

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 1

## 1. Aufgabenstellung

- 1.1.** Das Leistungsverhältnis des Heißluftmotors bei Betrieb als Kältemaschine ist aus kalorischen Messungen und aufgezeichneten  $p(V)$ -Diagrammen zu bestimmen.
- 1.2.** Der Heißluftmotor ist als Wärmekraftmaschine zu betreiben. Im Leerlauf sind zunächst der Heizungsteilwirkungsgrad und die Reibungsverluste bei verschiedenen Heizleistungen zu bestimmen. Bei maximaler Heizleistung sind danach für unterschiedliche mechanische Bremsmomente alle Teilwirkungsgrade sowie der Gesamtwirkungsgrad zu ermitteln.

Literatur:	Eichler, H. J. Kronfeldt, H.-D. Sahm, J.	Das Neue Physikalische Grundpraktikum Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2. Auflage 2006, S. 187-197
	Becker, J. Jodl, H.-J.	Physikalisches Praktikum für Naturwissenschaftler und Ingenieure VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1991, S. 68-73
	Stroppe, H.	Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 11. Auflage 1999, S. 164-168

## 2. Grundlagen

Die Basis thermodynamischer Maschinen ist ein *Kreisprozess*. Darunter versteht man eine Folge von Zustandsänderungen, die wieder zum Ausgangszustand zurückführt. Stellt man einen Kreisprozess im  $p(V)$ -Diagramm dar, dann entspricht die umfahrene Fläche dem theoretisch möglichen Arbeitsbetrag, der beim einmaligen Durchlaufen des Kreisprozesses realisiert werden kann. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik verknüpft die Zustandsgröße *innere Energie*  $U$  mit den Prozessgrößen *Wärmemenge*  $Q$  und *mechanische Arbeit*  $W$ . Angewandt auf einen Kreisprozess ergibt sich:

$$\oint dU = \oint dQ + \oint dW . \quad (1)$$

Für die innere Energie gilt  $\oint dU = 0$ , damit wird

$$\oint dQ = -\oint dW . \quad (2)$$

Das Integral  $-\oint dW$  wird auch als technische Arbeit bezeichnet. Es ist diejenige Arbeit, die einer Maschine bei einem vollständigen Umlauf entnommen werden kann (rechtsläufiger Prozess  $\Rightarrow$  Wärmekraftmaschine) oder zugeführt wird (linksläufiger Prozess  $\Rightarrow$  Wärmepumpe, Kältemaschine).

Als theoretischen (thermodynamischen) Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  einer Wärmekraftmaschine definiert man das Verhältnis von pro Umlauf entnommener mechanischer Arbeit zur zugeführten Wärmemenge  $Q_{zu}$ :

$$\eta_{th} = \frac{-\oint dW}{Q_{zu}} . \quad (3)$$

Wegen  $\oint dQ = Q_{zu} - Q_{ab}$  folgt mit (2):

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 2

$$\eta_{th} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} \quad (4)$$

und damit  $\eta_{th} < 1$ . Physikalisch verständlich ist, dass ein Kreisprozess nur durch die Abführung von  $Q_{ab}$  realisiert werden kann,  $Q_{ab}$  also einen prinzipiell notwendigen Verlust bei der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit darstellt.  $Q_{ab}$  könnte einem weiteren, bei tieferer Temperatur ablaufenden Kreisprozess zugeführt werden oder steht nur noch für Heizungszwecke zur Verfügung, für den ursprünglich betrachteten Prozess ist die abgeführte Energie aber „verloren“.

Für die theoretische Behandlung der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit ist der modellhafte *Carnot-Prozess* von besonderer Bedeutung. Er läuft über zwei Isothermen und zwei Adiabaten ab. Verlaufen die Isothermen bei  $T_h$  und  $T_t$  ( $T_h > T_t$ ), dann ergibt sich für den thermodynamischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}^c$ :

$$\eta_{th}^c = \frac{T_h - T_t}{T_h} = 1 - \frac{T_t}{T_h} \quad (5)$$

Das ist der höchste Wirkungsgrad, den eine Wärmekraftmaschine theoretisch erreichen kann.

Bei einem linksläufigen Kreisprozess nimmt das Gas während der isothermen Entspannung bei der tieferen Temperatur Wärme auf und gibt diese während der isothermen Kompression bei der höheren Temperatur zusammen mit der am Gas geleisteten Arbeit wieder ab. Wärmepumpe und Kältemaschine unterscheiden sich in diesem Bild nur durch die unterschiedlich definierten Nutzleistungen:

- Die Wärmepumpe soll eine möglichst hohe Wärmeleistung  $P_h = dQ_h/dt$  bei der höheren Temperatur  $T_h$  abgeben und dabei wenig mechanische Leistung  $P_{mech}$  für den Antrieb benötigen.
- Die Kältemaschine soll aus einem thermisch gut isolierten Volumen die Wärmeleistung  $P_t = dQ_t/dt$  entnehmen und bei der Temperatur  $T_h$  wieder abgeben mit dem Ziel, die Temperatur  $T_t$  im Behälter weiter zu senken. Auch hier soll möglichst wenig mechanische Leistung  $P_{mech}$  eingesetzt werden.

Anstelle des thermodynamischen Wirkungsgrades  $\eta_{th}$  einer Wärmekraftmaschine unterscheidet man jetzt zwei Leistungsverhältnisse:

$$\varepsilon_w = \frac{|P_h|}{|P_{mech}|} > 1 \quad \text{für die Wärmepumpe und}$$

$$\varepsilon_k = \frac{|P_t|}{|P_{mech}|} > (<) 1 \quad \text{für die Kältemaschine.}$$

## 2.1. Stirlingmotor

Für den vorliegenden Versuch wird ein Heißluftmotor verwendet, der nach dem Stirling-Kreisprozess arbeitet. Der Prozess läuft idealisiert auf zwei Isothermen und zwei Isochoren ab, der Arbeitsstoff ist Luft, welche als ideales Gas aufgefasst wird (Abb. 1).

