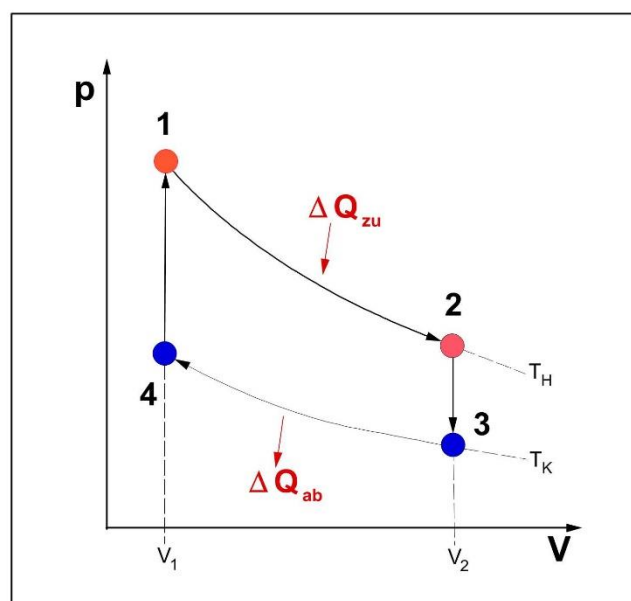
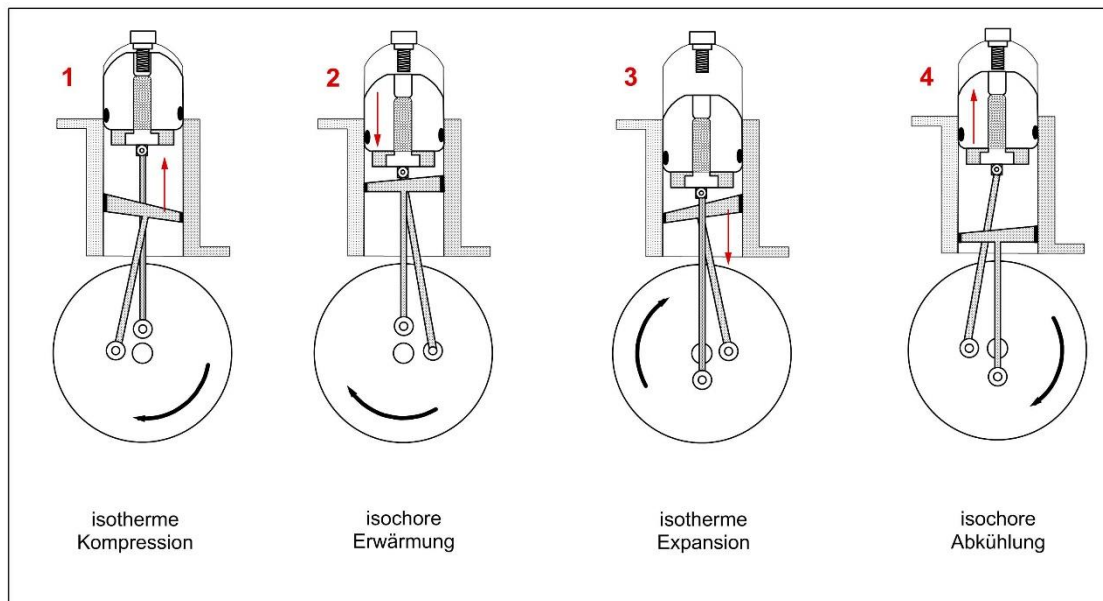


Versuch Nr. 9

Thermodynamische Kreisprozesse: Der Stirling-Motor



Kreisprozesse

Als Kreisprozesse bezeichnet man in der Thermodynamik eine Abfolge von Zustandsänderungen, die periodisch ablaufen und immer wieder den Ausgangszustand erreichen. Die charakteristischen messbaren Größen sind Druck, Volumen und Temperatur. Bei diesen Prozessen wird Wärme in Arbeit (Motoren) oder Arbeit in Wärme (Kühlschrank, Wärmepumpe) umgewandelt. Die Funktion aller Wärme- und Kältekraftmaschinen basieren auf Kreisprozessen.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, dass verschiedene Energieformen ineinander umwandelbar sind, aber nicht gebildet oder vernichtet werden können. Er trifft aber keine Aussage darüber, ob und mit welchem Anteil die Umwandlung von Wärme in Arbeit erfolgt.

Bereits im frühen 19ten Jahrhundert machte sich Sadi Carnot ((1796-1832) Gedanken zu einer idealen Maschine, die aus einem Kolben und einem beweglichen Zylinder besteht und mit einem idealen Gas arbeitet. Die Maschine besitzt zwei Wärmespeicher T_H und T_K . Carnot postulierte, dass Arbeit beim Durchlaufen von Zustandsänderungen, die im pV-Diagramm geschlossene Kurven bilden, erzeugt wird. Eine Maschine, die mit reversiblen Prozessen arbeitet, ist am wirkungsvollsten. Hier geht man von infinitesimal kleinen Schritten aus, sodass sich immer ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellen kann.

Der Carnot'sche Kreisprozess setzt sich aus zwei Isothermen und zwei Adiabaten zusammen.

