

Stirling Motor

Protokoll zum Versuch Nummer W1 vom 20. April 2015

Frederik Edens, Dennis Eckermann

Gruppe 6mo

f_eden01@uni-muenster.de

dennis.eckermann@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Temperatur und Wärmemenge	1
1.2. Stirling-Kreisprozess	1
1.3. Stirling-Motor	1
2. Versuchsteil	2
2.1. Bestimmung der Reibungsverluste	2
2.2. Bestimmung der Kühlleistung	2
2.3. Bestimmung der Heizleistung	4
2.4. Bestimmung des Wirkungsgrades aus dem (p, V) -Diagramm	5
A. Anhang	9
A.1. Fehlerrechnung	9

1. Einleitung

Die Versuchsreihe befasst sich ausschließlich mit dem Stirling-Motor. Als theoretische Grundlagen dazu sind insbesondere Kenntnisse von Temperatur und Wärmemenge, thermodynamischen Zuständen und Zustandsgleichungen sowie Kreisprozessen notwendig.

1.1. Temperatur und Wärmemenge

1.2. Stirling-Kreisprozess

Der idealisierte Stirling-Kreisprozess besteht aus vier Schritten. Im ersten Schritt wird bei isothermer Ausdehnung mechanische Arbeit vom System abgegeben, während ihm eine gleich große Wärmemenge zugeführt wird. Im zweiten Schritt gibt das System durch isochore Dekompression Energie in Form von Wärme ab. Im dritten Schritt wird das System isotherm auf das Ausgangsvolumen zurückgebracht. Dabei nimmt es die gleiche Arbeit auf, wie es an Wärme ab gibt, jedoch weniger als in Schritt 2. Der letzte Schritt ist die isochore Kompression. Nach Aufnahme der gleichen Wärmemenge, wie das System im dritten Schritt abgegeben hat, kehrt das System in den Ausgangszustand zurück. Der Stirling-Kreisprozess ist somit reversibel.

Wie für alle reversiblen Kreisprozesse ist auch hier die obere Schranke des Wirkungsgrades der Carnot-Wirkungsgrad

$$\eta \leq \eta_c = 1 - \frac{T_{kalt}}{T_{warm}}. \quad (1.1)$$

Für den idealen Stirling-Kreisprozess gilt $\eta = \eta_c$.

1.3. Stirling-Motor

2. Versuchsteil

Die Versuche befassen sich mit den beiden Betriebsmodi des Stirling-Motors. Es kann entweder mechanische Arbeit aufgebracht werden, um einen Wärmestrom zu erzeugen oder aus einem Temperaturgefälle mechanische Arbeit erzeugt werden.

2.1. Bestimmung der Reibungsverluste

Wie jeder reale Prozess weicht auch der Stirling-Motor vom idealisierten Konzept ab. Dafür sind auch Reibungsverluste durch die Reibung des Kolbens am Zylinder verantwortlich. Um diese zu bestimmen treibt man den Stirling-Motor an und misst die entstehende Reibungswärme. Diese erhält man aus der Flussrate und der Erwärmung des Kühlwassers.

Die gemessene Temperatur im Kühlsystem betrug bei Versuchsbeginn $(22,4 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ und blieb nach einiger Zeit konstant bei $(22,7 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Die aus mehreren Messungen gemittelte Abflussrate des Kühlwassers beträgt $(4,597 \pm 0,286) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Aus der Multiplikation von Abflussrate, Temperaturzunahme und Wärmekapazität von Wasser erhält man daraus, dass die Reibungsverluste $P_{\text{reib}}(5,7715 \pm 3,8645) \text{ W}$ betragen.

Aus der Fouriertransformation erhalten wir die Drehfrequenz des Motors von $f = (3,00 \pm 0,05) \text{ s}^{-1}$. Die Verlustleistung pro Zyklus beträgt somit $W_{\text{ver}} = P_{\text{reib}} \cdot \tau = \frac{P_{\text{reib}}}{f} = (1,9238 \pm 1,2886) \text{ J}$.