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 3

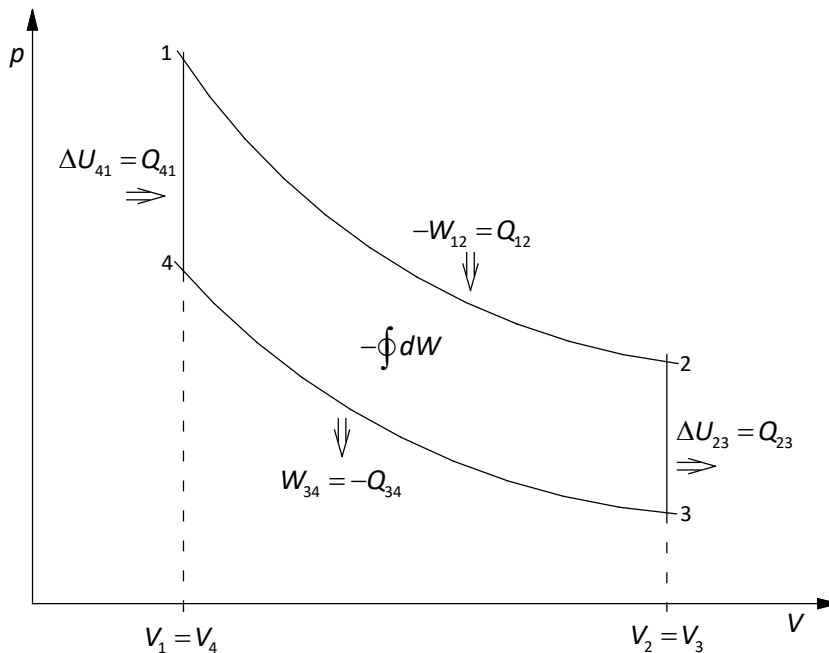


Abb. 1: Zustandsdiagramm für den Stirling-Prozess im  $p(V)$ -Diagramm

Die Energiebilanz eines Umlaufs setzt sich aus den folgenden Teilschritten zusammen:

1. Isotherme Expansion von Zustand 1 nach Zustand 2

$T_1 = T_2 = T_h$ , für ein ideales Gas (Stoffmenge  $n$ ) ist  $dU = nC_V dT$ , daraus folgt

$$\Delta U_{12} = 0 = Q_{12} + W_{12}. \text{ Mit } W_{12} = -\int_{V_1}^{V_2} p dV \text{ erhält man } -W_{12} = Q_{12} = nRT_h \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

2. Isochore Abkühlung von Zustand 2 nach Zustand 3

$$V_2 = V_3 = \text{konst.} \Rightarrow W_{23} = 0 \Rightarrow \Delta U_{23} = Q_{23} = -nC_V(T_h - T_t)$$

3. Isotherme Kompression von Zustand 3 nach Zustand 4

$$T_3 = T_4 = T_t \Rightarrow \Delta U_{34} = 0 = Q_{34} + W_{34} \Rightarrow W_{34} = -Q_{34} = nRT_t \ln \frac{V_3}{V_4}$$

4. Isochore Erwärmung von Zustand 4 nach Zustand 1

$$V_4 = V_1 = \text{konst.} \Rightarrow W_{41} = 0 \Rightarrow \Delta U_{41} = Q_{41} = nC_V(T_h - T_t)$$

Für die gesamte nach außen abgegebene mechanische Arbeit erhält man zunächst:

$$\oint dW = W_{12} + W_{34} = nR \left( -T_h \ln \frac{V_2}{V_1} + T_t \ln \frac{V_3}{V_4} \right). \quad (6)$$

Wegen  $V_2 = V_3$  und  $V_1 = V_4$  werden die Logarithmen der Volumenverhältnisse in (6) gleich und die vom Kreisprozess im  $p(V)$ -Diagramm eingeschlossene Fläche hat damit den Inhalt:

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 4

$$\oint dW = -nR \ln \frac{V_2}{V_1} (T_h - T_t). \quad (7)$$

Wärme wird dem Stirling-Prozess während der Teilschritte  $1 \rightarrow 2$  sowie  $4 \rightarrow 1$  zugeführt. Damit wird der thermodynamische Wirkungsgrad nach (3) zu

$$\eta_{th}^s = \frac{R \ln \frac{V_2}{V_1} (T_h - T_t)}{RT_h \ln \frac{V_2}{V_1} + C_V (T_h - T_t)} < \eta_{th}^c. \quad (8)$$

Die während der beiden isochoren Zustandsänderungen ausgetauschten Wärmemengen sind betragsmäßig gleich. Durch geschickte Prozessführung kann man versuchen, die abgegebene Wärmemenge  $Q_{23}$  zu speichern und sie später dem Prozess als  $Q_{41}$  wieder zuzuführen. In diesem Fall wird  $Q_{zu} = Q_{12}$  und der ideale Wirkungsgrad des Stirling-Prozesses erreicht den theoretischen Wirkungsgrad des Carnotprozesses:

$$\eta_{ideal}^s = \frac{T_h - T_t}{T_h} = \eta_{th}^c. \quad (9)$$

Die technische Realisierung des Stirling-Kreisprozesses gelingt ansatzweise mit dem am Versuchsplatz eingesetzten Heißluftmotor (Stirlingmotor vom Beta-Typ). Er besteht aus einem gläsernen Zylinder, in dem sich außer dem Arbeitskolben noch ein Verdrängerkolben befindet, der für die isochoren Zustandsänderungen zuständig ist. Dieser enthält eine Durchströmöffnung, die mit Kupferwolle als Wärmetauscher (Regenerator) gefüllt ist. Arbeits- und Verdrängerkolben werden von einer gemeinsamen Kurbelwelle angetrieben, die Pleuelstangen sind auf ihr um  $90^\circ$  gegeneinander versetzt angebracht. Der obere Teil des Zylinders wird durch eine Heizspirale erwärmt, der untere Teil mittels Leitungswasser gekühlt (vgl. Abb. 2).