- 1 → 2 Isotherme Expansion:

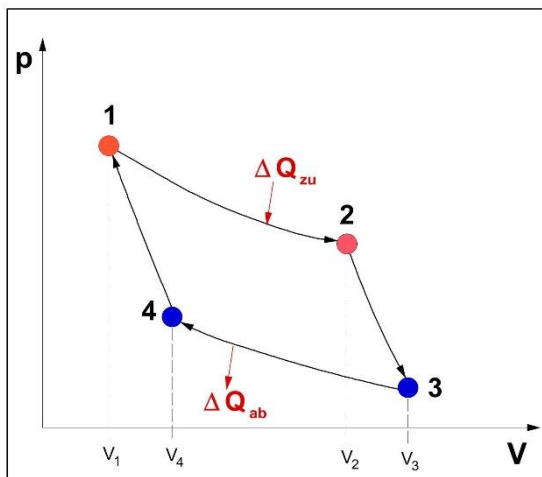


Abbildung 1: pV-Diagramm des Carnotprozesses

Das System wandelt die zugeführte Wärme bei der hohen Temperatur T_H vollständig in Arbeit um.

Die Innere Energie U ändert sich durch die zugeführte Wärme nicht ($\Delta U=0$). Die verrichtete Arbeit ist gegeben durch:

$$\Delta W_{12} = \Delta U - \Delta Q_{zu} = -\Delta Q_{zu} = R T_H \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

$$-\frac{\Delta Q_{zu}}{T_H} = R \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

- 2 → 3 Adiabatische Expansion:

Ohne zugeführte Wärme leistet das System Arbeit, $\Delta Q = 0$. Die Energie für diese Arbeit kommt aus der Inneren Energie des Arbeitsmediums.

$$\Delta U = c \Delta T \quad \text{mit } c = \text{Wärmekapazität} \quad (3)$$

$$\Delta W_{23} = \Delta U_1 = c (T_H - T_K) \quad (4)$$

- 3 → 4 Isotherme Kompression

Das System gibt Wärme bei der Temperatur T_K nach außen ab und mechanische Arbeit wird zugeführt. Auch hier ändert sich wie in Schritt 1 → 2 die innere Energie eines idealen Gases nicht

$$\Delta W_{34} = \Delta U - \Delta Q_{ab} = -\Delta Q_{ab} = R T_K \ln \frac{V_3}{V_4} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta Q_{ab}}{T} = R \ln \frac{V_3}{V_4} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta Q_{ab}}{T_K} = R \ln \frac{V_3}{V_4} = -R \ln \frac{V_1}{V_2} = -\frac{\Delta Q_{zu}}{T_H} \quad (7)$$

- 4 → 1 Adiabatische Kompression

Am System wird Arbeit geleistet, ohne dass es zur Wärmeabfuhr kommt. Die aufgewandte Arbeit wird vollständig zur Erhöhung der Inneren Energie verwendet.

$$\Delta U = m c_V \Delta T \quad (8)$$

und für die Arbeit:

$$\Delta W_{41} = \Delta U_1 = c_V (T_K - T_H) \quad (9)$$

Bildet man die Bilanz zwischen den Wärmemengen und den mechanischen Energien folgt daraus

$$\Delta W_{\text{gesamt}} = \Delta W_{12} + \Delta W_{23} + \Delta W_{34} + \Delta W_{41} \quad (10)$$

Die bei der adiabatischen Expansion (ΔW_{23}) und der adiabatischen Kompression (ΔW_{41}) aufgewandte Arbeit hat den gleichen Betrag.

$$\Delta W_{23} = -\Delta W_{41} \quad (11)$$

Damit folgt für die gesamte Arbeit

$$\Delta W_{\text{gesamt}} = \Delta W_{12} + \Delta W_{34} \quad (12)$$

$$\Delta W_{\text{gesamt}} = R T_H \ln \frac{V_1}{V_2} + R T_K \ln \frac{V_3}{V_4} \quad (13)$$

Aus der Poissonschen Adiabatangleichung $T V^{\kappa-1} = \text{konstant}$ (siehe Anhang) folgt:

$$\Delta W_{\text{gesamt}} = R T_H \ln \frac{V_1}{V_2} - R T_K \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (14)$$

$$\Delta W_{\text{gesamt}} = R (T_H - T_K) \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (15)$$

Der Wirkungsgrad einer Maschine ist definiert als das Verhältnis aus verrichteter Arbeit und aufgenommener Wärmeenergie

$$\eta = \frac{\Delta W_{\text{gesamt}}}{\Delta Q_{\text{zu}}} = \frac{R(T_H - T_K) \ln \frac{V_1}{V_2}}{R T_H \ln \frac{V_1}{V_2}} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{T_H - T_K}{T_H} \quad (17)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_K}{T_H} \quad (18)$$

Der 1. Hauptsatz setzt durch die Energieerhaltung Grenzen, innerhalb derer ein Prozess ablaufen muss, er sagt aber nicht aus, ob und mit welchem Anteil die Umwandlung von Wärme in Arbeit erfolgt und in welche Richtung ein Prozess abläuft. Der 2. Hauptsatz bestimmt in welchem Ausmaß sich eine Energieform in eine andere umwandeln lässt und welche Prozesse spontan ablaufen.

