



Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

# LABORÜBUNGEN 1: MECHANIK UND WÄRME

Übungstitel: Stirlingmotor

Betreuer: Lukas Drescher

Gruppennummer:

Vorbereitung	Durchführung	Protokoll

$\Sigma$

Name: Maximilian Philipp

Kennzahl: UF 033 678

Matrikelnummer: 11839611

Datum: 8. Mai 2021

SS 2021

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung . . . . .	3
2	Voraussetzungen und Grundlagen . . . . .	3
3	Versuchsanordnung . . . . .	5
4	Geräteliste . . . . .	6
5	Versuchsdurchführung und Messergebnisse . . . . .	7
6	Auswertung . . . . .	9
7	Diskussion und Zusammenfassung . . . . .	10

## 1 Aufgabenstellung

Die folgenden Punkte sind zu erfüllen:

- Die Erstellung von  $p(t)$ -,  $V(t)$ - und  $pV$ -Diagrammen aus den Messdaten für einen unbelasteten [1] sowie einen belasteten [2] Stirlingmotor.
- Berechnung der verrichteten mechanischen Arbeit  $W_{\text{mech}}$  bei einem Durchlauf der  $pV$ -Kurve durch numerische Integration.
- Bestimmung der mechanischen Leistung  $P_{\text{mech}}$  aus der vorher bestimmten mechanischen Arbeit und der Drehzahl  $n$ , welche sowohl aus dem Frequenzspektrum der Volumenschwingung durch plotten der gegebenen Werte  $V(f)$  und der Frequenz  $f$ , als auch durch das Fitten bzw. Abzählen der Peaks pro Zeit ermittelt werden kann.
- Berechnung des Wirkungsgrades des Stirlingmotors  $\eta_L$ .
- Ermittlung der über das Kühlsystem abgeführten Wärmemenge  $Q_{\text{ab}}$  pro Zyklus des Motors sowie der damit abgeführten Wärmeleistung  $P_{\text{ab}}$ .
- Die Bestimmung dieser Größen ist sowohl für den unbelasteten Betrieb als auch für den belasteten Betrieb des Stirlingmotors zu machen.

## 2 Voraussetzungen und Grundlagen

Ein Stirlingmotor ist eine Wärmekraftmaschine, das bedeutet, dass sie durch das Transportieren von Wärme einer höheren Temperaturquelle zu einer niedrigeren für uns mechanische Arbeit vollrichten kann. Dies ist in Abbildung 2 veranschaulicht.

Damit dieser Motor auch nützlich sein kann muss dieser Wärmetransport so oft wie möglich passieren, da immer nur ein Teil der transportierten Energie in nutzbare Arbeit umgewandelt. Die maximale theoretische Ausbeute ist durch den Carnot Wirkungsgrad  $\eta_{\text{Carnot}}$  gegeben, siehe Gleichung 1.

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \quad (1)$$

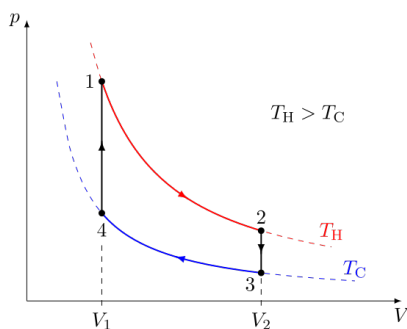
Wobei  $T_{\text{min}}$  die Temperatur der niedrigen Temperaturquelle ist und  $T_{\text{max}}$  die Temperatur der höheren Temperaturquelle ist.

Der Stirlingmotor durchgeht einen 4-teiligen Kreisprozess, bei welchem jedes mal, wie zuvor erwähnt, ein Teil der transportieren Wärme in nutzbare Arbeit umgewandelt wird.

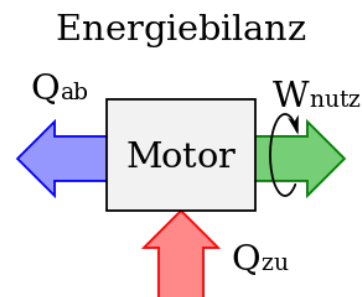
1. Isotherme Expansion ( $T = \text{konst.}$ ): Das Volumen( $\uparrow$ ) steigt und der Druck( $\downarrow$ ) fällt indem der Kolben durch das Gas nach unten gedrückt wird. In diesem Schritt vollrichtet das Gas Arbeit.
2. Isochore Abkühlung ( $V = \text{konst.}$ ): Die Temperatur( $\downarrow$ ) fällt und der Druck( $\downarrow$ ) fällt auch indem das Gas durch die niedrige Temperaturquelle abgekühlt wird.

