


Arbeitsunterlagen
für den
Hauptfach- und
APMB-Versuch

Stirling-Motor



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Wie arbeitet ein Stirlingmotor	2
2.1 Wärmeeigenschaften der Luft	2
2.2 Verdrängerkolben.....	2
2.3 Kurbeltrieb: Erzeugung der Drehbewegung	3
2.4 Kraftkolben und Schwungrad	3
2.5 Betrachtung einer Umdrehung (4 Arbeitstakte)	5
2.6 Regenerator	5
3 Thermodynamische Grundlagen zum Stirlingmotor	6
3.1 Thermodynamische Kreisprozesse	6
3.2 Kennzahlen	10
4 Weiterführende Literatur und Links	11
5 Versuchsdurchführung	12
5.1 Bestimmung der Reibungsverluste.....	12
5.2 Der Stirlingmotor als Wärmekraftmaschine	13
5.2.1 Betrieb als Wärmekraftmaschine, Einfluss der Heiztemperatur	13
5.2.2 Erstellung eines p,v-Diagramms	13
5.2.3 Leistungsmessung und Wirkungsgradbestimmung	15
5.2.4 Bestimmung der abgeführten Wärme	15
5.3 Der Stirlingmotor als Wärmepumpe oder Kältemaschine.....	16
5.3.1 Leistungszifferbestimmung beim linksläufigen Prozess	17
6 Auswertung	18
6.1 Bestimmung der Reibungsverluste.....	18
6.2 Der Stirlingmotor als Wärmekraftmaschine	18
1.1.1 p,v-Diagramm	18
6.2.2 Leistungsmessung	20
6.2.3 Wirkungsgrade.....	21
6.3 Der Stirlingmotor als Wärmepumpe und Kältemaschine	22

1 EINLEITUNG

Der Stirlingmotor ist nach der Dampfmaschine die zweitälteste Wärmekraftmaschine. Theoretisch kann mit einem Stirlingmotor ein höheren Wirkungsgrad als eine Dampfmaschine und als ein Benzin- oder Dieselmotor erreichen. Im Stirlingmotor wird Wärmeenergie in mechanische Arbeit umgesetzt. Das Interessante dabei ist, dass diese Wärmeenergie von außen an den Motor herangeführt wird. Er ist also nicht wie der Benzin- oder Dieselmotor auf die "innere" Verbrennung eines besonderen Kraftstoffes angewiesen, sondern kann mit beliebigen Wärmequellen arbeiten, z. B. mit Solarenergie, mit Wärme aus der Verbrennung von Deponiegas und von allen möglichen festen und flüssigen Brennstoffen - hierbei kann die Verbrennung optimal umweltschonend eingestellt werden.

In diesem Versuch soll die Wirkungsweise eines Stirlingmotors gezeigt werden. Da bei einer Stirlingmaschine der durchlaufene Kreisprozess sehr leicht umkehrbar ist, kann ein Wärmekraftprozess sowie ein Kältemaschinenprozess mit derselben Maschine demonstriert werden.

Über Leistungs- und Verbrauchsmessungen werden verschiedene Wirkungsgrade eingeführt und berechnet.

Achtung Unfallgefahr!

Bei der Versuchsdurchführung auf rotierende Teile achten

Beim Arbeiten mit dem Laser nie direkt in den Laserstrahl blicken

Geltende Sicherheitsvorschriften und Anweisungen des Betreuungspersonals beachten

2 WIE ARBEITET EIN STIRLINGMOTOR

Anhand eines Gedankenexperimentes wird in diesem Kapitel die Funktion des Stirlingmotors erläutert. Die Abbildungen sind <http://members.tripod.de/PeterFette/howdo.htm> von Peter Fette und <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/howwork.htm> entnommen.

2.1 Wärmeeigenschaften der Luft

Luft in einer mit einer Gummimembran verschlossenen Blechdose (Fig. 1), dehnt sich bei Erwärmung aus (Fig. 2) und zieht sich bei Kühlung zusammen (Fig. 3).

Wenn man auf der Gummihaut einen Kolben befestigt und Erwärmung und Abkühlung der Luft in einem gleichmäßigen Rhythmus aufeinanderfolgt, hätte man einen - wegen der notwendigen Erwärmung / Abkühlung des gesamten Systems allerdings sehr unwirtschaftlichen und langsamen - Motor.

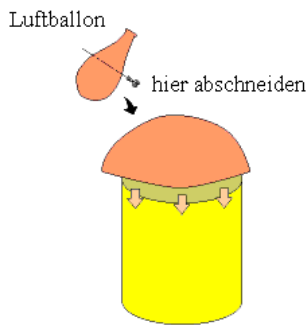


Fig. 1 Mit einer Gummi Membran eine Blechdose verschließen

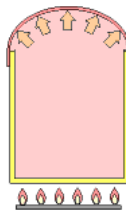


Fig. 2 Bei Erwärmung erhöht sich der Luftdruck

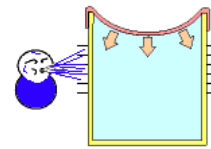


Fig.3 Bei Kühlung sinkt der Luftdruck

2.2 Verdrängerkolben

In einem Stirlingmotor wird die Luft durch einen Verdrängerkolben im gleichmäßigen Rhythmus abwechselnd in den kalten und den warmen Bereich verschoben (Fig. 4). Der Durchmesser des Verdrängerkolbens muss deutlich geringer sein als der des Zylinders, damit die Luft an ihm vorbeistreichen kann.

