

IIW5

Modul Wärmelehre

Thermodynamische Kreisprozesse

In diesem Versuch soll anhand des Stirlingmotors die Funktionsweise einer Wärmekraftmaschine untersucht werden. Aus dem dabei beobachteten pV-Diagramm soll die in Arbeit umgewandelte Energie, sowie der Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine ermittelt werden.

Versuch IIW5 - Thermodynamische Kreisprozesse

In diesem Versuch soll anhand des Stirlingmotors die Funktionsweise einer Wärmekraftmaschine untersucht werden. Aus dem dabei beobachteten pV-Diagramm soll die in Arbeit umgewandelte Energie, sowie der Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine ermittelt werden.

1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Wie lauten die Hauptsätze der Thermodynamik?
- Was ist ein thermodynamischer Kreisprozess?
- Wie funktioniert eine Wärmepumpe, wie eine Wärmekraftmaschine?
- Was ist ein Stirling-Motor?
- Was ist der Carnot-Prozess?
- Was ist ein Wirkungsgrad?
- Was bedeutet isochor, isobar, isotherm und adiabatisch?
- Wie lauten die bekanntesten Gasgesetze?

1.2 Theorie

1.2.1 Grundlagen

1816 meldete Robert Stirling das Patent für eine Heissluftmaschine an, die heute als Stirlingmotor bekannt ist. Heutzutage dient der Stirlingmotor mehrheitlich dazu, das Prinzip von Wärmekraftmaschinen zu studieren, da in diesem Fall der Umwandlungsprozess der thermischen Energie in mechanische Energie besonders klar und einfach zu verstehen ist.

Der Stirlingmotor durchläuft einen Prozess von Energieänderungen in einem gasförmigen Medium. Betrachtet man das Gas als eine Vielzahl von Teilchen ungeordneter Bewegung und berücksichtigt lediglich Stöße der Teilchen untereinander und mit den Wänden, lässt es sich durch die Zustandsgleichung des Idealen Gases

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = N \cdot k_B \cdot T \quad (1.1)$$

beschreiben. Dabei bedeuten $n(N)$ die Stoffmenge (Teilchenzahl) (in Mol) im Volumen V , bei einem Druck p und einer Temperatur T , R die universelle Gaskonstante ($R = 8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$) und k_B die Boltzmann-Konstante ($k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$). Beim Stirlingmotor handelt es sich um ein Gas in einem Zylinder, das auf einer Seite eines beweglichen Kolbens eingeschlossen ist. Sein Volumen V wird damit durch die Stellung des Kolbens bestimmt. Über einen sogenannten Exzenter wird bei periodischer Änderung des Gasvolumens die Kolbenbewegung in eine Drehbewegung verwandelt. Die Volumenänderungen können dabei durch verschiedene physikalische Prozesse (Verbrennung, Dampf-, Wärme-Zuführung, ...) hervorgerufen werden. Die während eines Zyklus auftretenden Zustandsänderungen des Gases sind reversibel und führen stets wieder zum Ausgangszustand zurück. Ein solcher Vorgang wird KREISPROZESS bezeichnet.

1.2.2 Der Hauptsatz der Wärmelehre

Wird in einem System von aussen die Wärmeenergie ΔQ zugeführt, so kann sie teilweise zu einer Arbeitsleistung $-\Delta W$ verbraucht werden. Der Rest von ΔQ führt zu einer Steigerung der inneren Energie U des Systems um ΔU :

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W \quad (1.2)$$

Weil das System hierbei Energie nach aussen abgibt, wird die Arbeitsleistung negativ gerechnet. Die innere Energie U kann Bewegungsenergie der Moleküle sein ($dU = C_V \cdot \delta T$), also zu einer Erwärmung führen; bei idealen Gasen ist dies die einzig mögliche Form innerer Energie. Wenn wir es mit einem Gas zu tun haben, besteht die äussere Arbeitsleistung nur in Druckarbeit $\Delta W = -p \cdot \Delta V$. ΔW wird negativ gerechnet, weil nur dann Arbeit geleistet wird, wenn das System Energie verliert und ΔV positiv ist.