3. Isotherme Kompression ( $T = \text{konst.}$ ): Das Volumen( $\downarrow$ ) wird komprimiert und der Druck( $\uparrow$ ) steigt indem der Kolben sich nach oben bewegt. In diesem Schritt wird Energie benötigt.
4. Isochore Erwärmung ( $V = \text{konst.}$ ): Die Temperatur( $\uparrow$ ) steigt und der Druck( $\uparrow$ ) nimmt zu indem das komprimierte Gas durch die hohe Temperaturquelle erwärmt wird.

Diese Vierzyklen, wie oben in der Aufzählung nummeriert, werden noch einmal in Abbildung 1 als  $pV$ -Diagramm visualisiert. Die Fläche eingeschlossen in der Kurve ist die abgreifbare Energie pro Zyklus.



**Abbildung 1:** Darstellung des idealisierten Stirlingkreisprozesses in einem  $pV$ -Diagramm. Wo  $p$  der Druck und  $V$  das Volumen ist.



**Abbildung 2:** Vereinfachte schematische Darstellung einer Wärmepumpe. Hier wird veranschaulicht, dass nur ein Teil der zugeführten Wärmeenergie  $Q_{zu}$  in Arbeit  $W_{nutz}$  umgewandelt wird. Der Rest  $Q_{ab}$  wird an die niedrige Temperaturquelle abgegeben.

Jedoch ist zu erwähnen, dass die Abbildung 1 dem idealisierten Kreisprozess entspricht. Diese scharfen Kanten werden in diesem Experiment nicht ersichtlich sein, dies wird im Kapitel Diskussion und Zusammenfassung noch genauer diskutiert.

Da die Wirkungsgrade des Systems im Mittelpunkt des Experiments stehen, muss nur der Input und Output verglichen werden (die ins System hinzugefügte Leistung ( $P_{in}$ ) und der abgreifbaren Leistung ( $P_{out}$ )) und nicht jeder Schritt des Kreisprozesses.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

Um den Output des Systems zu messen gibt es verschiedene Methoden, in diesem Experiment werden drei Methoden genutzt.

1. Durch die gemessenen Daten des Volumens und des Drucks
2. Durch Schlussrechnung mittels der im Wasser abgeführten Wärmemenge
3. Durch Messung der abgreifbaren mechanischen Leistung  $P_{mech}$  mittels dem Drehmoment und der Frequenz.

Um die abgeführte Wärmemenge pro Sekunde ( $P_{ab}$ ) zu berechnen wurde die Gleichung 3 [1] an dieses Experiment angepasst. Wo  $\dot{V}$  der Volumenstrom,  $\rho$  die Dichte des Wasser,  $c$  die spezifische Wärmekapazität von Wasser und  $\Delta T$  der Temperaturanstieg durch die abgegebene Wärme ist.

$$P_{ab} = \dot{Q}_{ab} = \dot{V} \rho c \Delta T \quad (3)$$

Weiters wird auch  $P_{mech}$ , welche der Bremszaum auf die Federwaage mittels der Kraft  $F$  und dem Hebelarm  $r$  pro Sekunde überträgt, durch Gleichung 4 bestimmt:

$$P_{mech} = F \cdot l \cdot 2\pi f \quad (4)$$

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fortpflanzt, ist Gleichung 5 verwendet worden. Die Grundlagen dieser Gleichung 5 sind von den Powerpointfolien von GUM entnommen worden.[6] Die Verallgemeinerung ist von Wikipedia entnommen worden [3]. Für die Auswertung der Unsicherheitfortpflanzung ist die Programmiersprache Python im speziellen das Packet `scipy` und `sympy` für die Aufstellung und Ausrechnung der Funktionen, zur Hilfe genommen worden.

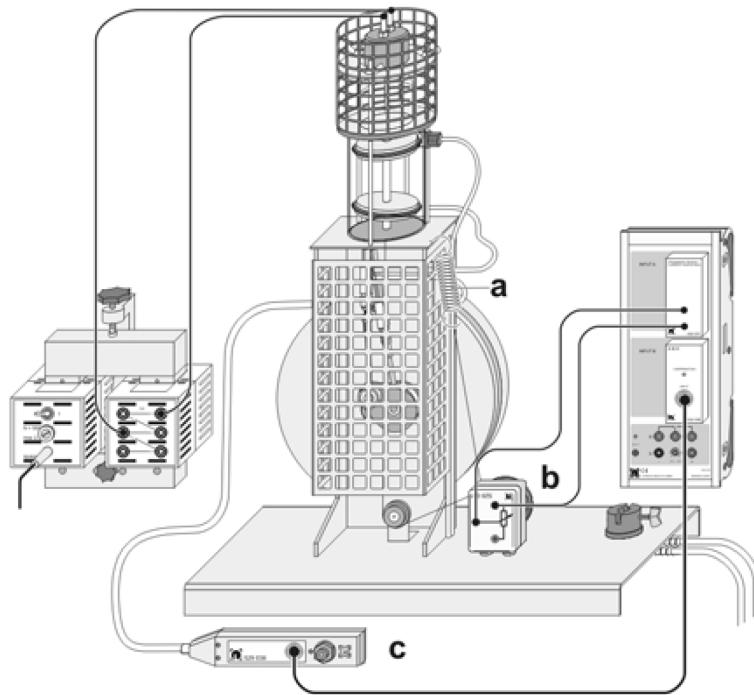
$$V_y = J(x) \cdot V_x \cdot J^T(x) \quad (5)$$