Wenn die Luft im warmen Bereich ist (Verdrängerkolben ist oben), expandiert sie. Wird gekühlt (Verdrängerkolben ist unten), wölbt sich kurze Zeit danach die Gummimembran nach innen (Fig. 5). Durch die gleichmäßige Auf- und Abwärtsbewegung des Verdränger-

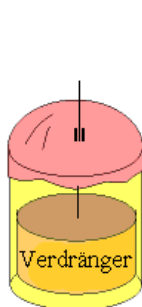
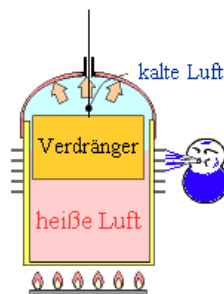
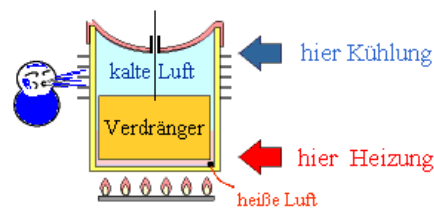


Fig. 4 Verdränger in der Dose



Verdränger oben
Luft wird erwärmt
der Luftdruck steigt



Verdränger unten
Luft wird gekühlt
der Luftdruck sinkt

Fig. 5 Wirkung des Verdrängers auf den Luftdruck

kolbens kann eine stetige Wiederholung des Auf- und Abwölbens der Gummimembran erreicht werden. Beim Abschalten der Heizung und Kühlung dagegen bleibt auch bei Bewegung des Verdrängerkolbens die Gummimembran in ihrer Ausgangslage, weil der Verdrängerkolben kein Kolben zur Luftkompression ist.

2.3 Kurbeltrieb: Erzeugung der Drehbewegung

Der Verdränger kann keine Kraft nach außen übertragen, im Gegenteil: Er braucht - allerdings sehr wenig - Kraft von außen, um bewegt werden zu können. Eine gleichmäßige Bewegung des Verdrängerkolbens kann mit einer Kurbelwellenantrieb (Fig. 6, Fig. 7) erreicht werden.

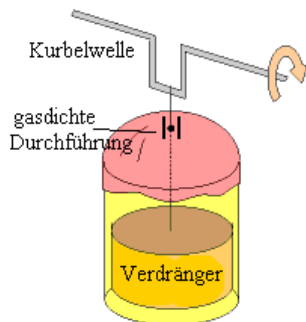


Fig. 6 Verdränger mit Kurbelwelle

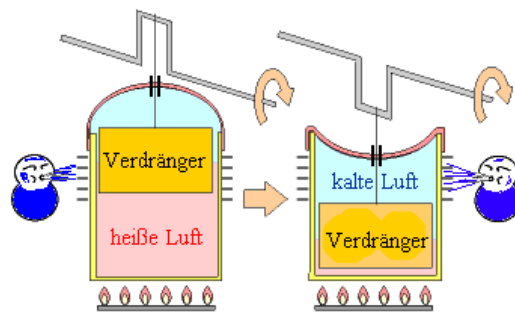


Fig. 7 Verdränger arbeitet mit der Kurbelwelle

2.4 Kraftkolben und Schwungrad

Die Bewegung der Gummimembran soll in einem nächsten Schritt zur Bewegung des Verdrängerkolbens dienen. Dazu muss ein Pleuel an der Gummimembran und an der Kurbelwelle befestigt werden. Optimal ist ein Versatz zur Bewegung des Verdrängerkolbens um 90 ° (Fig. 8, Fig. 9).

Allerdings wird die Maschine in der Nähe der obersten Gummihautstellung stehen bleiben. Diese Stellung ist ungefähr erreicht, wenn sich die Kurbelwelle in Fig. 8 in Richtung der Nutzkraft um ca. 90 Grad weiter dreht. Dabei ist deutlich die Kraft, die die Gummihaut bei ihrer Ausdehnung auf die Kurbelwelle ausübt, zu spüren. Um eine kontinuierliche Drehbewegung zu erhalten, muss die Kurbelwelle ein Schwungrad bekommen.