Anwendung des ersten Hauptsatzes auf das ideale Gas

Da beim idealen Gas zwischen den Molekülen keine Kräfte wirken, ist seine innere Energie U lediglich eine Funktion von T :

$$U = U(T) \quad (1.3)$$

Für das Differential dU ergibt sich dann

$$dU = \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_{T_0} \cdot dT \quad (1.4)$$

Die Erfahrung zeigt, dass $\left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_{T_0}$ über weite Teile konstant ist:

$$C_V = \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_{T_0} = \text{konstant} \quad (1.5)$$

1.2.3 Fundamentalprozesse des idealen Gases

1. Der isotherme Prozess: Einen isothermen Prozess haben wir genau dann, wenn T konstant ist. Aus dem ersten Hauptsatz folgt dann wegen $dU = n \cdot C_V \cdot dT$ und $dT = 0$:

$$dQ = -dW = p \cdot dV \quad (1.6)$$

Mit der Zustandsgleichung des idealen Gases (1.1) folgt:

$$dQ = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} dV \quad (1.7)$$

Integration führt zu:

$$\int_1^2 dQ = n \cdot R \cdot \int_1^2 \frac{1}{V} dV \quad (1.8)$$

$$Q = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

2. Der adiabatische Prozess: Ein thermodynamischer Prozess heisst dann adiabatisch, wenn während der Prozessführung keine Wärme des Systems nach aussen abgegeben wird. In der Realität bedeutet dies, dass die Prozessführung sehr viel schneller ist, als die Wärmediffusion. Wir nehmen also beim adiabatischen Prozess an, dass Q konstant und somit dQ null ist. Aus dem ersten Hauptsatz folgt dann:

$$dU = dW = -pdV \quad (1.9)$$

$$dU = nC_V dT$$

und somit:

$$nC_V dT = -n \cdot R \cdot T \frac{dV}{V} \quad (1.10)$$

Erneut liefert integrieren:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_V} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = -\frac{R}{C_V} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (1.11)$$

Mit der Definition des Adiabatenexponenten $\gamma = C_p/C_V$ folgt:

$$\frac{R}{C_V} = \frac{C_p - C_V}{C_V} = \gamma - 1$$

$$\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad (1.12)$$

und schliesslich:

$$T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1} = \text{konstant} \quad (1.13)$$

1.2.4 Der Carnot-Kreisprozess

Der CARNOT-Kreisprozess ist ein reversibel geführter Prozess, bestehend aus zwei je adiabatischen und isothermen Teilprozessen:

1. Isotherme Expansion:

$$dU = 0 \quad dQ = -dW_1$$

$$Q_1 = n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (1.14)$$

2. Adiabatische Expansion:

$$dQ = 0 \quad dW = dU$$

$$W_2 = C_V(T_2 - T_1)$$

$$= -C_V(T_1 - T_2) \quad (1.15)$$

3. Isotherme Kompression:

$$dU = 0 \quad dQ = -dW_3$$

$$Q_2 = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (1.16)$$

4. Adiabatische Kompression:

$$dQ = 0 \quad dW = dU$$

$$W_4 = C_V(T_1 - T_2)$$

$$= -C_V(T_2 - T_1) \quad (1.17)$$

Die vom System abgegebene Arbeit ist somit nach dem ersten Hauptsatz:

$$-W_{tot} = -W_1 - W_2 - W_3 - W_4$$

$$= Q_1 + Q_2$$

$$= n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (1.18)$$

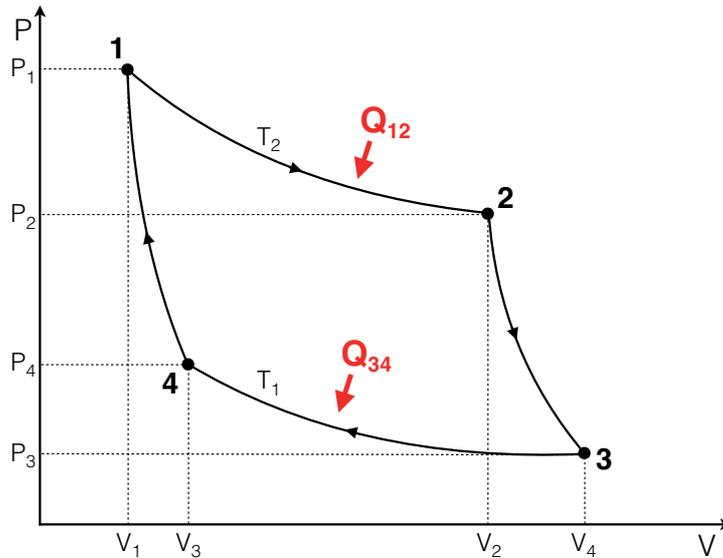


Abbildung 1.1: pV-Diagramm des Carnot-Kreisprozesses.

