

Die Stirling Maschine

Die Stirling Maschine oder der Heißluftmotor ist eine Wärmekraftmaschine, bei der ein Gas abwechselnd mit einer Wärmequelle und einer Kühlung in Kontakt gebracht wird. Dies führt in einem Kolben stark angenähert zu isochoren Druckänderungen und zu isothermen Volumenänderungen. Dadurch wird ein Schwungrad angetrieben.

Wir haben einen mechanischen Wirkungsgrad von $\eta = (15 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$ und sechs Leistungswirkungsgrade bestimmt.

Die PG 268-II:

Tutor:	Sing,	Cornelia	
	Bednarczyk,	Diana	196230
	Fleischer,	Fabian	197376
	Guyot,	Daniel	194649
	Könnecke,	Rene	197367
	Sturm,	Matthias	194362
	Südmeyer,	Heinrich	197655
	Torabi,	Ramin	197364

Protokollanten:

Könnecke,	Rene	Theorieteil, Auswertung und Resümee
Torabi,	Ramin	Allgemeines, Aufbau, Durchführung und Layout
Bednarczyk,	Diana	Bildbearbeitung

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Titelblatt mit Abstract	1
Inhaltsverzeichnis	2
1 Allgemeines zur Stirling Maschine	3
1.1 Was ist die Stirling Maschine?	3
1.2 Die Stirling Maschine in der Historie	3
2 Vorüberlegungen	4
2.1. Der Carnot- Kreisprozeß	4
2.2. Der Stirling- Kreisprozeß	7
3 Aufbau	9
3.1 Geräteliste	9
3.2 Versuchsaufbau	9
4 Durchführung	11
5 Auswertung - Bestimmung des realen Wirkungsgrades	12
5.1 Mechanischer Wirkungsgrad	12
5.2 Leistungswirkungsgrad	13
6 Resümee	15
7 Literaturverzeichnis	15
8 Anhang (Photos)	16

1. Allgemeines zur Stirling Maschine

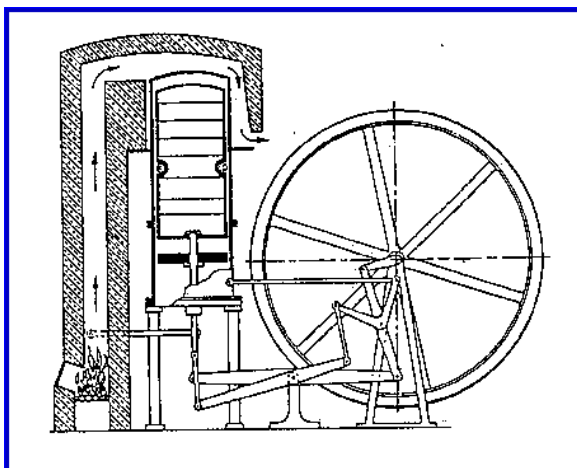
1.1 Was ist die Stirling Maschine?

Mit der Stirling Maschine nutzt man den Temperaturunterschied zweier Wärmereservoirs zur Erzeugung mechanischer Arbeit. Erreicht wird dies dadurch, daß in einem Zylinder immer dann ein Gas (meist Luft, Helium oder Wasserstoff) erwärmt wird, wenn der Arbeitskolben (der Stirling Motor hat zwei Kolben - näheres in 2.2) das Gas am stärksten komprimiert und wenn es expandiert ist, wird es abgekühlt. Dadurch wird ein Schwungrad, das mit dem Kolben verbunden ist, angetrieben. Umgekehrt kann man, wenn man mechanische Arbeit hinein steckt, mit dem Stirling Motor auch kühlen und erwärmen.

1.2 Die Stirling Maschine in der Historie

Der Reverend Robert Stirling, Pfarrer der Kirche von Schottland, erfand die Stirling Maschine eigentlich nur, da die damals üblichen Dampfmaschinen bisweilen explodierten und auf diesem Weg schon einige Arbeiter getötet oder verkrüppelt wurden. Die Stirling Maschine war in dieser Hinsicht bei weitem sicherer und konnte seinen Gemeindemitgliedern ein derartiges Schicksal ersparen. Im Jahre 1816 bekam Robert Stirling, dann das Patent auf seine "air engine". Später setzte sich aufgrund der üblichen Betriebstemperaturen der Name "hot air engine" also Heißluftmotor durch.

Abb. 1 Zeichnung der ersten Stirling Maschine



Seit dem wurden die Stirling Motoren, wie sie heute meist heißen weiterentwickelt, noch in den 1970'ern steckten US Automobilkonzerne Millionen von Dollar in die Entwicklung von Stirling-Autos. Aber der Stirling Motor ist immer noch sehr teuer und nicht sehr leistungsstark, daher wurde er trotz der hohen

Effizienz nicht zivil eingesetzt. Heutzutage werden Stirling Maschinen in militärischen U-Booten, Kühlern von Kryogenanlagen und in Hochleistungsinfrarotnachtsichtgeräten (auch als Kühlung - auf 80K) benutzt; dabei werden mit Stirling Maschinen Wirkungsgrade von bis zu 50% erreicht. Neueste Forschungen benutzen den Stirling Motor zur Umwandlung von Sonnenenergie (Wärme) in mechanische Bewegungen zum Antrieb eines Stromgenerators.

2. Vorüberlegungen

2.1. Der Carnot-Kreisprozeß

In meiner Beschreibung der Kreisprozesse werde ich über Zustandsänderungen schreiben, die ich nicht weiter noch einmal erläutern werde. Deshalb bringe ich an dieser Stelle eine kurze Erläuterung der einzelnen Zustandsänderungen.

