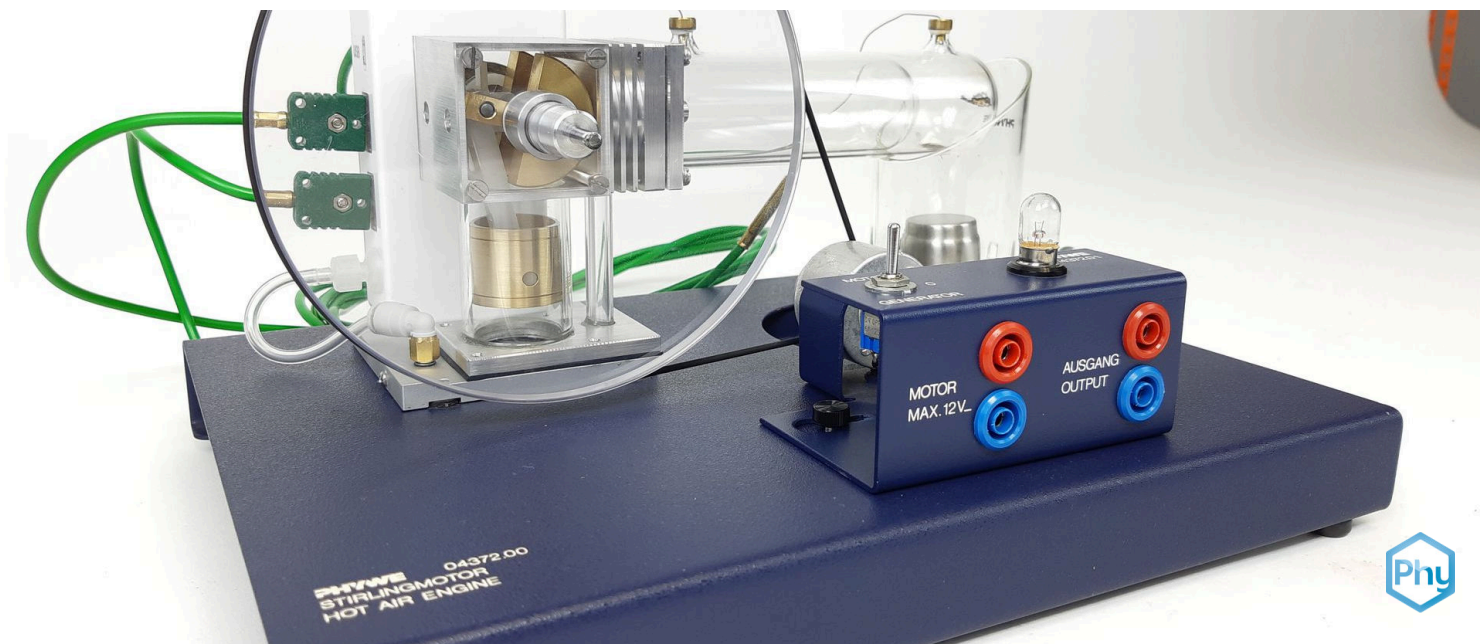


Stirlingmotor mit digitaler Messwerterfassung mit measureLAB



Physik

Wärmelehre / Thermodynamik

Temperatur & Wärme

Applied Science

Ingenieurwesen

Erneuerbare Energie

Wärme



Schwierigkeitsgrad

schwer



Gruppengröße

2



Vorbereitungszeit

10 Minuten



Durchführungszeit

20 Minuten

Diese Inhalte finden Sie auch online unter:


<https://www.curriculab.de/c/6850436753503d0002963921>

PHYWE

Allgemeine Informationen



Anwendung (1/3)

PHYWE



PHYWE Stirlingmotor transparent 04372-00

Der transparente Stirlingmotor von PHYWE vereint folgende Merkmale:

