**2 + Q_1_km_err**2)

print("Differenz der Energiebilanz:", E_km_diff, "+-", E_km_diff_err, "[J]")
# Abweichung:
sigma_E_km_diff = E_km_diff / E_km_diff_err
print("Sigma-Abweichung:", sigma_E_km_diff)

Differenz der Energiebilanz: 7.4384712264151 +- 3.3535446921789265 [J]
Sigma-Abweichung: 2.2180969110056616
```

```
In [7]: # Man berechne noch den Wirkungsgrad
eta_km = Q_2_km / W_M_km

eta_km_err = np.sqrt((Q_2_km_err/Q_2_km)**2 + (W_M_km_err/W_M_km)**2) * eta_km
print("Wirkungsgrad:", eta_km, "+-", eta_km_err)

Wirkungsgrad: 0.34846231041330084 +- 0.0267422025323036
```

Abbildung 6: Python Skript zu den Berechnungen aus Kapitel 3.1

```
In [8]: # Man bestimmt aus dem Temperaturverlauf die Gefrierzeit und daraus die Kälteleistung  
t_gef = 140 #s → gehört auch im Protoball  
t_gef_err = 20  
  
lambda_h2o = 335 * 1000 #J/kg  
V_W = 1*10**(-6) #m^3  
  
m_W = rho_W * V_W  
  
P_km = lambda_h2o * m_W / t_gef  
P_km_err = (t_gef_err / t_gef) * P_km  
  
print("Kälteleistung:", P_km, "+-", P_km_err, "[J/s]")  
  
sigma = np.abs(P_km-P_H_km)/(np.sqrt(P_km_err**2 + P_H_km_err**2))  
print("Vergleich der Kälteleistungen:", sigma)  
  
Kälteleistung: 2.3856785714285715 +- 0.3408112244897959 [J/s]  
Vergleich der Kälteleistungen: 60.08238485355965
```

Abbildung 7: Python Skript zu den Berechnungen aus Kapitel 3.2 und zum Vergleich der gewonnenen Kälteleistungen  $P_K$  (Kapitel 3.4)

```
In [9]: # Unsere Messwerte
U_H_wk = 11.91 #V
U_H_wk_err = 0.02

I_H_wk = 13.8 #A
I_H_wk_err = 0.05

f_wk_array = np.array([296, 290, 292]) / 60 # 1/s
f_wk = np.mean(f_wk_array)
f_wk_err_reading = 10/60
f_wk_err = np.sqrt((np.std(f_wk_array) / np.sqrt(3))**2 + f_wk_err_reading**2)

print("Gemittelte Drehzahl:", f_wk, "+-", f_wk_err, "[1/s]")

T_ab = 24.0 + 273.1
T_ab_err = 0.1

T_zu = 18.1 + 273.1
T_zu_err = 0.1

delta_T_wk = T_ab - T_zu
delta_T_wk_err = np.sqrt((T_ab_err)**2 + (T_zu_err)**2)

W_pV_wk_array = np.array([25730*10**(-4), 27930*10**(-4), 26610*10**(-4)]) #Pa m^3
W_pV_wk = np.mean(W_pV_wk_array)
W_pV_wk_err = np.std(W_pV_wk_array) / np.sqrt(3)

print("Gemittelte Arbeit pV:", W_pV_wk, "+-", W_pV_wk_err, "[Pa/m^3]")

V_punkt_wk = 236 / (60 * 10**(6))
V_punkt_wk_err = 2 / (60 * 10**(6))

Gemittelte Drehzahl: 4.877777777777777 +- 0.16838619143213787 [1/s]
Gemittelte Arbeit pV: 2.6756666666666664 +- 0.05219904923215313 [Pa/m^3]
```

Abbildung 8: Pythonskript zur Definition einiger Variablen, die Angaben der verwendeten Messwerte und erste Berechnungen zu Kapitel 3.3 (Leerlaufmessung)

```
In [10]: # Wir berechnen: P_el, Q_el, P_ab, Q_ab, P_pV, eta_th

P_el = U_H_wk * I_H_wk
P_el_err = np.sqrt((U_H_wk * I_H_wk_err)**2 + (U_H_wk_err * I_H_wk)**2)
print("P_el:", P_el, "+-", P_el_err, "[J/s]")

Q_el = P_el / f_wk
Q_el_err = np.sqrt((f_wk_err / f_wk)**2 + (P_el_err / P_el)**2)
print("Q_el:", Q_el, "+-", Q_el_err, "[J]")

P_ab = c_W * rho_W * delta_T_wk * V_punkt_wk
P_ab_err = P_ab * np.sqrt((delta_T_wk_err/delta_T_wk)**2 + (V_punkt_wk_err/V_punkt_wk)**2)
print("P_ab:", P_ab, "+-", P_ab_err, "[J/s]")