Eine isobare Zustandsänderung bedeutet, daß der Druck konstant bleibt. Dabei verändern sich nur die Temperatur und das Volumen. In einem Zylinder mit Kolben versucht man den Druck konstant zu halten, indem man bei Erwärmung bzw. Abkühlung den Kolben herauszieht bzw. hineindrückt.

Bei einer isochoren Zustandsänderung verändern sich die Temperatur und der Druck, wobei das Volumen konstant bleibt. Abkühlung bzw. Erwärmung senkt bzw. erhöht den Druck in einem festen Gefäß.

Die isotherme Zustandsänderung ist eine Druck- und eine Volumenänderung bei konstanter Temperatur. Um eine isotherme Zustandsänderung aufrecht zu halten, wird bei den meisten technischen Prozessen Wärme von außen zugeführt bzw. abgeführt und zwar so dass sich die Temperatur im System nicht ändert.

Eine adiabatische Zustandsänderung hält keine Größe konstant, nur der Term

pV^κ insgesamt bleibt konstant. Hierbei ist $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$.

Die innere Energie bleibt dabei konstant $dU=0$. Nach dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre ist somit $dW=dQ$ bzw. $-pdV=C_vdT$.

Adiabatische Zustandsänderungen sind in der Realität schwer umzusetzen. Damit solche Prozesse stattfinden, muss entweder das System sehr gut isoliert sein oder sie müssen sehr schnell ablaufen. Jedenfalls darf kein nennenswerter Wärmeaustausch mit der Umwelt auftreten.

Weitere Hinweise, Erläuterungen und Erklärungen sind im Demtröder und im Bergmann-Schäfer.

Zum besseren Verständnis des Stirling Kreisprozesses werden wir zuerst den Carnot-Kreisprozess beschreiben. Der Carnot-Kreisprozess ist ein idealisierter Kreisprozess, welcher nur eine theoretische Bedeutung für die Berechnung des bestmöglichen mechanischen Wirkungsgrades hat. Dieser Kreisprozess ist technisch nicht umsetzbar, da ein ideales Gas verwendet wird und jegliche Reibung und Wärmeverluste vernachlässigt werden.

Der Carnot-Prozess läßt sich anhand eines Kolbenzylinders beschreiben, siehe Abb. 2. Das dazugehörige Diagramm ist in der Abb. 2.1 bzw. 2.2 zu erkennen. In diesem p-V-Diagramm sind die Kurven von 1-2 und 3-4 isotherme Zustandsänderungen. Die Kurven 2-3 und 4-1 stellen adiabatische Zustandsänderungen dar. Die eingeschlossene Fläche der 4 Kurven entspricht der Nutzenergie bzw. der mechanisch geleisteten Arbeit.

Die Beschreibung des Kreisprozesses beginnt am Punkt 1:

In diesem Punkt besitzt das ideale Gas bereits einen hohen Druck, ein kleines Volumen und die Temperatur T_2 mit $T_2 > T_1$. Durch Zuführen von thermischer Energie von außen verrichtet das Gas mechanische Arbeit, der Kolben des Zylinders wird herausgedrückt. Die zugeführte Energie wird nicht im System gespeichert ($dT=0$). Es findet eine isotherme Expansion statt, bei der der Druck sinkt.

Punkt 2:

Nachdem die gesamte zugeführte thermische Energie in mechanische Energie umgewandelt wurde, besitzt das Gas selbst genügend thermische Energie, um den Kolben noch weiter herauszudrücken. Da in diesem theoretischen Prozess jeglicher Wärmeaustausch mit der Umwelt verneint wird, sinkt bei der adiabatischen Expansion neben dem Druck auch die Temperatur von T_2 auf T_1 .

Punkt 3:

Ab diesem Punkt bewegt sich der Kolben wieder in den Zylinder hinein. Bei der Bewegung in den Zylinder komprimiert der Kolben das Gas. Hierbei wird die mechanische Energie in thermische Energie umgewandelt und sofort dem System entzogen. Dies geschieht durch Wärmeabgabe in ein kühleres Reservoir. Somit wird bei der isothermen Kompression der Druck erhöht und das Volumen verkleinert.

Punkt 4:

Die weitere Bewegung des Kolbens in den Zylinder hinein und die theoretische Annahme, das System sei nicht mehr in der Lage Wärme abzugeben, veranlasst das Gas die in thermische Energie umgewandelte mechanische Energie im System zu speichern. Durch die adiabatische Kompression steigt somit nicht nur der Druck, sondern auch die Temperatur.

Der Kreisprozess beginnt von vorn, sobald die adiabatische Kompression wieder das System in den Zustand von Punkt 1 gebracht hat.

