

ST Der Stirling-Motor als Wärmekraftmaschine

Grundlagen

Hauptsätze der Thermodynamik, Entropie, allgemeine Gasgleichung, Wärmekapazität, Wirkungsgrad; Carnotprozess/Stirlingprozess: Prinzip, Gemeinsamkeiten und Unterschiede; Thermodynamische Grundlagen zu Wärmekraftmaschinen, Wärmepumpen und Kältemaschinen.

Literatur

- Gerthsen/Kneser/Vogel: *Physik*, Springer-Verlag, 14. Auflage, Kap. 5.3
- Demtröder, *Experimentalphysik I*, Springer-Verlag, 2. Auflage, Kap. 10.3.11
- M. Werdich: *Stirling-Maschinen - Grundlagen-Technik-Anwendungen*, 3. Auflage, ökobuch Verlag Stauffen bei Freiburg 1994
- LEYBOLD-HERAEUS, Gebrauchsanweisung 388 18/20 zum Heißluftmotor, PDF-Datei <http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/studium>

1. Fragen zur Vorbereitung & Protokoll

- Was bedeuten die Begriffe „Wärmereservoir“ und „Kältereservoir“? Inwiefern können der beheizte Zylinderoberteil und der gekühlte Zylinderunterteil als Wärme- bzw. Kältereservoir bezeichnet werden?
- Welche Funktion hat der Regenerator im Stirling-Kreisprozess? Ist die Kupferwolle eine gute Realisierung eines Regenerators?
- Berechnen Sie den theoretischen Wirkungsgrad des reversiblen Stirling-Kreisprozesses. Orientieren Sie sich an der Berechnung des Wirkungsgrades des Carnot-Prozesses. Was muss man voraussetzen, wenn man den Stirling-Prozess mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung berechnet?

2. Aufgabenstellung

1. Ermittlung der Reibungsverluste des Heißluftmotors.
2. Ermittlung des realen und idealen Wirkungsgrads durch die Bestimmung der vom Motor abgegebenen Arbeit aus einer Drehmomentmessung an der Motorachse.
3. Bestimmung des Wirkungsgrads durch Aufnahme des pV -Diagramms des Heißluftmotors.

Berücksichtigen Sie hierbei insbesondere die folgenden Punkte:

- Warum wird der Strom nicht mit einem Multimeter gemessen?
- An welchen Stellen der Koordinatenachsen des pV -Diagramms liegen die Minima und Maxima von Druck und Volumen?
- Ist die aus dem pV -Diagramm ermittelte Arbeit tatsächlich die vom Arbeitsgas abgegebene Arbeit? Welchen Einfluss hat die Kolbenreibung?
- Erläutern Sie die Unterschiede der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der zugeführten Energie, der abgegebenen Arbeit und der sich daraus ergebenden Wirkungsgrade!
- Bei der theoretischen Betrachtung müssen einige Vereinfachungen getroffen werden. Welchen Einfluss haben diese auf die Messungen?

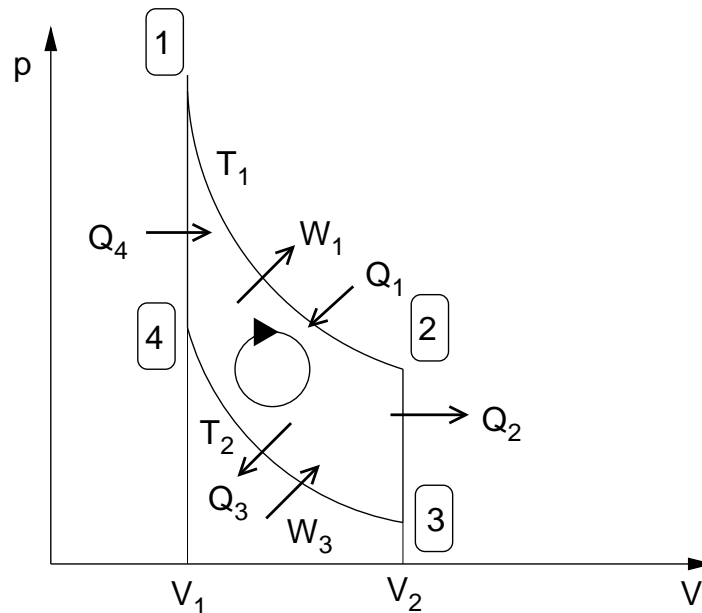
3. Funktionsprinzip des Stirling-Motors

Der dem Versuch zugrunde liegende Stirling-Prozess besteht aus zwei Isothermen und zwei Isochoren (vgl. Abb. ST.1). Eigentlich sollte er damit technisch einfacher zu realisieren sein als eine Carnot-Maschine, da dort sich ausschließende Anforderungen an das Material gestellt werden. Die Zylinderwände sollen einmal optimal wärmeleitend sein (isothermer Teilprozess), beim nächsten (adiabatischen) Teilprozess sollen sie aber ideale Isolatoren sein. Doch obwohl der Stirling-Motor z.B. vor dem Otto-Motor entwickelt wurde, behinderten technische Probleme, wie eine verschleiß- und reibungsarme Konstruktion der aufwändigen Mechanik und das Fehlen eines geeigneten Wärmezwischenspeichers, seine Entwicklung. Erst heute gewinnt der Stirling-Motor auch unter ökologischen Gesichtspunkten, da er nicht auf fossile Brennstoffe angewiesen ist, eine zunehmende Bedeutung.