- Komplette transparent – alle wichtigen Teile sind sichtbar
- Messung aller Versuchsdaten über das USB SmartSense Modul
- measureLAB kompatibel
- Großes transparentes Schwungrad
- Zylinder und Verdrängerkolben bestehen aus hitzebeständigem Glas.
- Verdrängerkolben mit zwei Messanschlüssen für Temperaturmessungen

Anwendung (2/3)

PHYWE



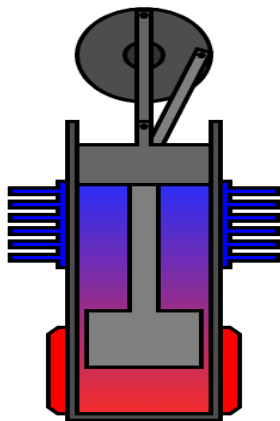
Dr. Robert Stirling

Ein Stirlingmotor ist eine Wärmekraftmaschine, die durch zyklische Kompression und Expansion von Luft bei unterschiedlichen Temperaturen betrieben wird, sodass eine Nettoumwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit stattfindet. Genauer gesagt handelt es sich beim Stirlingmotor um eine regenerative Wärmekraftmaschine mit geschlossenem Kreislauf und einem permanent gasförmigen Arbeitsmedium.

Der Stirlingmotor wurde ursprünglich von Dr. Robert Stirling (1790–1878) entwickelt.

Anwendung (3/3)

PHYWE



Das Prinzip des Stirlingmotors

PHYWEs Stirlingmotor hat nur einen Zylinder, der heiß am einen und kalt am anderen Ende ist. Ein lose sitzender Verdränger verschiebt die Luft zwischen dem heißen und kalten Ende des Zylinders. Ein Arbeitskolben am offenen Ende des Zylinders treibt das Schwungrad an.

Lehrerinformationen (1/4)

PHYWE

Vorwissen



Der Kreisprozess besteht aus vier thermodynamischen Prozessen / Carnot-Kreisprozess:

- Isotherme Wärmezufuhr (Expansion)
- Isochore Wärmeabfuhr (konstantes Volumen)
- Isotherme Wärmeabfuhr (Kompression)
- Isochore Wärmezufuhr (konstantes Volumen)

Während der Stirling-Kreis senkrechte Linien aufweist, ist dieser Kreisprozess in realen Anwendungen wie dem Stirlingmotor von PHYWE quasi elliptisch.

Lehrerinformationen (2/4)

PHYWE

Lernziel



Du lernst etwas über ...

- Erster und Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik
- Reversible Kreisprozesse, Isochore und Isotherme Veränderungen
- Gasgesetze
- Wirkungsgrad
- Wärmeumwandlung
- Wärmepumpe
- Carnot-Kreisprozess

Lehrerinformationen (3/4)

PHYWE

Prinzip



Der Stirlingmotor wird mittels eines einstellbaren Drehmomentmessers oder eines gekoppelten Generators belastet. Dabei werden Rotationsfrequenz und Temperaturänderungen des Stirlingmotors beobachtet. Die effektive mechanische Energie und Leistung sowie die effektive elektrische Leistung werden in Abhängigkeit von der Drehzahl ermittelt. Die pro Zyklus in Arbeit umgewandelte Energiemenge kann mit Hilfe des pV -Diagramms ermittelt werden.

Der Wirkungsgrad des Stirlingmotors kann näherungsweise berechnet werden.

Lehrerinformationen (4/4)

PHYWE

Aufgaben



- Aufbau des Experiments.
- Berechnung der insgesamt produzierten Energie durch den Stirlingmotor.
- Ermittlung der mechanischen Arbeit pro Umdrehung und Berechnung der mechanischen Leistungsabgabe in Abhängigkeit von der Drehfrequenz mit Hilfe des Drehmomentmessers.
- Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades des Brenners.
- Bewertung der elektrischen Leistungsabgabe in Abhängigkeit von der Drehfrequenz.
- Effizienzbewertung.