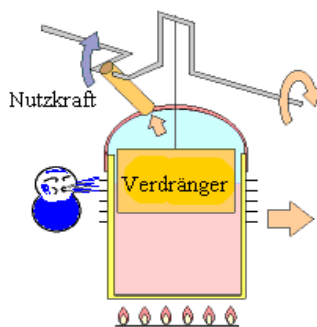


Fig. 8 Expansion und Nutzarbeit

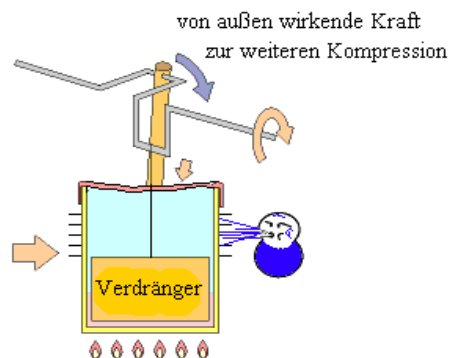


Fig. 9 Kompression benötigt Kühlung und Kraft von außen

Der Stirlingmotor leistet nur in ca. $1/3$ einer Kurbelwellenumdrehung Nutzarbeit. In ca. $1/6$ der Umdrehung läuft der Motor kraftneutral, hier heben sich Reibungsverluste und Antriebskräfte gegenseitig auf. Während ca. einer $1/2$ Umdrehung braucht der Motor externe Energiezufuhr, weil die Kühlung der Maschine nicht ausreicht, um - wie in Fig. 7 rechts gezeigt - die Gummihaut in die unterste Position zu bringen. Durch die Kühlung einer wirklichen Maschine erreicht die eingeschlossene Luft im Motor noch nicht einmal die Umgebungstemperatur. In diesem Betriebszustand benötigt der Motor zusätzliche Kraft, um die Gummihaut ganz nach unten zu drücken. Diese Kraft wird ihm durch das sich drehende Schwungrad (Fig. 10) geliefert. Die dafür benötigte Energie ist jedoch kleiner als die Energie, die der Motor in seiner Arbeitsphase selbst liefert und auf das Schwungrad überträgt.

Damit der Stirlingmotor in Schwung kommt, muss zuerst das Schwungrad in Bewegung versetzt werden.

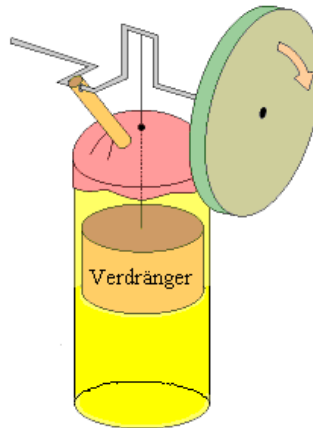


Fig. 10 komplette Maschine mit Kurbelwelle und Schwungrad

Realisiert wird der Stirlingmotor mit einem sogenannten Arbeitskolben statt der im Gedankenexperiment verwendeten Gummimembran. Der Arbeitskolben läuft - wie auch beim Otto-Motor - im Zylinder und schließt diesen gasdicht nach außen ab.

2.5 Betrachtung einer Umdrehung

Im folgenden sind die vier Arbeitstakte dieses Stirlingmotors dargestellt.

Fig. 12: „isochore“ Erwärmung: Der Arbeitskolben ist am unteren Umkehrpunkt, der Verdrängerkolben schiebt die Luft in den warmen Bereich.

Fig. 13: „isotherme“ Expansion: Der Arbeitskolben drückt nach oben, der Verdrängerkolben ist am oberen Umkehrpunkt.

Fig. 14: „isochore“ Abkühlung: Der Arbeitskolben ist am oberen Umkehrpunkt, der Verdrängerkolben schiebt die Luft in den kalten Bereich.

Fig. 15: „isotherme“ Kompression: Der Arbeitskolben wird nach unten gedrückt, der Verdrängerkolben ist am unteren Umkehrpunkt.

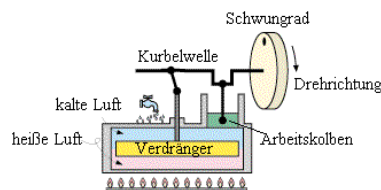


Fig. 12 Ausgangszustand, der Arbeitskolben ist unten die Luft ist komprimiert, Verdränger geht hoch und drückt die Luft in den heißen Bereich

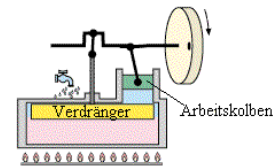


Fig.13 Arbeitskolben auf dem Weg nach oben Verdränger oben, maximale Beheizung der Luft maximale Kraft auf den Arbeitskolben

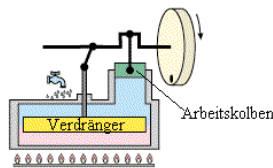


Fig.14 Arbeitskolben oben, maximale Expansion der Luft erreicht, Verdränger drückt die Luft auf die kalte Seite der Maschine

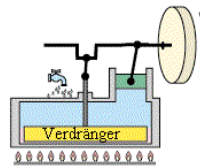


Fig.15 Verdränger unten, alle Luft im gekühlten Bereich der Maschine, Arbeitskolben bewegt sich nach unten, die Kompression beginnt nächster Takt siehe wieder Fig. 12

Die Zustandsänderungen verlaufen nur in einem idealen Stirlingmotor isochor bzw. isotherm. Im dargestellten realen Motor sind sie es nicht, weil beide Kolben stetig in Bewegung sind.