Der Stirling-Prozess ist zumindest näherungsweise beim Stirling-Motor verwirklicht. Das Arbeitsgas (Luft) befindet sich in einem Zylinder, der von einem beweglichen Arbeitskolben abgesperrt wird. Im Gaskolben befindet sich ein zweiter beweglicher Kolben, der sogenannte Verdrängerkolben. Der Arbeitskolben ist für die zyklische Expansion und Kompression des Arbeitsgases zuständig, während der Verdrängerkolben das Gas im Laufe einer Periode so verschiebt, dass es einmal mit dem Wärmereservoir und einmal mit dem Kältereservoir in Kontakt kommt. Somit ist der Arbeitskolben für die Volumensteuerung und der Verdrängerkolben für die Temperatursteuerung zuständig.

Takt 1 ($1 \rightarrow 2$) ist die **isotherme Expansion bei konstanter Temperatur** T_1 .

Dazu bleibt der Verdrängerkolben in seiner Stellung. Das Gas wird in Kontakt mit der warmen Wand der Temperatur T_1 – dem Wärmereservoir – gehalten. Während das Arbeitsgas die Wärme Q_1 aufnimmt, dehnt es sich aus und verschiebt den Arbeitskolben, so dass in dieser Phase vom Gas die Arbeit W_1 verrichtet wird.

Abbildung ST.1: Idealisierter Stirling Prozess im pV -Diagramm

Takt 2 ($2 \rightarrow 3$) ist die **isochore Wärmeabgabe bei konstantem Volumen** V_2 . Der Arbeitskolben bleibt in seiner Stellung. Das Arbeitsgas strömt durch den sich in Richtung Wärmereservoir bewegendem Verdrängerkolben und damit durch den Regenerator (Kupferwolle in einem Kanal im Verdrängerkolben). Durch diesen Kontakt mit dem kälteren Regenerator der Temperatur $T_1 < T_2$ gibt es einen Teil seiner Energie an ihn ab. Das Gas wird auf die Temperatur T_2 abgekühlt (idealisiert) und gibt dabei die Wärme Q_2 ab. Dadurch nimmt der Druck ab. Im Anschluss daran kommt es in Kontakt mit dem Kältereservoir in Form der wassergekühlten Zylinderseitenwand der Temperatur T_2 .

Takt 3 ($3 \rightarrow 4$) ist die **isotherme Kompression bei konstanter Temperatur** T_2 . Der Verdrängerkolben bleibt in seiner Stellung. Das Arbeitsgas ist im thermischen Kontakt mit der kalten Wand der Temperatur T_2 . Der Arbeitskolben komprimiert das Gas und verrichtet dabei die Arbeit W_3 an ihm, dadurch steigt der Druck. Die Temperatur ändert sich jedoch nicht, da das Arbeitsgas die Wärme Q_3 an das Kältereservoir abgeben kann.

Takt 4 ($4 \rightarrow 1$) ist die **isochore Wärmezufuhr bei konstantem Volumen** V_1 . Der Arbeitskolben bleibt in seiner Stellung, während sich der Verdrängerkolben in Richtung des Kältereservoirs bewegt. Dabei strömt das Gas der Temperatur T_2 durch den Regenerator, wobei es die vorher abgegebene Wärmeenergie Q_4 wieder aufnimmt und sich auf die Temperatur T_1 erwärmt. Der Druck steigt weiter, bis sich das Gas wieder im Ausgangszustand befindet.

Dieser Kreislauf und die Stellungen beider Kolben sind in Abb. ST.2 dargestellt. Im Praktikum wird der Heißluftmotor der Firma LEYBOLD-HERAEUS (vgl. Abb. ST.3) als Beispiel