Der Verdrängerkolben ist im Idealfall nur während der isochoren Zustandsänderung bei stehendem Arbeitskolben in Bewegung. Er verschiebt den Teil des Gases, der seinem Hubvolumen entspricht, in den gekühlten bzw. geheizten Zylinderteil. Beim Durchströmen der Kupferwolle wird vom heißen Gas die Wärmemenge  $Q_{23}$  abgegeben, vom kalten Gas die Wärmemenge  $Q_{41}$  aufgenommen.

Während des Betriebes als Wärmekraftmaschine laufen die Zustandsänderungen idealisiert folgendermaßen ab:

#### 1 $\rightarrow$ 2 : Isotherme Expansion

Arbeits- und Verdrängerkolben bewegen sich nach unten. Das Gas dehnt sich isotherm aus, nimmt  $Q_{12}$  auf und gibt die mechanische Arbeit  $W_{12}$  an Schwungrad und bewegte Teile ab.

#### 2 $\rightarrow$ 3 : Isochore Abkühlung

In der Nähe des unteren Totpunktes bewegt sich der Arbeitskolben nur wenig ( $V_2 \approx konst.$ ). Der Verdränger bewegt sich nach oben, das heiße Gas strömt in den unteren Zylinderteil und gibt dabei die Wärmemenge  $Q_{23}$  an den Wärmetauscher ab.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 5

### 3 → 4 : Isotherme Kompression

Der Arbeitskolben wird durch das Schwungrad nach oben geschoben. Er verrichtet die Arbeit  $W_{34}$  am Gas, das isotherm verdichtet wird und die Wärmemenge  $Q_{34}$  an das Kühlwasser abgibt.

### 4 → 1 : Isochore Erwärmung

In der Nähe des oberen Totpunktes bewegt sich der Arbeitskolben wieder nur wenig ( $V_4 \approx \text{konst.}$ ). Der Verdränger bewegt sich nach unten, das kalte Gas strömt in den heißen Zylinderteil und entnimmt dem Wärmetauscher die Wärmemenge  $Q_{41}$ . Der Kreisprozess ist somit geschlossen.

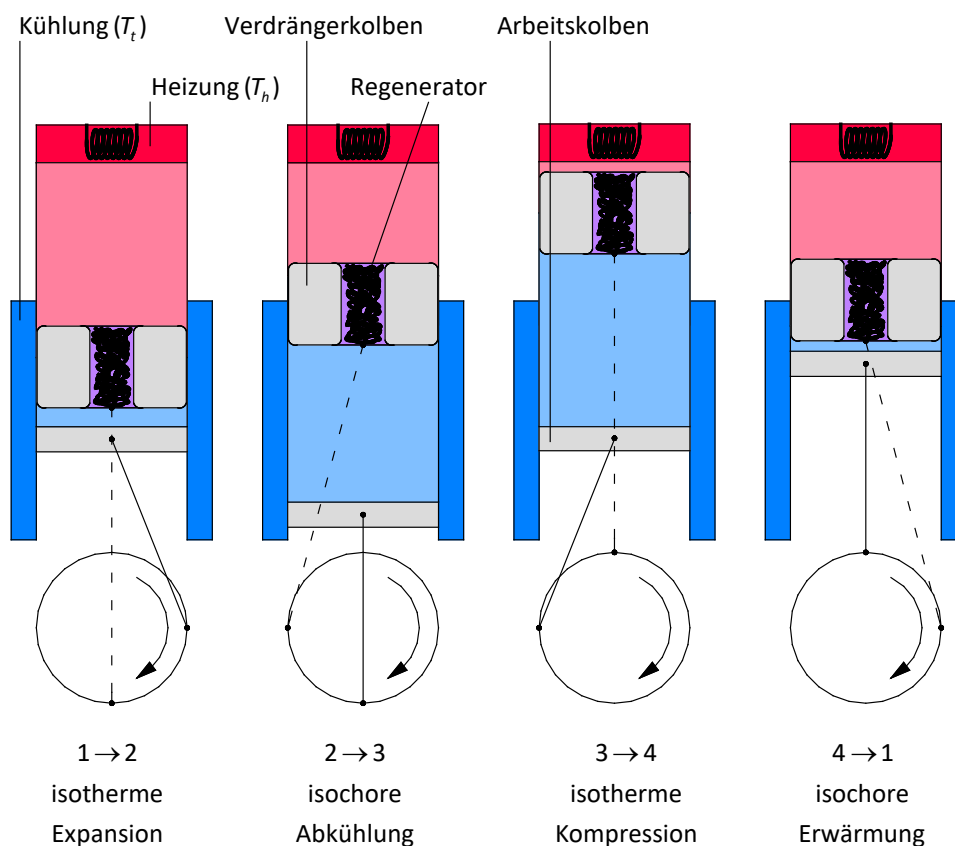


Abb. 2: Prozessschritte des Stirlingmotors am Versuchsplatz

## 2.2. Technische Wirkungsgrade

Beim Betrieb eines Motors als Wärmekraftmaschine interessiert nicht nur die höchstmögliche mechanische Leistung, sondern vor allem auch der technisch erreichbare Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$ . Er ergibt sich aus der an der Motorwelle abgegebenen mechanischen Leistung  $P_{mech}$  und der eingesetzten Heizleistung  $P_{heiz}$  (im vorliegenden Fall elektrische Leistung  $P_{el} = UI$ ):

$$\eta_{ges} = \frac{|P_{mech}|}{P_{heiz}} = \frac{|P_{mech}|}{UI}. \quad (10)$$

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 6

Der Gesamtwirkungsgrad wird aber nicht nur durch den thermodynamischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  nach (8) bzw. (9) bestimmt, sondern durch weitere Teilwirkungsgrade verringert:

- Das Arbeitsgas übernimmt nicht die gesamte zur Verfügung gestellte Heizleistung. Verluste entstehen vor allem durch Wärmeabstrahlung und Konvektion im Zylinderkopfbereich. Mit  $f$ , der Drehfrequenz des Motors, lässt sich die vom Gas aufgenommene Leistung  $P_{auf}$  über einen Teilwirkungsgrad  $\eta_{heiz}$  ausdrücken:

$$P_{auf} = \eta_{heiz} P_{heiz} = f Q_{12} \cdot \quad (11)$$

- Die vom Arbeitsgas abgegebene Leistung  $P_{ab}$  ist nicht vollständig an der Motorabtriebswelle nutzbar. Der mechanische Teilwirkungsgrad  $\eta_{mech}$ , bestimmt durch Reibungsverluste, führt zu nicht mehr nutzbarer Wärmeabgabe an Kühlwasser und die Umgebung:

$$P_{mech} = \eta_{mech} P_{ab} \cdot \quad (12)$$

Der Zusammenhang zwischen den Leistungen  $P_{auf}$  und  $P_{ab}$  ist durch den thermodynamischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  des Kreisprozesses gegeben:

$$P_{ab} = \eta_{th} P_{auf} = f \oint p dV, \quad (13)$$

insgesamt gilt also:

$$P_{mech} = \eta_{mech} \eta_{th} \eta_{heiz} P_{heiz} \cdot \quad (14)$$

Quantitative Untersuchungen am Heißluftmotor erfordern somit die Erfassung der Drehfrequenz  $f$  und die Messung des  $p(V)$ -Diagramms, aus dem dann das Integral  $\oint p dV$  pro Umlauf entnommen werden kann. Die Wärme  $Q_{12}$  ist hier nicht direkt ablesbar, da in der Realität keiner der Prozessschritte wirklich isotherm erfolgt. Messungen der mechanischen Arbeit sowie des Durchsatzes und der Temperaturänderung des Kühlwassers erlauben aber eine Abschätzung der transportierten Wärmemengen.

Für die Untersuchung der Leistungsverhältnisse  $\varepsilon_w$  einer Wärmepumpe bzw.  $\varepsilon_k$  einer Kältemaschine gelten die Überlegungen sinngemäß.

### 3. Messanleitung

Der für diesen Versuch benutzte Heißluftmotor wurde vom Hersteller auf größtmögliche Transparenz seiner Funktionsweise optimiert (Zylinder und Verdrängerkolben aus Glas, einfache mechanische Lösung der Kolbenantriebe), wodurch die einzelnen Arbeitsschritte nur im Ansatz dem Stirling-Prozess entsprechen und damit der erreichbare Wirkungsgrad gering bleibt. Für die quantitativen Versuchsteile werden folgende Messgrößen erfasst und von einem Computerprogramm entweder über Messprozeduren oder durch manuelle Eingaben übernommen:

- Position der Kurbelwelle mit Hilfe eines rotatorischen inkrementellen Impulsgebers (zahnriemengekoppelter IGR-1000 mit nachgeschalteter Zählelektronik), hieraus und mit den vom Hersteller des Motors angegebenen Konstruktionsdaten wie Kolbendurchmesser, Pleuellänge,

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 7

Kurbelradius usw. kann das vom Arbeitskolben abgeschlossene Volumen als Funktion der Kurbelwellenposition bestimmt werden. Pro Umdrehung wird ein Indeximpuls erzeugt, vom Computer registriert und für die Bestimmung der Drehzahl ausgewertet.

- Druck des Arbeitsgases mittels eines piezoelektrischen Drucksensors, dessen Ausgangssignal digitalisiert, vom Computerprogramm ausgewertet und für die Darstellung des  $p(V)$ -Diagramms genutzt wird
- Kühlwasserdurchsatz und -temperaturen mithilfe eines Strömungsmessers, zweier Thermoelemente und angeschlossener Messinterface ( $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$ )
- Heiz- bzw. Kühlleistung mittels elektrisch betriebener Glühwendeln, für die Messung der Kühlleistung (Kompensationsmessung) ist zusätzlich ein Thermoelement ( $\vartheta_3$ ) in den Zylinderkopfdeckel eingebaut.
- Abgegebene mechanische Arbeit mit Hilfe eines *Pronyschen Bremszaumes* zur Erzeugung eines bremsenden Drehmomentes