Wobei  $V_y$  und  $V_x$  die Kovarianzmatrizen von den Vektoren  $\mathbf{y}$  und  $\mathbf{x}$ .  $\mathbf{x}$  ist der Vektor der Eingangsvariablen und  $\mathbf{y}$  ist der Vektor der Ausgangsvariablen.  $J$  ist die Jakobimatrix der vektorwertigen Funktion  $\mathbf{y} = \vec{F}(\mathbf{x})$  ist. So lassen sich die Komponent der Matrix relativ einfach anschreiben  $J_{ij}(x) = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}(x)$ . Damit man die Unsicherheit der einzelnen Variablen  $y_i$  bekommt muss nur die Quadratwurzel des i-ten Diagonalelementes der  $\mathbf{y}$ -Kovarianzmatrix genommen werden  $u_i = \sqrt{\text{diag}(V_y)_i}$ . Da in diesem Experiment meistens nur skalare Funktionen untersucht werden vereinfacht sich die Gleichung 5 dramatisch und die Unsicherheit der Variabel  $y$  lässt sich einfach so berechnen:

$$u_y = \sqrt{\text{grad}y^T \cdot V_x \cdot \text{grad}y} \quad (6)$$

### 3 Versuchsanordnung

In diesem Experiment wurde eine Stirlingmotor der  $\beta$ -Konfiguration verwendet. Dies bedeutet, dass die zwei Kolben in einem Zylinder sich bewegen, wie in Abbildung 3 ersichtlich. Da der, hier verwendete, Stirlingmotor von der Firma LD Didavtic GmbH schon zusammengebaut verkauft wird, wird auf diesen Aufbau hier nicht genauer eingegangen. Jedoch wird noch erklärt wie dieser konfiguriert wird, damit Druck und Volumen aufgezeichnet werden kann. Zunächst wird eine Angelschnurr benötigt um diese an die Öse des Trägers zu hängen und über den Wegaufnehmer(b) an dem Gitter mit einer Schraubenfeder(a) zu befestigen. Dies möglich das Aufnehmen des Volumens im Zylinder. Weiters wir der Drucksensor(c) mittels einem Schlauch an den inneren Hohlraum des Zylinders geschlossen. Im obersten Teil des Motors ist die Glühwendel, welche Wärme dem System hinzufügt. Direkt unter dieser, mit einem Gitter umschlossenen, Kuppel ist der Anschluss für das fließende Wasser, welches die niedrige Temperaturquelle ist.



**Abbildung 3:** Aufbau des Stirlingmotors, um das Volumen und den Druck innerhalb des Zylinders zu messen

## 4 Geräteliste

**Tabelle 1:** Verwendete Geräte

Gerät	Messbereich	Gerät-Nr.	Unsicherheit	Bemerkungen
Relative- Druckmesssonde	$\pm 2000$ mbar	axx	$\pm 0,05$ %	-
Drehwinkelgeber	$\pm 75$ mm	bxx	$\pm 0,1$ mm	-
Federwaage	0 - 2 N	cxx	$\pm 2$ %	-
Messbecher	-	dxx	1 mL	-
Thermometer klein (am Motor)	-	fxx	$\pm 0,25$ K	-
Thermometer lang	$-10 \dots + 110$ °C	gxx	$\pm 0,25$ K	-
Rollmeter	3 m	hxx	$\pm 0,5$ mm @ 20 °C	-
CASSY Lab	-	ixx	-	-
Gleichstromquelle	-	jxx	$\pm 0,1$ W	Thurlby Thandar Instruments
Stirlingmotor	-	kxx	-	LD Didactic GmbH Serie-Nr. 388182