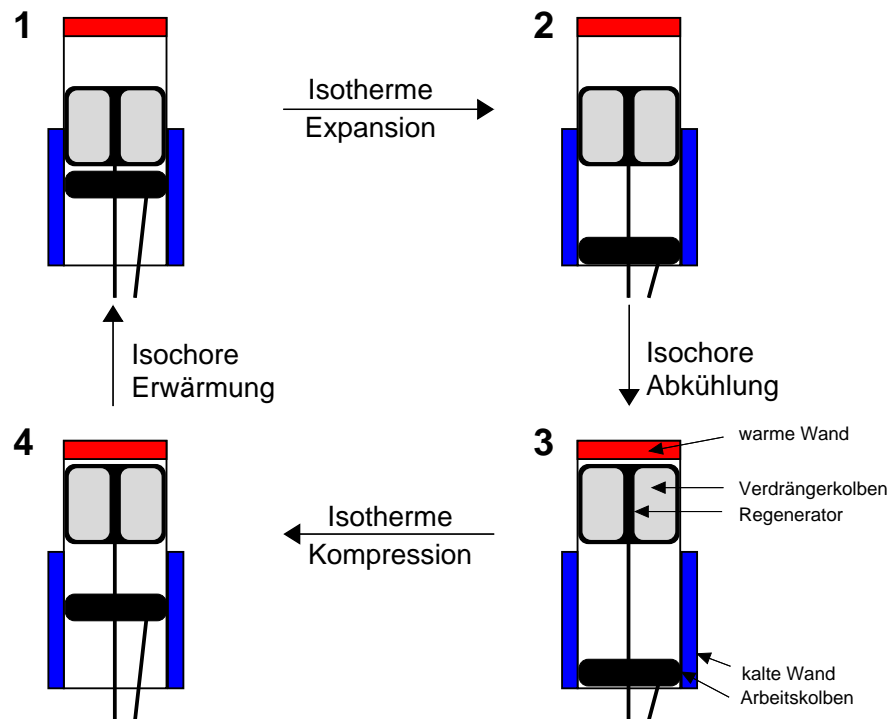


Abbildung ST.2: Stellung von Arbeits- und Verdrängerkolben während der Arbeitstakte

für die Realisierung einer Stirling-Maschine verwendet. Der Heißluftmotor besteht aus einem gläsernen Zylinder, welcher sich durch einen Zylinderaufsatz mit Heizwendel luftdicht verschließen lässt. Der untere Teil des Zylinders ist doppelwandig und ermöglicht so den Kontakt mit dem Kältereservoir in Form von Kühlwasser.

Da der gläserne Zylindermantel die Kühlwirkung des Wassers beeinträchtigt, wird das Kühlwasser zusätzlich durch eine koaxiale Zu- und Ableitung in der Kolbenstange des Verdrängerkolbens auch dem metallischen Unterteil des Verdrängerkolbens zugeführt, dessen enge Schlitze das Arbeitsgas passieren muss, wenn es von einem Reservoir ins andere geschoben wird. Eine quantitative Bestimmung der abgeführten Wärmemenge ist möglich, indem man den Wasserdurchsatz und die Temperaturänderung des Kühlwassers misst.

Der Verdrängerkolben weist neben der wassergekühlten Metallplatte mit den engen Schlitzen einen axialen Kanal auf, der mit Kupferwolle gefüllt ist. Durch diesen Kanal stehen die Gasanteile des Zylinders ober- und unterhalb des Verdrängerkolbens miteinander in Verbindung. Die Kupferwolle übernimmt die Rolle des Regenerators. Sie soll während der isochoren Erwärmung bzw. Abkühlung die Wärmeenergie an das Gas abgeben bzw. vom Gas aufnehmen und hat damit die Funktion eines Zwischenspeichers für die Wärmen Q_2 und Q_4 .

Der Arbeitskolben, welcher das Gas periodisch komprimiert und entspannt, schließt den Zylinder nach unten luftdicht ab. Er ist zusammen mit dem Verdrängerkolben an einem Schwungrad befestigt, wobei der Verdrängerkolben dem Arbeitskolben um 90° vorausseilt. Die Bewegung beider Kolben im Zylinder wird in Abb. ST.4 dargestellt.