Dass sich dieser Wert nicht genauer bestimmen lässt, ist hauptsächlich eine Folge der ungenauen Temperaturmessung. Die Temperaturdifferenz betrug bei uns gerade mal $0,3^\circ\text{C}$ bei einer Unsicherheit von $0,2^\circ\text{C}$, da sowohl die untere als auch die obere Temperatur nur auf $0,1^\circ\text{C}$ genau bestimmt werden konnten.

2.2. Bestimmung der Kühlleistung

Zur Bestimmung der Kühlleistung werden etwa 1 mL Wasser im Stirling-Motor bis auf -25°C abgekühlt. Dazu wird das Wasser im oberen Ende des Stirling-Motors eingesetzt, und im Uhrzeigersinn bei konstanter Drehfrequenz angetrieben. Die Drehfrequenz sollte vom ersten Versuch übernommen werden, also wieder bei etwa 3 s^{-1} liegen.

Den Versuch haben wir wie den ersten bei einer Frequenz von $(3,00 \pm 0,05) \text{ s}^{-1}$ durchgeführt. Der Verlauf der Kurve weist bei etwa 0°C ein Plateau auf, während die Tempera-

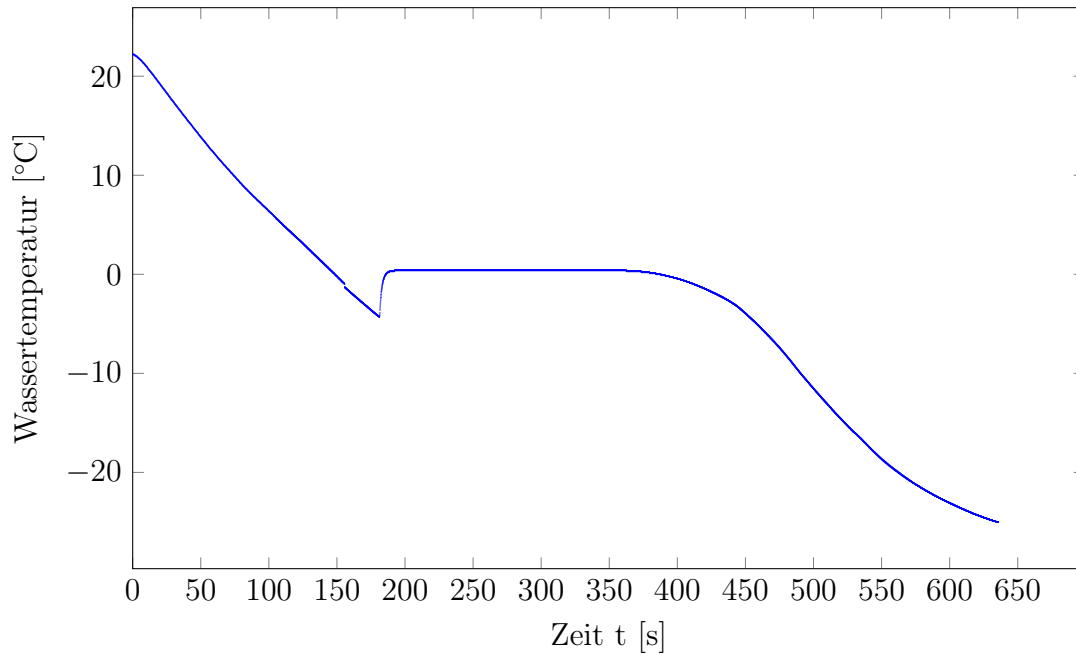


Abbildung 1 – Temperaturverlauf bei Kühlung durch Stirling-Motor

tur links und rechts davon in guter Näherung linear fällt. Erst gegen Ende der Messung flacht die Kurve wieder ab. Zudem unterschreitet die Temperaturkurve bereits vor dem Plateau 0°C , steigt dann aber Sprungartig auf an.