2.6 Regenerator

Der Arbeitsprozess des Stirlingmotors kann durch einen Regenerator optimiert werden. Dieser ist ein Drahtgeflecht, das die Wärme der Luft zwischenspeichert, wenn diese vom heißen in den kalten Bereich des Motors verdrängt wird. Auf dem Rückweg in den heißen Bereich wird die Luft im Regenerator vorgewärmt, so dass weniger Wärme zugeführt werden muss als ohne den Regenerator.

3 THERMODYNAMISCHE GRUNDLAGEN ZUM STIRLINGMOTOR

3.1 Thermodynamische Kreisprozesse

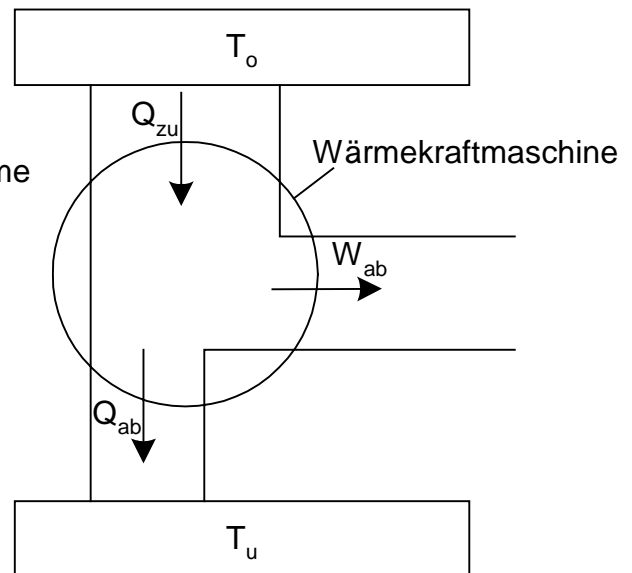
Durchläuft ein Arbeitsmedium eine Reihe von Zustandsänderungen, die so aneinander anschließen, dass das Arbeitsmedium wieder den Ausgangszustand erreicht, so bezeichnet man diese Folge von Zustandsänderungen als Kreisprozess. Man unterscheidet zwischen rechts- und linksläufigen Prozessen im p,v -Diagramm.

Rechtsläufige Prozesse oder Kraftmaschinenprozesse:

Kraftmaschinenprozesse durchlaufen das p,v -Diagramm im Uhrzeigersinn. Sie wandeln Wärme in mechanische Arbeit um.

T_o : Oberes Temperaturniveau

T_u : Unteres Temperaturniveau

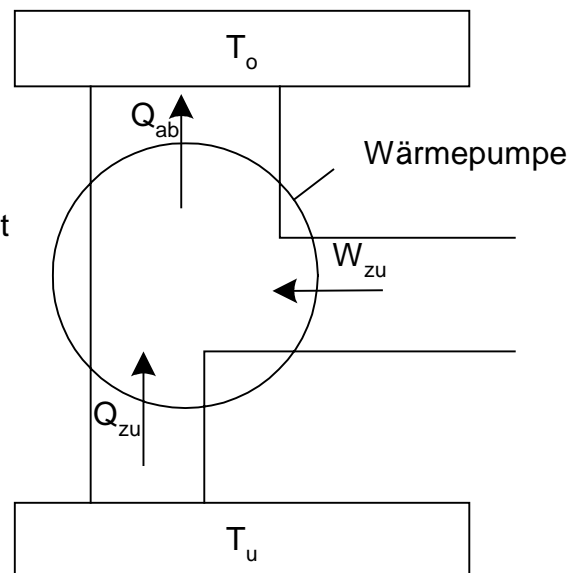


Linksläufige Prozesse oder Kältemaschinenprozesse:

Wärmepumpen- oder Kältemaschinenprozesse durchlaufen das p,v -Diagramm entgegen dem Uhrzeigersinn. Sie wandeln mechanische Arbeit in Wärme um.

T_o : Oberes Temperaturniveau

T_u : Unteres Temperaturniveau



Die vom Kreisprozess umschlossene Fläche im p,v -Diagramm entspricht dem Betrag der Arbeit, der nach Durchlaufen des Prozesses entweder im Arbeitsmedium gespeichert (linksläufiger Prozess) oder vom Arbeitsmedium geleistet wurde (rechtsläufiger Prozess).