Q_ab = P_ab / f_wk
Q_ab_err = Q_ab * np.sqrt((P_ab_err/P_ab)**2 + (f_wk_err/f_wk)**2)
print("Q_ab:", Q_ab, "+-", Q_ab_err, "[J]")

P_pV = W_pV_wk * f_wk
P_pV_err = np.sqrt((W_pV_wk_err * f_wk)**2 + (W_pV_wk * f_wk_err)**2)
print("P_pV:", P_pV, "+-", P_pV_err, "[J/s]")

eta_th = W_pV_wk / Q_el
eta_th_err = np.sqrt((W_pV_wk_err / W_pV_wk)**2 + (Q_el_err/Q_el)**2) * eta_th
print("eta_th:", eta_th, "+-", eta_th_err)

P_el: 164.358 +- 0.6563507065586203 [J/s]
Q_el: 33.695261958997726 +- 0.034751300198073334 [J]
P_ab: 96.9442255333297 +- 2.464683699999997 [J/s]
Q_ab: 19.874670382687853 +- 0.8520814843432313 [J]
P_pV: 13.051307407407405 +- 0.5175133502758776 [J/s]
eta_th: 0.07940780130816513 +- 0.0015513142501031247

In [11]: # Energiebilanz Q_el = Q_v + W_pV + Q_ab + Q_R, Q_V = Q_v + Q_R
Q_V = Q_el - W_pV_wk - Q_ab
Q_V_err = np.sqrt(Q_el_err**2 + W_pV_wk_err**2 + Q_ab_err**2)
print("Energieverluste:", Q_V, "+-", Q_V_err, "[J]")

Energieverluste: 11.144924909643208 +- 0.8543858903134822 [J]
```

Abbildung 9: Python Skript zu den Berechnungen aus Kapitel 3.3 (Leerlaufmessung)

```
In [12]: # Drehmomentmessung und Bestimmung von W_D, W_pV_dreh, eta_th_dreh und eta_eff

# Berechnung der Mittelwerte
#0.8N
f_08_array = np.array([202, 196, 199]) / 60 #1/s
f_08 = np.mean(f_08_array)
f_08_err_reading = 10/60
f_08_err = np.sqrt((np.std(f_08_array)/np.sqrt(3))**2 + f_08_err_reading**2)
print("Frequenz_08:", f_08, "+-", f_08_err, "[1/s]")

W_pV_08_array = np.array([3.1090, 3.1430, 3.1820]) # Pa m^3
W_pV_08 = np.mean(W_pV_08_array)
W_pV_08_err = np.std(W_pV_08_array)/np.sqrt(3)

#0.6N
f_06_array = np.array([227, 229, 231]) / 60 #1/s
f_06 = np.mean(f_06_array)
f_06_err_reading = 10/60
f_06_err = np.sqrt((np.std(f_06_array)/np.sqrt(3))**2 + f_06_err_reading**2)
print("Frequenz_06:", f_06, "+-", f_06_err, "[1/s]")

W_pV_06_array = np.array([3.0590, 3.101, 3.074]) # Pa m^3
W_pV_06 = np.mean(W_pV_06_array)
W_pV_06_err = np.std(W_pV_06_array)/np.sqrt(3)

#0.4N
f_04_array = np.array([252, 250, 258]) / 60 #1/s
f_04 = np.mean(f_04_array)
f_04_err_reading = 10/60
f_04_err = np.sqrt((np.std(f_04_array)/np.sqrt(3))**2 + f_04_err_reading**2)
print("Frequenz_04:", f_04, "+-", f_04_err, "[1/s]")

W_pV_04_array = np.array([2.9770, 2.9280, 2.9360]) # Pa m^3
W_pV_04 = np.mean(W_pV_04_array)
W_pV_04_err = np.std(W_pV_04_array)/np.sqrt(3)

#0.2N
f_02_array = np.array([295, 297, 295]) / 60 #1/s
f_02 = np.mean(f_02_array)
f_02_err_reading = 10/60
f_02_err = np.sqrt((np.std(f_02_array)/np.sqrt(3))**2 + f_02_err_reading**2)
print("Frequenz_02:", f_02, "+-", f_02_err, "[1/s]")

W_pV_02_array = np.array([2.9310, 2.8770, 2.8770]) # Pa m^3
W_pV_02 = np.mean(W_pV_02_array)
W_pV_02_err = np.std(W_pV_02_array)/np.sqrt(3)

Frequenz_08: 3.3166666666666664 +- 0.16832508230603463 [1/s]
Frequenz_06: 3.8166666666666664 +- 0.16740576859243736 [1/s]
Frequenz_04: 4.222222222222222 +- 0.16984621463404592 [1/s]
Frequenz_02: 4.9277777777777778 +- 0.1669133976184259 [1/s]
```

Abbildung 10: Pythonskript zur Definition einiger Variablen, die Angaben der verwendeten Messwerte und Berechnungen zu Kapitel 3.3 (Drehmomentmessung)