Sicherheitshinweise

PHYWE



- **Ethanol / Brennsprit**
- Für diesen Versuch gelten die allgemeinen Hinweise zum sicheren Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht.
- Die H- und P-Sätze entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt der jeweiligen Chemikalie.
- H225: Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar.
- H318: Verursacht schwere Augenschäden.
- P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellenarten fernhalten. Nicht rauchen.

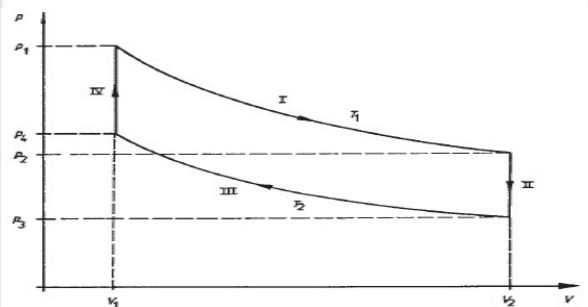
Theorie (1/6)

PHYWE

Im Jahr 1816 erhielt Robert Stirling ein Patent für einen Heißluftmotor, der heute als Stirlingmotor bekannt ist. Heutzutage wird der Stirlingmotor zur Erforschung des Prinzips von Wärmekraftmaschinen verwendet, da hier die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie besonders anschaulich und relativ leicht verständlich ist.

Derzeit durchläuft der Stirlingmotor aufgrund seiner vielen Vorteile eine neue Phase der Weiterentwicklung. So stellt er beispielsweise ein geschlossenes System dar, läuft sehr ruhig und kann mit vielen verschiedenen Wärmequellen betrieben werden, wodurch auch Umweltaspekte berücksichtigt werden können.

Theoretisch umfasst jeder Motorzyklus vier Phasen.



pV Diagramm des idealen Stirlingvorgangs

Theorie (2/6)

PHYWE

I) Eine isotherme Veränderung bei der Wärmezufuhr und Arbeitsleistung:

$$V_1 \rightarrow V_2; p_1 \rightarrow p_2; T_1 = \text{const.}$$

II) Eine isochore Modifikation beim Abkühlen des Gases: $T_1 \rightarrow T_2; p_2 \rightarrow p_3; V_2 = \text{const.}$

III) Eine isotherme Veränderung bei der Wärmeerzeugung und Arbeitszufuhr:

$$V_2 \rightarrow V_1; p_3 \rightarrow p_4; T_2 = \text{const.}$$

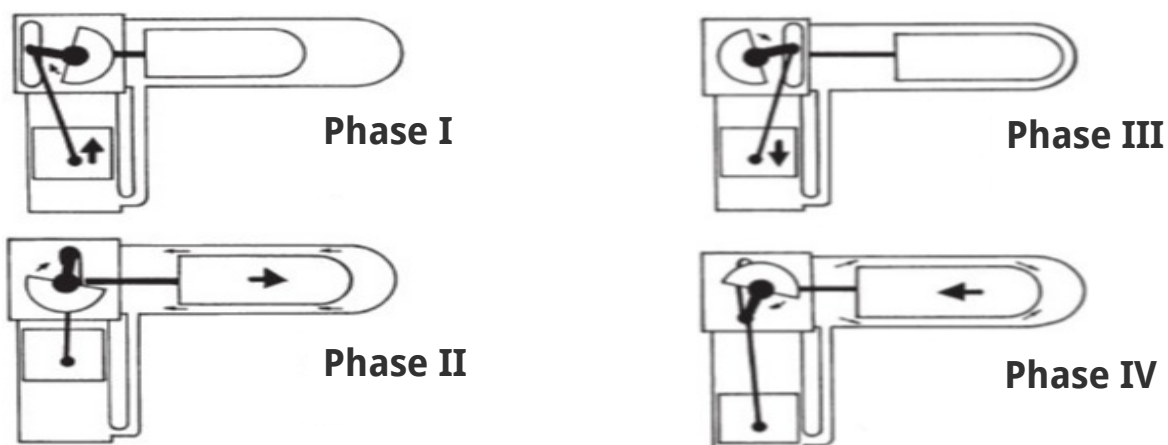
IV) Eine isochore Modifikation bei der Wärmezufuhr zum System: $T_2 \rightarrow T_1; p_4 \rightarrow p_1; V_1 = \text{const.}$