Berechnung des mechanischen Wirkungsgrades:

Aufgrund der gegenseitigen Aufhebung der Volumenarbeiten in den adiabatischen Teilprozessen ist es ausreichend als Integrationsgrenzen V_1 und V_2 zu nehmen. Nähere Erläuterungen sind im Niedrig, 1992, S. 152-153 zu finden. Die Berechnung des Wirkungsgrades sieht nun wie folgt aus:

$$W_{ges} = \int_{V_1}^{V_2} p_2 dV - \int_{V_1}^{V_2} p_1 dV \quad \text{mit} \quad p = \frac{RT}{V}$$

folgt

$$W_{ges} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT_2}{V} dV - \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT_1}{V} dV \quad \Rightarrow \quad W_{ges} = R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)(T_2 - T_1)$$

Der Wirkungsgrad ist der Quotient aus aufgewendeter Energie und Nutzenergie, also

$$\eta = \frac{W_{Nutz}}{W_2} \quad W_2 = R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) T_2$$

mit

Daraus ergibt sich die Formel

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Abb.2:

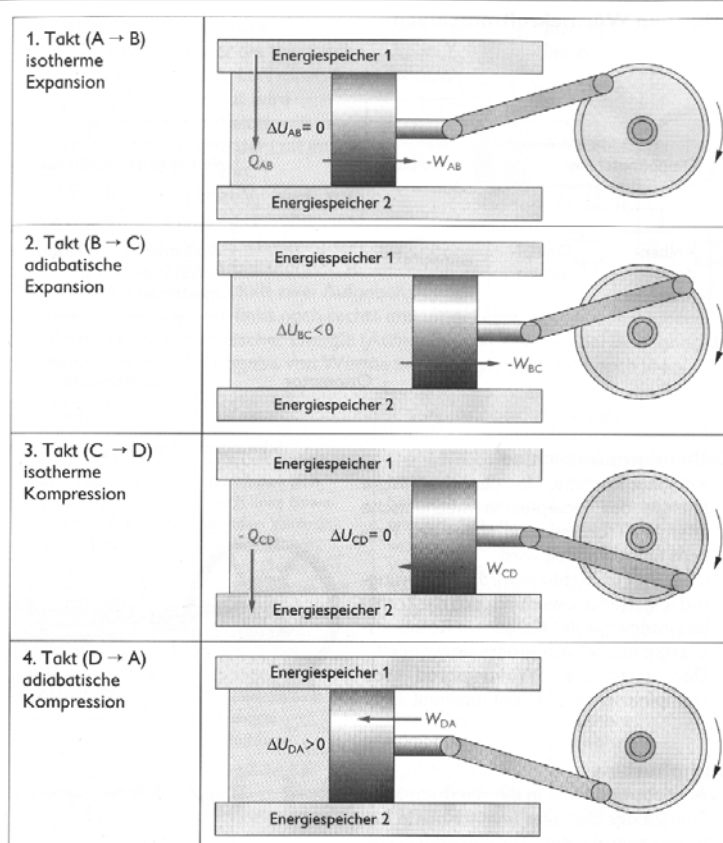


Abb.2.1:

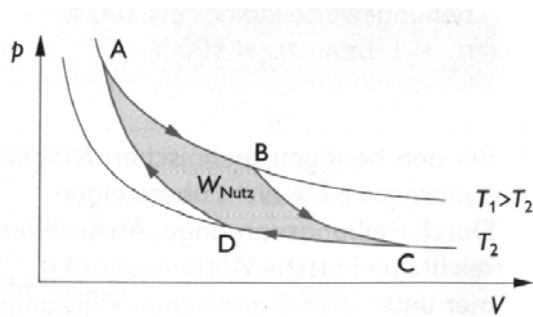
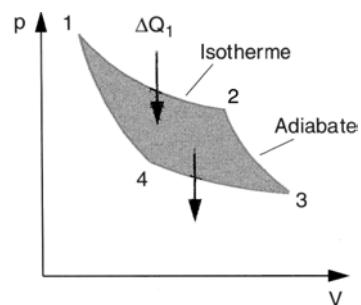
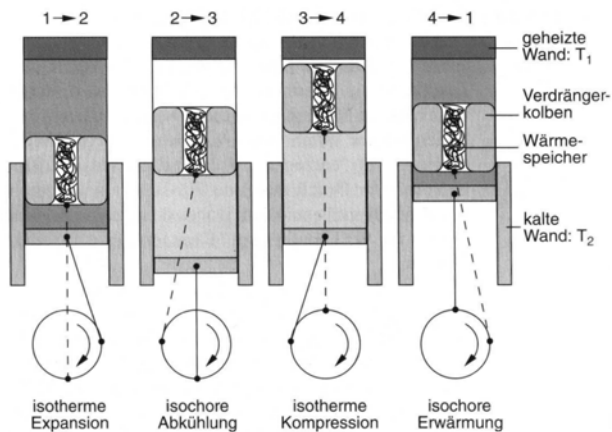


Abb.2.2:



2.2. Der Stirling- Kreisprozeß



In einer ähnlichen Art und Weise wie der Carnot- Kreisprozess funktioniert auch der Stirling- Kreisprozess. Im Gegensatz zum Carnot- Prozess ist es möglich, den Stirling- Prozess technisch umzusetzen. Hierbei werden nur die adiabatischen durch isochoren

Zustandsänderungen ersetzt. Bei der technischen Umsetzung ist es nicht möglich ein System so zu manipulieren, daß es keinen Wärmeaustausch mit der Umwelt eingeht und gleichzeitig die angegebenen adiabatischen Zustandsänderungen vollständig ausführt.

Das p-V-Diagramm des Stirling-Kreisprozesses ist in der Abb.3 dargestellt. Könnte dieser Prozess mit einem idealen Gas realisiert werden, so würde es den gleichen Wirkungsgrad wie der Carnot-Kreisprozess aufweisen. Nichtsdestotrotz wird versucht den Wirkungsgrad des Stirling-Kreisprozesses, technisch realisiert in einem Stirling-Motor, so gut wie nur möglich dem optimalen Wirkungsgrad anzupassen. Dies geschieht durch Zwischenspeicherung der Wärme in einem zweiten Kolben, dem Verdrängerkolben. Wie der Name schon sagt speichert dieser Kolben nicht nur die Energie, sondern, verdrängt auch das Gas vom kühlen zum warmen Reservoir und umgekehrt. Der zweite Kolben, der Verdrängerkolben, befindet sich um 90° phasenverschoben gegenüber dem Arbeitskolben am Schwungrad, siehe Abb.4.