Aus $T \cdot V^{\gamma-1} = \text{konstant}$, der adiabatischen Zustandsgleichung, folgt nun:

$$\begin{aligned} T_1 \cdot V_2^{\gamma-1} &= T_2 \cdot V_3^{\gamma-1} \\ T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} &= T_2 \cdot V_4^{\gamma-1} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Werden die beiden letzten Gleichungen durcheinander dividiert, ergibt sich:

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} &= \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} \\ \left(\frac{V_2}{V_1}\right) &= \left(\frac{V_3}{V_4}\right) \end{aligned} \quad (1.20)$$

Damit ergibt sich für den durch

$$\eta_C = \frac{-W_{tot}}{Q_1} \quad (1.21)$$

definierten Carnot-Wirkungsgrad:

$$\begin{aligned} \eta_C &= \frac{-W_{tot}}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} \\ &= \frac{T_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \end{aligned} \quad (1.22)$$

1.2.5 Der Stirling-Prozess

Beim Stirling-Prozess werden die adiabatischen Äste durch zwei isochore ersetzt. Damit ergibt sich für das ideale Gas wegen $dV = 0$ aus dem ersten Hauptsatz:

Der isochore Prozess

$$dU = C_V \cdot dT \quad (1.23)$$

Die Berechnungen für den Wirkungsgrad des STIRLING-Motors η_S können somit wortwörtlich von η_C übernommen werden:

$$\eta_C = \eta_S \quad (1.24)$$

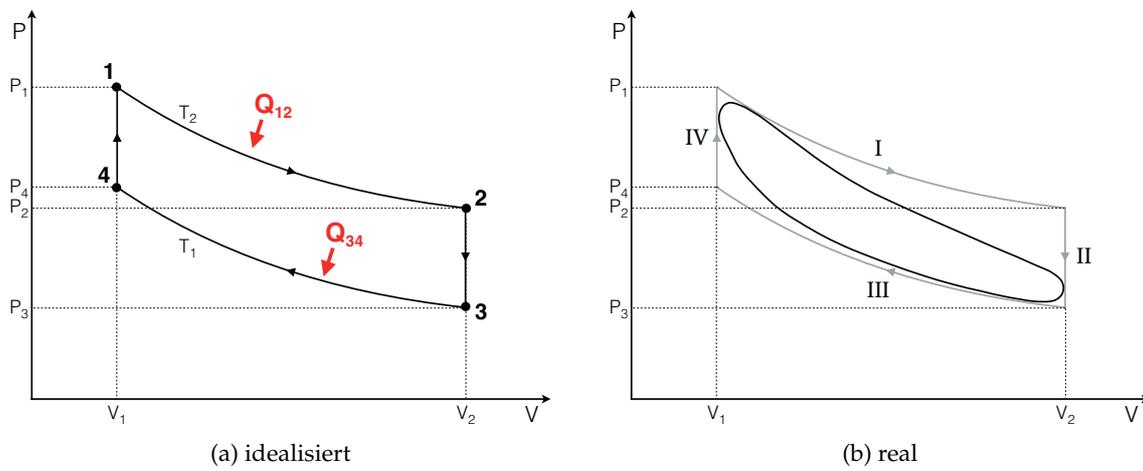


Abbildung 1.2: pV-Diagramm des Stirling-Kreisprozesses.

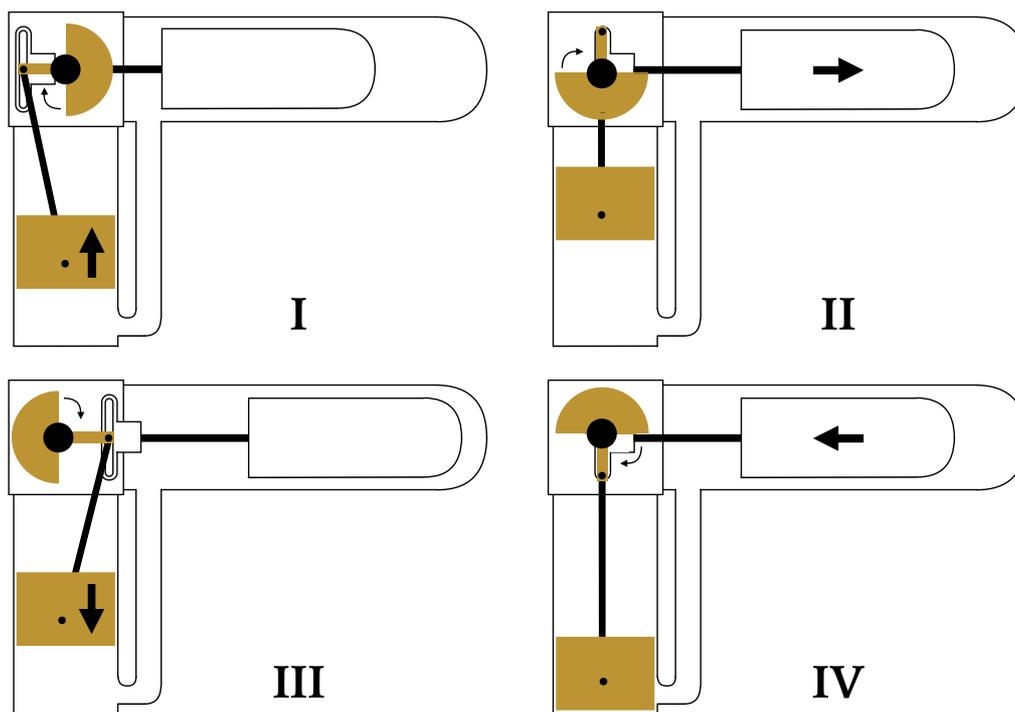


Abbildung 1.3: Funktionsweise des realen Stirlingmotors in den 4 Phasen des Kreisprozesses.