In der Natur verlaufen alle Vorgänge irreversibel, sie sind nicht vollständig umkehrbar. In Gedankenexperimenten kann man sich Prozesse überlegen, die reversibel ablaufen, also in jedem Moment umkehrbar sind. Sowohl reversible als auch irreversible Vorgänge verstoßen nicht gegen den 1. Hauptsatz der Thermodynamik, weil keine Energie gebildet oder vernichtet wird. Bei einem irreversiblen Vorgang streben Energie und Teilchen eines Systems einer Gleichverteilung zu. Das System geht also in einen Zustand größerer „Unordnung“ über, die Entropie nimmt zu.

Führt man einem System Wärme zu, dann erhöht sich damit auch seine Entropie. Für reversible Prozesse ist die Entropieänderung proportional zur zu- oder abgeführten Wärmemenge dQ und umgekehrt proportional zur Temperatur bei der dies geschieht.

$$\Delta S_{\text{rev}} = \frac{dQ_{\text{reversibel}}}{T} \quad (19)$$

In einem thermisch abgeschlossenen System findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Damit ist für das Arbeitsmedium im Fall reversibler Prozesse $\Delta S_{\text{rev}} = 0$. Beim Carnot-Prozess wird nicht die gesamte aufgenommene Wärme in Arbeit umgewandelt. Ein Teil der Wärme wird an einen Wärmespeicher mit niedriger Temperatur abgegeben.

Der Wirkungsgrad der Carnot'schen Maschine ist gegeben durch:

$$\eta = 1 - \frac{T_K}{T_H} = \frac{\Delta W_{gesamt}}{\Delta Q_{zu}} = \frac{\Delta Q_{zu} - \Delta Q_{ab}}{\Delta Q_{zu}} = 1 - \frac{\Delta Q_{ab}}{\Delta Q_{zu}} \quad (20)$$

$$\frac{T_K}{T_H} = \frac{\Delta Q_{ab}}{\Delta Q_{zu}} \quad (21)$$

$$\frac{\Delta Q_{zu}}{T_H} = \frac{\Delta Q_{ab}}{T_K} = 0 \quad (22)$$

$$\text{mit } \Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad \Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 0 \quad (23)$$

Die Entropie bleibt beim Carnot'schen Kreisprozess für das Arbeitsmedium erhalten, also ist er reversibel.

Bei irreversibel arbeitenden Maschinen ist die Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit noch geringer, da Reibungswärme auftritt und an die Umgebung abgegeben wird. Damit ist für das Arbeitsmedium bei irreversiblen Prozessen $\Delta S \geq 0$.

Bei allen realen Vorgängen in einem abgeschlossenen System kann die Entropie von alleine nur zunehmen bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Die Entropie erreicht dann ihr Maximum. Eine Umkehrung dieser Prozesse findet von selber nicht statt. Damit bestimmt die Entropie in welche Richtung ein Prozess spontan verläuft.

Stirling-Motor

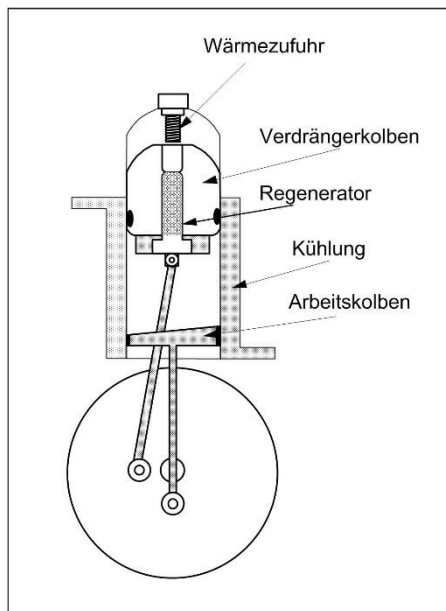


Abbildung 2: Aufbau eines Stirling-Motors
Typ β

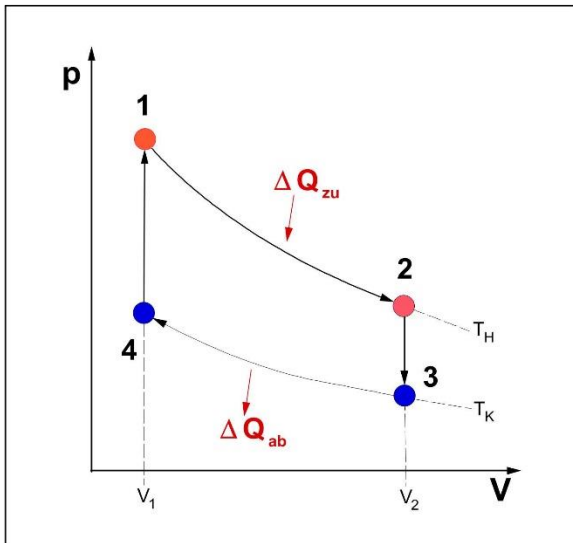
Der Stirling-Motor ist eine von Robert Stirling 1816 entwickelte Wärmekraftmaschine. Stirling-Motoren besitzen einen permanent gekühlten und einen permanent geheizten Bereich zwischen denen das Arbeitsgas hin und her bewegt wird. Im geheizten Teil findet die Expansion und im gekühlten Bereich die Kompression statt. Hierbei wird, ähnlich dem in der Theorie beschriebenen Kreisprozess, vom Arbeitsmedium Wärme aus dem heißen Reservoir entnommen, nutzbare Arbeit verrichtet und ein kleiner Teil der aufgenommenen Energie als Wärme an das kältere Reservoir abgegeben.