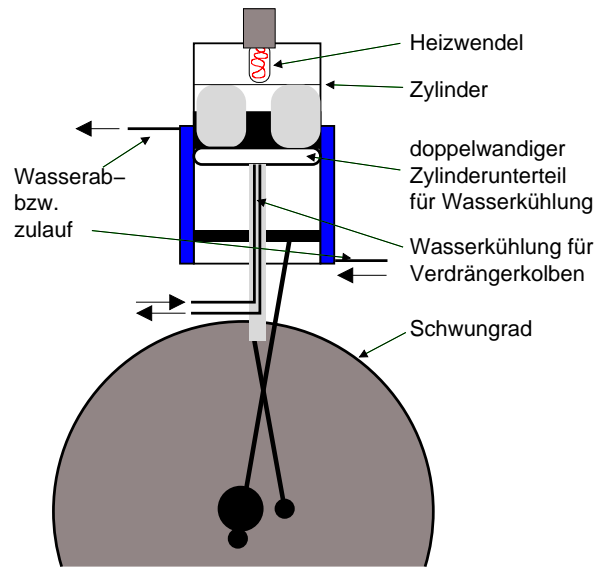


Abbildung ST.3: Prinzipieller Aufbau des Heißluftmotors von LEYBOLD-HERAEUS

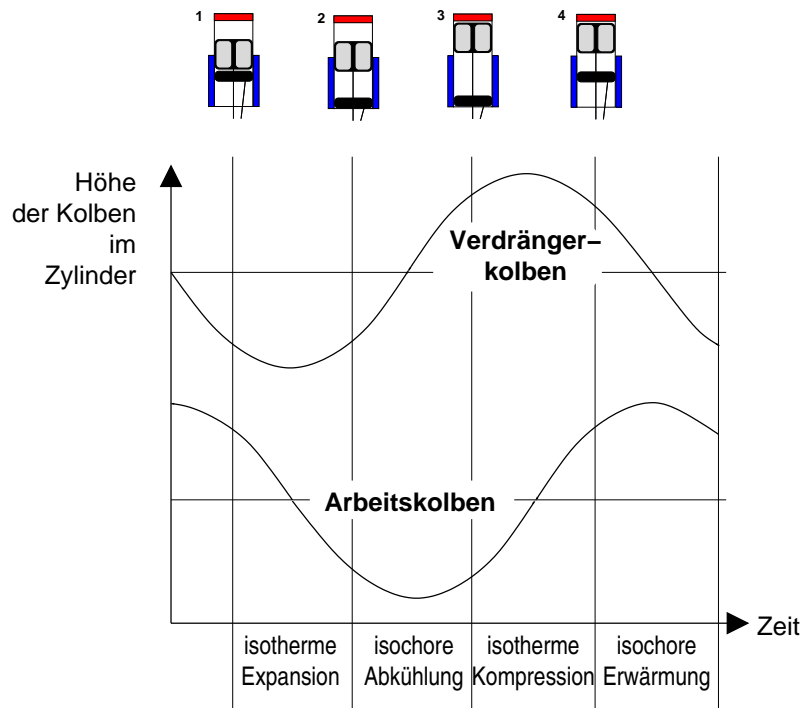


Abbildung ST.4: Phasenbeziehung zwischen Arbeits- und Verdrängerkolben des Heißluftmotors

4. Versuchsdurchführung

4.1. Bestimmung der Reibungsverluste

Zubehör: Heißluftmotor (ohne Zylinderkopf und Heizwendel)
 Elektromotor
 Wasserbehälter (ca. 40 l)
 Wasserpumpe
 Messzylinder und Stoppuhr
 Durchlaufgefäß mit Thermometer
 Lichtschranke mit Lochscheibe und Digitalzähler

Zur Bestimmung des Energieverlustes durch Reibung des Kolbens an der Zylinderwand wird der Stirling-Motor bei offenem Zylinderkopf extern durch einen Elektromotor angetrieben. Unter der Voraussetzung, dass die dabei auftretende Reibungswärme Q_R vollständig an das Kühlwasser abgegeben wird, kann man durch die dem Kühlwasser zugeführte Energie $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ den Reibungsverlust messen, da $Q_{\text{H}_2\text{O}} = Q_R$ gilt.

$Q_{\text{H}_2\text{O}}$ wird mittels der kalorischen Zustandsgleichung $Q_{\text{H}_2\text{O}} = c_{\text{H}_2\text{O}} m \Delta T$ bestimmt. Dazu werden die Temperaturerhöhung ΔT des Kühlwassers, der Kühlmassendurchfluss $\frac{dm}{dt}$ und die Drehzahl f des Motors gemessen. Die gesuchte Energieabgabe pro Motorzyklus erhält man dann aus

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V1}} = \frac{c_{\text{H}_2\text{O}} \Delta T}{f} \frac{dm}{dt} \quad (\text{ST.1})$$

Um die Größe ΔT zu ermitteln, trägt man die Kühlwassertemperatur als Funktion der Zeit in ein Diagramm (vgl. Abb. ST.5) ein. Man erhält durch Extrapolation die gesuchte Temperaturdifferenz ΔT . Der Versuchsaufbau dafür ist in Abb. ST.6 dargestellt. Für die Messung wird Wasser zur Kühlung des Motors in einem Behälter bereitgestellt. Das Wasser aus der Wasserleitung kann nicht direkt als Kühlwasser benutzt werden, da die Temperaturschwankungen unter Umständen größer als die zu messenden Temperaturdifferenzen sind. Das gesamte Kühlwasser wird in dem Behälter regelmäßig durchmischt.