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik hat für Kreisprozesse folgende Form:

$$\oint dQ = \oint dU - \oint dW \quad (1)$$

Da der Zustand nach einer Umdrehung bei einem Kreisprozess definitionsgemäß derselbe ist wie vorher, gibt es keine Unterschiede in der inneren Energie des Systems. Es gilt:

$$\begin{aligned} \oint dU &= 0 \\ \oint dQ &= -\oint dW \end{aligned} \quad (2)$$

Bei allen Kreisprozessen enthält der Wärmeaustausch stets Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr. Dies bedeutet, dass in einem Kreisprozess nie die gesamte Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann (2. Hauptsatz). Darum führt man bei thermodynamischen Prozessen einen Wirkungsgrad ein.

Der thermodynamische Wirkungsgrad η eines rechtsläufigen Kreisprozesses ist definiert als das Verhältnis von geleisteter Arbeit W zur zugeführten Wärmemenge Q

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_{zu}|} \quad (3)$$

Er gibt an, welcher Anteil der zugeführten Wärmemenge in technische Arbeit umgewandelt wird.

Aus Gl. (2) folgt:

$$\oint dQ = Q_{zu} - Q_{ab} = W \quad (4)$$

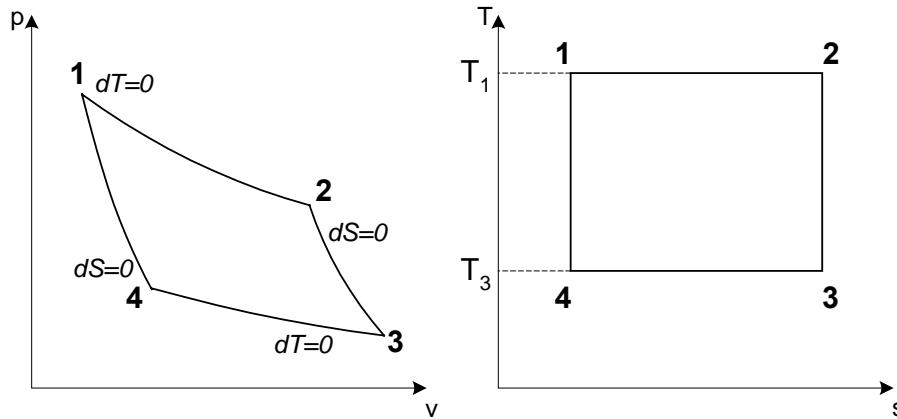
Damit wird Gl. (3):

$$\eta = \frac{(Q_{zu} - Q_{ab})}{Q_{zu}} = 1 - \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} \quad (5)$$

Um die Güte eines realen Prozesses beurteilen zu können, muss man wissen, wie ein entsprechender Prozess mit den theoretischen Zustandsänderungen und mit idealem Gas verlaufen würde. Einen solchen theoretischen Prozess nennt man Vergleichsprozess.

Carnot-Prozeß

Ein wichtiger Vergleichsprozess ist der Carnot'sche Kreisprozess, da er, bei vorgegebenen Temperaturniveaus, den größten möglichen Wirkungsgrad hat. Der Carnot-Prozess setzt sich aus zwei Isothermen und zwei Isentropen (= Adiabaten) zusammen und läuft zwischen zwei Temperaturniveaus, T_1 und T_3 , ab.



Bei einer adiabaten Zustandsänderung wird keine Wärme zu- oder abgeführt. Die bei der Isothermen Zustandsänderung 1 → 2 dem Kreisprozess zugeführte Wärme berechnet sich zu

$$Q_{12} = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{6}$$

In gleicher Weise lässt sich die zugeführte Arbeit $W_{34} = -Q_{34}$ berechnen.

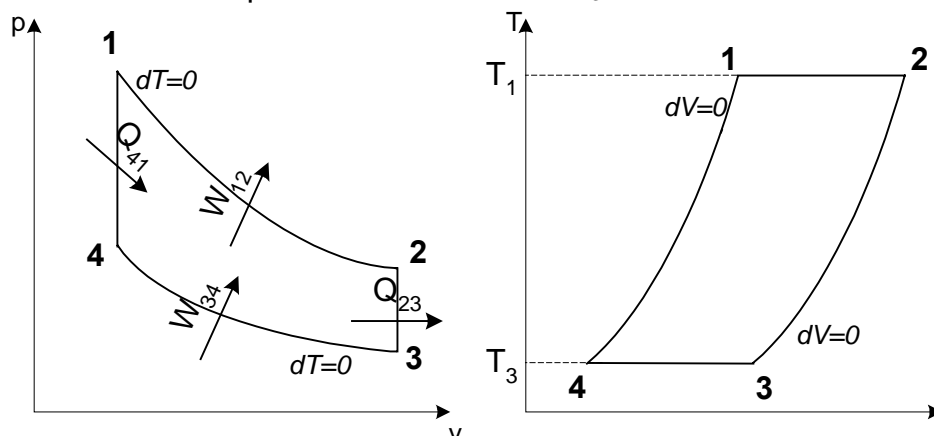
Damit ergibt sich bei einem rechtsläufigen Carnot-Prozess der thermodynamische Wirkungsgrad zu

$$\eta_{th} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{R \cdot (T_1 - T_3) \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}}{R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_3}{T_1} \tag{7}$$

Der thermodynamische Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses hängt nur von den Temperaturen der Wärmezufuhr- und -abfuhr ab. Es gibt keinen Kreisprozess, der für ein gegebenes Temperaturgefälle $T_1 - T_3$ einen besseren thermodynamischen Wirkungsgrad hat als der Carnot-Prozess.