Eine Besonderheit des Stirling-Motors ist der Regenerator. Auf dem Weg der heißen Gase in den gekühlten Bereich des Motors nimmt der Regenerator bis zu 80% der Wärmeenergie auf. Diese Wärme gibt er beim Verdrängen der kalten Gase in den warmen Bereich wieder ans Gas ab. Dadurch kann der Stirling-Motor theoretisch den Wirkungsgrad des Carnot'schen Kreisprozesses erreichen.

Je nach Bauart unterscheidet man bei Stirling-Motoren zwischen dem α -, β - oder γ -Typ. Bei dem hier verwendeten Motor handelt es sich um einen β -Typen bei dem beide Kolben in einem Zylinder laufen und der Regenerator im Verdrängerkolben untergebracht ist.

Stirling-Kreisprozess

Ein Stirling-Motor arbeitet nahezu wie eine Carnot'sche Maschine. Der ideale Stirling-Kreisprozess wird ebenfalls durch vier Zustandsänderungen beschrieben. Er setzt sich aus zwei Isothermen und zwei Isochoren zusammen. Die von der Maschine geleistete Arbeit entspricht ebenfalls der von den Linien umschlossenen Fläche im pV-Diagramm.



• 1 → 2 Isotherme Expansion:

Die Volumenänderung erfolgt bei konstanter Temperatur T_H , wobei die Wärmemenge Q_{zu} aufgenommen wird. Das Gasvolumen wird größer (beide Kolben bewegen sich nach rechts, siehe unten), der Druck sinkt und Arbeit wird verrichtet. Die Temperatur wird durch die Heizung konstant gehalten. Die verrichtete Arbeit ist gegeben durch:

$$Q_{zu} = Q_{12} = W_{12} = n R T_H \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (24)$$

Abbildung 3: pV-Diagramm eines idealen Stirling-Prozesses

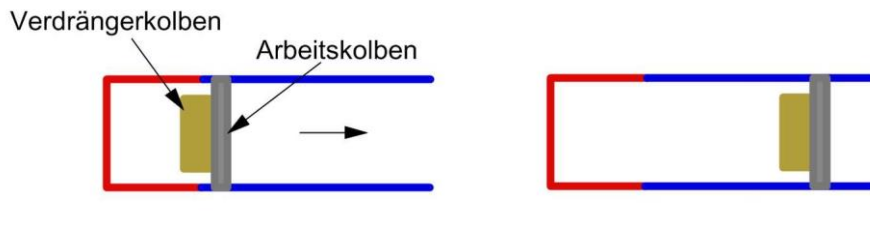


Abbildung 4: Isotherme Expansion des Stirling-Motors

2 → 3 Isochore Abkühlung:

Die isochore Abkühlung erfolgt bei konstantem Volumen. Hierbei wird die Wärmemenge Q_{23} an den Regenerator abgegeben, der die Wärme speichert. Temperatur und Druck des Gases ändern sich. Da auf beiden Seiten das gleiche Volumen vorliegt, erfordert das Verschieben der Kolben keine Arbeit.

$$Q_{23} = \Delta E_{reg} = n c_v (T_H - T_K) \quad (25)$$

ΔE_{reg} = Änderung der thermischen Energie des Regenerator und $n = 1 \text{ Mol}$ des Gases



Abbildung 5: Isochore Abkühlung des Stirling-Motors

Der Verdrängerkolben mit Regenerator bewegt sich nach links und nimmt dabei Wärme des Gases auf. Der Regenerator wird warm.

3 → 4 Isotherme Kompression:

Die isotherme Kompression vom Volumen V_2 auf Volumen V_1 erfolgt bei konstanter Temperatur T_K . Hierbei wird die Wärmemenge Q_{ab} abgegeben und die Arbeit W_{34} muss zugeführt werden. Der äußere Luftdruck schiebt den Kolben in den Zylinder. Das Gasvolumen wird kleiner und der Druck steigt an. Durch die Kühlung wird die Temperatur konstant gehalten.

$$Q_{ab} = Q_{34} = W_{34} = n R T_K \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (26)$$



Abbildung 6: Isotherme Abkühlung des Stirling-Motors

Der Arbeitskolben geht nach links und verdichtet das Gas. Die dabei erzeugte Wärme wird an die gekühlte Zylinderwand abgegeben.

4 → 1 Isochore Erwärmung:

Bei der isochoren Erwärmung wird die Wärme Q_{41} vom Gas aufgenommen. Diese Wärme wird vom Regenerator abgegeben. Temperatur und Druck ändern sich. Das Verschieben des Verdrängerkolbens erfordert keine Arbeit, da auf beiden Seiten das gleiche Volumen vorliegt.

$$Q_{41} = -\Delta E_{\text{Reg}} = n C_v (T_K - T_H) \quad (27)$$



Abbildung 7: Isochore Erwärmung des Stirling-Motors

Der Verdrängerkolben bewegt sich nach rechts und der Regenerator gibt die gespeicherte Wärme an das Gas ab.