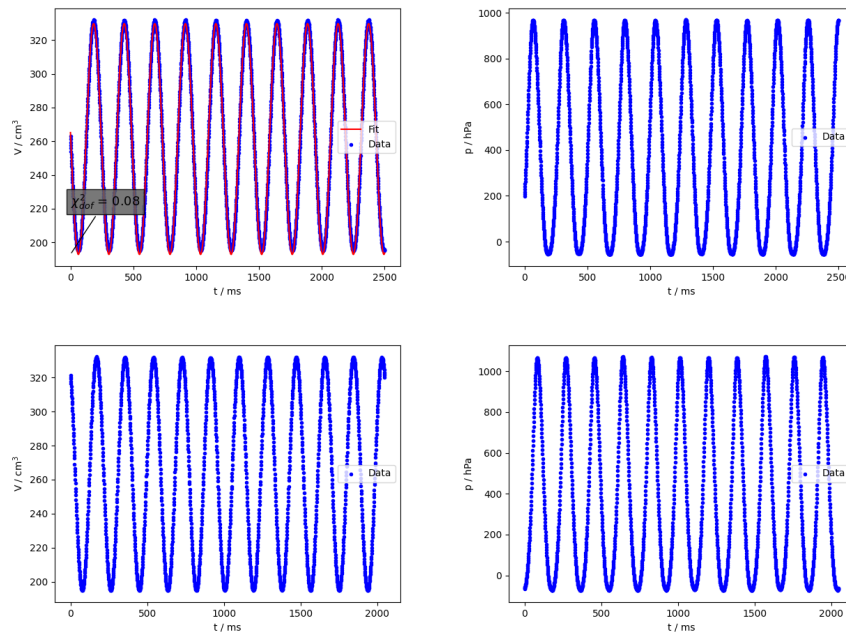
## 5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Für sowohl den belasteten und den unbelasteten Motorbetrieb gilt, es die mechanische Arbeit pro Zyklus, die mechanische Leistung mittels Drehzahl, den Wirkungsgrad und die abgeführte Wärme zu bestimmen. Daher ist die Vorgehensweise, dieselbe bei beiden Fällen.

**Tabelle 2:** Werte der ins System hinzugefügten Leistung  $P_{\text{elek}}$  oder auch Heizleistung  $P_{\text{heiz}}$  genannt

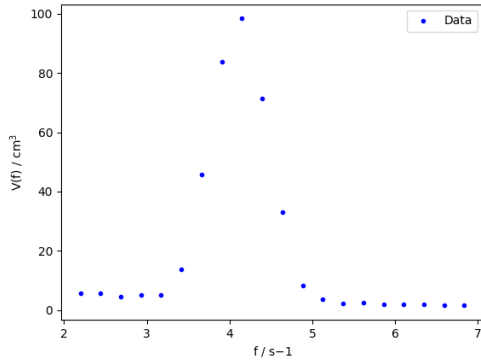
Betriebsart:	$P_{\text{elek}}$
Unbelastet	$(107,50 \pm 0,10) \text{ W}$
Belastet	$(249,10 \pm 0,10) \text{ W}$

Um  $W_{\text{mech}}$  zu bestimmen werden die, durch den Drucksensor und dem Drehwinkelgeber erhaltenen, Daten, siehe Abbildung 4, mittels Python numerisch integriert [2] (Trapezmethode) und ausgewertet.

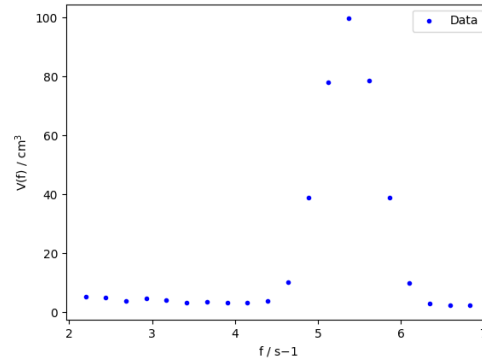


**Abbildung 4:** Links oben die  $p(t)$  Daten und rechts oben die  $V(t)$  Daten für den unbelasteten Motorbetrieb und links unten die  $p(t)$  Daten und rechts unten die  $V(t)$  Daten für den belasteten Motorbetrieb

Um  $P_{\text{mech}}$  zu bestimmen wird die zuvor ermittelte mechanische Arbeit pro Zyklus  $W_{\text{mech}}$  mit der Drehzahl  $n$  multipliziert. Welche entweder durch Abzählen der Perioden und der verstrichenen Zeit in den Daten oder durch die Fourier-Analyse der Volumenschwingung  $V(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} V(t) e^{-ift} dx$  und herauslesen bei welcher Frequenz der Peak am höchsten ist, siehe Abbildung 5 und Abbildung 6, bestimmt werden kann.



**Abbildung 5:** Fourier-Analyse des Stirlingmotors im unbelasteten Betrieb



**Abbildung 6:** Fourier-Analyse des Stirlingmotors im belasteten Betrieb

Wie im ersten Bild, siehe Abbildung 4 ersichtlich wurde um die genaue Drehzahl zu bestimmen die Datenpunkte gefittet und haben folgende Werte bekommen, siehe Tabelle 3. Damit die Daten noch sauber zu sehen ist entschieden worden nur einen Fit in die Daten zu plotten.

