

## Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine: Aufzeichnung und Auswertung des $pV$ -Diagramms mit CASSY

### Versuchsziel

- Aufzeichnung des  $pV$ -Diagramms für verschiedene Heizspannungen
- Bestimmung der mechanischen Arbeit pro Umlauf aus der eingeschlossenen Fläche.

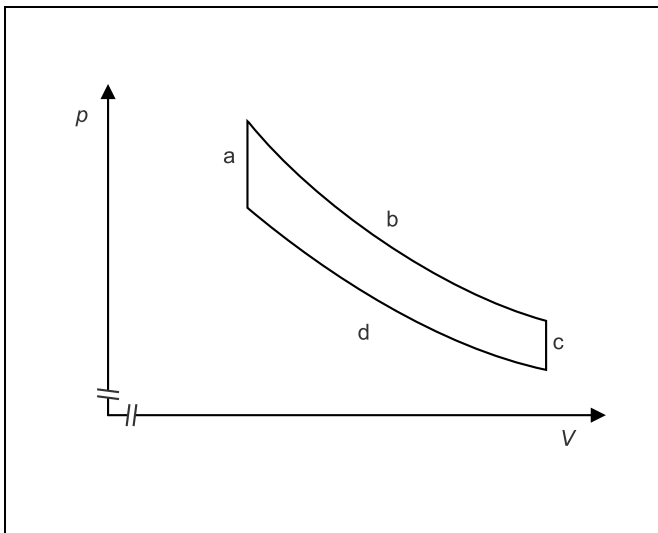


Fig. 1  $pV$ -Diagramm des Stirling-Kreisprozesses

### Grundlagen

Der Kreisprozess einer Wärmekraftmaschine wird häufig als geschlossene Kurve in einem  $pV$ -Diagramm ( $p$ : Druck,  $V$ : Volumen) dargestellt. Die dem System entnommene mechanische Arbeit entspricht hier der durch die Kurve eingeschlossenen Fläche:

$$W = - \oint p \cdot dV \quad (I)$$

Der Kreisprozess des Heißluftmotors wird häufig idealisiert als Stirling-Kreisprozess beschrieben (siehe Fig. 1), also als eine Abfolge aus isochorer Aufheizung (a), isothermer Expansion (b), isochorer Abkühlung (c) und isothermer Expansion (d). Diese Beschreibung ist jedoch eine grobe Näherung, da sich der Arbeitskolben sinusförmig bewegt und daher z. B. eine isochore Zustandsänderung nicht zu erwarten ist. Zum Vergleich mit dem realen Verhalten des Heißluftmotors wird im Versuch das  $pV$ -Diagramm mit dem Messwertaufzeichnungssystem CASSY computerunterstützt aufgezeichnet. In Abhängigkeit von der Zeit misst ein Drucksensor den Druck  $p$  im Zylinder und ein Wegaufnehmer die Position  $s$  des Arbeitskolbens, aus der das eingeschlossene Volumen  $V$  berechnet wird. Die Messwerte werden auf dem Bildschirm unmittelbar in einem  $pV$ -Diagramm dargestellt.

**Geräte**

1 Heißluftmotor . . . . .	388 182
1 U-Kern mit Joch . . . . .	562 11
1 Spannvorrichtung . . . . .	562 12
1 Netzspule, 230 V, mit 500 Windungen . .	562 21
1 Kleinspannungsspule, 50 Windungen . .	562 18
1 Sensor-CASSY . . . . .	524 010
1 CASSY Lab . . . . .	524 200
1 B-Box . . . . .	524 038
1 Drucksensor . . . . .	529 038
1 Verbindungskabel, 6polig, 1,5 m . . . . .	501 16
1 Stromquellen-Box . . . . .	524 031
1 Wegaufnehmer . . . . .	529 031
1 Angelschnur, 10 m . . . . .	309 48
1 Schraubenfeder, 5 N; 0,25 N/cm . . . . .	352 08

Experimentierkabel

*zusätzlich erforderlich:*

offener Wasserbehälter (mindestens 10 l)

1 Tauchpumpe 12 V . . . . .	388 181
1 Kleinspannungs-Netzgerät . . . . .	522 16
2 Silikonschläuche i.Ø 7 × 1,5 mm, 1 m . .	667 194

oder

Kühlwasserzu- und -abfluss

**Sicherheitshinweise**

Der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine ist nicht selbst anlaufend und bleibt z. B. nach einem Stromausfall stehen. Auch Blockieren der Kolbenstangen und der Kurbelwelle kann einen Stillstand der Maschine verursachen. Bei einem Stillstand wird die dem Zylinderkopf zugeführte Wärme nicht ausreichend abgeführt.