```
In [13]: # Wir berechnen W_D = 2*pi*L*F
l = 0.2 * 0.5 #m
F = np.array([0.8 , 0.6 , 0.4 , 0.2])#N
F_err = np.ones(4)*0.03

W_D_array = 2*np.pi*l*F
W_D_array_err = 2*np.pi*l*F_err
print("Mechanische Arbeiten: ",W_D_array, "+-", W_D_array_err, "[J]")

# Wir berechnen eta_th_dreh = W_pV_dreh / Q_el
W_pV_dreh = np.array([W_pV_08, W_pV_06 , W_pV_04 , W_pV_02])
W_pV_dreh_err = np.array([W_pV_08_err, W_pV_06_err , W_pV_04_err , W_pV_02_err])

eta_th_dreh = W_pV_dreh / Q_el
eta_th_dreh_err = np.sqrt((W_pV_dreh_err / W_pV_dreh)**2 + (Q_el_err / Q_el)**2) * eta_th_dreh

print("eta_th Drehmomentmessung:", eta_th_dreh, "+-", eta_th_dreh_err)

# Wir berechnen eta_eff = W_D / Q_el

eta_eff = W_D_array / Q_el
eta_eff_err = np.sqrt((W_D_array_err / W_D_array)**2 + (Q_el_err / Q_el)**2) * eta_eff
print("eta_eff:", eta_eff, "+-", eta_eff_err)

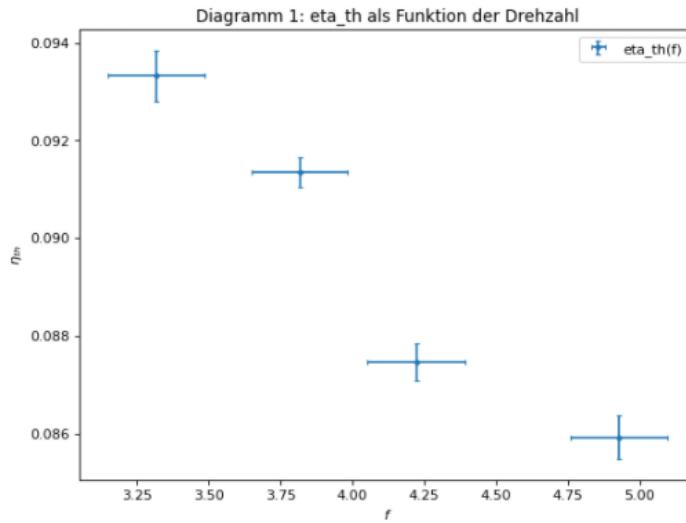
Mechanische Arbeiten: [0.50265482 0.37699112 0.25132741 0.12566371] +- [0.01884956 0.01884956 0.01884956 0.01884956] [J]
eta_th Drehmomentmessung: [0.09332667 0.09134815 0.08746037 0.08591712] +- [0.00052003 0.00031231 0.00037866 0.00044508]
eta_eff: [0.01491767 0.0118825 0.00745884 0.00372942] +- [0.00055962 0.00055953 0.00055947 0.00055943]
```

Abbildung 11: Python Skript zu den Berechnungen aus Kapitel 3.3 (Drehmomentmessung)

```
In [14]: # Wir tragen eta_th und eta_eff als Funktion der Frequenz auf:
f_array = np.array([f_08, f_06, f_04, f_02])
f_array_err = np.array([f_08_err, f_06_err, f_04_err, f_02_err])

plt.figure(figsize=(8, 6), dpi=80)
plt.errorbar(f_array, eta_th_dreh, linestyle="None", marker = ".", yerr =
            eta_th_dreh_err, xerr = f_array_err, capsizes = 2, label="eta_th(f)")
plt.title("Diagramm 1: eta_th als Funktion der Drehzahl")
plt.legend()
plt.xlabel("$f$")
plt.ylabel("$\eta_{th}$")
```

Out[14]: Text(0, 0.5, '\$\eta\_{th}\$')



```
In [15]: plt.figure(figsize=(8, 6), dpi=80)
plt.errorbar(f_array, eta_eff, linestyle="None", marker = ".", yerr =
            eta_eff_err, xerr = f_array_err, capsizes = 2, label="eta_eff(f)", color = "green")
plt.title("Diagramm 2: eta_eff als Funktion der Drehzahl")
plt.legend()
plt.xlabel("$f$")
plt.ylabel("$\eta_{eff}$")
```

Out[15]: Text(0, 0.5, '\$\eta\_{eff}\$')

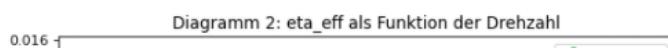


Abbildung 12: Pythonskript zur erstellung der Diagramme 10 und 11

lebt

Eigentlich eine gute Idee von der Anstellung aber verunsieht die tatsächliche Auswirkung ein wenig aufzuhören zu machen (alle Fehlerformeln umr. und vor allem mehr Interpretation der Daten).

⊕

03.01.22

Niklas Herz