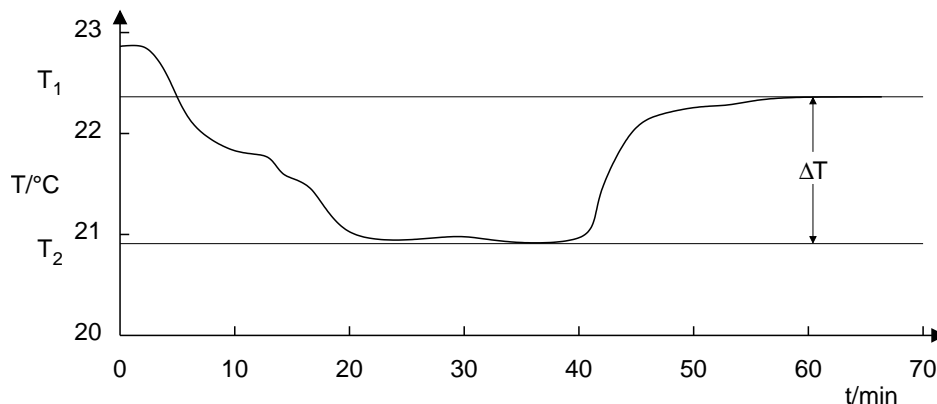


Abbildung ST.5: Zeitlicher Verlauf der Kühlwassertemperatur

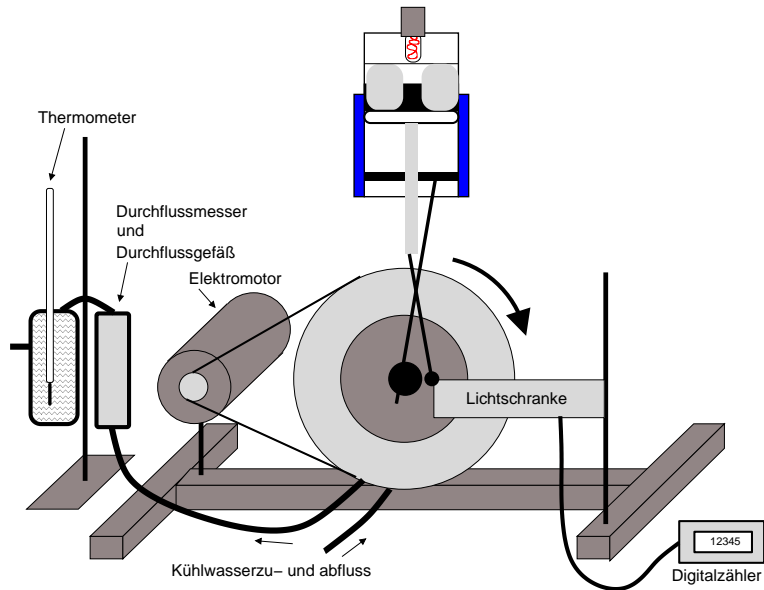


Abbildung ST.6: Versuchsaufbau für die Bestimmung der Reibungsverluste

Sind diese Vorbereitungen abgeschlossen, wird die Wasserpumpe eingeschaltet; der Strom sollte 800 mA nicht übersteigen (sonst werden die Schläuche undicht). Der Kühlwasserdurchsatz wird mittels einer Stoppuhr und eines Messzylinders ermittelt. Die Kühlwassertemperatur soll in Intervallen von zwei Minuten gemessen werden (das Thermometer zeigt die Kühlwassertemperatur direkt nach Verlassen des Kühlsystems des Motors an). Der Wasserdurchsatz und die Kühlwassertemperatur sollen während des gesamten Versuchs gemessen und als Funktion der Zeit protokolliert werden.

Hat die Temperatur des Kühlwassers einen konstanten Wert erreicht ($< 0.1 \text{ K}/6 \text{ min}$) so wird der Antrieb zugeschaltet. Die Drehzahl des Stirling-Motors wird sich auf etwa $f = 5 \text{ s}^{-1}$ einstellen. Sie wird mit einer Lichtschranke (Lochscheibe an der Motorachse) gemessen.

Die Temperaturmessung wird solange durchgeführt, bis sich wieder eine konstante Gleichgewichtstemperatur eingestellt hat. Dies ist ungefähr nach 15 Minuten der Fall.

4.2. Bestimmung der zugeführten Energie und der geleisteten Arbeit

Hier soll die real nutzbare Arbeit W_r^D mit Hilfe des Pronyschen Zaumes bestimmt werden. Gleichzeitig wird die nicht genutzte Wärmemenge $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{V2}$ über die Temperatur des Kühlwassers und die tatsächlich zugeführte Energie Q_{el} aus der elektrischen Heizleistung gemessen.

Zubehör: Heißluftmotor
 Regeltransformator
 5 Massestücke
 Federkraftmesser (Stativfuß und -stange)
 1 Multimeter
 1 Strommessgerät
 Wasserbehälter (ca. 40 l)
 Wasserpumpe
 Messzylinder und Stoppuhr
 Durchlaufgefäß mit Thermometer
 Lichtschranke mit Lochscheibe und Digitalzähler

Die real zugeführte Energie Q_r kann auf unterschiedliche Weisen gemessen und berechnet werden. Dabei können die Werte deutlich voneinander abweichen.