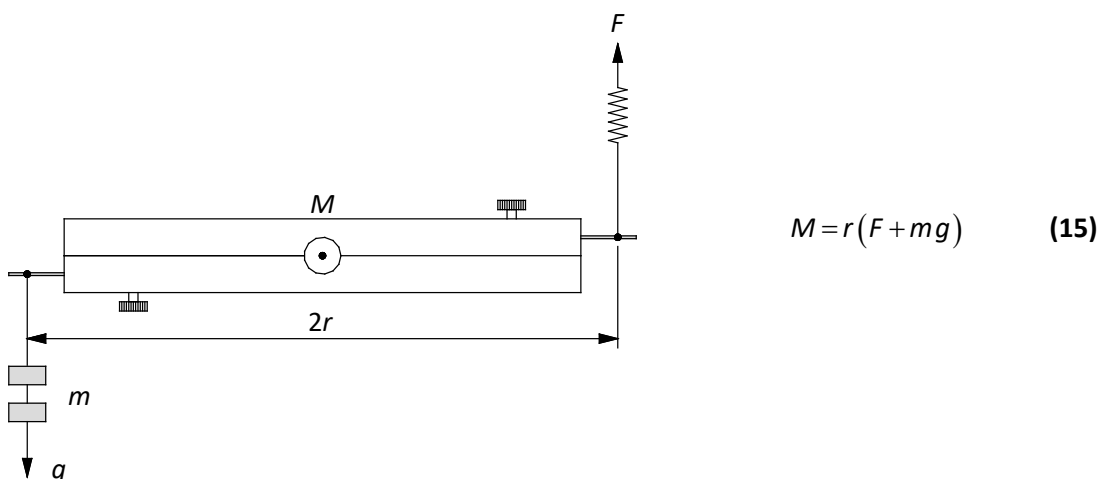


Abb. 3: Pronyscher Zaum zur Erzeugung eines Bremsmomentes

Für seinen Betrieb als Kältemaschine oder auch als Wärmepumpe kann der Heißluftmotor über einen Keilriemen von einem Elektromotor mit einstellbarer Drehzahl und Drehrichtung angetrieben werden.

### 3.0. Vorbereitung der Messungen

- Kühlwasser aufdrehen und Einstellung des Druckminderers (1,0bar) überprüfen, Hahn am Durchflussmesser voll aufdrehen, elektrische Verbindungen zwischen Thermoelementen, Temperaturmessinterface und Computer (USB) kontrollieren
- Elektrische Verbindungen der Motorsteuerung, zwischen Druckmessdose, Positionsgeber, Messinterface und Computer kontrollieren und ggf. vom Versuchsbetreuer überprüfen lassen
- Die Steuerung für den Antriebsmotor bleibt zunächst ausgeschaltet, das Stellpotentiometer für die Drehzahlregelung in Mittelstellung.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 8

- Computer hochfahren, das Praktikumsprogramm *PhysPract* mit der Option für den Versuch W8 starten und Fenster zum Versuch öffnen. Das zwischen der Computer-I/O-Karte und den beiden Sensoren für Druck und Kurbelwellenposition angeschlossene Messinterface verfügt über zwei Signal-LEDs: „Grün“ bedeutet Bereitschaft und „Rot“ heißt, dass die Zählereingänge für den Positionsgeber noch gesperrt sind. Auf der Registerkarte *Messung* müssen die Steuerelemente für die Programmierung der  $p(V)$ -Diagramme aktiviert sein. Die Steuerung des Temperaturmessinterfaces geschieht über ein spezielles Messfenster mit integrierter Grafik, das man über den Menübefehl *Geräte/Temperaturmessgerät...* öffnet.
- Detaillierte Informationen zu den Funktionen der Messfenster kann über die Hilfeübersicht (Menü *Hilfe*) aufgerufen werden.

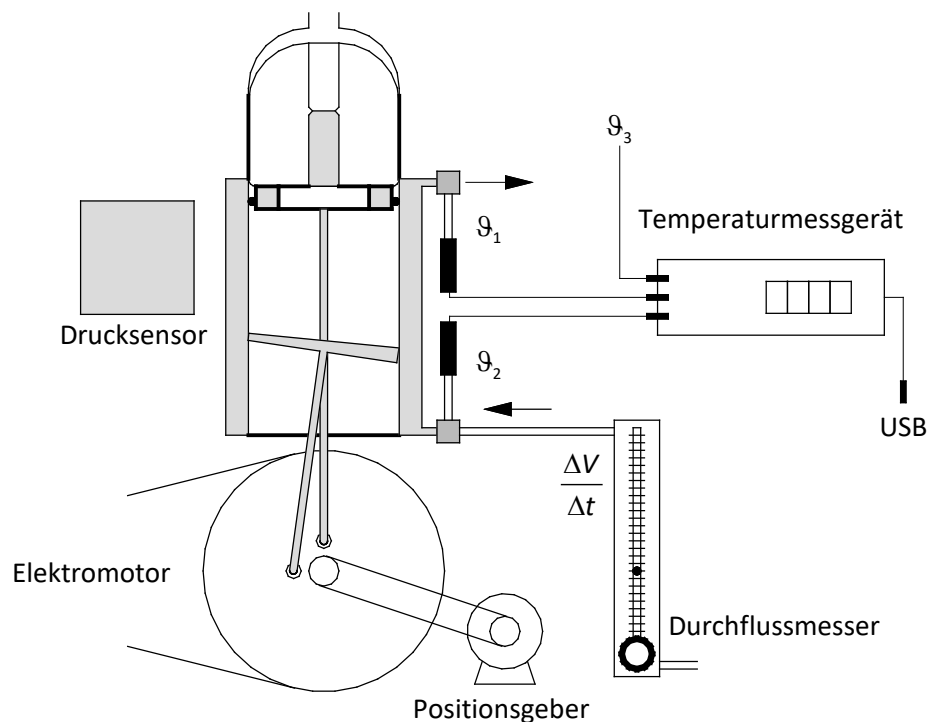


Abb. 4: Elemente der Experimentieranordnung

- Offsetspannung des Drucksensors messen, hierzu muss das Schraubventil für den Kondenswasserablass vor der Druckmessdose aufgedreht werden, so dass im Motorzylinder Umgebungsdruck herrscht. Danach startet man die Messfunktion des Computerprogramms (Menüpunkt *Aktionen/Referenzdruck messen*). Der am Barometer abgelesene Luftdruck kann über das Umrechnungstool (Taschenrechnersymbol) direkt in *Torr (mmHg)* eingegeben werden. Nach der Umrechnung in *mbar* ist damit die Druckskala des später vom Computer berechneten  $p(V)$ -Diagramms kalibriert.
- Oberer Totpunkt des Arbeitskolbens festlegen, diese Prozedur erfordert ein Höchstmaß an Genauigkeit, weil die  $p(V)$ -Diagramme empfindlich davon abhängen. Zunächst muss die Zähl Elektronik initialisiert werden. Dazu dreht man die Schwungscheibe des Motors ein bis zwei Umdrehungen nach links und dann wieder nach rechts. In der Statuszeile des Messfensters wird jetzt



TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 9

die Position des rotatorischen Gebers von 0...3999 angezeigt. Der Arbeitskolben wird danach in den oberen Umkehrpunkt bewegt (vgl. Peilmarke am Pleuel, Motorrückseite) und die Menüfunktion *Aktionen/Referenzposition (OT) eingeben* ausgeführt.