Der thermische Wirkungsgrad ergibt sich wie bei der Carnot'schen Maschine:

$$\eta = \frac{T_H - T_K}{T_H} = 1 - \frac{T_K}{T_H} \quad (28)$$

T_H = Temperatur des heißen Gases, T_K = Temperatur des kalten Gases

Der Teilschritt der isothermen Expansion erfolgt bei der hohen Temperatur T_H . Das Gas nimmt die Wärme auf und wandelt sie vollständig in Arbeit um. Der Druck des Gases erzeugt eine Kraft auf die Fläche A des Arbeitskolbens $F = p A$. Der Kolben bewegt sich um den Weg Δs nach oben. Die abgegebene Arbeit beträgt dabei:

$$W = F \Delta s = p A \Delta s = p \Delta V \quad (29)$$

Im pV -Diagramm des Stirling-Prozesses erkennt man die geleistete Arbeit als die Fläche unter der Linie $1 \rightarrow 2$. Siehe auch Abbildung 3.

Während der isothermen Kompression bei T_K muss weniger Arbeit zugeführt werden, als bei der isothermen Expansion geleistet wird. Die Fläche unter der Linie $3 \rightarrow 4$ ist kleiner. Bei jeder Umdrehung des Motors ist die beim Kreislauf umschlossene Fläche die Arbeit W , die abgegeben wird.

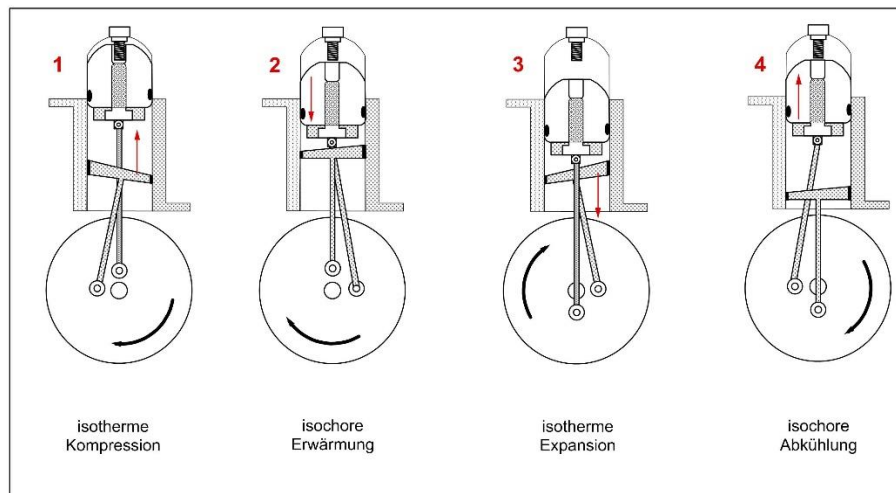


Abbildung 8: Kolbenstellung des verwendeten Stirling-Motors bei den einzelnen Arbeitsschritten des Stirling-Prozesses.

Inbetriebnahme des Motors

Als Heißluftmotor:

- Kühlwasserversorgung einschalten und überprüfen
- Heizspannung 12 Volt abgreifen, Netzspule einschalten und Heizwendel beobachten
- Sobald die Heizwendel rot glüht durch Drehen der Schwungscheibe im Uhrzeigersinn Heißluftmotor anwerfen. **Achtung:** Die Heizwendel darf nie gelb glühen!
- Wenn der Motor trotz mehrmaligen Anwerfens nicht anspringt Netzspule ausschalten und Aufbau prüfen. Assistenten benachrichtigen.

Sicherheitshinweise:

Zylinderkopf bei stehender Maschine nie permanent beheizen.

Heißluftmotor nie ohne Aufsicht laufen lassen.

Bei Stillstand elektrische Heizung sofort ausschalten.

Bewegliche Teile durch Sicherheitsgitter schützen.

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

Heißluftmotor nie ohne Wasserkühlung betreiben.

Die Kühlwassertemperatur sollte 30°C nicht überschreiten.

Heizwendel nicht im Dauerbetrieb und nur bei schnell laufendem Motor auf hohe Temperaturen heizen-

Bei längerem Betrieb werden Zylinderkopf und Anschlussbuchsen sehr heiß.
Verbrennungsgefahr!

Motor als Wärmekraftmaschine

In diesem Versuchsteil wird der Motor als Wärmekraftmaschine betrieben. Über eine Heizwendel wird er mit elektrischer Energie Q_{el} von außen beheizt. Hierbei treten Verluste Q_v durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung auf, sodass nicht die gesamte zugeführte Wärme in den Kreisprozess einfließt. Die in den Kreisprozess eingekoppelte Wärme ist somit:

$$Q_{Kr} = Q_{el} - Q_v = W_{mech} \quad (30)$$

Nur die Wärmemenge Q_{Kr} wird vom Motor in mechanische Arbeit W_{mech} umgewandelt. Diese kann durch Aufnahme eines pV-Diagramms und Vermessung der eingeschlossenen Fläche bestimmt werden. Eine weitere Möglichkeit die geleistete Arbeit bzw. die Leistung des Motors zu bestimmen erfolgt über die Messung des Drehmomentes und der dazugehörigen Drehzahl.