1.3 Experiment

1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
pVnT-Messgerät	1
Stirlingmotor mit Sensoreinheit	1
Digitales Oszilloskop, 40 MHz, 2 Kanal	1
Abgeschirmtes Kabel BNC, l = 750 mm	2
Drehmomentmesser	1
Motor/Generator-Einheit	1
Schiebewiderstand 330 Ohm, 1,0 A	1
Thermoelement, NiCr-Ni, -50...1100°C	2
Digitalmultimeter	2
Kamin für Stirlingmotor	1
Becherglas 500ml	1
Ethanol, Lösemittel (Brennspiritus), 1l	1
Spritze, 20 ml	1
Verbindungsleitung, 32 A, 500 mm, rot	2
Verbindungsleitung, 32 A, 500 mm, blau	3
Messzylinder 50 ml	1

1.3.2 Versuchsaufbau und Justage

Grundaufbau

- Schalte das pVnT-Messgerät ein.
- Verbinde die p- und V-Ausgänge des pVnT-Messgerätes mit dem Y- und X-Kanal des Oszilloskops.
- Schraube den metalligen Schutzzyylinder von den beiden Thermoelementen.

Kalibrierung des Messgerätes

Zur Auswertung werden die thermodynamischen Zustandsgrößen Druck p und Volumen V als analoges Spannungs-Signal aus dem pVnT-Messgerät in ein Oszilloskop gespiesen, die Temperatur T kann direkt am pVnT-Messgerät abgelesen werden. Dies bedeutet, dass das Gerät zuerst kalibriert werden muss. Dazu wird folgendermassen vorgegangen.

- Nach dem Einschalten zeigt das pVnT-Messgerät *cal* (Kalibrierung) an.
- Fülle das Becherglas mit etwas Wasser. Halte nun beide Temperaturfühler in das Wasser und drücke danach die Kalibrieren- ΔT -Taste am Gerät. Dies beeinflusst lediglich die Temperatur-Differenz zwischen beiden Elementen und nicht den Absolutwert. Die Anzeige zeigt nun *ot* (oberer Totpunkt) an. Das Gerät erfasst beide Messwerte und speichert ihre Differenz bis zum Ausschalten des Gerätes. Stecke nun für die Messung die Drahtspitzen der beiden Thermoelementen vorsichtig in die beiden Öffnungen oberhalb des Glaszylinders. Die Temperatur T_1 muss dabei der Temperatur am Ende des Zylinders entsprechen (wo bei der Messung der Brenner steht). Lege die beiden Kabel vorsichtig hin, so dass sich der Draht der Thermoelemente nicht ruckartig biegt.