Ermittlung aus der zugeführten elektrischen Energie:

$$Q_r^{\text{el}} = \frac{U \cdot I}{f} \quad (\text{ST.2})$$

Ermittlung aus abgegebener Wärme an das Kühlwasser und verrichteter mechanischer Arbeit (I. Hauptsatz):

$$Q_r^{\text{th}} = W_r + Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}_2} \quad (\text{ST.3})$$

Da das Arbeitsgas nun beheizt wird, unterscheidet sich $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}_2}$ auch bei gleicher Drehzahl von dem im ersten Versuch ermittelten Wert um die zusätzlich vom Gas an das Kältereservoir (Kühlwasser) abgegebene Wärmemenge Q' . Es gilt also:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}_2} = Q' + Q_R \quad \longrightarrow \quad Q_r^{\text{th}} = W_r + Q' + Q_R \quad . \quad (\text{ST.4})$$

Bestimmt man die real abgegebene Arbeit W_r^D durch eine Drehmomentmessung an der Motorachse mit Hilfe des Pronyschen Zaums, so lässt sich W_r^D wie folgt berechnen:

$$\mathbf{T} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad . \quad (\text{ST.5})$$

Ist der Pronysche Zaum in Ruhe, so wird das Drehmoment \mathbf{T} durch die Federkraft \mathbf{F}_F und die Gewichtskraft \mathbf{F}_G der angehängten Massestücke kompensiert. Es gilt also:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_F + \mathbf{F}_G \quad (\text{ST.6})$$

Bei waagerechter Ausrichtung des Zaums gilt

$$T = r \cdot F \quad . \quad (\text{ST.7})$$

Für die abgegebene Leistung P_r^D gilt

$$P_r^D = T \cdot \omega \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi f \quad . \quad (\text{ST.8})$$

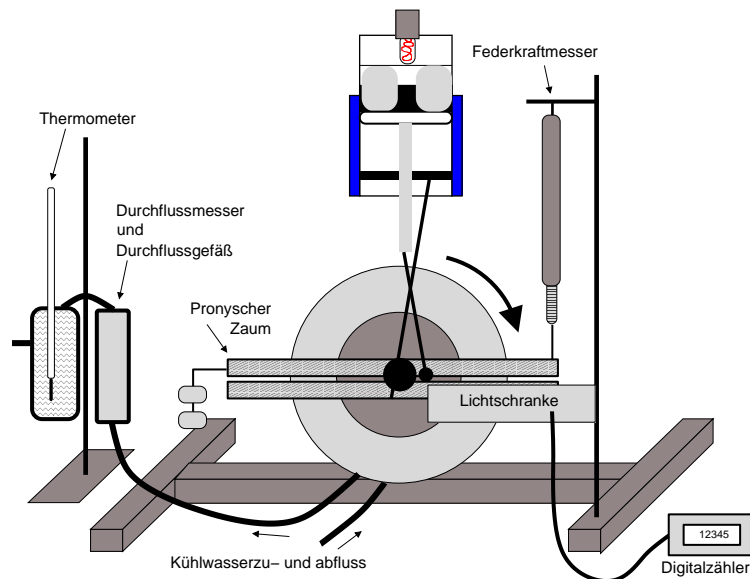


Abbildung ST.7: Versuchsaufbau für die Bestimmung der real abgegebenen Arbeit, Nutzung eines Pronyschen Zaumes

Die Arbeit pro Zyklus beträgt dann

$$W_r^D = 2\pi T = 2\pi r(mg + F_F) \quad (\text{ST.9})$$

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung ST.7 zu sehen. Das Kühlwasser wird im Wasserbehälter bereitgestellt und während der Temperaturmessung, die wie in 4.1. beschrieben durchgeführt wird, regelmäßig umgerührt. Analog zu 4.1. lässt sich daraus zusammen mit dem Durchfluss $\frac{dm}{dt}$ und der Frequenz f nach Gl. ST.1 wieder die Wärmemenge $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{V2}$ bestimmen. Man verschließt den Zylinder mit dem Zylinderkopfdeckel luftdicht. Der Strommesser und das Multimeter werden angeschlossen, dabei soll darauf geachtet werden, dass die (Wechsel-)Spannung mit minimalem Fehler gemessen werden kann. Sobald die Kühlwassertemperatur annähernd konstant ist, wird der Trafo für die Zylinderkopfheizung eingeschaltet. Unmittelbar nachdem die Heizwendel zu glühen begonnen hat, muss der Motor (in Uhrzeigersinn) von Hand angeworfen werden. Nun wird der Pronysche Zaum lose um die Motorachse gelegt und die Lochscheibe wieder angeheftet. Der Trafo wird so eingestellt, dass die Drehzahl mindestens $f=5.0 \text{ s}^{-1}$ beträgt. Nach einigen Minuten ist die Drehzahl konstant und Stromstärke sowie Spannung können regelmäßig gemessen werden, ebenso ist die Kühlwassertemperatur zu protokollieren. Aus dieser Messung erhält man nach Gl. (ST.1) Q_r^{el} .