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ist die Menge thermischer Energie, die einem isolierten System zugeführt wird, gleich der Summe aus der inneren Energiezunahme des Systems und der von diesem geleisteten mechanischen Arbeit: $dQ = dU + pdV$

Wichtig für den Stirlingzyklus ist, dass die während der isochoren Abkühlphase erzeugte Wärmeenergie solange gespeichert wird, bis sie während der isochoren Aufheizphase wieder genutzt werden kann (Regenerationsprinzip).

Theorie (3/6)

PHYWE



Funktionsweise des Stirlingmotors; Phase I, II, III, IV

Theorie (4/6)

PHYWE

Somit wird in Phase IV die in Phase II freigesetzte Wärmeenergiemenge regenerativ aufgenommen. Das bedeutet, dass innerhalb des Motors lediglich ein Austausch thermischer Energie stattfindet. In den Phasen I und III wird lediglich mechanische Arbeit geleistet. Da sich die innere Energie bei isothermen Prozessen nicht verändert, ist die in diesen Phasen geleistete Arbeit jeweils gleich der aufgenommenen bzw. abgegebenen Wärmeenergie. Weil

$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$$

gilt, wobei ν die Anzahl der im System enthaltenen Mol ist, und R die generelle Gaskonstante.

Die Menge der produzierten Arbeit in der Phase I ist:

$$W_1 = -n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1)$$

(negativ, weil diese Menge der Arbeit investiert wird).

Folglich beträgt der Arbeitsaufwand während Phase III:

$$W_3 = +\nu \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V_2/V_1)$$

$$|W_1| > W_3 \text{ weil } T_1 > T_2$$

Theorie (5/6)

PHYWE

Die Gesamtarbeit ergibt sich somit aus der Summe von W_1 und W_3 . Diese entspricht der Fläche des pV -Diagramms:

$$W_t = W_1 + W_3$$

$$W_1 = -\nu \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln(V_2/V_1)$$

Nur ein Teil dieser gesamten Nutzenergie W_t wird durch äußere Belastungen des Motors als Nutzarbeit W_m genutzt. Der Rest besteht aus Verlusten innerhalb des Stirlingmotors.

Theorie (6/6)

Der maximale thermische Wirkungsgrad eines reversiblen Prozesses in einer Wärmekraftmaschine ist gleich dem Verhältnis zwischen der Gesamtarbeitsmenge $|W_1|$ und der Menge der zugeführten thermischen Energie $Q_1 = -W_1$.

$$\eta_{th} = W_t / W_1$$
$$\eta_{th} = \frac{\nu \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln(V_2/V_1)}{\nu \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1)}$$
$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

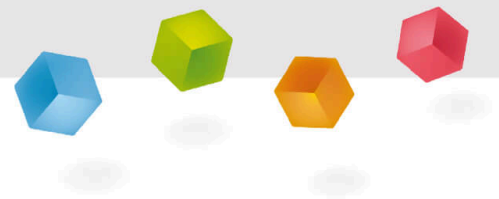
Carnot stellte fest, dass dies der maximale thermische Wirkungsgrad für jede Wärmekraftmaschine ist, der nur theoretisch erreicht werden kann. Man sieht, dass der Wirkungsgrad mit zunehmenden Temperaturunterschieden steigt.