- Die Volumenmessung wird kalibriert, indem der Arbeitskolben (Kolben aus Metall) in die Stellung gebracht wird, bei der im Stirlingmotor das kleinste Volumen zur Verfügung steht, d.h. der Arbeitskolben befindet sich in seinem tiefsten Punkt. In dieser Stellung ist die Taste Kalibrieren- V zu drücken. Das kleinste Volumen (32 cm^3) entspricht nun einer Spannung von 0 V , das grösste Volumen (44 cm^3) einer Spannung von 5 V .
- Falsches Kalibrieren führt zu einem Offset in der Volumenberechnung und damit zu einer Verformung des pV -Diagramms. Die Tasten für die Kalibriervorgänge haben während des weiteren Betriebes keine Funktion mehr. Ein neuer Kalibriervorgang kann nur durch Aus- und Einschalten des Gerätes veranlasst werden.
- Der Drucksensor misst die Druckdifferenz gegenüber dem Luftdruck p_0 . Lese dazu den relativen Luftdruck an der Wetterstation in den Praktikumsräumen ab. Zur Auswertung des pV -Diagramms muss nun ebenfalls die Druck-Ausgangsspannung des Messgerätes für die vorhandene Sensor-Messgerät-Kombination kalibriert werden. Verwende dazu die Spritze und ziehe den Kolben auf 20 ml heraus. Die Messung kann am Oszilloskop durchgeführt werden: Dazu wird das Oszilloskop eingeschaltet und überprüft, ob der YT-Modus gewählt wurde (sonst ins Display-Menü wechseln (,Display'-Knopf) und Knopf für Modus drücken bis ,YT' erscheint). Die Skalierung für die Channels (CH1 und CH2) sollte auf 2 V eingestellt sein (sonst Drehknöpfe verwenden bis unten links auf der Anzeige , 2 V ' für CH1 & CH2 erscheint). Die Zeitskala sollte 5 s betragen (sonst Drehknopf verwenden).
- Anschliessend wird das Schlauchstück von der Bodenplatte des Stirlingmotors abgezogen und über die Spritzenspitze gezogen. Durch Hereinschieben des Spritzenkolbens in ml-Schritten bis 10 ml wird nun der Druck schrittweise erhöht. Der Vorgang verläuft isotherm. Starte mit dem Hereinschieben des Spritzenkolbens erst, wenn die Signallinie am linken Displayrand des Oszilloskops erscheint. Halte für jede Position des Spritzenkolbens kurz an, auf dem Display ist eine Art ,Treppe' zu erkennen.
- Stecke den USB-Stick ins Oszilloskop und speichere direkt nach Abschluss der überdruckmessung das Bild durch Drücken der ,Print'-Taste (siehe Abb. A.1.1). Der Unterdruckbereich wird entsprechend durch Expansion vermessen, indem der Schlauch über die Spritze von 10 ml Volumen gezogen wird und nun das Volumen durch Herausziehen des Spritzenkolbens in ml-Schritten bis 20 ml vergrössert wird. Gehe analog vor wie beim überdruckbereich. Das Volumen des Schlauchstückes (ca. 0.07 ml) kann dabei vernachlässigt werden. Abbildung 1.4 zeigt ein Messbeispiel.
- Stülpe nun den Schlauch wieder über den Schlauchstutzen auf der Bodenplatte nahe dem Stirlingmotor.

Wärmeleistung des Brenners

- Das Alkoholvolumen wird vor und nach dem Versuch mit der Waage bestimmt. Die Dauer des Experimentes (Brennzeit des Brenners) wird mit einer Stoppuhr gemessen.

Darstellung und Erstellen des pV -Diagrammes

- Betrachte die beiden Spannungssignale auf dem Oszilloskop und überprüfe, ob die Spannung des Druckes etwa 2.5 V und die des Volumens etwa 0 V beträgt.

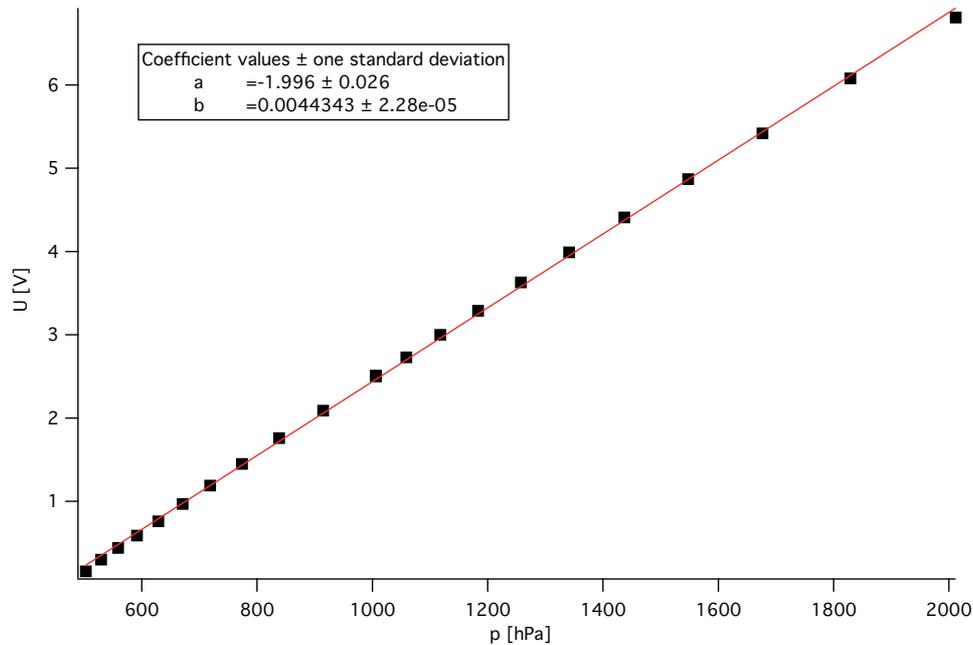


Abbildung 1.4: Kalibration der Druck-Ausgangsspannung als Funktion des Druckes p .