### **Warnhinweise**

**Besondere Sorgfalt ist beim Umgang mit den auswechselbaren Zylinderkopfeinsätzen geboten. Bitte verbiegen Sie die Heizwendeln nicht und legen Sie nicht benötigte Teile in die vorgesehenen Halterungen zurück.**

**Beim Betrieb als Wärmekraftmaschine ist zu beachten, dass der Motor nicht von selbst anläuft. Sobald die Heizung zu glühen anfängt, muss der Motor von Hand nach rechts angeworfen werden. Bleibt der Motor stehen oder wurde „abgewürgt“, sofort die Heizung abstellen bzw. den Motor erneut anwerfen!**

**Falls Sie lange Haare tragen, leihen Sie sich bitte bei der Aufsicht eine Arbeitsschutzmütze oder einen Haargummi aus.**

### **3.1. Leistungsverhältnis bei Betrieb als Kältemaschine**

Am Ventil des Durchflussmessers wird ein Durchflussvolumen von  $200\text{ cm}^3/\text{min}$  eingestellt. Die Zeit bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichtes nutzt man zur Vorbereitung des Heißluftmotors:

- Falls noch nicht geschehen, Keilriemen zum Elektromotor auflegen, Spannvorrichtung bitte vorsichtig festziehen
- Wärmeisolierring aus PUR-Schaum auf den Zylinderkopf schieben
- Zylinderkopfheizung mit Thermometer vorsichtig einsetzen und festschrauben, Verbindung zwischen Thermoelement (Temperatur  $\vartheta_3$ ) und Temperaturmessinterface prüfen und Raumtemperatur  $\vartheta_U$  notieren (Umschaltung der Displayanzeige ist zwischen allen interessierenden Temperaturen möglich)
- Regelnetzteil 12V/2A über Digitalmultimeter (Strommessbereich DC 10A) anklemmen, aber noch nicht einschalten, Digitalmultimeter (Spannungsmessbereich DC V, Bereich automatisch) an den Bananensteckern der Zylinderkopfheizung anschließen
- Ablass für Kondenswasser mit Schraubventil verschließen

Zur Bestimmung des Leistungsverhältnisses  $\varepsilon_K$  wird der Heißluftmotor im Uhrzeigersinn vom Elektromotor angetrieben und in einer Kompensationsmessung die benötigte elektrische Leistung bestimmt, die die Temperatur des Zylinderkopfes konstant auf Umgebungstemperatur  $\vartheta_U$  hält. Die Messung beginnt, wenn die Kühlwassertemperaturen stabil sind, eine verbliebene Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  wird mittels der entsprechenden Schaltfläche des Fensters für die Temperaturmessung auf OK zurückgestellt. Dann startet man die automatische Aufzeichnung der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ .

Zunächst stellt man den Heizstrom auf 1A ein und beobachtet  $\vartheta_3$ . Sobald die Temperatur zu steigen beginnt, schaltet man den Elektromotor an und lässt ihn vorsichtig im Rechtslauf drehen. Ziel ist das

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 10

Finden der Motordrehzahl, bei der  $\vartheta_3$  gleich der zuvor notierten Raumtemperatur  $\vartheta_U$  bleibt und der Heizstrom  $2A$  (maximal einstellbarer Wert) beträgt. Auch sollte die erreichte Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  des Kühlwassers konstant bleiben. Hat man solch eine Einstellung gefunden, wird die Erfassung eines  $p(V)$ -Diagramms gestartet.

Insgesamt werden fünf  $p(V)$ -Diagramme aufgenommen und die vom Programm erfassten Daten, die erreichte Heizleistung sowie die gemessene Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  notiert (handschriftlich bzw. in den Eingabezeilen des Messfensters enthalten). Es ist zu beachten, dass die Temperatur des Kühlwassers nur langsam ansteigt.

### 3.2. Wirkungsgrad bei Betrieb als Wärmekraftmaschine

Wie zu Beginn des Experimentes 3.1 werden zunächst die thermischen Ausgangsbedingungen des Kühlwassers hergestellt. Das Durchflussvolumen beträgt auch hier  $200\text{cm}^3/\text{min}$ . Weitere Vorbereitung des Motors:

- Zylinderkopfheizung mit Thermometer abschrauben und vorsichtig in die vorgesehene Halterung stellen
- Wärmeisolierring aus PUR-Schaum vom Zylinderkopf entfernen (wichtig, er würde verbrennen!), Distanzröhrchen wieder auf die Stehbolzen des Motors schieben
- Zylinderkopfheizung ohne Thermometer vorsichtig aufsetzen und festschrauben, Schutzgitter für den Zylinderkopf aufsetzen
- Regelnetzteil  $32V/16A$  mit den kräftigeren Leitungen anklemmen, Digitalmultimeter (Spannungsmessbereich DC V) an die Bananenstecker der Zylinderkopfheizung anschließen, die Strommessung erfolgt im Netzgerät, die Spannungsmessung mit dem externen Multimeter
- Keilriemen zwischen Elektro- und Heißluftmotor abnehmen

Wenn die Kühlwassertemperaturen stabil sind, wird die verbliebene Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  wieder auf  $0K$  kompensiert. Man beginnt zunächst mit den Messungen ohne Last, die gesamte mit Hilfe des gemessenen  $p(V)$ -Diagramms ermittelte mechanische Arbeit des Motors wird also für die Überwindung innerer und äußerer Reibungskräfte aufgewandt.