**Tabelle 3:** Die Drehzahl  $n_{\text{daten}}$  anhand den  $p(t)$  und den  $V(t)$  Daten. Die Drehzahl  $n_{\text{fourier}}$  ermittelt durch die Auswertung der Fourier-tranformierten Daten.

Betriebsart:	$n_{\text{daten}}$	$n_{\text{fourier}}$
Unbelastet	$(4,112 \pm 0,003) \text{ Hz}$	$(4,10 \pm 0,10) \text{ Hz}$
Belastet	$(5,376 \pm 0,003) \text{ Hz}$	$(5,40 \pm 0,10) \text{ Hz}$

Um die abgeführte Wärmeleistung  $P_{\text{ab}}$  zu bestimmen, muss der Volumenstrom, die Dichte von Wasser, die Temperaturerhöhung und die spezifische Wärmekapazität von Wasser bekannt sein. Die Temperaturerhöhung wird mit zwei Thermometern gemessen einmal beim Eingang des Stirlingmotors und einmal beim Ausgang. Der Volumenstrom wurde gemessen, indem der Wasserstand zweimal mit möglichst großen zeitlichen Abstand abgelesen. Nun wurde die benötigte Zeit des Wassers, um den Messbecher bis zu diesem Wert zu füllen, mittels eines Videobearbeitungsprogramm ermittelt. Es wurden die genauen Frames bestimmt, bei dem das Wasser 100 ml und 250 ml überschreitet. Mit den Timestamps der Bilder ist das Zeitintervall, welches gebraucht wurde um 150 ml dem Gefäß hinzuzufügen, auf  $\pm 0,06 \text{ s}$  bestimmt.

**Tabelle 4:** Daten für die Berechnung des Volumenstroms

Betriebsart:	$\Delta V$	$\Delta t$
Belastet	$(150,00 \pm 0,10) \text{ mL}$	$(36,70 \pm 0,06) \text{ s}$
Unbelastet	$(150,00 \pm 0,10) \text{ mL}$	$(36,50 \pm 0,06) \text{ s}$

Die spezifische Wärmekapazität wurde von dem Artikel [4] entnommen und beträgt  $4187 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ . Die Dichte von Wasser wurde von der Website [5] entnommen und beträgt bei



den hier wichtigen Temperaturen:

- $0,998\,599 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$  @  $18,0^\circ\text{C}$
- $0,997\,518 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$  @  $23,1^\circ\text{C}$
- $0,997\,175 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$  @  $24,5^\circ\text{C}$
- $0,998\,207 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$  @  $20,0^\circ\text{C}$

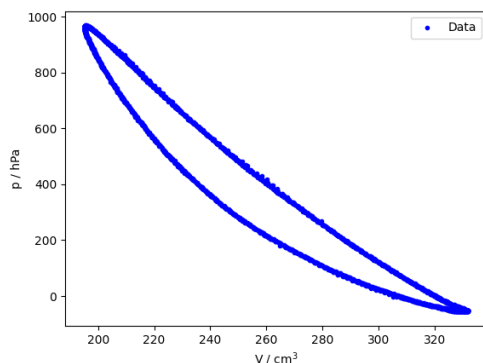
Zusätzliche ist noch die mechanische Leistung des belasteten Stirlingmotors mittels dem Bremszaum und der Federwaage zu bestimmen. Da der Wert für die Kraft  $F$  sehr schwankte ist dieser nicht genauer ablesbar zeitliche Mittelung dieser Daten wäre natürlich besser. Der Hebelarm  $l$  hat eine Länge von  $(25,0 \pm 0,5) \text{ cm}$  und die Kraft  $F$  beträgt  $(0,55 \pm 0,05) \text{ N}$ .

## 6 Auswertung

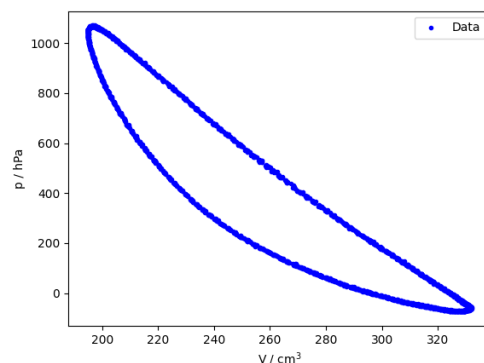
Kombiniert man nun die Messwerte aus dem Kapitel Versuchsdurchführung und Messergebnisse mit den Gleichungen aus Voraussetzungen und Grundlagen kommt man auf die verschiedenen gesuchten Leistungen und Wirkungsgrade.

Wie schon in Voraussetzungen und Grundlagen wurde für die Unsicherheitsfortpflanzung die verallgemeinerte Gaußmethode verwendet und ist mittels Python `scipy` ausgewertet worden, zudem wurde auch großzügig gerundet.

