

Thermodynamische Kreisprozesse sind die physikalische Grundlage der Erzeugung mechanischer Arbeit durch Wärmeenergiemaschinen. In diesem Versuch soll ein Einblick in die technische Anwendung solcher Maschinen gegeben werden, indem eine Stirling-Maschine als Heißluftmotor betrieben wird.

1. Theoretische Grundlagen

1.1. Der Stirling-Prozess

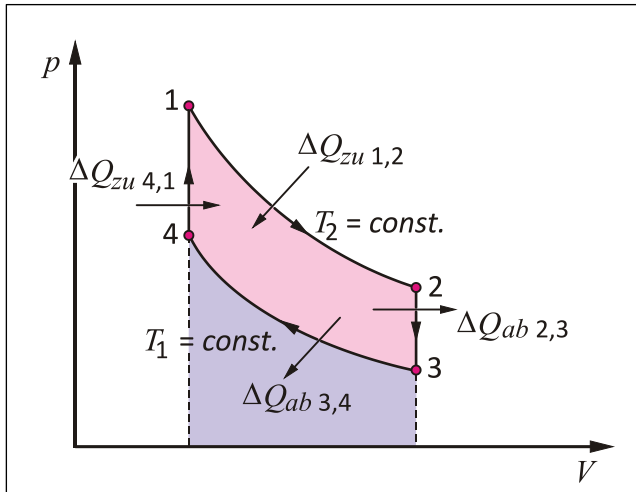


Bild 1: pV-Diagramm idealer Kreisprozesse

arbeiten durch einen Kurbelmechanismus um 90° phasenverschoben auf einer Welle. Eine äußere Wärmequelle heizt den sogenannten Expansionsraum rechts vom Verdrängerkolben. Als Wärmesenke dient der Kompressionsraum unterhalb von **a**.

1 → 2 Isotherme Expansion: Der Arbeitskolben **a** bewegt sich nach oben. Dabei dehnt sich heißes Gas nahezu isotherm bei der hohen Temperatur T_2 aus. Die erforderliche Wärme $\Delta Q_{zu\,1,2}$ wird dem Gas durch den äußeren Brenner zugeführt. Bei diesem Schritt wird nutzbare Arbeit geleistet

2 → 3 Isochore Abkühlung: Nun bewegt sich merklich der Verdrängerkolben **b** nach rechts und entfernt dadurch Arbeitsgas vom Einfluss des Brenners aus dem Expansionsraum rechts von **b** in den Kompressionsraum unterhalb von **a**. Das Gas gibt dabei die Wärme $\Delta Q_{ab\,2,3}$ an die Wänden der Strömungskanäle (= **Regenerator**) ab, wo sie zwischengespeichert wird.

3 → 4 Isotherme Kompression: Durch die Abwärtsbewegung von **a** wird das Arbeitsgas bei der niedrigen Temperatur T_1 komprimiert. Die Verdichtungs-wärme $\Delta Q_{ab\,3,4}$ wird nach außen abgegeben und die erforderliche Verdichtungsarbeit der Schwungscheibe entnommen.

4 → 1 Isochore Erwärmung: Bei der sich nun ergebenden Bewegung von **b** nach links wird das Arbeitsgas vom Kompressions- in den Expansionsraum

In einer Wärmekraftmaschine durchläuft ein Arbeitsmedium, in der Regel ein Gas, mehrere thermodynamische Zustandsänderungen bis es nach einem Zyklus wieder den Ausgangszustand erreicht. Der resultierende Kreisprozess lässt sich diagramm-artig darstellen, z. B. indem man den Druck des Arbeitsgases über seinem Volumen aufträgt. Diese Darstellung nennt man Indikatordiagramm.