Der Heizstrom beträgt zunächst  $12A$ . Der Verdrängerkolben darf die Heizung nicht umschließen, sobald diese anfängt zu glühen, muss der Motor im Uhrzeigersinn angeworfen werden. Dies wird nicht gleich beim ersten Versuch gelingen, da der Zylinderkopf erst nach und nach seine Betriebstemperatur erreicht. Der Heizstrom wird dann schrittweise soweit verringert, bis der Motor eine Leerlaufdrehzahl von etwa  $200U/\text{min}$  beibehält. Bei dieser Drehzahl lässt man ihn ca.  $5\text{min}$  einlaufen und stellt danach einen Heizstrom von  $8A$  ein.

Wenn Motorlauf und Temperaturdifferenz des Kühlwassers stabil bleiben, wird die Messung des  $p(V)$ -Diagramms durchgeführt. Zu notieren bzw. in die Eingabezeilen des Messfensters einzutragen sind:

- Heizstrom und –spannung, die daraus berechnete Heizleistung

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 11

- die Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  zwischen den Messstellen im Kühlwasserkreislauf, dies erfolgt automatisch durch das Messprogramm, wenn die Temperaturlaufzeichnung gestartet wurde

Die gemittelte Drehzahl des Motors sowie die berechneten Arbeiten Grün (Expansion), Rot (Kompression) sowie ihre Summe werden automatisch nach der Messung angezeigt.

Auf diese Weise werden mehrere  $p(V)$ -Diagramme bei unterschiedlichen Drehzahlen aufgenommen, als Messparameter ist der Heizstrom jeweils um  $2A$  zu erhöhen. Der Versuch wird spätestens dann beendet, wenn die Leerlaufdrehzahl des Motors einen Wert von etwa  $500U/min$  erreicht hat.

**Die Motorheizung jetzt noch nicht abschalten!**

Für die Messung lastabhängiger  $p(V)$ -Diagramme wird der Pronysche Bremszaum, wie in Abb. 3 angedeutet, auf die Abtriebswelle des Motors gesteckt und die Stellschrauben für den Backendruck wechselseitig so eingestellt, dass die Bremswirkung gerade einsetzt. Während man mit der rechten Hand die horizontale Position der Holzbacken fixiert, hängt man auf den linken Stahlstift den Massenhalter ( $m_0 = 10g$ ) und hängt die Kerbe des rechten Stahlstiftes in die untere Öse des Federkraftmessers ein. Die Höhe der Aufhängung wird so eingestellt, dass eine Anzeige von  $0,2N$  bis  $0,3N$  erfolgt. Sodann wird der Heizstrom auf den Maximalwert von  $16,5A$  eingestellt.

Man verdreht jetzt solange wechselseitig die Stellschrauben für den Bremsbackendruck, bis Federkraftmesser und angehängte Massen den Pronyschen Bremszaum in horizontaler Lage halten. Wenn der Motor stabil läuft, wird das  $p(V)$ -Diagramm gemessen. Im Messprotokoll notiert man außer den schon angegebenen Messgrößen für die Leerlaufversuche noch die angehängte Masse  $m$  und die Federkraft  $F$ . Es empfiehlt sich, die Hebelarmlänge  $r$  vor Beginn des Experimentes zu bestimmen, damit das erzeugte Bremsmoment in die entsprechende Protokollzeile des Messfensters eingetragen werden kann.

Im weiteren Gang des Versuches erhöht man durch Auflegen jeweils zweier weiterer Zusatzmassen (je  $m = 10g$ ) das Bremsmoment. Nach jeder Veränderung der Motorbelastung wird ein neues  $p(V)$ -Diagramm aufgenommen. Hat man auf diese Weise alle Massestücke aufgelegt, kann durch Erhöhung der Federkraft (höherer Aufhängepunkt in  $2cm$ -Schritten) das Bremsmoment weiter gesteigert werden. Das Experiment wird aber bei einer gebremsten Motordrehzahl von etwa  $150U/min$  beendet, und zwar auf folgende Weise:

- Bremszaum festhalten, angehängte Massen abnehmen und Federkraftmesser aushängen
- Heizstrom auf  $0A$  zurückdrehen und Stromversorgungsgerät ausschalten
- warten, bis Motor anfängt langsamer zu werden, dann Druck der Bremsbacken verringern
- Bremszaum von Motorabtriebswelle abziehen, der Heißluftmotor wird noch einmal für eine kurze Zeit eine hohe Leerlaufdrehzahl erreichen und die Restwärme des Zylinderkopfes umsetzen

**4. Auswertung**

Das Praktikumsprogramm bietet die Möglichkeit, alle im Messfenster gespeicherten Versuchsdaten in eine Excel-Tabelle zu exportieren. Nach Überprüfung aller getätigten Eingaben aktiviert man hierzu den

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 12

Menübefehl *Import/Export/Excel-Tabelle erstellen*. Die erzeugte Datei lässt sich leicht um die für Auswertung durchzuführenden Berechnungen ergänzen. Für die Bestimmung der in den Aufgabenstellungen gesuchten Größen ist es angebracht, alle Leistungsdaten in Energien pro Umlauf des Motors umzurechnen.