Das Plateau lässt sich durch die frei werdende Schmelzwärme beim Übergang *flüssig* \rightarrow *fest* erklären. Nach dem Beginn des Gefrierprozesses kann die Temperatur durch die Schmelzwärme nicht weiter sinken. Dennoch wird weiterhin kontinuierlich die gleiche Energiemenge dem Wasser entzogen wie vorher. Daraus lässt sich die Schmelzwärme von Wasser bestimmen:

Die durchschnittliche Temperaturänderung von $t_1 = (60,0 \pm 0,1) \text{ s}$ bis $t_2 = (154,0 \pm 0,1) \text{ s}$ lässt sich durch ein Steigungsdreieck bestimmen. Die dazugehörigen Temperaturen sind $T_1 = (12,2 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ und $T_2 = (-0,8 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Die Temperaturänderungsrate beträgt somit $(-0,13830 \pm 0,00215) \text{ K s}^{-1}$. Durch lineare Extrapolation ergibt sich daraus für $t_3 = (480,0 \pm 0,1) \text{ s}$ eine Temperatur von $T_{3,e} = (-45,885 \pm 0,721)^\circ\text{C}$; die tatsächliche Temperatur beträgt $T_3 = (-8,2 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Das Wasser ist also durch die Schmelzwärme $\Delta T = (37,685 \pm 0,821) \text{ K}$ Wärmer geblieben. Dies entspricht einer Wärmemenge von $Q_{\text{schmelz}} = (157,712 \pm 3,014) \text{ J g}^{-1}$.

Der von uns bestimmte Wert entspricht in etwa der Hälfte des auf Wikipedia.de [1] an-

gegebenen Referenzwertes von $333,5 \text{ J g}^{-1}$. Wir hatten bei der Messung Probleme damit, das sich die Zeit immer wieder zurückgesetzt hat. Außerdem mussten wir im Nachhinein feststellen, dass das Programm die eingestellte Messfrequenz während der Messung von 5 s^{-1} auf 10 s^{-1} geändert hat. Dies könnte auch den Faktor 2 um den unser Ergebnis abweicht erklären.

Um die Kühlleistung zu bestimmen sollte die Temperatur möglichst nah bei der Umgebungstemperatur liegen, da ansonsten die Wärmeaufnahme von der Umgebung zu großen Einfluss nimmt. Jedoch war bei uns die Steigung im Rahmen der systematischen Fehler bei uns am Anfang so konstant, dass auch wieder die Steigung die zur Berechnung der Schmelzwärme angenommen wurde verwendet werden kann. Eine Temperaturänderungsrate von $(-0,138\,30 \pm 0,002\,15) \text{ K s}^{-1}$ entspricht bei $(1,00 \pm 0,02) \text{ g}$ Wasser einer Leistung von $(0,578\,78 \pm 0,008\,99) \text{ W}$,