Die  $pV$  Diagramme sind auch visulisiert worden.



**Abbildung 7:** Das  $pV$ -Diagramm des Stirlingmotors im unbelasteten Betrieb



**Abbildung 8:** Das  $pV$ -Diagramm des Stirlingmotors im belasteten Betrieb

Hier ist gut ersichtlich, wie eine höhere Temperaturquelle das  $pV$ -Diagramm verändert. Die höher Temperaturquelle bewirkt wie erwartet, dass die Fläche unter der Kurve und somit die Leistung, welche an die Welle übertragen wird, größer wird. Hier soll noch erwähnt werden, dass die Kanten im Vergleich zum Modell, welches in den Voraussetzungen und Grundlagen durchgemacht wurde, abgerundet sind. Der Gründe dafür sind, dass keine Dichtung und keine Messung perfekt ist. Dadurch wird ein Großteil der Abrundung erklärt, aber selbst wenn perfekte Messungen und Dichtungen vorhanden wären, wären

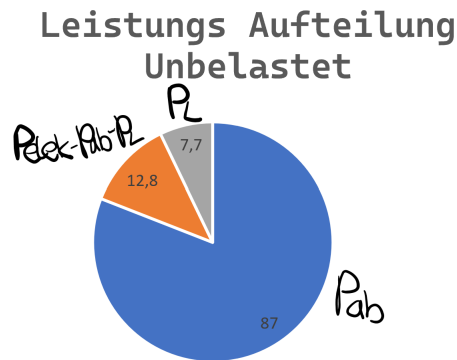
die Ecken leicht abgerundet, da Kanten, also nicht Glatte Übergänge, unphysikalisch wären.

**Tabelle 5:** Die errechneten Leistungen und Wirkungsgrade und zusätzliche wichtige Systemgrößen des Stirlingmotors. Genauer Beschreibungen der einzelnen Größen wurden, aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit, in der Tabelle gemacht

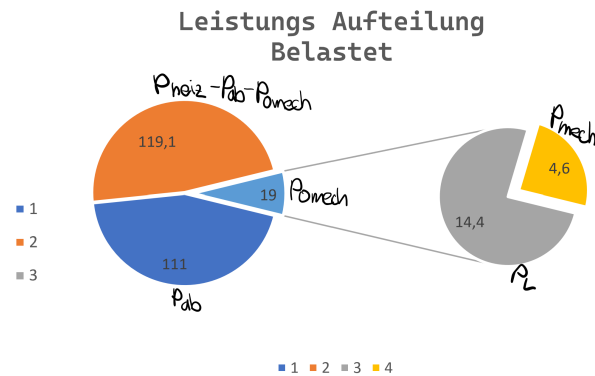
	Belastet	Unbelastet	Anmerkungen
$P_{0\text{mech}} P_L / \text{W}$	19,04 $\pm$ 0,10	7,69 $\pm$ 0,10	Die Leistung bestimmt mittels numerischer Integration.
$n_B n_L / \text{Hz}$	4,112 $\pm$ 0,003	5,376 $\pm$ 0,003	Die Drehzahlen von Tabelle 3.
$\eta_0 \eta_L / \%$	7,72 $\pm$ 0,10	7,11 $\pm$ 0,10	Der innere Wirkungsgrad bzw. Leerlauf Wirkungsgrad.
$P_{\text{mech}} / \text{W}$	4,6 $\pm$ 0,6	-	Die Leistung die an die Antriebswelle abgegeben wird.
$\eta_{\text{ges}} / \%$	1,9 $\pm$ 0,3	-	Der Bruchteil(Wirkungsgrad) der von der hinzugefügten Leistung $P_{\text{elek}}$ in $P_{\text{mech}}$ umgewandelt wird.
$P_{\text{ab}} / \text{W}$	111 $\pm$ 2	87 $\pm$ 5	Die, über das Wasser abgeführte, Leistung.
$Q_{\text{ab}} / \text{J}$	20,6 $\pm$ 0,5	21,3 $\pm$ 0,5	Die, über das Wasser abgeführte, Wärmeenergie pro Zyklus.
$\tilde{P}_{0\text{mech}} \tilde{P}_L / \text{W}$	138 $\pm$ 2	20 $\pm$ 5	Die Leistung, welche nicht an das Wasser übergeben wird, also $P_{\text{elek}} - P_{\text{ab}}$ .
$\tilde{\eta}_0 \tilde{\eta}_L / \%$	55,4 $\pm$ 0,8	19 $\pm$ 4	Der Bruchteil(Wirkungsgrad) der von der hinzuzufügen Leistung $P_{\text{elek}}$ in $\tilde{P}_{0\text{mech}}$ bzw. $\tilde{P}_L$ umgewandelt wird.