Abb.3

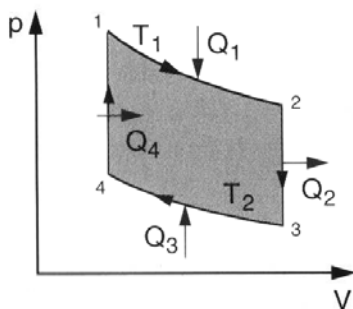
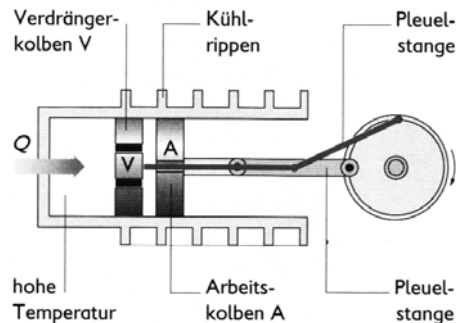


Abb.4



Zusätzlich zu dem mechanischen Wirkungsgrad des Stirling-Kreisprozesses läßt sich auch der Leistungswirkungsgrad des Stirling-Motors bestimmen.

Dabei ist

$$\eta = \frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{ein}}} = \frac{2\pi nl(mg + F)}{UI}$$

Mit n = Anzahl der Umdrehungen des Schwungrades pro Sekunde

l = Hebelarm

m = Größe der am Klotz hängenden Masse

g = Erdbeschleunigung

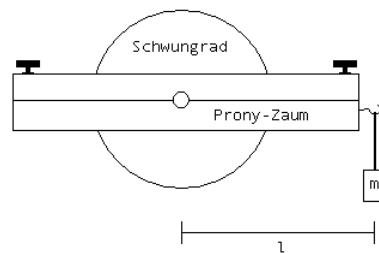
F = Kraftwirkung des Schwungrades (am Federkraftmesser gemessene Kraft)

U = Spannung der Heizspirale

I = Stromstärke der Heizspirale

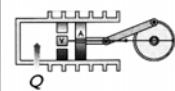
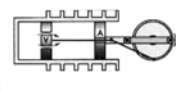
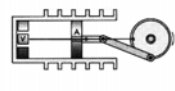
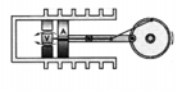
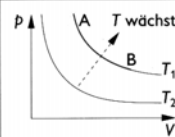
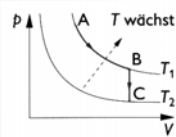
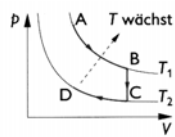
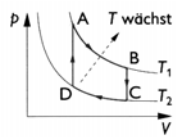
Für die Leistungsentnahme wurde ein Prony-Zaum, wie in der Skizze verwendet.

Skizze:



Herleitung und tiefgreifendere Erklärungen sind im Manual für den Stirling-Motor des PL's.

Zusammenfassend seien noch einmal die 4 Takte des Stirling-Motors in einem Schema dargestellt (Wissenspeicher Physik, 1995, S.169).

1. Takt	2. Takt	3. Takt	4. Takt
Durch Wärmezufuhr expandiert die Luft im linken heißen Teil des Zylinders. Dadurch wird der Arbeitskolben nach rechts bewegt.	Die Luft strömt durch den sich nach links bewegenden Verdrängerkolben hindurch. Dabei gibt sie Wärme an den Verdrängerkolben und die Umgebung ab. Ihre Temperatur sinkt.	Der sich nach links bewegende Arbeitskolben komprimiert die Luft wieder. Durch Wärmeabgabe bleibt die Temperatur konstant.	Die Luft strömt durch den sich nach rechts bewegenden Verdrängerkolben hindurch. Dabei nimmt sie vom Verdrängerkolben Wärme auf. Die Temperatur steigt.
isotherme Expansion	isochore Abkühlung	isotherme Kompression	isochore Erwärmung
			
			

3. Aufbau

3.1 Geräteliste

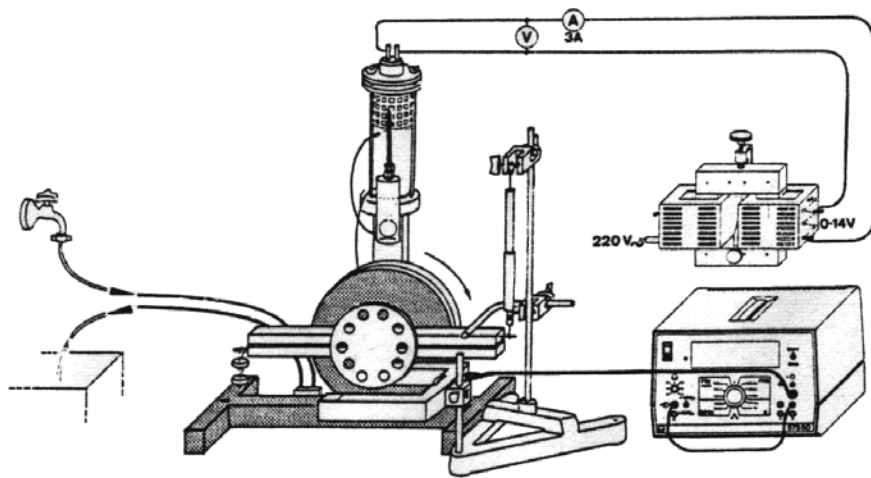
PL-Inventarnummer:

1. Stirlingmotor, Steuerteil und Zubehör (Leybold)	822c
2. Netzgerät für Stirlingmotor, [25V, 25A]	012b
3. Netzgerät [30V, 2.5A] (EA 7030-025)	014b
4. Universalzähler (Impo Electronics MC24 E)	042a
5. Gabellichtschranken für Universalzähler	043b
6. Federkraftmesser	863a
7. HeNe-Laser [$\lambda=632.8$ nm] (Melles-Griot)	731b
8. Schirm (und Millimeterpapier)	735
9. (2x) Multimeter	034b
10. Manometer	313b
11. Spiegelreflexkamera (Canon T70)	100
12. Zubehör für Canon-Kamera	751b
13. Präzisionswaage	821d

Schläuche, Stative, Ständer usw.

3.2 Versuchsaufbau

Abb. 5



Ursprünglich planten wir den Aufbau aus dem Manual des Zubehörs zum Stirling Motor [Abb.5] zu übernehmen, aber leider sind die Lichtschranken des PL zu breit um zwischen das Schwungrad und die dafür vorgesehene Lochscheibe zu passen. Daher haben wir die Lochscheibe weggelassen und statt dessen unseren eigenen "Impulsgeber" für die Lichtschranke gebaut. Dieser bestand aus einem (pfeilförmig) geschnittenen Stück Pappe, das auf das Schwungrad geklebt wurde.

Außerdem hat der Stirling Motor von Leybold-Heraeus im PL einen Spiegel, der sich in Abhängigkeit von der Position des Arbeitskolbens (also in Abhängigkeit zum Volumen) horizontal dreht und in Abhängigkeit des Druckes im Zylinder vertikal. Wir haben dies ausgenutzt um zusätzlich Projektionen derartiger p-V Diagramme zu photographieren. [siehe Abb.6]

Abb. 6

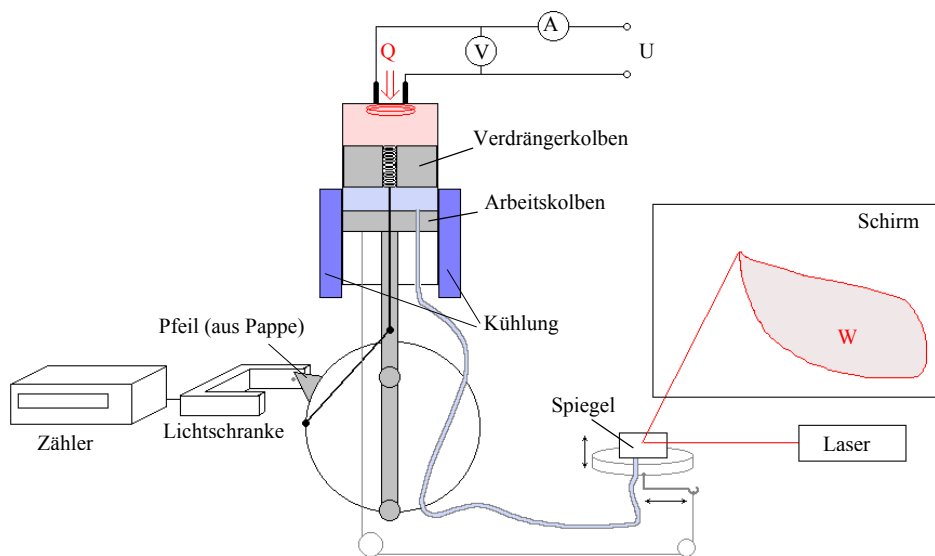
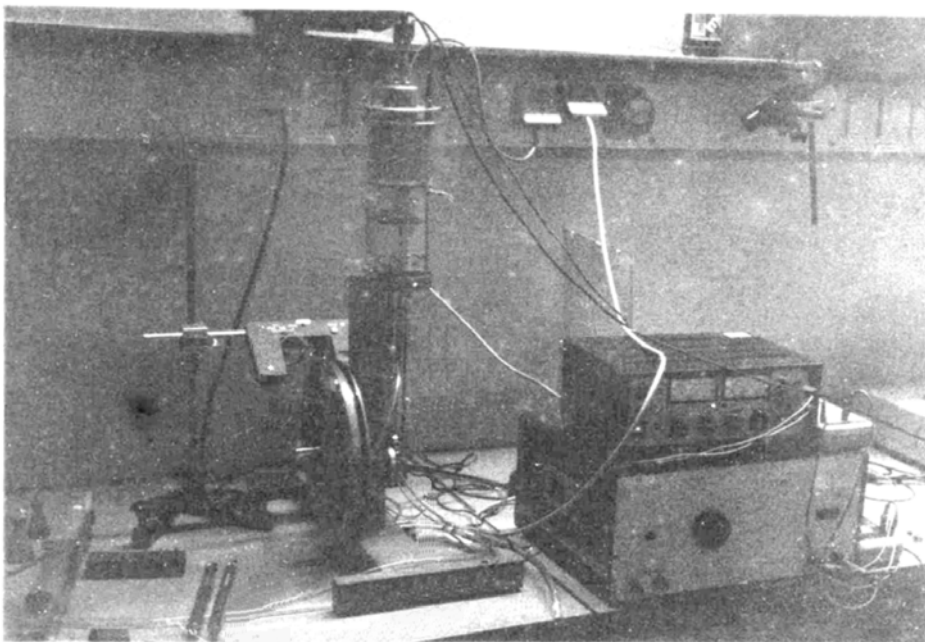