Material

Position	Material	Art.-Nr.	Menge
1	Stirlingmotor, transparent	04372-00	1
2	Motor/Generator-Einheit	04372-01	1
3	Drehmomentmesser	04372-02	1
4	Kamin für Stirlingmotor	04372-04	1
5	Messwerterfassungsmodul für Stirlingmotor	04372-10	1
6	measureLAB, Schullizenz	14580-61	1
7	Schiebewiderstand 330 Ohm, 160 W	06116-03	1
8	Verbindungsleitung, 32 A, 50 cm, rot Experimentierkabel, 4 mm Stecker	07361-01	2
9	Verbindungsleitung, 32 A, 50 cm, blau Experimentierkabel, 4 mm Stecker	07361-04	3
10	Messzylinder, Kunststoff (PP), niedrige Form, 50 ml	36628-01	1
11	Ethanol (Brennspiritus), 1000 ml	31150-70	1
12	Glühlampe 4 V/0,08 A/0,16 W, Sockel E10 1 Stück	06154-00	5

PHYWE

Aufbau und Durchführung



Aufbau (1/5)

PHYWE

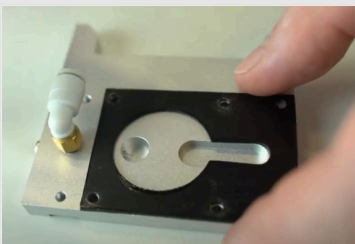


Abbildung 1
Demontage des alten
Datalogging Moduls

- Entfernen Sie zunächst den O-Ring und demontieren Sie die Grundplatte des alten Moduls, indem Sie sie von unten abschrauben.
- Nehmen Sie nun einen Schraubenzieher und lösen Sie die vier Schrauben an der Unterseite der Grundplatte des alten Moduls.
- Ersetzen Sie die alte Grundplatte durch die neue. Achten Sie darauf, dass die magnetischen Pole in die gleiche Richtung zeigen wie beim alten Modul.
- Verwenden Sie außerdem das schwarze Gummistück, um die Kammer abzudichten (Abb. 1).
- Schrauben Sie das neue Modul wieder auf die Grundplatte.
- Ziehen Sie alle vier mitgelieferten Schrauben von unten fest an. Achten Sie darauf, dass alle vier Schrauben richtig festgezogen sind.

Aufbau (2/5)

PHYWE



Abbildung 2

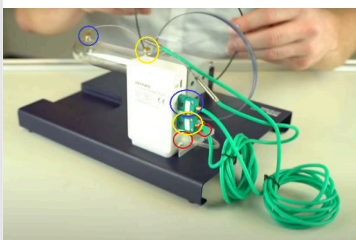


Abbildung 3

- Um das Modul mit der Grundplatte zu verbinden, schließen Sie zuerst den Silikonschlauch für die Druckmessung an und kleben Sie anschließend den Adapter für die Rotationsbewegung auf den Motor. Achten Sie darauf, dass die beiden Stifte korrekt im Modul positioniert sind (Abb. 2).
- Nun verbinden Sie den Silikonschlauch mit dem Modul und setzen das Modul an seinen Platz. Es passt dank der Magnete an der Unterseite problemlos und nehmen Sie die beiden Thermoelemente. Schließen Sie das mit „T2“ gekennzeichnete an den ersten Anschluss an und verwenden Sie das mit „T1“ gekennzeichnete im hinteren Bereich (Abb. 3).

Aufbau (3/5)

PHYWE

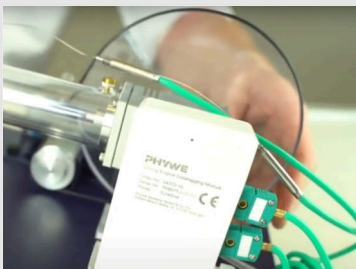


Abbildung 4
Montage des neuen
Datenlogger-Moduls

- Setzen Sie den O-Ring wieder auf den Motor (Abb. 4)
- Um eine Messung durchzuführen, starten Sie die MeasureLab-Software auf dem Computer.
- Sie können das Modul einfach über USB mit dem Computer verbinden.
- Wählen Sie in der Software die Option „Quick Start“, die das Modul automatisch erkennt.