Neben der Umwandlung in mechanische Energie, fließt ein Teil der zugeführten Wärme Q_{Kw} ungenutzt in den Kühlkreislauf. Weitere Verluste entstehen durch Reibung von Kolben und Lagern Q_R . Für die Bilanz des Motors lässt sich also zusammenfassen:

$$Q_{el} = Q_v + W_{mech} + Q_{Kw} + Q_R \quad (31)$$

Die abgeführte Wärmemenge Q_{ab} setzt sich aus der Wärmemenge, die an das Kühlwasser abgegeben wird und der Reibungswärme zusammen.

$$Q_{ab} = Q_{Kw} + Q_R \quad (32)$$

Die Größen Q_{el} , W_{mech} , Q_R und Q_{ab} lassen sich unmittelbar experimentell bestimmen, während sich die Verluste abschätzen lassen.

$$Q_v = Q_{el} - Q_{Kw} - W_{mech} - Q_R \quad (33)$$

Die pro Motorumdrehung von außen zugeführte Wärme wird aus der elektrischen Heizleistung und der Motordrehzahl bestimmt:

$$Q_{el} = \frac{P_{el}}{f} = \frac{UI}{f} \quad (34)$$

Die an das Kühlwasser abgegebene Wärme lässt sich mit Hilfe der kalorischen Zustandsgleichung bestimmen:

$$Q_{KW} = \frac{c_W \rho_W}{f} \frac{\Delta V}{\Delta t} \Delta \vartheta \quad (35)$$

$c_W = 4,185 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho_W = 1 \text{ g cm}^{-3}$, $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ = Volumendurchsatz Kühlwasser, $\Delta \vartheta$ = Temperaturdifferenz Kühlwasser.

Ebenso lassen sich die Reibungsverluste der Kolben durch die Änderung der Kühlwassertemperatur bestimmen. Hierzu wird der Stirling-Motor extern mit Hilfe eines Elektromotors angetrieben.

Bestimmung der Reibungsverluste des Motors

Der Motor entnimmt als Wärmekraftmaschine pro Umdrehung pro Umdrehung aus einem Reservoir 1 die Wärmemenge Q_1 und erzeugt mechanische Arbeit. Die Differenz an Wärme, Q_2 , wird an ein Reservoir 2 abgegeben.

$$Q_2 = Q_1 - W \quad (36)$$

Als Kältemaschine wird dem Motor bei gleicher Drehzahl von außen die mechanische Arbeit W zugeführt und er entzieht dem Reservoir 1 die Wärmemenge Q_1 und führt dem Reservoir 2 die Wärmemenge Q_2 zu. In allen Fällen treten Verluste in der Leistungsbilanz durch die Kolbenreibung und die Reibung der Lager auf. Die Reibung wird in thermische Energie umgewandelt. Die Kolbenreibung lässt sich experimentell bestimmen. Dazu wird der Stirling-Motor bei offenem Zylinderkopf extern durch einen Elektromotor angetrieben. Unter der Voraussetzung, dass die auftretende Reibungswärme Q_R vollständig an das Kühlwasser abgegeben wird, kann man durch die dem Kühlwasser zugeführte Energie Q_{H_2O} den Reibungsverlust bestimmen, da $Q_{H_2O} = Q_R$.

Dazu bestimmt man die Temperaturerhöhung des Kühlwassers $\Delta \vartheta$, den Kühlwasserdurchfluss $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ und die Drehzahl des Motors f . Zur Ermittlung der Erhöhung der Kühlmitteltemperatur $\Delta \vartheta$ trägt man die Kühlmitteltemperatur als Funktion der Zeit auf. Durch Extrapolation erhält man die Temperaturdifferenz.

Vorbereitung:

- Entfernen des Zylinderkopfes
- Elektromotor montieren

Durchführung:

- Bestimmung der Kühlwassertemperatur in Zeitabständen von 2 Minuten bis der Verlauf eindeutig extrapolierbar ist
- Elektromotor starten und Drehzahl des Heißluftmotors messen
- Weiterhin die Kühlwasserdifferenz messen. Temperaturzunahme beobachten und warten bis der Verlauf extrapolierbar ist
- Wenn der Maximalwert erreicht ist, Elektromotor stoppen und weiterhin die Kühlwassertemperatur messen, bis der Verlauf extrapolierbar ist
- Kühlwasserdurchfluss messen
- Drehzahl des Elektromotors verändern und Messung wiederholen

Bestimmung der Arbeit des Motors durch die Aufnahme eines pV-Diagramms

In diesem Versuchsteil wird die geleistete Arbeit des Arbeitsgases bestimmt. Diese Arbeit ergibt sich gemäß:

$$W = \oint p \, dV \quad (37)$$

Die Arbeit erhält man aus der Fläche im pV-Diagramm.

Der Stirling-Prozess stellt einen idealisierten Kreisprozess dar. Zur Bestimmung der geleisteten Arbeit und als Vergleich des realen Verhaltens mit dem idealen Verhalten werden bei verschiedenen Spannungen pV-Diagramme aufgenommen. In Abhängigkeit von der Zeit misst ein Drucksensor den Druck im Zylinder und ein Wegmesser die Position des Arbeitskolbens, aus der das eingeschlossene Volumen (Kolbenfläche = 28,3 cm³) bestimmt wird.

Die Aufnahme der Änderungen des Druckes und des Kolbenweges erfolgen über eine Datenerfassung (CASSY LAB) die mit einem Computer verbunden ist

Vorbereitung:

- Software CASSY LAB aufrufen und Einstellungen für Heißluftmotor laden
- Einstellungen in B-Box kontrollieren.