Stirling-Prozess

Der ideale Stirling-Prozess setzt sich aus zwei Isothermen und zwei Isochoren zusammen, und läuft zwischen den Temperaturniveaus T_1 und T_3 ab.



Die Zustandsänderungen im idealen Stirling-Prozess (rechtsläufig) laufen in folgender Weise ab:

- 1. Isotherme Expansion** von 1 nach 2, dabei wird Arbeit geleistet und Wärme bei einer Temperatur von $T_1 = T_2$ aufgenommen. (Der Arbeitskolben drückt nach oben, der Verdrängerkolben ist am oberen Umkehrpunkt, Fig. 13)

$$W_{12} = -Q_{12} = -R * T_1 * \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (8)$$

- 2. Isochore Abkühlung** von 2 nach 3, dabei wird Wärme abgegeben. (Der Arbeitskolben ist am oberen Umkehrpunkt, der Verdrängerkolben schiebt die Luft in den kalten Bereich, Fig. 14)

$$Q_{23} = c_v * (T_3 - T_2) = c_v * (T_3 - T_1) \quad (9)$$

- 3. Isotherme Kompression** von 3 nach 4, dabei muss Arbeit zugeführt und Wärme bei einer Temperatur von $T_3 = T_4$ abgeführt werden. (Der Arbeitskolben wird nach unten gedrückt, der Verdrängerkolben ist am unteren Umkehrpunkt, Fig. 15)

$$W_{34} = -Q_{34} = -R * T_3 * \ln \frac{V_4}{V_3} = R * T_3 * \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (10)$$

- 4. Isochore Erwärmung** von 4 nach 1, dabei muss Wärme zugeführt werden. (Der Arbeitskolben ist am unteren Umkehrpunkt, der Verdrängerkolben schiebt die Luft in den warmen Bereich, Fig. 12)

$$Q_{41} = c_v * (T_1 - T_4) = c_v * (T_1 - T_3) \quad (11)$$

Die nach außen abgegebene Arbeit ergibt sich aus

$$W = W_{12} - W_{34} = R * \ln \frac{V_2}{V_1} * (T_1 - T_3) \quad (12)$$

Die bei den isochoren Zustandsänderungen (2→3 und 4→1) umgesetzten Wärmemengen sind - einen ideal funktionierenden Regenerator vorausgesetzt - gleich. Die zuzuführende Wärmemenge beträgt dann:

$$Q_{zu} = Q_{12} = R * T_1 * \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (13)$$

Somit ist der thermodynamische Wirkungsgrad des idealen Stirling-Prozesses

$$\eta_{th} = \frac{|W|}{|Q_{zu}|} = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = \eta_{Carnot} \quad (14)$$

3.2 Kennzahlen

Bei der Behandlung von thermischen Maschinen wird oft der Begriff Wirkungsgrad verwendet. Dabei ist darauf zu achten, welcher Wirkungsgrad gemeint und wie dieser definiert ist.

Für Wärmekraftmaschinen gelten folgende Definitionen:

- Der **thermodynamische Wirkungsgrad** ist im theoretischen, idealen Prozess das Verhältnis von Nutzarbeit zur zugeführten Wärmemenge. Er gibt den theoretisch möglichen Wirkungsgrad des Prozesses an.

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W}{Q_{\text{zu}}} \quad (15)$$

- Der **Gütegrad** ist das Verhältnis der indizierten Arbeit (aus (p,v-)Indikatordiagramm) zur Nutzarbeit des theoretischen Prozesses. Er gibt an, wie gut der Prozess in der Maschine realisiert wird.

$$\eta_{\text{g}} = \frac{W_{\text{ind}}}{W} \quad (16)$$

- Der **innere Wirkungsgrad** ist das Verhältnis der indizierten Arbeit zur zugeführten Wärmemenge. Er gibt an, welcher Anteil der zugeführten Wärme vom realen Prozess in Arbeit umgesetzt wird.

$$\eta_{\text{i}} = \frac{W_{\text{ind}}}{Q_{\text{zu}}} \quad (17)$$

- Der **mechanische Wirkungsgrad** ist das Verhältnis der an der Motorwelle abgegebene Arbeit zur indizierten Arbeit. Er gibt an, welcher Anteil der vom Prozess freigesetzten Arbeit an der Motorwelle abgenommen werden kann, oder wie groß die mechanischen Verluste z. B. durch Reibung sind.

$$\eta_{\text{m}} = \frac{W_{\text{mech}}}{W_{\text{ind}}} \quad (18)$$

- Der **effektive Wirkungsgrad** ist das Verhältnis der an der Motorwelle abgegebenen Arbeit zur zugeführten Wärme. Der effektive Wirkungsgrad ist letztlich für den Nutzer entscheidend. Er gibt an, wie viel Arbeit gewonnen werden kann, wenn eine bestimmte Menge Wärme eingesetzt wird.