Aufbau (4/5)

PHYWE



Abbildung 5

- Nun stehen Ihnen verschiedene Messoptionen zur Verfügung.
- Beginnen Sie zunächst mit dem pV -Modus.
- Starten Sie den Motor. Nach einigen Sekunden ist das Modul initialisiert und Sie können die Messung starten, indem Sie den Knopf unten links drücken (Abb. 5)
- Die pV -Kurve erscheint automatisch, und Sie können zum Beispiel in das Diagramm hineinzoomen und die vom Modul erfassten Messdaten ansehen.

Aufbau (5/5)

PHYWE

Abonnieren Sie auch gerne kostenlos den PHYWE YouTube-Kanal um keine relevanten Informationen mehr zu verpassen.

<https://www.youtube.com/c/phywesysteme/featured>

[Um zu abonnieren einfach hier klicken](#)



Durchführung

PHYWE

Darstellung und Zeichnung des pV Diagramms

- Verbinden Sie das Modul per USB mit dem PC und starten Sie measureLAB.
- Wählen Sie „Schnellstart“ und aktivieren Sie den P-V-Modus.
- Die Frequenz sollte auf 2 kHz eingestellt sein.
- Kurveinstellungen: Linienbreite: 6 Symbolpunkte.
- Halten Sie den brennenden Brenner unter den Glaszylinder und beobachten Sie die Temperaturanzeige.
- Vergessen Sie den Glasbehälter nicht.
- Wenn die Temperaturdifferenz ca. 80 K erreicht hat, geben Sie dem Schwungrad einen leichten Schub im Uhrzeigersinn, um den Motor zu starten. Nach kurzer Zeit sollte die Drehzahl ca. 600 U/min erreichen.

Handbuch

PHYWE

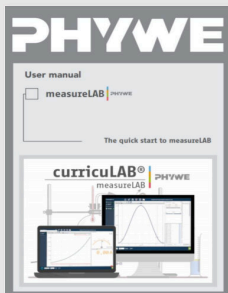


Abbildung 6

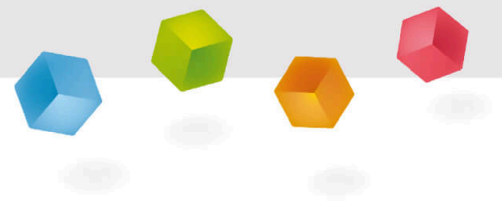
Verwendung von measureLAB

- Die Bedienung der Software ist ausführlich im Benutzerhandbuch (Abb. 6) beschrieben.
- Sie finden dieses Handbuch über die Schaltfläche (Abb. 7) in der measureLAB-Software



Abbildung 7

PHYWE



Auswertung

Auswertung (1/3)

PHYWE



Spiritusbrenner, einstellbar 32154-00

Nachfolgend finden Sie eine Schätzung der Wärmeleistung des Brenners (siehe Foto).

Menge des verbrannten Alkohols: $\Delta V = 29 \text{ ml}$

Dichte des Alkohols: $\rho = 0.83 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$

Dadurch lässt sich die pro Sekunde verbrannte Alkoholmasse bestimmen:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = 6.69 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