#### 4.1. Leistungsverhältnis bei Betrieb als Kältemaschine

Der Leistungsfaktor der Kältemaschine ist mit Hilfe der ermittelten Arbeiten pro Umlauf näherungsweise abschätzbar:

$$\varepsilon_K = \frac{Q_{43}}{W_{mech}} = \frac{UI}{f(W_{mech,th} + W_{reib})} \quad (16)$$

Hierbei bedeuten

$U$  - Heizspannung in  $V$ ,

$I$  - Heizstrom in  $A$ ,

$W_{mech,th}$  - gemittelte Arbeitsleistung pro Umlauf aus  $p(V)$ -Diagrammen in  $J$ ,

$W_{reib}$  - zusätzlich aufzuwendende Reibungsarbeit pro Umlauf aus Versuch 3.2 in  $J$  und

$f$  - gemittelte Drehfrequenz des Heißluftmotors in  $1/s$ .

Die pro Umlauf an das Kühlwasser abgegebene Wärmemenge erhält man folgendermaßen:

$$Q_{ab} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \rho_w c \Delta \vartheta \quad (17)$$

In (17) bedeuten

$\Delta V/\Delta t$  - Volumendurchsatz des Kühlwassers in  $cm^3/min$ ,

$\rho_w$  -  $0,998 g/cm^3$ , Dichte des Wassers bei  $20^\circ C$ ,

$c$  -  $4,182 J/(gK)$ , spezifische Wärmekapazität von Wasser bei  $20^\circ C$  und

$f$  - gemittelte Drehfrequenz des Heißluftmotors in  $1/min$ .

Gl. (17) kann für diesen Versuchsteil zur Überprüfung der Energiebilanz eingesetzt werden. Man beachte hierbei, dass die abgegebene Wärme sich aus  $Q_{ab} = |Q_{21}| + W_{reib} = Q_{43} + W_{mech,th} + W_{reib}$  ergibt.

#### 4.2. Wirkungsgrad bei Betrieb als Wärmekraftmaschine

Bei den Leerlaufexperimenten sind die Reibungsverluste pro Umdrehung sofort aus den  $p(V)$ -Diagramm ablesbar, da keine weitere äußere mechanische Arbeit verrichtet wurde. Mithilfe einer geeigneten Regression der Messwerte  $W_{reib}(f)$  kann dann auch die gesuchte Reibungsarbeit in (16) für den ersten Versuchsteil ermittelt werden.

Die an das Kühlwasser abgegebene Wärme  $Q_{ab}$  wird wieder nach (17) bestimmt. Vernachlässigt man die bei diesem Versuch nicht messbaren Verluste außerhalb des Motorzylinders (Lagerreibung,

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W8
Institut für Physik	<b>Heißluftmotor</b>	Seite 13

Luftwiderstand an der Schwungscheibe), dann muss diese Wärme betragsmäßig gleich der Größe  $Q_{12}$  in (11) sein. Damit ergibt sich der Heizungsteilwirkungsgrad zu:

$$\eta_{heiz} = \frac{Q_{12}}{Q_{heiz}} = \frac{f Q_{ab}}{UI} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \frac{\rho_w c \Delta \vartheta}{UI}. \quad (18)$$

Für die lastabhängigen Experimente berechnet man den mechanischen Teilwirkungsgrad als Quotient aus an der Abtriebswelle gemessener mechanischer Arbeit  $W_{mech}$  nach (15) und der im  $p(V)$ -Diagramm abgelesenen Arbeit des Gases:

$$\eta_{mech} = \frac{W_{mech}}{|W_{mech,th}|} = \frac{2\pi M}{|W_{mech,th}|} = \frac{2\pi r(mg + F)}{|W_{mech,th}|}. \quad (19)$$

Die Differenz zwischen Nenner und Zähler von (19) ergibt die gesuchten Reibungsverluste  $W_{reib}$  unter Last.

Eine Abschätzung des Heizungsteilwirkungsgrades gelingt unter Berücksichtigung der o. g. Näherungen, wenn man davon ausgeht, dass die mit dem Kühlwasser abgeführte Wärme  $Q_{ab}$  und die abgegebene mechanische Arbeit  $W_{mech}$  zusammen als Wärme  $Q_{12}$  dem Kreisprozess zugeführt wurden. Damit wird

$$\eta_{heiz} = \frac{Q_{12}}{Q_{heiz}} = \frac{f(Q_{ab} + W_{mech})}{UI} = \frac{\frac{\Delta V}{\Delta t} \rho_w c \Delta \vartheta + f W_{mech}}{UI}. \quad (20)$$

Da der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$  aus den gemessenen Größen gemäß (10) direkt bestimmbar ist, erhält man den thermodynamischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  entweder nach (14), d. h.

$$\eta_{th} = \frac{\eta_{ges}}{\eta_{heiz} \eta_{mech}} \quad (21)$$

oder zur Probe mit den schon in (19) und (20) eingesetzten Messgrößen:

$$\eta_{th} = \frac{|W_{mech,th}|}{Q_{12}} = \frac{|W_{mech,th}|}{Q_{ab} + W_{mech}}. \quad (22)$$

Die gefundenen Resultate sind in einer tabellarischen Übersicht zusammenzustellen. Jeweils in eine Grafik sind als Funktionen der Motordrehzahl zu zeichnen:

- die Reibungsarbeit pro Umlauf für Leerlauf und unter Belastung,
- der Teilwirkungsgrad  $\eta_{heiz}$  im Leerlauf,
- die Teilwirkungsgrade  $\eta_{heiz}$ ,  $\eta_{th}$  und  $\eta_{mech}$  unter Belastung sowie
- der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$ .

Die Messpunkte sollten nicht miteinander verbunden werden, vielmehr eignen sich nichtlineare Ausgleichskurven (parabolische Regression) zur Veranschaulichung der prinzipiellen Verläufe. Die Abhängigkeiten sind zu diskutieren, eine Betrachtung der Unsicherheiten ist qualitativ durchzuführen.