Messgröße: Relativdruck pB1 (2000 hPa)

Messbereich: 2000 hPa.....2000 hPa


Messgröße: Weg sA1

Messbereich: 0 cm.....15 cm

- Überprüfen ob der vom Kolben zurückgelegte Weg im Messbereich des Weglängensensors liegt.
- Weg s_0 bestimmen, der dem kleinsten Volumen (oberer Totpunkt des Arbeitskolbens) entspricht.
- Im Register „Parameter/Formel/FFT“ des Dialogfensters „Einstellungen“ neue Größe eingeben.
Größe: Volumen, Symbol V, Einheit cm³
Formel: $(sA1 - s_0) * 28,3$
- Im Register „Darstellung“ „Einstellungen“ auswählen:

x-Achse : V, y-Achse: pB1

Betrieb zur Aufnahme von pV-Diagrammen

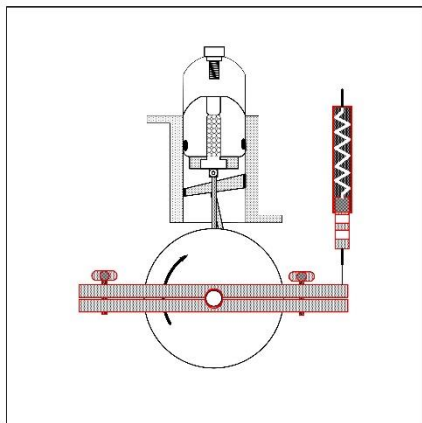
- Motor mit einer Spannung von 10 Volt starten
- Motor warm laufen lassen
- Messparameter wählen:
„Automatische Aufnahme“, „Intervall 1 ms, Anzahl: 250“
- Messung mit  oder F9 starten und pV-Diagramm aufnehmen
Bei Änderung der Drehzahl muss der Messparameter „Anzahl“ geändert werden
Läuft der Motor schnell kann der Messabstand auf 2 ms und die Anzahl der Messpunkte auf 125 reduziert werden. Der entsprechende Graph wird auf dem

Bildschirm dargestellt. Durch Rechtsklick auf den Graphen lassen sich weitere Einstellungen vornehmen. Es erscheint ein selbsterklärliches Menü. Durch Rechtsklick auf die Koordinaten lassen sich die Wertebereiche einstellen. Zur Berechnung der Fläche des pV-Diagramms klicken Sie mit rechts auf das Diagramm- Wählen Sie im Menü den Punkt „Integral berechnen“ aus. Suchen Sie im Diagramm den Bereich bei dem ein Überlapp der Messpunkte zu Beginn und am Ende der Messung vorliegt. Fahren Sie mit gedrückter linker Maustaste von außen nach innen über den Bereich. Der komplette Umfang der Kurve sollte sich verfärben. Nach loslassen der Taste wird der Flächeninhalt des pV-Diagramms angezeigt. Durch „Alt T“ kann der Flächeninhalt zusätzlich im Diagramm platziert werden. Die Angabe erfolgt in hPa cm³.

Bestimmung der Arbeit des Motors durch die Messung des Drehmoments

Die Bestimmung der abgegebenen Arbeit des Motors über die Messung des Drehmoments erfolgt mit Hilfe eines Pronyschen Bremszaums. Mit dieser Anordnung lässt sich eine variable Bremskraft auf die Welle des Motors ausüben.

Zur Messung des Drehmoments wird der Bremszaum mit einem Kraftmesser verbunden und so ausgerichtet, dass der Bremszaum waagrecht ausgerichtet bleibt. Für das Drehmoment gilt:



$$D = l F \quad (38)$$

mit l = Länge des Bremszaums und F der gemessenen Kraft.

Die pro Motorumdrehung abgegebene Arbeit W_D ergibt sich:

$$W_D = 2\pi D \quad (39)$$

bzw. für die Leistung

$$P_D = W_D f \quad (40)$$

Abbildung 9: Aufbau zur Bestimmung des Drehmoments des Stirling-Motors

Die Messung der real nutzbaren Arbeit W_D mit Hilfe des Pronyschen Zaums erfolgt bei gleichzeitiger Messung der zugeführten elektrischen Energie und der an das Kühlwasser abgegebene Energie pro Motorzyklus.

Da das Arbeitsgas jetzt beheizt wird, unterscheidet sich die abgeführte Wärme von der bei der Bestimmung der Reibungsverluste ermittelten.

Wie im ersten Teil werden die Kühlwassertemperatur, die Durchflussmenge und die Drehzahl des Motors ermittelt. Zur Bestimmung der elektrischen Leistung werden Strom und Spannung gemessen. Der Motor wird wie beschrieben gestartet und der Pronysche Zaum lose um die Motorachse gelegt. Die Drehzahl des Motors sollte ca. 5 s^{-1} betragen (12 Volt). Nach einigen Minuten sollte die Drehzahl konstant sein und Stromstärke und Spannung können regelmäßig protokolliert werden, ebenso wird die Kühlwassertemperatur alle 2 Minuten notiert.

Anschließend werden die Schrauben des Pronyschen Zaums langsam angezogen bis die Drehzahl des Motors deutlich abnimmt. Die Drehzahl sollte nicht unter 3 s^{-1} sinken. Sollte der Motor stehen bleiben, sofort die Spannungsversorgung unterbrechen!