- Gebrauchsanweisung zum Heißluftmotor beachten.
- Zylinderkopf bei stehender Maschine nicht permanent beheizen.
- Heißluftmotor nicht ohne Aufsicht laufen lassen.
- Bei einem Stillstand elektrische Heizung sofort ausschalten.
- Kolbenstangen und Kurbelwelle durch Aufsetzen des Schutzgitters vor unbefugtem Zugriff schützen.

Die Glasbauteile des Heißluftmotors dürfen thermisch nicht zu stark belastet werden.

- Heißluftmotor nicht ohne Kühlwasser betreiben und einwandfreien Kühlwasserumlauf überprüfen.
- Temperatur des eintretenden Kühlwassers nicht über 30 °C ansteigen lassen.
- Heizwendel nicht im Dauerbetrieb und nur bei schnell laufendem Motor auf hohe Temperaturen (Gelbglut) heizen.

Achtung: Zylinderkopf-Deckel und Anschlussbuchsen werden bei längerem Betrieb mit maximaler Heizleistung sehr heiß.

- Schutzgitter des Zylinders montieren.
- Heißluftmotor vor Entfernen der Anschlusskabel oder vor Austausch des Zylinderkopf-Deckels abkühlen lassen.

**Aufbau**

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 2 dargestellt.

**Kühlwasserversorgung:**

- Offenen Wasserbehälter mit mindestens 10 l Wasser füllen und Tauchpumpe einhängen.
- Ausgang der Tauchpumpe an Kühlwasserzulauf des Heißluftmotors anschließen und Kühlwasserablauf in Wasserbehälter leiten.
- Tauchpumpe an Kleinspannungs-Netzgerät anschließen.

oder

- Kühlwasserzulauf des Heißluftmotors an Wasserhahn anschließen und Kühlwasserablauf in Wasserabfluss leiten

**Anschluss an CASSY:**

- Sensor-CASSY an seriellen Eingang des Computers (z. B. COM1) anschließen und Stromquellen-Box und B-Box aufstecken.
- Drucksensor über 6-poliges Verbindungskabel an B-Box anschließen.
- Verschlussstopfen entfernen und Schlauch des Drucksensors auf die Schlauchwelle an der Kolbenstange schieben.
- Wegaufnehmer mit zwei Kupplungssteckern auf Grundplatte des Heißluftmotors befestigen und an die Stromquellen-Box anschließen.
- Angelschnur an dem mit dem Arbeitskolben verbundenen Stift mit Öse festknoten, zweimal (zur Vermeidung von Schlupf) um den Wegaufnehmer führen und mit zweitem Ende unter leichtem Zug an der in der Öse am Gestellkopf eingehängten Schraubenfeder festknoten (im unteren Totpunkt des Arbeitskolbens muss bereits Spannung vorhanden sein).

**Spannungsversorgung:**

- Zylinderkopf-Deckel mit Heizwendel montieren (auf Markierung achten, siehe Gebrauchsanweisung zum Heißluftmotor).
- Schwungscheibe drehen und Heißluftmotor auf Dichtheit überprüfen; ggf. Schlauch des Drucksensors fester auf die Schlauchwelle schieben.
- Zerlegbaren Transformator aufbauen und 12-V-Ausgang an Anschlussbuchsen des Zylinderkopf-Deckels anschließen.