2.3. Bestimmung der Heizleistung

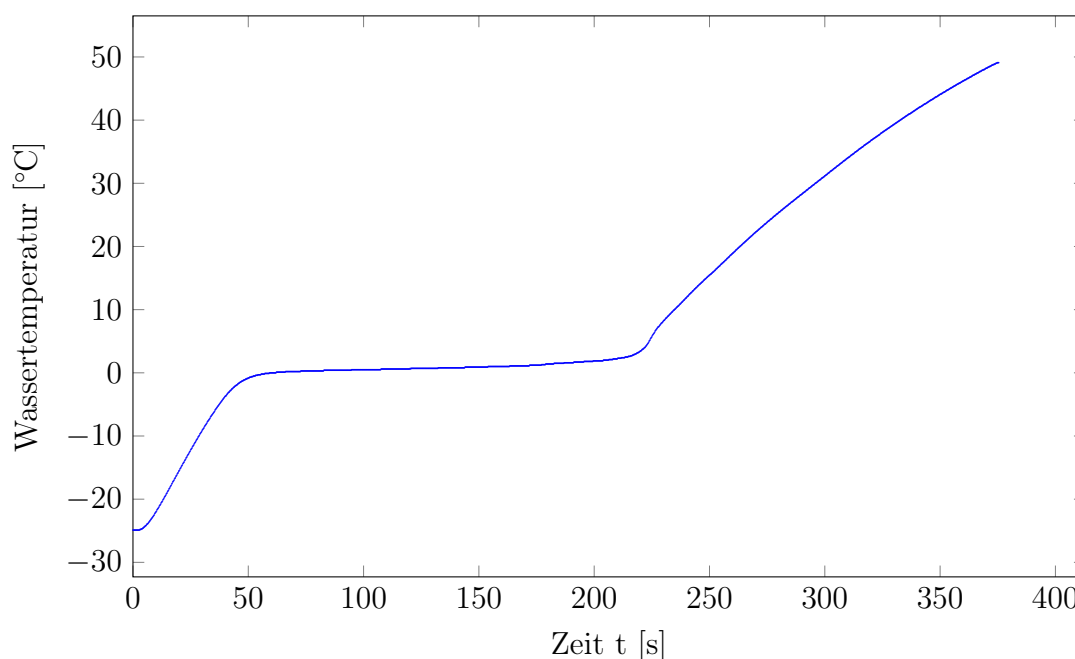


Abbildung 2 – Temperaturverlauf beim heizen durch Stirling-Motor

2.4. Bestimmung des Wirkungsgrades aus dem (p, V) -Diagramm

In diesem und dem folgendem Versuch wird der Stirling-Motor nicht mehr durch mechanische Arbeit angetrieben, sondern als Wärmekraftmaschine betrieben. Dazu wurde der Stirling-Motor am oberen Ende durch eine elektrische Heizwendel erwärmt, während er am unteren Ende weiterhin durch Wasser gekühlt wurde. Wegen $\delta W = p dV$ ist die abgegebene Arbeit pro Zyklus die eingeschlossene Fläche der Kurve im (p, V) -Diagramm. Teilt man durch die Zeit pro Zyklus bzw. multipliziert man mit der Frequenz erhält man die Leistung. Um den Wirkungsgrad zu erhalten braucht man zudem die eingesetzte Energie. Diese wird durch Messung der Spannung und Stromstärke an der Heizwendel bestimmt. Daraus ergeben sich die folgenden Werte:

Die mechanische Leistung wurde aus numerischer Integration über der p - V -Kurve er-