Abb. 7



Zu [Abb.7]:

Leider ist die Aufnahme des Aufbaus nicht sonderlich gut zu erkennen, daher beschreibe ich sie kurz. Im linken Teil des Bildes steht der Stirling Motor, direkt hinter ihm ist die Lichtschranke angebracht. Neben dem Stirling Motor stehen die Netzgeräte für den Stirling Motor (unten) und die Lichtschranke. Neben jedem Netzgerät liegt ein Multimeter. Der flache Kasten der am rechten Bildrand noch halb erkennbar ist, ist unser Zähler. Links neben dem Stirling Motor liegen noch die Bremsvorrichtung und zwei Federkraftmesser. Mit einiger Phantasie kann man im oberen rechten Bildrand den Laser erkennen. Der Schirm mit dem Millimeterpapier ist hinter den Netzgeräten. Links im Bild sind

noch ein paar nicht benutzte Gewichte. Einen lästigen Ständer haben wir vom Bild aus Gründen der Übersichtlichkeit entfernt.

4. Durchführung

Zuerst haben wir (wie immer) alles zusammengetragen und aufgebaut. Dabei fiel uns auf, daß (wie schon im Aufbau erwähnt) die Lichtschranke zu breit ist, um den Aufbau aus [Abb.5] zu benutzen. Daher, weil wir zusätzlich noch das p-V Diagramm aufnehmen wollten und da wir keine Gewichte benutzt haben, ergibt sich im Endeffekt der Aufbau aus [Abb.6].

Anfangs sollte man erstmal prüfen, ob der Stirling Motor selbst funktioniert, so hatten wir z.B. anfänglich ein Netzteil, das einfach nicht genug Leistung erbrachte (012b verwenden!).

Ansonsten war es sehr hilfreich vorher das ganze zugehörige Manual zu lesen (unbedingt vor dem Experimentaltermin - das Manual ist recht lang); ist aber nicht nötig. Ich empfehle aber zumindest die hervorgehobenen Teile zu lesen und zu beachten. Die meisten der erwähnten Punkte dienen dem Erhalt der Glühwendel, aber ich denke, das die von Leybold erwähnten 20V eindeutig viel zu hoch sind, effektiv sollte der Stirling Motor höchstens mit 18V - besser weniger - betrieben werden. (Bei uns und zwei anderen Projektgruppen sind in neun Tagen mindestens drei Glühwendeln geschmolzen.)

Außerdem müssen die Kabel, die an der Glühwendel angeschlossen sind, regelmäßig auf ihre Temperatur überprüft werden und sie sollten nicht direkt in den Stirling Motor gesteckt werden, da dieser oben sehr heiß wird und die Kabel schmelzen könnten. Wir haben Verbindungstücke aus Metall zum Überbrücken benutzt.

Die Bestimmung des Leistungswirkungsgrades geht eigentlich recht schnell (ist in vier Stunden zu schaffen), aber die Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades ist recht langwierig. Wir haben ihn bestimmt, indem wir den, vom oben erwähnten beweglichen Spiegel, reflektierten Laserstrahl auf Millimeterpapier fallen ließen. Dieses haben wir dann mit einer Sekunde Belichtungszeit photographiert. Den folgenden Experimentaltermin haben wir dann unter anderem zum Entwickeln benutzt.

Den Leistungswirkungsgrad haben wir bestimmt, indem wir die Bremsvorrichtung auf das Schwungrad gelegt haben (viel stärker kann man diesen Stirling Motor nicht mehr bremsen, ohne ihn anzuhalten) und wie im Manual des Zubehörs beschrieben, mit Federkraftmessern die Kraft gemessen haben. Wir haben zwei genommen, da der Stirling Motor das Schwungrad sehr ungleichmäßig beschleunigt und es leichter ist, Werte abzunehmen, die einfach ablesen kann, statt sie schätzen zu müssen. Dafür haben wir keine Gegengewichte benötigt.

5. Auswertung - Bestimmung des realen Wirkungsgrades

5.1. Mechanischer Wirkungsgrad

Wie in der Theorie besprochen wird der mechanische Wirkungsgrad

durch die Formel $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ dargestellt.

Aufgrund der Tatsache, daß wir einen bereits vorgefertigten Aufbau des Stirling-Motors verwendeten, der keine Vorrichtung für die Temperaturmessung beinhaltet, mußten wir den mechanischen Wirkungsgrad anders bestimmen. Wie in der Durchführung schon erklärt, nahmen wir Aufnahmen von der projizierten Fläche, die der Arbeit des Kolbens entspricht. Um herauszufinden, wie das Verhältnis bzw. η der Arbeitsfläche zur Fläche unterhalb des Graphen von T_2 ist, spielt es keine Rolle, welches Verfahren verwendet wird. Zum einen ist es möglich den Flächeninhalt zu bestimmen, durch auszählen der Kästchen, zum anderen besteht die Möglichkeit die jeweiligen Flächen, aufgenommen auf Photos, zu wiegen, Voraussetzung $\rho = \text{konstant}$. Wir entschieden uns für das Wiegen. Die projizierte Fläche, mit einer Kamera aufgenommen, wurde nun ausgeschnitten und gewogen. Sie wog 0,225 Gramm. Die Meßgenauigkeit liegt bei 5%. Zum einen enthält die ausgeschnittene Fläche einen Toleranzbereich von 2 mm^2 , zum anderen liegt der Toleranzbereich der Meßwaage bei 0,01 Gramm. Somit ergibt sich für die Fläche ein Gewicht von $0,225 \pm 0,011$ Gramm. Leider war es nur möglich, eine der vielen Aufnahmen zu verwenden. Nur auf dieser einen Aufnahme war auch noch das Millimeterpapier zu erkennen, welches uns davor bewahrte die Auswertung für den mechanischen Wirkungsgrad fallen zu lassen. Es wurde zwar eine Kalibrierung photographiert, doch diese Aufnahme stimmte nicht mehr mit den Bildern aus der Messung überein. Allein können die anderen Bilder nicht verwendet werden, da wir, auf Grund der Kalibrierung, nicht darauf achteten die Bilder parallel zum Boden zu photographieren. Das hat zur Folge, dass wir nicht genau bestimmen können, wo das Maximum der Amplitude in p- und V-Richtung genau liegt.