Bild 1 zeigt idealisiert die Zustandsänderungen beim Stirling-Prozess und **Bild 2** die dazugehörige technische Realisierung. Ein direkt schließender Arbeitskolben **a** und ein in Strömung erlaubender Verdrängerkolben **b**

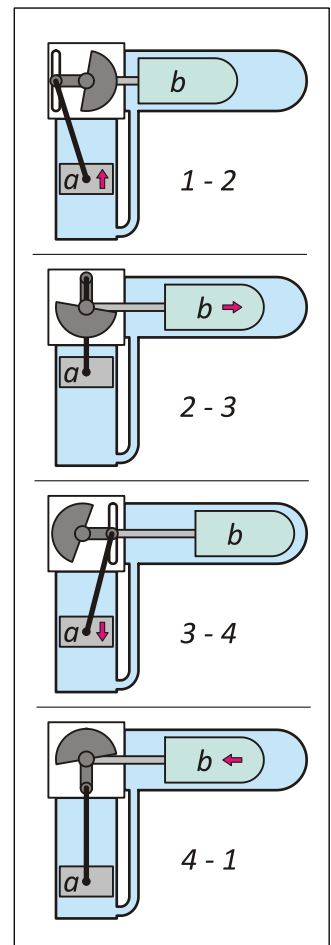


Bild 2: Funktion des Heißluftmotors

übergeschoben. Das eingeschlossene Volumen bleibt dabei näherungsweise konstant. Das Gas nimmt dabei Wärme $\Delta Q_{zu\ 4,1} = -\Delta Q_{ab\ 2,3}$ bis zur Temperatur T_2 auf. Damit ist der Ausgangszustand wieder erreicht und ein Zyklus durchlaufen.

Eine eindeutige Kenngröße eines solchen Kreisprozesses ist sein Wirkungsgrad η als Quotient der abgegebenen mechanischen Arbeit ΔW und der zugeführten Wärme ΔQ_{zu} .

$$\eta = \frac{\Delta W}{\Delta Q_{zu}} \quad (1)$$

Die im pV -Diagramm eingeschlossene Fläche stellt gerade die Arbeit ΔW dar.

Für ein ideales Gas als Arbeitsmedium errechnet man beim Stirling-Prozess (wie für den Carnot-Prozess) als theoretisch möglichen thermodynamischen Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (2)$$

Das heißt, der Wirkungsgrad hängt nicht vom Hubraum, nicht von der Gasart, sondern nur von den beteiligten Temperaturen ab.

Der reale Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine ist deutlich kleiner als der theoretische. Moderne Stirling-Motoren erreichen real mehr als 30%. Bemerkenswert ist ihr relativ gleichmäßiger Drehmomentverlauf an der Welle und ihr leiser, vibrationsarmer Betrieb.

Im Unterschied zu anderen Motoren (*Otto*-, *Diesel*-,) tauscht der Stirling-Motor sein Arbeitsgas nicht aus. Die Wärmezufuhr erfolgt extern, dadurch kann die Schadstoffemission durch die Wahl von geeigneten Wärmequellen (z.B. *Solarwärme*) minimiert werden. Nachteil des Stirling-Motors ist seine schlechte Regelbarkeit.

1.2 Leistungsmessung

Die Leistung des Heißluftmotors kann entweder aus Bremsversuchen oder aus dem pV -Diagramm bestimmt werden. Die in Bremsversuchen ermittelte Leistung P_M an der Welle des Motors ist wegen der inneren Reibung kleiner als die Leistung P_{pV} am Kolben.

Zur Messung von P_M wird der Motor durch eine konstante Reibungskraft, die am Umfang der Motorwelle angreift, abgebremst und das auftretende Drehmoment gemessen. Die verrichtete Arbeit bei einer Umdrehung ergibt sich zu

$$W_M = 2\pi \cdot M \quad (3)$$

und die von der Motorwelle abgenommene mechanische Leistung ist in Abhängigkeit von der Drehzahl n

$$P_M = 2\pi \cdot M \cdot n \quad (4)$$

Die geschlossene Kurve im pV -Diagramm wird bei einer Motorumdrehung in der Zeit T einmal durchlaufen. Der eingeschlossene Flächeninhalt entspricht der bei einer Umdrehung abgegebenen mechanischen Arbeit ΔW .