## 7 Diskussion und Zusammenfassung

Damit die Aufteilung der Energie besser verstanden werden kann sind zwei Diagramme erstellt worden. Einmal für den belasteten und einmal für den unbelasteten Motorbetrieb, siehe Abbildung 9 und Abbildung 10. Die Heizleistung Leistung ( $P_{\text{heiz}}$  oder auch  $P_{\text{elek}}$  genannt) ist die gesamte Leistung, welche dem System hinzugefügt wird. In diesen Diagrammen ist diese die Zusammensetzung aller Teile des Kreises, also der ganze Kreis.



**Abbildung 9:** Die Aufteilung der hinzugefügten Leistung  $P_{elek}$  durch den unbelasteten Betrieb. Wobei  $P_{ab}$  die abgeführte Leistung,  $P_L$  die mechanische Leistung für die Deckung der inneren Verluste ist. Der orange Teil des Kreis ist die Leistung, welche aus diversen Gründe an die Umgebung abgegeben wird.



**Abbildung 10:** Die Aufteilung der hinzugefügten Leistung  $P_{elek}$  durch den belasteten Betrieb. Wobei  $P_{ab}$  die abgeführte Leistung,  $P_L$  die mechanische Leistung für die Deckung der inneren Verluste ist und  $P_{mech}$  die abgegriffene mechanische Leistung ist. Der orange Teil des Kreis ist die Leistung, welche aus diversen Gründe an die Umgebung abgegeben wird.

Die Diagramme und die Werte aus Tabelle 5 zeigen uns, dass die Wirkungsgrade  $\eta_0$  und  $\eta_L$  größenordnungsmäßig übereinstimmen. Dies bedeutet, dass innere Wirkungsgrad das Equivalent zu dem Leerlauf Wirkungsgrad vom unbelasteten Betrieb ist für den belasteten Betrieb. Dies war auch erwartet da die Wirkungsgrade, obwohl die Leistungen  $P_{0mech}$  bzw.  $P_L$  unterschiedlich groß sind, da unterschiedlich viel Energie  $P_{elek}$  ins System gesteckt wird, großteils durch die Geometrie des Stirlingmotors gegeben sind. Natürlich wenn die Temperaturdifferenz oder andere Grenzen des Stirlingmotors erreicht unterscheiden sich diese Werte auch.

Weiters zeigen die Diagramme auch, dass durch das Heizen ein großer Teil der Leistung an die Umgebung weiter gegeben wird, in den Diagrammen orange dargestellt.

Wenn der Wirkungsgrad des gesamten Prozesses  $\eta_{ges}$  gesteigert, werden soll lässt sich aus den zuvor erwähnten Punkte schließen, entweder die Reibung verringert oder der Motor mehr isoliert werden muss.

Weiters ist es einfach anhand der Diagramme zusehen, dass  $P_{0mech}$ , (bzw.  $P_L$  beim unbelasteten Betrieb) nicht gleich den  $\tilde{P}_{0mech}$  bzw.  $\tilde{P}_L$  sind. Somit representieren sowohl deren Wirkungsgrade  $\tilde{\eta}_0$  und  $\tilde{\eta}_L$  als auch deren Leistungen den orangenen mit dem  $P_{0mech}$ , (bzw.  $P_L$  beim unbelasteten Betrieb) kombinierten Anteil des Kreises. Also die mechanische Leistung mit den Abgaben an die Umgebung. Daher ist auch die Vorgehensweise die mechanische Leistung  $P_{0mech}$  (bzw.  $P_L$  beim unbelasteten Betrieb) mittels Schlussrechnung ( $P_{0mech} \stackrel{?}{=} P_{elek} - P_{ab} = \tilde{P}_{0mech}$ ) zu bestimmen, hier nicht sinnvoll ist, da eindeutigerweißer, wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 ersichtlich,  $P_{0mech} \neq \tilde{P}_{0mech}$  ist.

Wenn die abgreifbare mechanische Leistung  $P_{mech}$  genauer bestimmt werden will sollte die Kraft  $F$  über einen Sensor zeitlich aufgenommen werden und über diese Daten gemittelt werden.

Bei den Drehzahlen konnte, durch das Fitten der Daten ein genauerer Wert für die Drehzahl bestimmt werden. Jedoch beschreibt der, durchs Fitten erhaltene, Wert nur unter der Annahme, dass die Schwingung perfekt periodisch ist, die Drehzahl korrekt. Diese Bedingung ist hier näherungsweise erfüllt. Ist die Schwingung jedoch nicht perfekt periodisch, würde diese Methode die Aperiodizität der Schwingung bei einem Sinusmodell nicht gut beschreiben. Deshalb ist der, durch die Fourier-Analyse erhaltenen Daten, ermittelte Wert eigentlich der physikalisch richtigere Wert, da dieser die Varianze der einzelnen Schwingungen berücksichtigt. Da jedoch nicht genug Messpunkte aufgenommen worden, damit der FFT (Fast-Fourier-Transform) genügend Werte liefert, damit ein guter Wert für die Drehzahl herauskommt ist in diesem Experiment der Drehzahlwert von dem Fit verwendet worden.