Die Schrauben links und rechts am Pronyschen Zaum werden langsam so angezogen, dass der Motor gerade noch rund läuft. Dabei soll die Drehzahl des belasteten Motors nicht unter $f=3 \text{ s}^{-1}$ sinken. Sollte der Motor doch aus Versehen zum Stehen gekommen sein, so muss er entweder unverzüglich wieder angeworfen werden oder es muss sofort die elektrische Heizung abgeschaltet werden. **Ein Motorstillstand bei eingeschalteter Zylinderkopfheizung**

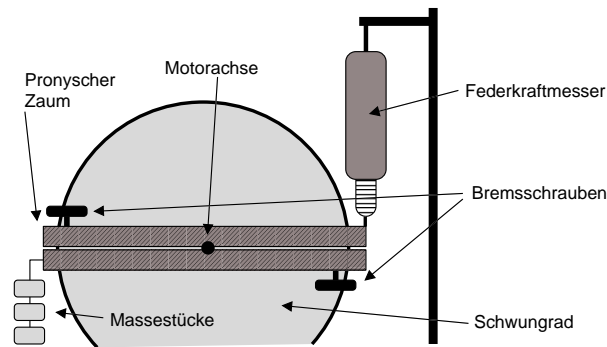


Abbildung ST.8: Drehmomentmessung unter Anwendung eines Pronyschen Zaums, Lage der Massestücke und des Federkraftmessers

kann zur Zerstörung der Maschine führen! Durch Massestücke auf der einen und den Federkraftmesser auf der anderen Seite wird der Pronysche Zaum in der Horizontalen gehalten (vgl. Abb. ST.8). Ist das System in einem relativ schwingungsfreien Gleichgewichtszustand, wird die Anzahl der Massestücke, die am Federkraftmesser angreifende Kraft und die Drehzahl des Motors gemessen. In diesem Zustand wird der Motor noch ca. 15 bis 20 Minuten betrieben, bis die Temperatur des Kühlwassers wieder konstant ist. Dann kann auch die Temperaturmessung beendet und der Trafo für die Glühwendel ausgeschaltet werden.

4.3. Aufnahme des pV -Diagramms

Aus dem pV -Diagramm lässt sich die die vom Gas verrichtete Arbeit W_i^{pV} bestimmen (Wie?). Gleichzeitig kann aus der elektrischen Heizleitung die zugeführte Wärme Q^{el} pro Motorzyklus bestimmt werden.

Zubehör: Heißluftmotor
 Multimeter
 Strommesser
 Aufbau zur Darstellung des pV -Diagramms mittels eines Lasers
 Millimeterpapier
 Stoppuhr

Im Gegensatz zu der in 4.2. bestimmten, vom Motor real abgegebenen Arbeit W_r^D lässt sich durch ein pV -Diagramm die vom Arbeitsgas ideal abgegebene Arbeit W_i^{pV} aufzeichnen. Man erhält sie aus der Fläche A im pV -Diagramm, dazu muss die Druck- und Volumenachse kalibriert werden. Dies ergibt sich aus dem Hubraum (150 ml) und dem maximaler Druckänderung. Da dieser Versuch einen Vergleichswert für die abgegebene Arbeit liefern soll, müssen die Versuchsbedingungen möglichst genau denen von 4.2. entsprechen, insbesondere hinsichtlich Heizleistung und Kühlwasserdurchfluss.

Den Versuchsaufbau kann man Abb. ST.9 entnehmen. Der pV -Indikator wird mit dem Motor verbunden. Der Druckanschluss wird hergestellt, indem der druckfeste Schlauch, der am

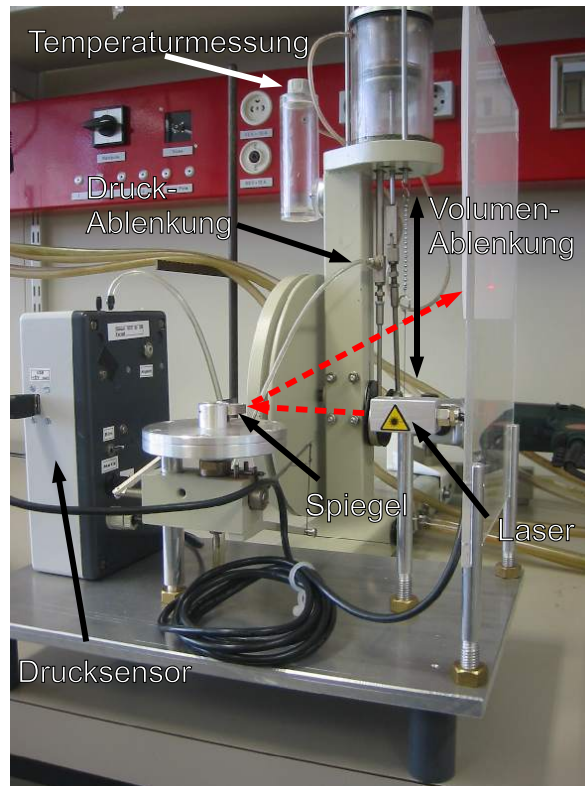


Abbildung ST.9: Versuchsaufbau zur Bestimmung der abgegebenen Arbeit durch Aufzeichnen des pV -Diagramms