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{W_{\text{mech}}}{Q_{\text{zu}}} = \eta_{\text{m}} * \eta_{\text{i}} = \eta_{\text{m}} * \eta_{\text{g}} * \eta_{\text{th}} \quad (19)$$

Neben dem Wirkungsgrad wird oft auch der Begriff des **Nutzungsgrades** verwendet. Während der Wirkungsgrad von Faktoren wie Betriebszustand usw. abhängt, wird zur Nut-

zungsgradbestimmung eine zeitliche Mittelung der Wirkungsgrade in verschiedenen auftretenden Betriebszuständen vorgenommen.

Für Wärmepumpen und Kältemaschinen wird nicht der Begriff des Wirkungsgrades verwendet, sondern die **Leistungsziffer**. Bei Wärmepumpen nennt man die Leistungsziffer Wärmeziffer, bei Kältemaschinen Kälteziffer.

- Für Wärmepumpen wird die **Wärmeziffer** definiert als das Verhältnis der nutzbaren Wärme zur aufzuwendenden Arbeit, wobei die nutzbare Wärme die ist, die vom Prozess abgegeben wird und dem zu heizenden Raum zugeführt wird. Die Wärmeziffer ist immer größer als 1:

$$\varepsilon_w = \frac{|Q_{ab}|}{W_{zu}} = \frac{|Q_{ab}|}{|Q_{ab}| - Q_{zu}} \quad (20)$$

- Für Kältemaschinen ist die **Kälteziffer** ebenfalls definiert als das Verhältnis der nutzbaren Wärme zur aufzuwendenden Arbeit. Hier wird als nutzbar die Wärme bezeichnet, die dem zu kühlenden Raum entzogen wird und vom Prozess aufgenommen wird. Die Kälteziffer kann größer, kleiner oder gleich 1 sein.

$$\varepsilon_k = \frac{Q_{zu}}{W_{zu}} = \frac{Q_{zu}}{|Q_{ab}| - Q_{zu}} \quad (21)$$

Für die Leistungsziffern von Wärmepumpen und Kältemaschinen gelten sinngemäß die Definitionen für die Wirkungsgrade der Wärmekraftmaschine.

4 WEITERFÜHRENDE LITERATUR UND LINKS

Hahne, E.: Technische Thermodynamik, Addison-Wesley, 1992

Künzel, M.: Stirlingmotor der Zukunft, Fortschrittberichte VDI, VDI-Verlag, 1986

Werdich, M.: Stirlingmaschinen, Ökobuchverlag, 1991

Viebach, D.: Der Stirlingmotor - einfach erklärt und leicht gebaut, Ökobuchverlag 1999

Erläuterungen zur Funktion: <http://members.tripod.de/PeterFette/howdo.htm>

Geschichte, Funktion, Links: <http://www.stirlingmotor.purespace.de/>

Bau eines Stirling-Motors „Keksdosenmotor“: <http://mitglied.tripod.de/Stirlingmotor/bau.htm>

Modelle, Bausätze, Literatur: <http://www.stirlingmotor.com/>

Thermodynamik des Stirlingmotors: <http://members.tripod.de/PeterFette/prozess.htm>

Alpha-Typ-Stirling-Motor: <http://members.tripod.de/PeterFette/alphadia.htm>

Praxiseinsatz, Effizienz der Motoren: http://www.stirlingcycle.com/german/g_faq.htm

Anwendung in Blockheizkraftwerken: <http://www.stirling-engine.de/>

5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 Bestimmung der Reibungsverluste

Bevor der Motor in Betrieb genommen wird, sollen die Reibungsverluste des Motors bestimmt werden. Diese Verluste, die im wesentlichen durch die Kolbenreibung im Zylinder entstehen, treten in jeder Betriebsart auf und gehen in die Energiebilanz des Motors ein. Diese Reibungsverluste werden über den Kühlwassertemperaturanstieg bestimmt, wenn der Motor bei offenem Zylinderkopf von einem Elektromotor angetrieben wird. Dabei soll folgendermaßen vorgegangen werden:

- **Zylinderkopf**

Den Zylinderkopf des Motors abschrauben (3 Flügelschrauben). Das Thermometer mit dem Messbereich von -10 °C bis 40 °C in das Durchflussgefäß stecken und mit der Kunststoffmutter vorsichtig festklemmen.

- **Messung des Kühlwasserdurchflusses**

Kühlwasserschlauch am Eintritt in den Kühlzylinder des Motors abnehmen und mit Hilfe von Stoppuhr und Messzylinder den Kühlwasserdurchfluss bestimmen.