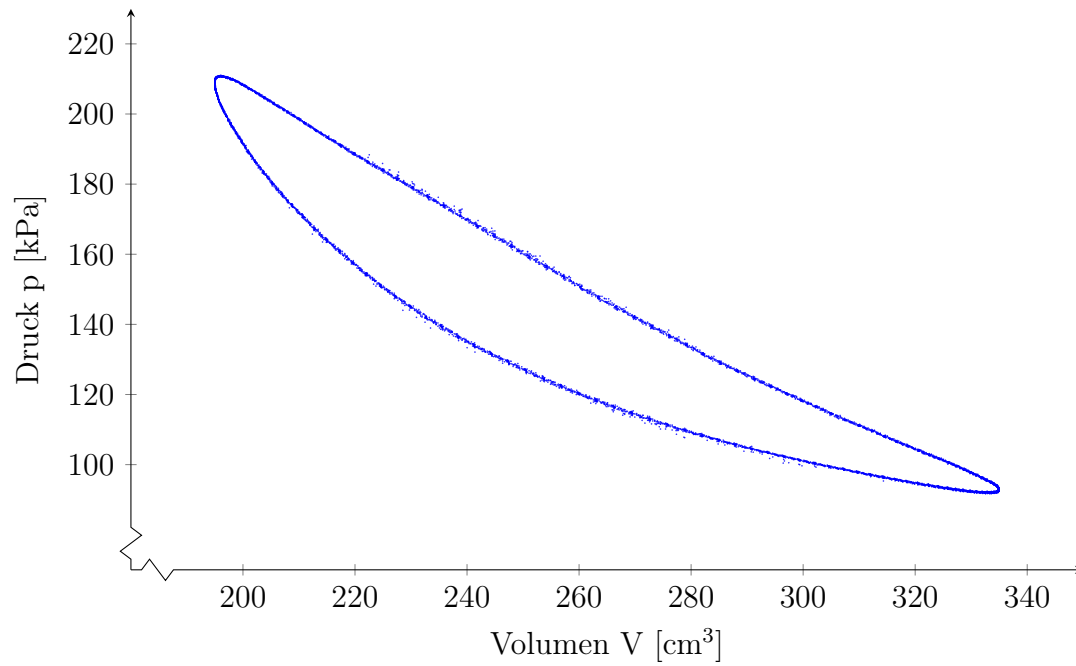
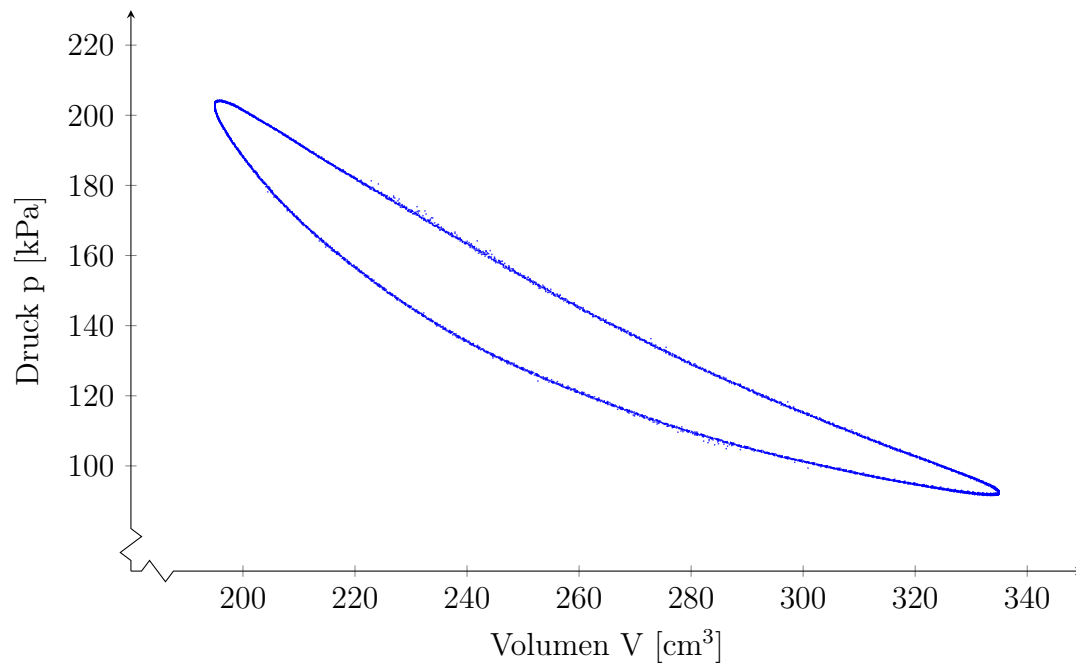
	el. Leistung [W]	mech. Leistung [W]	Wirkungsgrad
16 V	$2250,60 \pm 36,43$	23,362	$(1,0380 \pm 0,0168) \%$
14 V	$1876,73 \pm 33,05$	16,366	$(0,8721 \pm 0,0154) \%$
12 V	$1494,30 \pm 29,41$	11,442	$(0,7657 \pm 0,0151) \%$
10 V	$1079,30 \pm 25,19$	7,475	$(0,6926 \pm 0,0162) \%$
8 V	$717,50 \pm 20,57$	3,822	$(0,5327 \pm 0,0153) \%$