pV -Indikator befestigt ist, mit dem Druckmessanschluss an der Kolbenstange verbunden wird. Für den Volumenanschluss wird eine dünne Schnur am Arbeitskolben befestigt, über eine Umlenkrolle am Fuß des Heißluftmotors geführt und mit dem Schwinghebel des pV -Indicators in passender Länge verbunden.

Bei diesem Versuch wird die zugeführte Wärme nur elektrisch über die Heizspannung bestimmt, deshalb könnte hier mit Leitungswasser direkt gekühlt werden. Durch wiederholtes Messen und Regeln stellt man den gleichen Durchsatz wie in 4.2. her. Die Multimeter werden analog zu 4.2. angeschlossen.

Nun wird der Trafo eingeschaltet, der Motor angeworfen und die Spannung so geregelt, dass der Motor mit gleicher Drehzahl f wie im unbelasteten Fall in 4.2. läuft. Strom und Spannung mehrmals messen!

Nach diesen Vorbereitungen wird der Laser eingeschaltet. pV -Indikator, Schirm und Laser müssen so hintereinander auf der optischen Bank justiert werden, dass die vom Laser aufgezeichnete Kurve vollständig auf dem Schirm erscheint. Ein Blatt Millimeterpapier wird auf den Schirm gelegt. Den maximalen Volumen- und Druckbereich auf dem Schirm ermittelt man, indem man jeweils die Verbindung zu Druck- (Schlauch) bzw. Volumensensor (Faden) unterbricht und einen kompletten Zyklus durchfährt. Horizontale und vertikale Auslenkung erscheinen jeweils als Geraden und können mit Bleistift nachgezeichnet werden. Die Volumenachse weicht auf Grund ihrer Konstruktion leicht von der Geradenform ab.

Die Anschlüsse werden wieder hergestellt und die projizierte Kurve wird auf dem Papier nachgezeichnet. Dabei darf der Schirm nicht bewegt werden. Abschließend wird der Trafo ausgeschaltet und der Kühlwasserzufluss unterbrochen. Aus der von der Kurve umschlossenen Fläche ist die während eines Zyklus vom Arbeitsgas abgegebene Arbeit W_i^{pV} zu bestimmen.

5. Auswertung

Der Wirkungsgrad η ist definiert als das Verhältnis von Nutzarbeit $|W|$ zu zugeführter Wärme Q :

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (\text{ST.10})$$

Experimentell kann der Wirkungsgrad des Motors unter zwei Aspekten bestimmt werden: Zum einen kann untersucht werden, wie diese spezielle Maschine den Stirling-Prozess ausnutzt. Damit wird der reale Wirkungsgrad η_r berechnet:

$$\eta_r = \frac{W_r}{Q_r} . \quad (\text{ST.11})$$

Durch Berücksichtigung der Reibungsverluste Q_R lässt sich die tatsächlich vom Gas verrichtete Arbeit bestimmen. Daraus ergibt sich der Wirkungsgrad eines idealen Motors:

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_r} = \frac{W_r + Q_R}{Q_r} . \quad (\text{ST.12})$$

Berücksichtigt man nun noch die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der nutzbaren Arbeit und der zugeführten Arbeit, so ergeben sich folgende Gleichungen:

Elektrisch zugeführte Energie:

$$\eta_r^{\text{el}} = \frac{W_r^D}{Q_r^{\text{el}}} . \quad (\text{ST.13})$$

$$\eta_i^{\text{el}} = \frac{W_r^D + Q_R}{Q_r^{\text{el}}} \quad (\text{ST.14})$$

Thermodynamisch bestimmte zugeführte Energie:

$$\eta_r^{\text{th}} = \frac{W_r^D}{Q_r^{\text{th}}} . \quad (\text{ST.15})$$

$$\eta_i^{\text{th}} = \frac{W_r^D + Q_R}{Q_r^{\text{th}}} \quad (\text{ST.16})$$

Mit dem in 4.3. gemessenen Werten kann man einen weiteren Wirkungsgrad bestimmen:

$$\eta_i^{pV} = \frac{W_i^{pV}}{Q_r^{\text{el}}} \quad (\text{ST.17})$$