**Einrichtung von CassY Lab:**

- Software CASSY Lab aufrufen und im Register „CASSY“ des Dialogfensters „Einstellungen“ auf „Anordnung aktualisieren“ klicken.
- Auf die Darstellung der B-Box klicken und folgende Einstellungen wählen:  
Messgröße: „Relativdruck pB1 (2000 hPa)“  
Messbereich: „-2000 hPa ... 2000 hPa“
- Auf die Darstellung der Stromquellen-Box klicken und folgende Einstellungen wählen:  
Messgröße „Weg sA1“  
Messbereich „0 cm ... 15 cm“ wählen

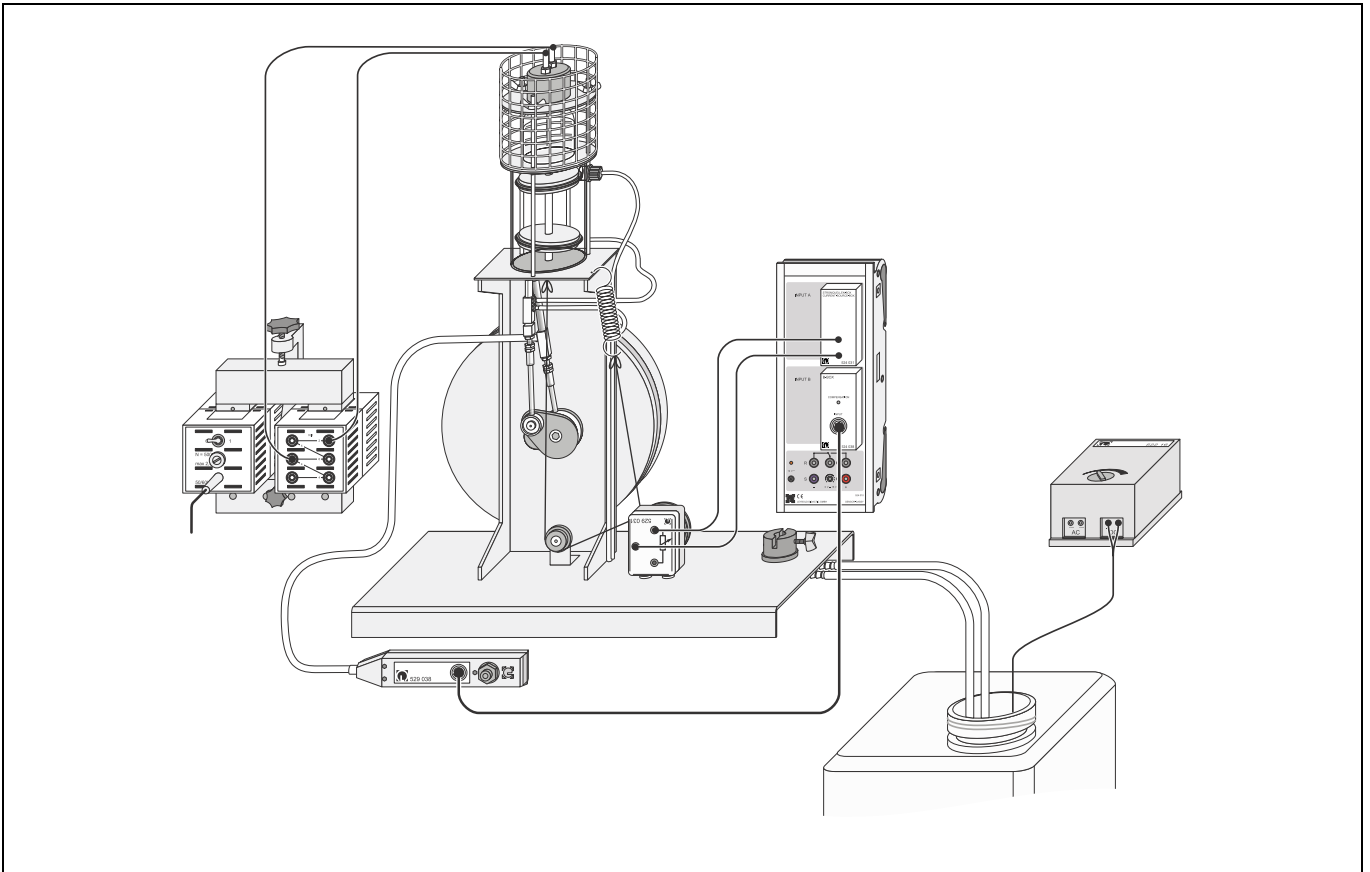


Fig. 2 Versuchsaufbau zur Aufzeichnung des  $pV$ -Diagramms des Heißluftmotors mit CASSY, dargestellt ohne Schutzgitter des Trägers