Die Leistung am Arbeitskolben ist dann

$$P_{pV} = \frac{\Delta W_{pV}}{T} = \Delta W_{pV} \cdot n \quad (5)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Leistungsbestimmung ist die Messung der abgegebenen elektrischen Leistung P_E eines durch den Heißluftmotor angetriebenen Generators. Diese Leistung kann durch Strom- und Spannungsmessung an einem Lastwiderstand gemessen werden und ergibt sich zu

$$P_E = U \cdot I \quad (6)$$

Der gesamte Wirkungsgrad der Maschine η_G wird aus dem Verhältnis der Motorleistung P_M und der zugeführten thermischen Leistung P_G bestimmt.

$$P_G = \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \varrho \cdot H_i \quad (7)$$

ΔV : Volumen des verbrannten Spiritus

ϱ : Dichte Spiritus

Δt : Brenndauer

H_i : spezifischer Heizwert Spiritus

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe: Ein Stirlingmotor erreicht bei einer Drehzahl von $n=600 \text{ min}^{-1}$ ein Drehmoment von $M=20 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$. Die durchschnittliche Temperatur unter dem Kolben beträgt dabei $\vartheta_1=280^\circ\text{C}$ und die über dem Kolben $\vartheta_2=80^\circ\text{C}$. Die verrichtete Kolbenhubarbeit ist $W_{pV}=0,26 \text{ J}$.

Nach einer Brenndauer von $t=40 \text{ min}$ wurde ein Viertel der ursprüngliche Befüllungsmenge von **80 ml** Spiritus verbraucht.

(Spiritus: Dichte $\varrho=0,83 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$; spezifischer Heizwert $H_i=24,48 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

- Berechnen Sie Folgende Größen:
 - die mechanische Arbeit W_M und die mechanische Leistung P_M
 - die Kolbenleistung P_{pV} und die inneren Reibungsverluste W_R
 - die zugeführte thermische Leistung P_G !
- Bestimmen Sie den mechanischen Gesamtwirkungsgrad η , den Carnot-Wirkungsgrad η_{th} und die inneren Reibungsverluste η_V !

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Stirling-Motor-Einheit, $pVnT$ -Messgerät, Drehmomentmesser, 2 Vielfachmessinstrumente, Schiebewiderstand, Messzylinder, Motor- / Generatoreinheit, Stoppuhr, PC mit Auswertungssoftware

2.2.2 Versuchshinweise

Achtung:

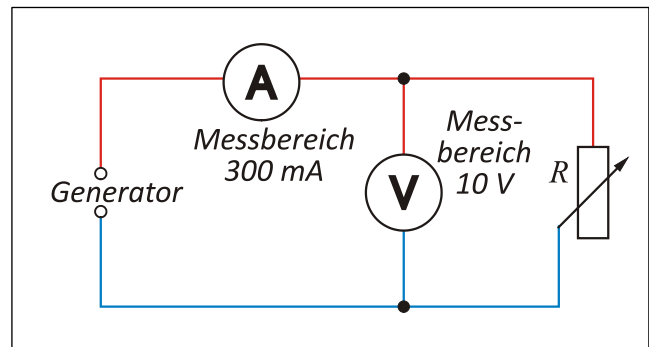
Das **$pVnT$ -Messgerät** ist nur bei Bedarf entsprechend einer am Praktikumsplatz liegenden Anleitung zu kalibrieren (Entscheidung des Laborpersonals).

Aufgabe 1: Bestimmung der thermischen Leistung

- Füllen Sie vor Beginn des Versuches den Spiritusbrenner mit einem abgemessenen Volumen an Brennstoff (siehe Hinweis Praktikumsplatz).
- Messen Sie die Gesamtbrenndauer Δt .
- Bestimmen Sie nach Abschluss des Versuches die verbrauchte Brennstoffmenge ΔV .