Alle durch das Experiment erhaltenen Werte und Ergebnisse sind in Tabelle 5 ersichtlich.

Alles in allem konnte eine brauchbare Analyse eines Stirlingmotors gemacht werden. Diese beinhaltet die Erstellung der genauen Leistungsaufteilungen, der zugeführten Leistung, im belasteten und unbelasteten Fall. Durch diese Aufteilung wird ersichtlich, dass größtenteils der Leistung (47,81 %) beim belasteten Betrieb an die Umgebung abgegeben wird. Dies deutet darauf hin, dass beim Optimieren der Motorleistung sich auf die thermische Isolierung des Motors sich fokussiert werden soll.

## Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik. 2: Elektrizität und Optik*. ger. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Springer-Lehrbuch. OCLC: 840599854. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2013. ISBN: 9783642299445 9783642299438.
- [2] *Documentation Integration (scipy.integrate)*. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/integrate.html>.
- [3] *Fehlerfortpflanzung*. de. Page Version ID: 205827844. Nov. 2020. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Fehlerfortpflanzung&oldid=205827844> (besucht am 08.05.2021).
- [4] CTT UIt. „Spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten W 17“. In: *MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG* (), S. 35.
- [5] W. Wagner und A. Pruß. „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“. en. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 31.2 (Juni 2002), S. 387–535. ISSN: 0047-2689, 1529-7845. DOI: 10.1063/1.1461829. URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1461829> (besucht am 08.05.2021).
- [6] Braunschweig Wolfgang Kessel. *Die ISO/BIPM-GUM Sicht:Schätzwert & Messunsicherheit*. 2004.

## Abbildungsverzeichnis

1	Kreisprozess des Stirlingmotors . . . . .	4
2	Wärmepumpe Darstellung . . . . .	4
3	Aufbau des Stirlingmotors, um das Volumen und den Druck innerhalb des Zylinders zu messen . . . . .	6
4	Links oben die $p(t)$ Daten und rechts oben die $V(t)$ Daten für den unbelasteten Motorbetrieb und links unten die $p(t)$ Daten und rechts unten die $V(t)$ Daten für den belasteten Motorbetrieb . . . . .	7
5	Fourier-Analyse des Stirlingmotors im unbelasteten Betrieb . . . . .	8
6	Fourier-Analyse des Stirlingmotors im belasteten Betrieb . . . . .	8
7	Das $pV$ -Diagramm des Stirlingmotors im unbelasteten Betrieb . . . . .	9
8	Das $pV$ -Diagramm des Stirlingmotors im belasteten Betrieb . . . . .	9
9	Die Aufteilung der hinzugefügten Leistung $P_{\text{elek}}$ durch den unbelasteten Betrieb. Wobei $P_{\text{ab}}$ die abgeführte Leistung, $P_{\text{L}}$ die mechanische Leistung für die Deckung der inneren Verluste ist. Der orange Teil des Kreis ist die Leistung, welche aus diversen Gründe an die Umgebung abgegeben wird. .	11
10	Die Aufteilung der hinzugefügten Leistung $P_{\text{elek}}$ durch den belasteten Betrieb. Wobei $P_{\text{ab}}$ die abgeführte Leistung, $P_{\text{L}}$ die mechanische Leistung für die Deckung der inneren Verluste ist und $P_{\text{mech}}$ die abgegriffene mechanische Leistung ist. Der orange Teil des Kreis ist die Leistung, welche aus diversen Gründe an die Umgebung abgegeben wird. . . . .	11

**Tabellenverzeichnis**

1	Geräteliste . . . . .	6
2	Werte der ins System hinzugefügten Leistung $P_{\text{elek}}$ oder auch Heizleistung $P_{\text{heiz}}$ genannt . . . . .	7
3	Die Drehzahl $n_{\text{daten}}$ anhand den $p(t)$ und den $V(t)$ Daten. Die Drehzahl $n_{\text{fourier}}$ ermittelt durch die Auswertung der Fourier-tranformierten Daten. . . . .	8
4	Daten für die Berechnung des Volumenstroms . . . . .	8
5	Die errechneten Leistungen und Wirkungsgrade und zusätzliche wichtige Systemgrößen des Stirlingmotors. Genauer Beschreibungen der einzelnen Größen wurden, aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit, in der Tabelle gemacht . . . . .	10