- Feder aushängen und Angelschnur lockern.
- Wegaufnehmer solange drehen, bis etwa  $sA1 = 7,5$  cm angezeigt wird, und Feder mit Angelschnur wieder einhängen.
- Anschließend Schwungrad von Hand drehen und überprüfen, ob die Positionen des Arbeitskolbens stets im gewählten Messbereich liegen.
- Weg  $s_0$  bestimmen, der dem kleinsten Volumen  $V_0$  (oberer Totpunkt des Arbeitskolbens) entspricht.
- Im Register „Parameter/Formel/FFT“ des Dialogfensters „Einstellungen“ neue Größe einführen:  
Größe: Volumen, Symbol:  $V$ , Einheit:  $\text{cm}^3$   
Formel:  $(sA1 - s_0) \cdot 28,3 + 195$  (Zahlenwert für  $s_0$  einsetzen!)
- Im Register „Darstellung“ des Dialogfensters „Einstellungen“ auswählen:  
x-Achse:  $V$ , y-Achse:  $pB1$


### Durchführung

- Kühlwasserversorgung einschalten (dazu z. B. Kleinspannungs-Netzgerät für Tauchpumpe auf Stufe 2 stellen), Durchfluss überprüfen und abwarten, bis Wasser durch den Ablaufschlauch zurückläuft.
- Heizspannung 10 V abgreifen, Netzspule einschalten und Heizwendel beobachten.

Sobald die Heizwendel rot glüht:

- Durch Drehen der Schwungradscheibe im Uhrzeigersinn Heißluftmotor anwerfen.

Wenn der Heißluftmotor trotz mehrmaligen Anwerfens nicht anspringt:

- Netzspule ausschalten und Aufbau überprüfen.
- Einige Zeit warten, bis der Heißluftmotor stabil läuft.
- Als Messparameter wählen:  
- „automatische Aufnahme“, „Intervall: 1 ms“, „Anzahl: 250“
- Mit dem Button  oder der Taste F9 Messung starten und  $pV$ -Diagramm aufzeichnen.
- Heizspannung  $U$  schrittweise bis 16 V erhöhen und Aufzeichnung wiederholen.
- Messparameter „Anzahl“ auf 500 erhöhen und Aufzeichnung mit den Heizspannungen 8 und 6 V wiederholen.

**Messbeispiel und Auswertung**

Fig. 3 zeigt das für die Heizspannung  $U = 10\text{ V}$  aufgezeichnete  $pV$ -Diagramm. Der Kurvenverlauf weicht deutlich vom Stirling-Kreisprozess ab. Diese Abweichung ist nicht weiter überraschend, wenn man den in Fig. 4 dargestellten zeitlichen Verlauf von Druck und Volumen betrachtet. Das Volumen zeigt einen sinusförmigen Verlauf, das heißt, die Zustandsänderung ist zu keinem Zeitpunkt wirklich isochor.

Tab. 1: Mechanische Arbeit  $W(10^4\text{ hPa cm}^3 = 1\text{ J})$  pro Umlauf in Abhängigkeit von der Heizspannung  $U$

$\frac{U}{V}$	$\frac{W}{J}$
6	1,2
8	1,5
10	1,9
12	2,3
14	2,6
16	2,9

**Bestimmung der mechanischen Arbeit  $W$  pro Umlauf:**

- Mit der rechten Maustaste in das Diagramm klicken.
- Menüpunkt „Integral berechnen → Peakfläche“ auswählen und mit dem Mauszeiger bei gedrückter linker Maustaste die Messkurve abfahren, bis ein kompletter Umlauf farbige markiert ist.