Aufgabe 2: Messung der abgegebenen elektrischen Leistung in Abhängigkeit von der Drehzahl

- Montieren Sie die Motor- / Generatoreinheit.
 - Treibriemen auf große Generatorscheibe
 - Lampe herausdrehen
 - Schalterstellung „Generator“
- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 3** auf.
- Beginnen Sie die Messung ohne Last bei Drehzahl $n > 800 \text{ min}^{-1}$ (Schalterstellung „0“ an Generatoreinheit).
- Variieren Sie den Widerstand R (**10 Einstellungen**).
- Messen Sie die Spannung U und den Strom I .
- Notieren Sie sich die dazugehörige Drehzahl n , sowie die Temperaturen ϑ_1 und ϑ_2 .

**Bild 3:** Schaltung zur Bestimmung von P_E **Hinweis:**

Bei größter Last sollte die Drehzahl bei **ca. 300 min^{-1}** liegen.

Aufgabe 3: Gleichzeitige Messung der abgegebenen mechanischen Arbeit W_M (Leistung P_M) und der Kolbenarbeit W_{pV} (Leistung P_{pV}) in Abhängigkeit von der Drehzahl

- Bauen Sie die Motor- / Generatoreinheit ab.
- Montieren Sie die Skale des Drehmomentmessers, in dem Sie den Zeiger des Drehmomentmessers auf die Achse des Stirling-Motors schieben. Variieren Sie durch Anziehen der Andruckschraube das Drehmoment.
- Nehmen Sie gleichzeitig mit Hilfe eines PC's die p - V -Kennlinie auf und bestimmen Sie daraus P_{pV} .

Hinweis:

Die Bedienungsanleitung für die PC-Messung und die PC-Auswertung befindet sich am Praktikumsplatz.

- Bestimmen Sie in Abhängigkeit vom Drehmoment M die Drehzahl n .
- Nehmen Sie mit Hilfe des PC's jeweils ein p - V -Diagramm auf und drucken Sie exemplarisch aber nur ein Diagramm aus.
- Ermitteln und notieren Sie anhand der aufgenommenen Diagramme durch das Messprogramm die verrichtete Kolbenarbeit W_{pV} .
- Notieren Sie sich ebenfalls die jeweiligen Temperaturen ϑ_1 und ϑ_2 . (bei größter Last sollte die Drehzahl bei **ca. 300 min^{-1}** liegen).
- Führen Sie die Messungen **für mindestens 10 unterschiedliche Drehmomente** durch.

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Bestimmung der thermischen Leistung

- Berechnen Sie die thermische Leistung P_G nach der Gleichung (7).

Aufgabe 2: Messung der abgegebenen elektrischen Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl

- Ermitteln Sie die elektrische Leistung P_E .

Aufgabe 3: Gleichzeitige Messung der abgegebenen mechanischen Arbeit W_M (Leistung P_M) und der Kolbenarbeit W_{pV} (Leistung P_{pV}) in Abhängigkeit von der Drehzahl n

- Berechnen Sie die mechanische Arbeit W_M und die mechanische Leistung P_M .
- Bestimmen Sie die inneren Reibungsverluste W_R ($W_R = W_{pV} - W_M$)
- Sie sollten bereits durch Hilfe des Messprogramms die Kolbenarbeit W_{pV} bestimmt haben.
- Berechnen Sie Kolbenleistung P_{pV} .

Aufgabe 4: graphische Darstellung

- Erstellen Sie zur Auswertung folgende Diagramme:

Diagramm 1: $W_{pV} = f(n)$ $W_M = f(n)$ $W_R = f(n)$

Diagramm 2: $P_M = f(n)$ $P_E = f(n)$

Diagramm 3: $P_{pV} = f(n)$

Diagramm 4: $M = f(n)$ (Verlauf des Drehmomentes)

- Zeichnen Sie die Regressionskurve bzw. die Regressionsgraden ein und bestimmen Sie die relative Messunsicherheit durch Antragen der Fehlerbalken.
- Interpretieren Sie Ihre Messergebnisse.