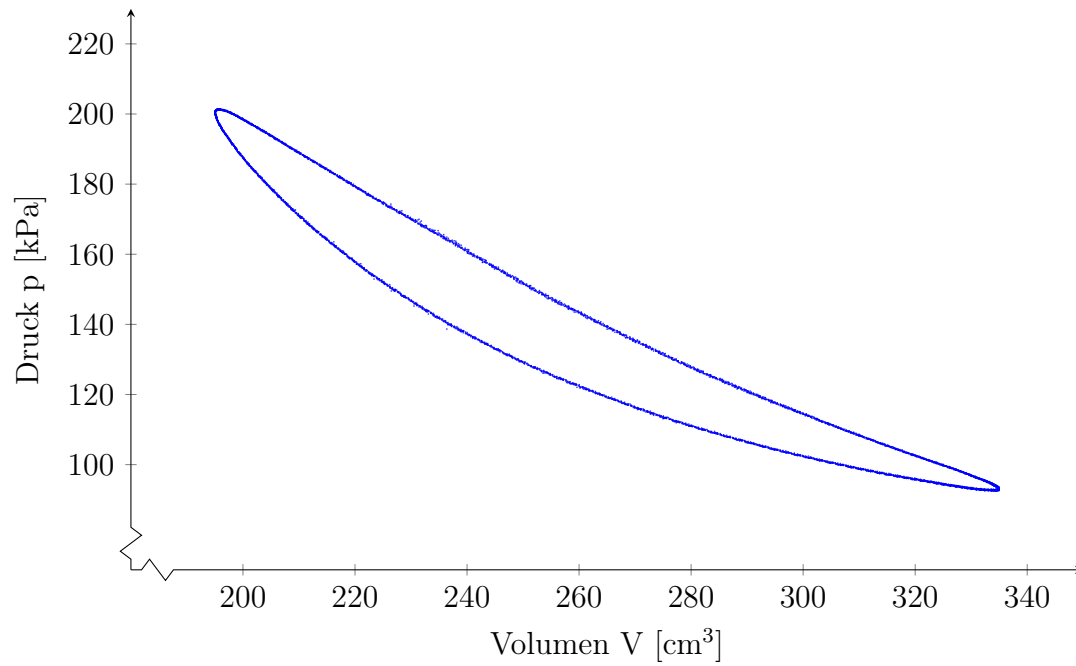
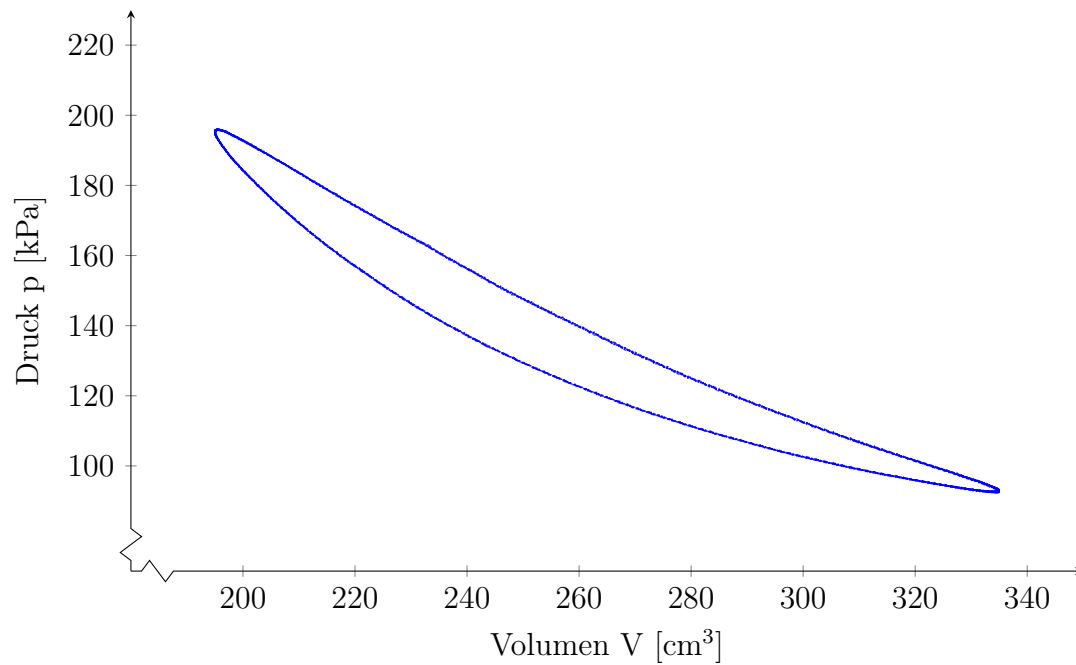
Tabelle 1 – Wirkungsgrad aus (p, V) -Diagramm