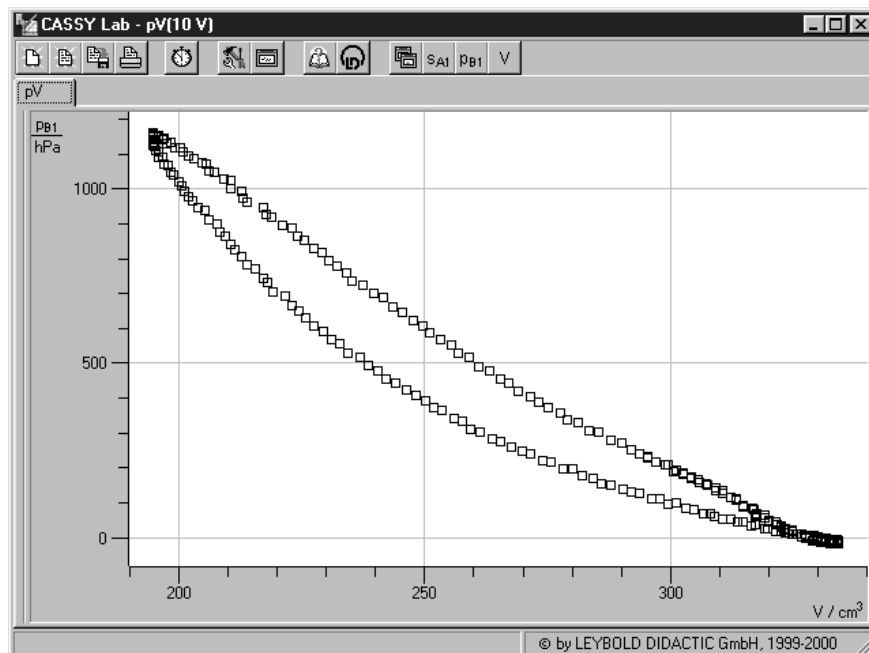


Fig. 3  $pV$ -Diagramm des Heißluftmotors bei  $U = 10\text{ V}$

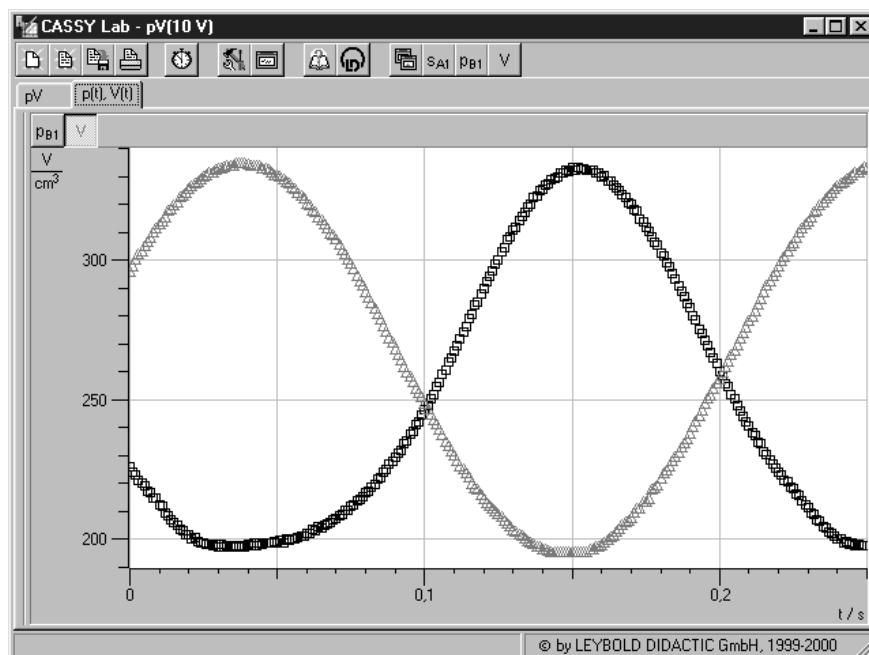


Fig. 4 Relativdruck  $p$  und Volumen  $V$  als Funktion der Zeit  $t$  bei  $U = 10\text{ V}$ .