Aufgabe 5: Wirkungsgrade

- Berechnen Sie für die Messwerte folgendes:

– den mechanischen Gesamtwirkungsgrad $\eta_g = \frac{P_M}{P_G}$

– den theoret., thermodynamischen Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ (Carnot-Wirkungsgrad)

– und die inneren Reibungsverluste $\eta_V = \frac{W_M}{W_{pV}}$

bei denen die maximale mechanische Leistung bzw. das maximale Drehmoment abgegeben werden.

3. Ergänzung

3.1 Vertiefende Fragen

Wodurch werden die Unterschiede von idealem (**nach Bild 1**) und realem Stirling-Prozess (*gemessenes pV -Diagramm*) herbeigeführt?

3.2 Ergänzende Bemerkungen

Wärmepumpe und Kältemaschine

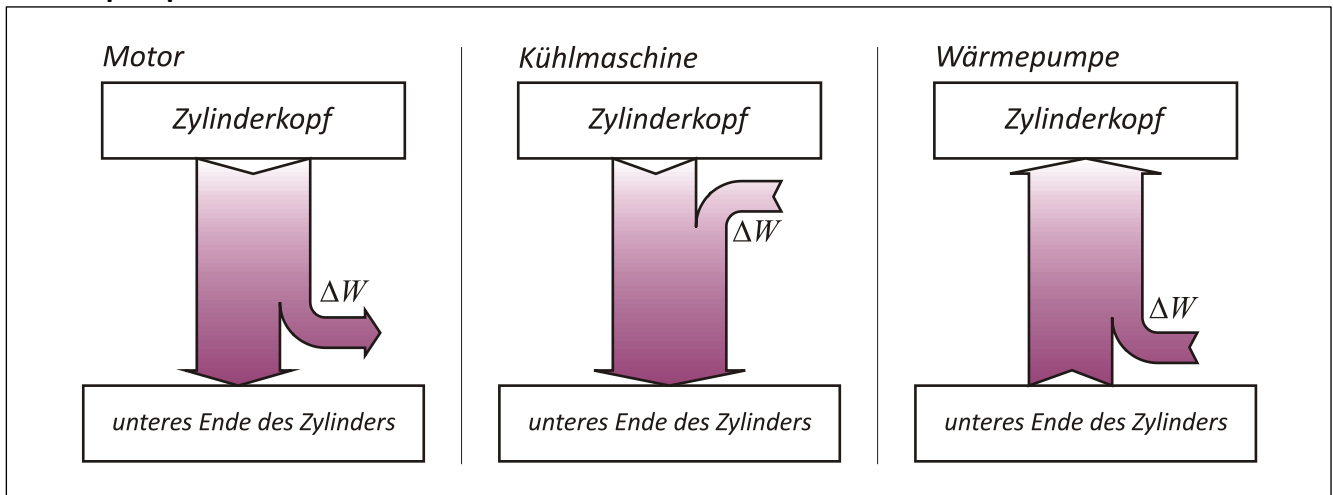


Bild 4: Energiefluss-Diagramm

Die Stirling-Maschine lässt sich als Kältemaschine betreiben, wenn die Heizung des Zylinderkopfes ausgeschaltet und die Maschine von außen (z.B. durch einen Elektromotor) in der gleichen Drehrichtung wie vorher betrieben wird. Die zur Kompression des Arbeitsgases notwendige mechanische Arbeit wird also von außen aufgebracht. Die für die Expansion notwendige Wärme wird dem Zylinderkopf durch Abkühlung entzogen.

Die Expansion erfolgt bei niedrigerer Temperatur des Arbeitsgases als die Kompression. Folglich wird das pV -Diagramm, anders als beim Motor, entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen.

Bei Umkehrung der Drehrichtung vertauschen sich die Funktionen von Zylinderunterteil und Zylinderkopf. Die zur Expansion nötige Energie wird der Umgebung am unteren Ende des Zylinders entzogen. Diese Wärme wird, vergrößert um die zugeführte mechanische Arbeit, an den Zylinderkopf abgegeben. Die Maschine arbeitet dann als Wärmepumpe.