- Verschiebe die beiden Signale vertikal auf die absoluten Werte, um eine korrekte Absolutskala zu erreichen (kein Offset durchs Oszilloskop).
- Stelle nun das Oszilloskop unter *Display* auf *XY-Modus*.
- Stelle die Auflösungen so ein, dass ein Messpunkt bei (2.5/0) liegt.
- Drehe mit der Schraube den Docht ein wenig aus der Öffnung und zünde ihn mit dem Feuerzeug an. Starte die Stoppuhr.
- Drehe den Docht etwas runter, so dass nur eine kleine Flamme zu sehen ist.
- Setze den Kamin mit der Öffnung in Richtung Stirlingmotor über den Brenner und schiebe ihn bis zum Anschlag unter den Motor. Justiere nun die Höhe der Flamme so, dass sie knapp den Glaszylinder des Motors berührt.
- Stelle nun am Messgerät die obere Temperaturanzeige auf ΔT . Nun zeigt der untere Wert die Temperatur T_2 nahe des Arbeitskolbens an, der obere Wert zeigt den Unterschied zwischen diesem Temperaturwert und dem höheren Temperaturwert T_1 , nahe der Flamme, an.
- Beobachte den Temperaturanstieg und warte bis der Temperaturunterschied etwa 100° beträgt.
- Gib nun dem Schwungrad einen Anstoß im Uhrzeigersinn, um den Motor zu starten. Wenn er sich nicht starten lässt, braucht es entweder etwas mehr Schwung, oder der Temperaturunterschied ist noch zu gering. Falls Du unsicher bist, hole den Assistenten/die Assistentin zu Hilfe.
- Wenn der Motor etwa 900 Umdrehungen/min erreicht hat, sollte ein klar ersichtlicher Stirling-Kreisprozess auf dem Oszilloskop zu sehen sein.

- Beginne nun erst mit den Messungen, wenn die Temperaturen T_1 , T_2 und die Rotationsfrequenz etwa konstant sind. Die untere Temperatur sollte ca. 70°C entsprechen.
- Um das Bild zu speichern, setze einen USB-Stick ins Oszilloskop ein und drücke die Taste ‚Speichern/Abrufen‘. Anschliessend kann das Bild durch Drücken der ‚Print‘-Taste auf den USB-Stick gespeichert werden.
- Stoppe die Stoppuhr.

Effektive Mechanische Energie

- Um den Motor mit einem bestimmten Drehmoment zu belasten, wird die Skala des Drehmoment-Meters auf der Bodenplatte und das innere Metallstück des Zeigers (Prony'scher Zaum mit Neigungsgewicht) auf der Achse vor dem Schwungrad befestigt.
- Die Reibung zwischen dem Zeiger und dem befestigten Metallstück kann mit der Feststellschraube variiert werden. Die Regulierung muss dabei äusserst vorsichtig vollzogen werden, damit gewährleistet ist, dass der Zeiger nicht zu schwingen beginnt.
- Beginne die Messungen mit einem kleinen Drehmoment.
- Messe für ca. 10-15 verschiedene Drehmomente (inkl. ohne Belastung).
- Warte nach jeder Änderung bis das Drehmoment, die Rotationsfrequenz und die Temperaturen ungefähr konstant sind, bevor die Werte und das pV -Diagramm aufgezeichnet werden (Bild am Oszilloskop speichern und n , T_2 , ΔT pro Drehmoment notieren).

1.3.3 Aufgaben zur Auswertung

- Erstelle ein pU -Diagramm aus der Druck-Sensor-Kalibrierung und bestimme aus der Steigung den U - p -Faktor.
Zur Erstellung des pU -Diagramm muss die jeweilige Spannung U für die Spritzenkolbenstellung gemessen werden (aus den ‚Treppen‘-Bilder, siehe Anhang). Also z.B.: 15 ml \rightarrow 1.8 V usw. Die Spritzenvolumen müssen jeweils in den Druck p umgerechnet werden. Verwende dazu:

$$p_0 \cdot 20 \text{ ml} = \text{const. (für überdruckbereich)}$$

$$p_0 \cdot 10 \text{ ml} = \text{const. (für Unterdruckbereich)}$$

Wobei p_0 dem Luftdruck ist, welcher an der Wetterstation abgelesen wurde.

- Bestimme auch den Umrechnungsfaktor $U - V$ aus den Angaben zur Spannung U der kleinsten und grössten Stellung des Arbeitskolben ($V = 32 \text{ cm}^3$ entspricht 0 V usw). Erstelle mit Hilfe der Umrechnungsfaktoren $U - p$ und $U - V$ ein pV -Diagramme für das erste erstellte Oszilloskopbild (ohne Drehomentbelastung, beschrifte die Achsen mit p bzw. V).
- Bestimme die Wärmeleistung P_H des Brenners. Verwende dazu:

$$P_H = h \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

Wobei Δm der Massendifferenz des Brenners und Δt der Messzeit entspricht. Der Heizwert von Ethanol h ist 26.8 MJ/kg und der Brennwert von Ethanol ist 29.7 MJ/kg .