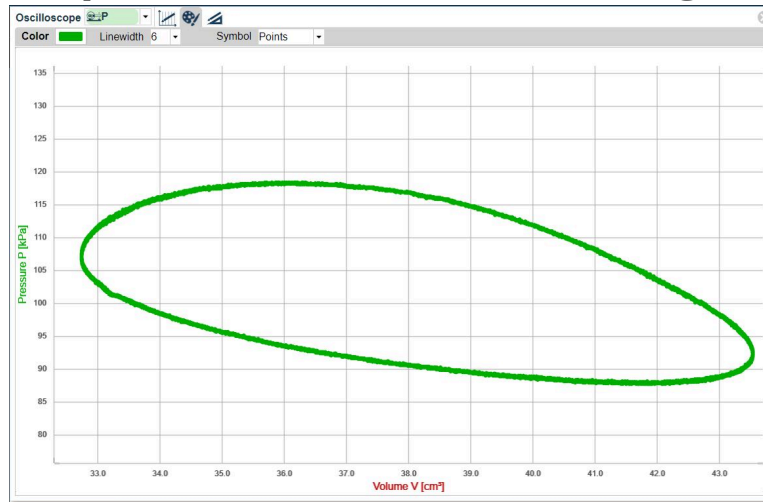
sowie die Wärmeleistung des Brenners:

$$P_H = 167 \text{ W}$$

Auswertung (2/3)

PHYWE

Typische pV Kurve des PHYWE Stirlingmotors:



Auswertung (3/3)

PHYWE

Nach der Aufzeichnung der pV-Kurve können Sie über die Schaltfläche „Tools und Analyse“ mithilfe der „Integrationsfunktion“ den Wert des Integrals bestimmen (Abb. 8).

Mit diesem Tool können Sie die zur Bestimmung des Wirkungsgrads des Stirling-Motors erforderliche Kurvenfläche bestimmen.

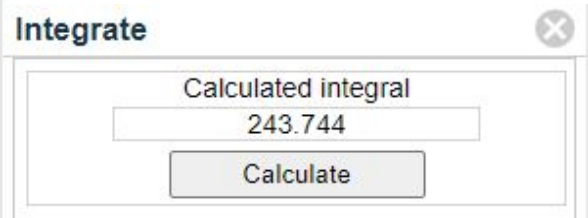


Abbildung 8

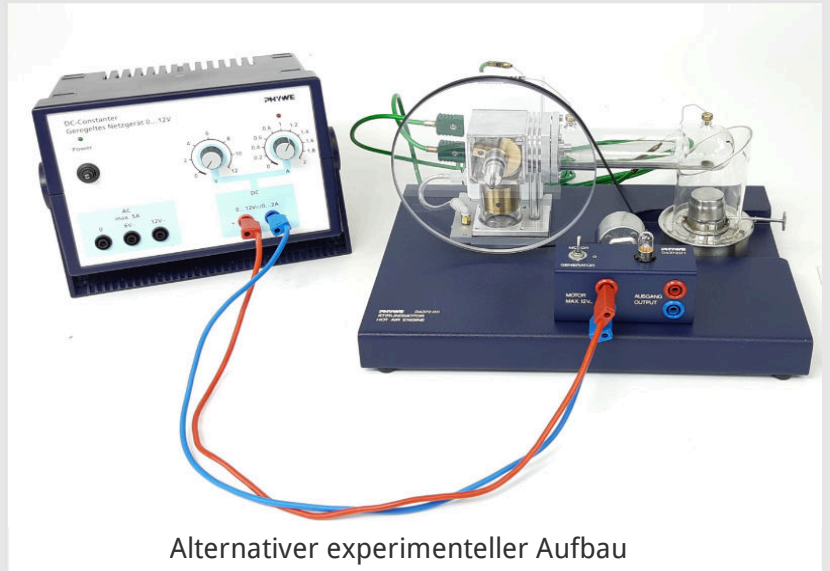
Alternativer Aufbau

PHYWE

Experimenteller Aufbau:

Mit einem externen Netzteil (z. B. PHYWE Netzteil, 230 V, 13506-93) mit DC: 0...12 V, 2 A können Sie den Carnot-Zyklus umkehren, indem Sie das Gerät gemäß dem abgebildeten Foto mit 5 - 10 VDC, 1,5 A versorgen.

Beachten Sie, dass das Netzteil nicht im Lieferumfang des Experiments enthalten ist und separat erworben werden muss.



Alternativer experimenteller Aufbau