Bei unserem auswertbaren Bild lag eine Spannung von 18V an. Schwieriger war es die untere Fläche bzw. die Fläche von T_1 zu bestimmen. Die Nulllinie konnte auf dem Photo nicht mit abgebildet werden. Das Millimeterpapier für die Kalibrierung nutzten wir um auf dem Photo eine Niveaulinie zu erstellen. Dies ist auch ein Grund, warum alle weiteren Photos für die Auswertung nichtig sind, auf ihnen ist kein Bezugspunkt bzw. Niveaulinie erkennbar. Die Fläche unter der Niveaulinie konnten wir berechnen und auf einem beliebigen anderem Photo mit gleichem Photopapier nachstellen. Alle 3 Flächen, die Arbeitsfläche, die Fläche unter der Niveaulinie und die Fläche zwischen diesen beiden Flächen, wurden mit einem Toleranzbereich von 5 mm^2 ausgeschnitten und ausgewogen. Alle Flächen wurden mit einmal gewogen. Dadurch bleibt der Toleranzbereich der Meßwaage bei 0,01 Gramm. Zusammen wogen die Flächen 1,5 Gramm. Mit einer

Meßungenauigkeit von 1% erhalten wir ein Gewicht von $1,5 \pm 0,015$ Gramm.

Daraus ergibt sich folgender Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{0,225 \pm 0,011}{1,5 \pm 0,015} \approx (15 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$$

In Prozent ausgedrückt, sind dies rund 15%.

5.2. Leistungswirkungsgrad

$$\eta = \frac{2\pi nl(mg + F)}{UI}$$

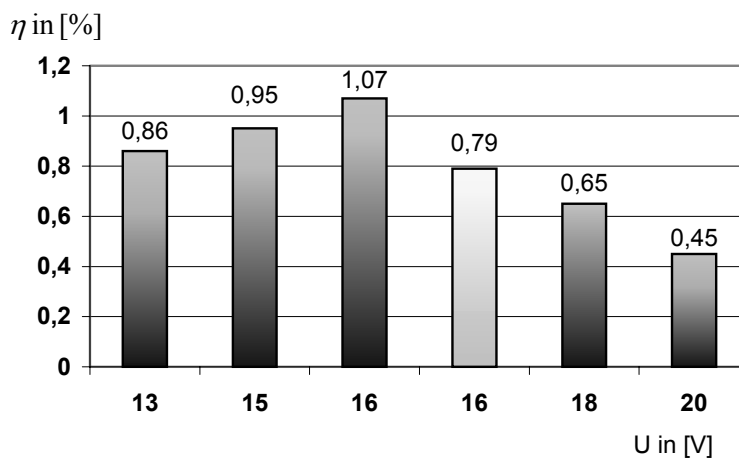
Hier verweise ich auf die Formel des Leistungswirkungsgrades aus der Theorie. Wie aus der Durchführung hervorgeht, nutzten wir kein Gegengewicht auf dem Bremsklotz. Damit fällt der Term (mg) weg und wir erhalten die Gleichung.

$$\eta = \frac{2\pi n l F}{UI}$$

In der folgenden Tabelle und dem nachfolgenden Diagramm werden Wirkungsgrade in Abhängigkeit verschiedener Spannungen gezeigt:

U in [V]	I in [A]	n in [1/s]	F in [N]	η in [%]
13	14,8	1,70	0,72	0,86
15	15,0	1,95	0,70	0,95
16	15,7	2,77	0,62	1,07
16	15,9	2,08	0,62	0,79
18	17,6	2,30	0,57	0,65
20	19,5	2,20	0,72	0,45

η - U - Diagramm



Die Diskrepanz der Wirkungsgrade bei gleicher Spannung liegt vor allem an der hohen Fehlerquelle des Bremsklotzes. Nur alleine das Auflegen