- Bestimme nun aus den Messwerten der Drehmoment-Messung jeweils die effektive mechanische Arbeit W_m , die totale effektive Arbeit W_{pV} sowie die Reibungsarbeit W_r eines Zyklus (für jedes verwendete Drehmoment) und zeichne sie als Funktion der Rotationsfrequenz in ein Diagramm (alle Messwerte in ein einzelnes Diagramm).

Es gilt:

$$W_m = 2 \cdot \pi \cdot M \quad W_r = W_{pV} - W_m$$

Dabei ist M das am Stirlingmotor angelegte Drehmoment.

- Bestimme aus den Messreihen die mechanische P_m und zeichne sie als Funktion der Rotationsfrequenz n in ein Diagramm. Es gilt:

$$P_m = W_m \cdot n$$

Dabei ist n die Rotationsfrequenz (in Hz/s).

- Erkläre, wieso sich der reale Stirling-Kreisprozess vom idealisierten unterscheidet.
- Berechne für 5 Punkte in der Mitte des pV -Diagrammes die Stoffmenge n und bilde daraus den Mittelwert als representative Stoffmenge im Zylinder (verwende das erstellte pV -Diagramm). Für die Berechnung wird die ideale Gasgleichung verwendet.
- Berechne den totalen Wirkungsgrad η_{tot} des Zyklus bei maximaler mechanischer Leistung des Stirlingmotors. Es gilt:

$$\eta_{tot} = \frac{W_m}{W_H} \quad W_H = \frac{P_H}{n}$$

- Berechne zudem die individuellen Komponenten des Wirkungsgrades (Wirkungsgrad des Brenners η_H , Carnot Wirkungsgrad η_C , Innerer Wirkungsgrad η_{in} und mechanischer Wirkungsgrad $\eta_m \rightarrow$ ebenfalls für den Zyklus bei maximaler mechanischer Leistung).

$$\eta_H = \frac{|W_1|}{W_H} \quad \eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\eta_{in} = \frac{W_{pV}}{|W_t|} \quad \eta_m = \frac{W_m}{W_{pV}}$$

$$W_1 = -\nu \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad W_t = -\nu \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

1.4 Literatur

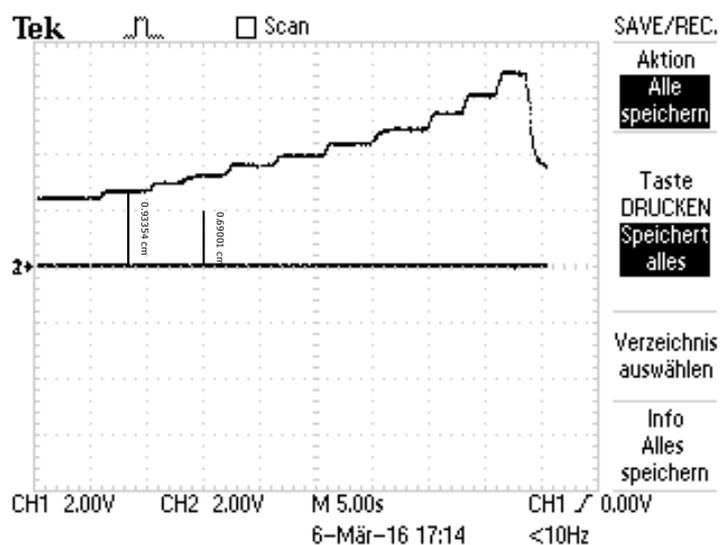
- W. Demtröder, Experimentalphysik 1, "Mechanik und Wärme", Springer Verlag, Berlin
- D. Meschede, "Gerthsen Physik", Springer Verlag, Berlin

A.1 Anhang: Bestimmung von W_pV und Umrechnungsfaktor $U-p$

Zur Ausmessung der Oszilloskopbilder kann mit der Software Inkscape wie folgt vorgegangen werden.