Durch Massestücke auf der einen und den Federkraftmesser auf der anderen Seite wird der Bremszaum bei Bedarf in der Horizontalen gehalten. Die am Federkraftmesser angreifende

Kraft wird bestimmt. In diesem Zustand den Motor noch ca. 15 Minuten laufen lassen bis die Kühlwassertemperatur konstant ist.

Betrieb mit Pronyschem Zaum:

- Beide Hälften des Pronyschen Zaums auf die Welle des Motors aufsetzen und leicht anziehen. Den Pronyschen Zaum waagrecht ausrichten
- Der Kraftmesser soll im rechten Winkel zum Pronyschen Zaum eingehängt sein und der Nullpunkt des Kraftmessers wird eingestellt
- Durch Zusammenschrauben der beiden Hälften des Pronyschen Zaums die gewünschte Reibungskraft einstellen
- Motor mit einer Spannung von 10 Volt starten und dabei den Temperaturverlauf des Kühlwassers beobachten. Wassertemperatur alle 2 Minuten notieren.
- Wiederholen Sie die Messungen bei einer Spannung von 12 Volt.
- Nach ca. 10 Minuten die Kraft am Kraftmesser ablesen
- Bestimmung der Drehzahl des Motors
- Temperaturerhöhung des Kühlwassers und Durchflussmenge bestimmen.
- Reibungskraft in mehreren Schritten erhöhen und Messung wiederholen.
- Nehmen Sie gleichzeitig mit der Kraftmessung ein pV-Diagramm auf.

Thermodynamische Prozesse werden häufig durch geschlossene Kurven in einem pV-Diagramm beschrieben. Die dem System entnommene oder zugeführte Arbeit entspricht dann der durch die Kurve eingeschlossenen Fläche. Die vom Gas geleistete Arbeit lässt über die Aufnahme der pV-Diagramme bestimmen. Die abgeführte Wärme kann ebenfalls dem pV-Diagramm entnommen werden und über die kalorische Zustandsgleichung berechnet werden. Bestimmen Sie die Kühlwassertemperatur alle 2 Minuten. Ist die Differenz konstant, beginnen Sie mit den Messungen. Starten Sie den Motor und bestimmen Sie weiterhin die Kühlwassertemperaturdifferenz bis der Temperaturverlauf eindeutig extrapolierbar ist.

Auswertung:

Aus pV-Diagramm

- Bestimmen Sie aus dem pV-Diagramm die vom Gas geleistete Arbeit.
- Stellen Sie die Abhängigkeit der Leistung von der Drehzahl dar.
- Bestimmen Sie aus dem pV-Diagramm die zugeführte und die abgeführte Wärme.
- Diskutieren Sie die zugeführte Energie, die gemessenen Reibungsverlusten, die abgeführte Wärme und die Leistung des Motors bei verschiedenen Drehzahlen.
- Vergleichen Sie diese Werte mit der zugeführten elektrischen Leistung und den gemessenen Werten. Diskutieren Sie eventuelle Unterschiede.
- Diskutieren Sie alle Beobachtungen ausführlich.

Aus Messungen mit Pronyschem Zaum

- Bestimmen Sie das Bremsmoment, die Bremsarbeit und die Bremsleistung
- Bestimmen Sie aus dem pV-Diagramm die vom Gas geleistete Arbeit.
- Ziehen Sie eine Leistungsbilanz zwischen Arbeit (Leistung) aus dem pV-Diagramm und der gemessenen Bremsarbeit (Leistung). Berücksichtigen Sie den gemessenen Reibungsverlust.
- Diskutieren Sie alle Beobachtungen ausführlich.

Weitere Fragen:

- Kann der Stirling-Motor theoretisch den gleichen thermodynamischen Wirkungsgrad erreichen wie die Carnot-Maschine?

http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/p_index_d.html#

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stirling-Kreisprozess>

<https://www.youtube.com/watch?v=9y2SUhJ9Fsw>

Anhang:

Erster Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\delta Q = 0 = dU - \delta W = C_v dT + p dV$$

$$= C_v dT + \frac{n R T}{V} dV$$

$$= \frac{C_v}{T} dT + \frac{n R}{V} dV$$

$$= \frac{dT}{T} + \frac{n R}{C_v} \frac{dV}{V}$$

$$n R = C_p - C_v$$

$$= \frac{dT}{T} + \frac{C_p - C_v}{C_v} \frac{dV}{V}$$

$$= \frac{dT}{T} + (\kappa - 1) \frac{dV}{V}$$

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v}$$

Integration:

$$\ln(T) + (\kappa - 1) \ln(V) = \text{konstant}$$

$$\ln(T) + \ln(V^{\kappa-1}) = \text{konstant}$$

$T V^{\kappa-1} = \text{konstant}$

Im Falle des Carnot-Prozesses:

$$T_H V_1^{\kappa-1} = T_K V_2^{\kappa-1} \quad \rightarrow \quad \frac{T_K}{T_H} = \frac{V_1^{\kappa-1}}{V_2^{\kappa-1}}$$

und

$$T_K V_3^{\kappa-1} = T_H V_4^{\kappa-1} \quad \rightarrow \quad \frac{T_K}{T_H} = \frac{V_4^{\kappa-1}}{V_3^{\kappa-1}}$$

und damit

$$\frac{V_1^{\kappa-1}}{V_2^{\kappa-1}} = \frac{V_4^{\kappa-1}}{V_3^{\kappa-1}}$$