des Bremsklotzes verursachte unterschiedliche Reibung. Mit Absicht wurde daher dieses Diagramm ohne Fehlerbalken erstellt. Es ergibt keinen Sinn Fehlerbalken anzugeben, bei dem der Fehler nicht abgeschätzt werden kann. Wie in dem Diagramm an den beiden Werten für 16V erkennbar bzw. berechenbar ist, liegt der Fehler des Bremsklotzes bei mindestens 23,3%, unter Berücksichtigung der relativen Fehler der restlichen Fehlerquellen, siehe unten. Auch wurde hierbei bereits darauf geachtet, dass alle anderen Einflüsse konstant gehalten wurden. Trotz dieser hohen Fehlerquelle läßt sich im Diagramm ein Maximum erahnen. Das Maximum des Leistungswirkungsgrades könnte durchaus bei 16V liegen. Der Bremsklotz könnte auch der Hauptverursacher für den Abfall des Wirkungsgrades bei steigender Spannung sein. Um so geringer die Spannung ist, um so langsamer wird das Schwungrad. Bei langsamerer Umdrehung des Schwungrades könnte für einen Bruchteil der Sekunde Haftreibung eintreten und somit eine größere Kraft F hervorrufen. Dies wäre für ein schneller drehendes Schwungrad schwieriger. Auch jedes Mal die gleiche Reibung mit dem Bremsklotz zu erzeugen ist sehr schwer, wenn nicht sogar utopisch. Schaffe man es die Reibung bei gleichen Spannungen und die Umdrehungen des Schwungrades bei unterschiedlichen Spannungen konstant zu halten, so wäre eine sehr gute Auswertung möglich. Anhand solch einer Auswertung ließe sich die Abhängigkeit des Leistungswirkungsgrades von der Spannung gut zeigen. Hier müßte dann auch jede kleine Fehlerquelle in Betracht gezogen werden, die vorher von der großen Fehlerquelle überschattet wurde.

Aufgrund der äußerst hohen Fehlerquelle des Bremsklotzes lassen sich alle weiteren Fehlerquellen vernachlässigen. Nur für die Statistik geben wir hier noch einmal die Toleranzbereiche plus die relativen Fehler ($\Delta x / \bar{x}$) der verschiedenen Fehlerquellen an:

Spannung	:	0,05 V	$\Delta x / \bar{x} = 0,3 \%$
Stromstärke	:	0,05 V	$\Delta x / \bar{x} = 0,3 \%$
Drehzahl	:	0,005 s ⁻¹	$\Delta x / \bar{x} = 0,2 \%$
Kraft	:	0,01 N	$\Delta x / \bar{x} = 1,5 \%$
Länge	:	0,005 m	$\Delta x / \bar{x} = 0,6 \%$

Die relativen Fehler sind, wie jeder erkennt, vernachlässigbar klein gegenüber der großen Fehlerquelle des Bremsklotzes.

Zuletzt noch das Bild, welches ausgewertet wurde, plus ein zweites ganzes Bild von der selben Einstellung. In den weiteren Bildern erkennt man, daß auch bei anderen Einstellungen gute Aufnahmen gemacht wurden.

6. Resümee

Wird dieser Versuch in zwei Teilen betrachtet, Theorie- und Experimentierteil, so können wir sagen, der Theorieteil ist interessant und relativ leicht zu verstehen, wobei die technische Umsetzung trotz des vorgefertigten Aufbaus ziemlich schwierig ist. Zum einen war es uns nicht möglich die Temperatur zu messen, weder mit einem optischen Temperaturmeßgerät noch mit einem Thermoelement, zum anderen war die Arbeit mit dem Bremsklotz mehr als nur unpräzise. Zusätzlich mußten wir sehr wachsam gegenüber dem Schwungrad sein. Stoppt das Schwungrad bei angelegter Heizspannung, so glüht die Heizspirale ziemlich schnell durch.

Aufgrund dessen, daß die Reibung schwer abzuschätzen ist und das Schwungrad bei etwas stärkerer Reibung abzustoppen droht, ist die Durchführung an sich ganz leicht - laßt einfach den Bremsklotz weg - nur in Bezug auf eine Auswertung sehr schwer. In anderen Worten, der „Prony-Zaum“ ist für den Stirling-Motor aus dem PL unbrauchbar.

In dem Fall, in dem wir den Bremsklotz nicht brauchten, also Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades, erhielten wir relativ zu anderen Gruppen ein gutes Meßergebnis.

Unser mechanischer Wirkungsgrad berechnete sich auf 15 %, im Vergleich zu 10 % einer anderen Gruppe.

Der Leistungswirkungsgrad ist bei uns schlechter ausgefallen. Dieser lag zwischen 0,45 und 1,07 %, gegenüber 4 % aus dem Manual.

Unsere Idee war es, die Arbeitsfläche mit einem Laser auf ein Blatt Millimeterpapier zu projizieren und dann diese zu photographieren. Die Idee an sich ist gut, jedoch muß an der Umsetzung noch gefeilt werden, sonst lohnt sie sich nicht. Daher war diese Methode für uns, aufgrund einiger kleiner Fehler, nicht wirksam genug. Auch das Wiegen ist nur begrenzt besser geeignet. Es muß vorher gut überlegt sein, wie diese Methode angewendet wird, zum Beispiel Größe des Bildes und somit Größe der auszuwertenden Fläche oder Feinheit der Waage. Jedoch das Auszählen der Kästchen ist auch nicht einfach.

Trotz aller Schwierigkeiten, ein Versuch zum Wiederholen. Hier läßt sich schließlich noch sehr viel verbessern, zum Beispiel bessere Kühlung, bessere Erwärmung, Kontrolle der Reibung und der Drehzahl und so weiter. Wie? Eure Ideen sind gefragt.

7. Literaturverzeichnis

J.Grehn, J.Krause, „Metzler Physik“, Schroedel-Verlag 1999, 3.Auflage

Rudolf Göbel, „Wissenspeicher Physik“, Cornelsen-Verlag 1995

H.Niedrig, „Physik“, Springer-Verlag 1992

Manual für den Stirling-Motor des Pl's

Demtröder

Bergmann-Schäfer

8. Anhang (Photos)