A.1.1 Umrechnungsfaktor $U-p$

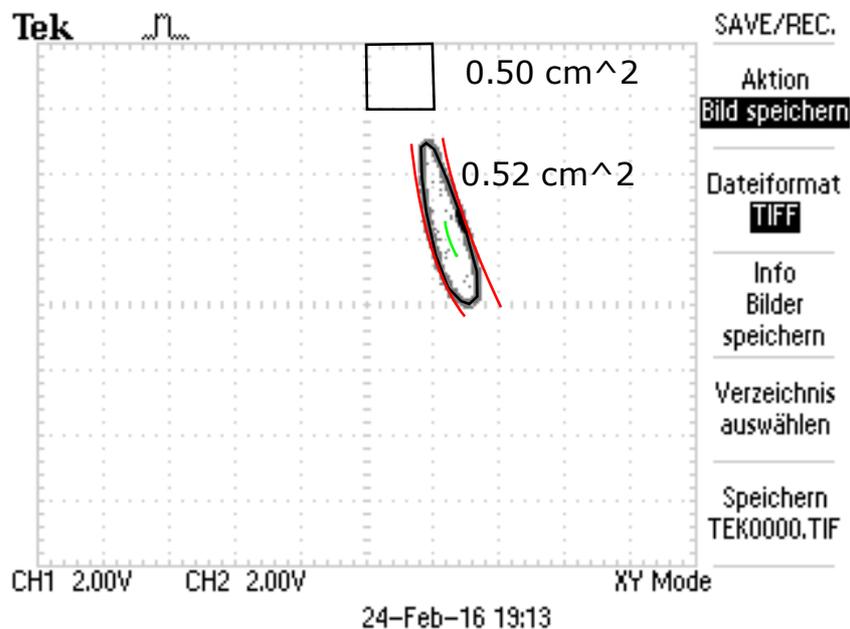
Für den Umrechnungsfaktor $U - p$ muss das ‚Treppen‘-Bild vermessen werden. öffne dazu die Tiff-Datei mit Inkscape. Wähle das Bézier-Kurven-Werkzeug (Tastenkürzel: CTRL+F6). Zeichne zuerst einer Quadratkante entlang eine gerade Linie (halte dazu beim Ziehen der Linie die Taste CTRL gedrückt). Mache einen Doppelklick, um die Linie zu ‚stoppen‘. Wähle nun ‚Erweiterungen‘ → ‚Pfad visualisieren‘ → ‚Pfad ausmessen...‘. Wähle im geöffneten Dialogfenster den Mess-Typ ‚Länge‘ und die Längeneinheit ‚cm‘. Die Schriftgrösse muss eventuell angepasst werden (auf ca. 4-5 px). Die Genauigkeit sollte grösser als 3 gewählt werden. Klicke nun auf ‚Anwenden‘ und anschliessend auf ‚Schliessen‘. Nun wurde die Linie gemessen. Die Kantenlänge entspricht einer Spannung von 2 V. Um die Spannung des jeweiligen Spritzenvolumens zu berechnen, werden die einzelnen ‚Stufen‘ der Treppe gemessen. Ziehe dazu jeweils eine Linie von der Treppenhöhe zur Hauptachse und messe die Linien aus.



A.1.2 Bestimmung von W_{pV}

Zur Bestimmung von W_{pV} muss die Fläche der Kreisprozesse auf den Oszilloskopbildern gemessen werden. öffne dazu die Tiff-Datei mit Inkscape. Wähle das Bézier-Kurven-Werkzeug (Tastenkürzel: CTRL+F6). Zeichne zuerst einem Quadrat entlang eine Linie (halte dazu beim Ziehen der Linie die Taste CTRL gedrückt). Starte bei einem Eckpunkt eines Quadrats und klicke anschliessend nacheinander auf die drei weiteren Eckpunkte. Mache einen Doppelklick auf den Startpunkt, um die Linie zu ‚stoppen‘. Wähle nun ‚Erweiterungen‘ → ‚Pfad visualisieren‘ → ‚Pfad ausmessen...‘. Wähle im geöffneten Dialogfenster den Mess-Typ ‚Gebiet‘ und die Längeneinheit ‚cm‘. Die Schriftgrösse muss eventuell angepasst werden (auf ca. 4-5 px). Die Genauigkeit sollte grösser als 3 gewählt werden. Klicke nun auf ‚Anwenden‘ und anschliessend auf ‚Schliessen‘. Nun wurde die eingeschlossene Fläche gemessen.

Die Fläche eines Quadrats entspricht einer Arbeit von: $2V \cdot \text{Umrechnungsfaktor } U-V \cdot 2V \cdot \text{Umrechnungsfaktor } U-p'$ (in Joule). Nun wird ein Pfad entlang des Kreisprozesses gezeichnet (schliesse den Pfad mit Doppelklick auf den Startpunkt). Vermesse die Fläche des Kreisprozesses. Jetzt kann die Arbeit W_{pV} durch Vergleich mit dem Einheitsquadrat bestimmt werden.



Für die Stoffmengen Bestimmung sollten 5 Punkte auf der grünen Linie (siehe Beispiel-Diagramm oben) gewählt werden (in etwa). Die Temperatur entspricht dabei dem Durchschnitt von T_1 und T_2 .