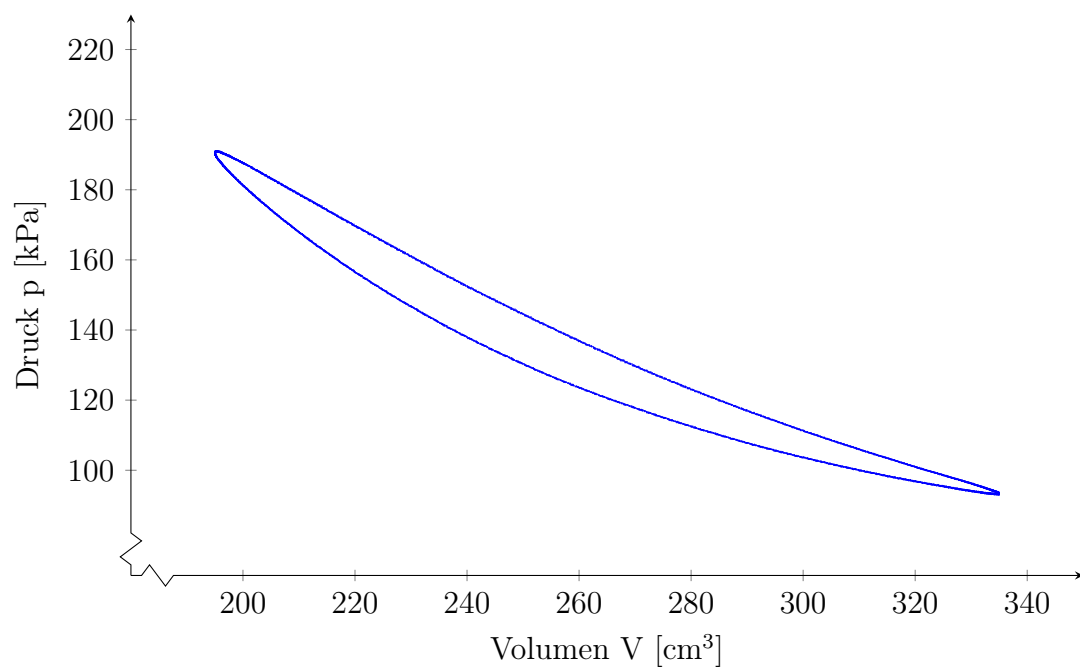
halten. Die elektrische Leistung aus dem Produkt von gemessener Spannung und Stromstärke.

Der Wirkungsgrad ist mit maximal etwa 1 % sehr gering. Dafür Verantwortlich könnten mehrere Faktoren sein. Zunächst ist der Stirling-Kreisprozess an vielen Stellen idealisiert und praktisch nicht umsetzbar. So ist an den (p, V) -Diagrammen gut zu erkennen, dass insbesondere die isochore (de)kompression nicht erkennbar ist. Dies ist insbesondere eine Folge dessen, dass zu keiner Zeit das Volumen konstant gehalten. Weiterhin hat das System weder die Zeit, um während der Aufwärmphase die Temperatur der Heizwendel aufzunehmen, noch um während der Abkühlphase auf die Temperatur des Kühlwassers abzukühlen. Somit ist das Temperaturgefälle effektiv geringer als im idealisierten Kreislauf, so dass nach 1.1 der maximal mögliche Wirkungsgrad sinkt.

Eine weitere Störquelle könnte sein, dass die Heizwendel die Wärme nicht gezielt in den Motor abstrahlt sondern auch in die Umgebung. Dadurch wird elektrische Leistung aufgenommen, die dem Kreisprozess in keiner Weise zugeführt wird.

**Abbildung 3** – (p, V) -Diagramm bei 16 V**Abbildung 4** – (p, V) -Diagramm bei 14 V

Abbildung 5 – (p, V) -Diagramm bei 12 VAbbildung 6 – (p, V) -Diagramm bei 10 V

**Abbildung 7** – (p, V) -Diagramm bei 8 V

A. Anhang

A.1. Fehlerrechnung

In diesem Versuch werden alle Messgrößen linear oder anti-proportional berechnet. Daher ist der Fehler aller vorkommenden Größen $y(x_1, \dots, x_n)$ gegeben durch

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(y \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2} = |y| \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2} \quad (\text{A.1})$$

Literatur

- [1] WIKIPEDIA: *Eigenschaften des Wassers* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Eigenschaften_des_Wassers&oldid=141014847. Version: 2015. – [Online; Stand 2. Mai 2015]