- **Kühlwasserkreislauf**

Das Durchflussgefäß mit dem Magnet am Fuß des Motors befestigen. Kühlwasserpumpe auf geringe Pumpleistung (Netzgerät: ca. 8 V) einstellen.

- **Messung der Kühlwassertemperatur**

Bei stationärer Temperaturverteilung Kühlwassertemperatur ablesen. Dieser Wert entspricht der Kühlwassereintrittstemperatur bei allen künftigen Messungen.

- **Ermittlung der Reibungsverluste**

Stirlingmotor mit Elektromotor bei höchster Drehzahl antreiben und in regelmäßigen Abständen Kühlwassertemperatur ablesen. Wenn nach einiger Zeit (ca. 10 Min.) die Temperatur konstant bleibt, Messwert notieren. Die Motordrehzahl wird mit dem optoelektrischen Drehzahlmesser gemessen. Die Wärmeleistung wird aus der Temperaturdifferenz, dem Massenstrom und der Wärmekapazität des Wassers bestimmt. Teilt man die Wärmeleistung durch die Motordrehzahl, erhält man die Reibungsarbeit pro Umdrehung.

5.2 Der Stirlingmotor als Wärmekraftmaschine

In dieser Betriebsweise wird dem Stirlingmotor mit der Heizwendel am oberen Ende des Zylinders Wärme zugeführt. An der Kurbelwelle gibt der Motor mechanische Leistung ab.

5.2.1 Betrieb als Wärmekraftmaschine, Einfluss der Heiztemperatur

- **Zylinderkopf:** Zylinderkopfdeckel mit Heizwendel wieder aufschrauben.
- **Kühlwasserkreislauf:** Kühlwasserpumpe einschalten

Achtung

Vor Inbetriebnahme des Motors ist Folgendes zu überprüfen:

- **Zylinderdeckel mit Heizwendel ist fest und gleichmäßig auf den Zylinder geschraubt**
- **Verdrängerkolben berührt in keiner Position die Heizwendel (zur Kontrolle Motor von Hand durchdrehen), da sonst die Heizwendel zerstört wird**
- **Zylinderwände ausreichend geschmiert**
- **Kühlwasserpumpe fördert Kühlwasser**

- **Inbetriebnahme**

Anschluss der Heizwendel mit dem Transformator (14 V) verbinden

Achtung

Der Motor ist NICHT selbstanlaufend. Er muss SOFORT nach dem Einschalten der Heizspannung von Hand angeworfen werden, da sonst die Heizwendel zerstört wird.

Netzspule des Transformators einschalten. Nach 2-3 Sekunden das Schwungrad des Stirlingmotors im Uhrzeigersinn von Hand anwerfen. Anwerfversuche gegebenenfalls wiederholen, bis der Motor von selbst ununterbrochen läuft.

Nun kann die Heizspannung vergrößert werden, indem die Anschlüsse am Transformator umgesteckt werden. **Dabei sollte ein Gelbglühen der Wendel (18 V) nur bei schnellaufendem Motor und nur kurzzeitig erreicht werden.**

Die folgenden Versuche sollten mit einer Heizspannung von 14 V durchgeführt werden.

5.2.2 Erstellung eines p,v -Diagramms

Mit Hilfe eines p,v -Indikators kann der vom Arbeitsgas durchlaufene Kreisprozess im p,v -Diagramm sichtbar gemacht werden. Damit kann die **indizierte Arbeit W_{ind}** (d. h. die theoretisch mit diesem Motor erreichbare Maximalarbeit) ermittelt werden.

In dem p,v-Indikator werden die Druckänderungen im Stirlingmotor in eine horizontale Drehbewegung des Spiegels umgewandelt. Die der Volumenänderung entsprechende Bewegung des Arbeitskolbens wird über ein Hebelsystem in eine vertikale Drehbewegung des Spiegels umgesetzt.

Durch diese Drehbewegung des Spiegels beschreibt der vom Spiegel reflektierte Laserstrahl auf dem Projektionsschirm eine Kurve, die dem p,v-Diagramm des vom Arbeitsgas durchlaufenen Kreisprozesses entspricht. Dabei wird auf der Horizontalachse das Volumen und auf der Vertikalachse der Druck aufgetragen.

- **Anschluss des p,v-Indikators**

Um den auf die optische Bank montierten p,v-Indikator in Betrieb zu nehmen, Druck-Mess-Anschluss an der Kolbenstange des Arbeitskolbens öffnen und den zugehörigen Gummistopfen in dem dafür bestimmten Loch im Fuß des Stirlingmotors aufbewahren.

Danach den Druckschlauch des p,v-Indikators mit dem Schlauchanschluss der Kolbenstange des Arbeitskolbens verbinden. Die Angelschnur mit dem aus der Unterseite des Zylinders herausragenden Zapfen des Arbeitskolbens verbinden und dann um die am Fuß des Motors angebrachte Rolle herumführen und am Schwinghebel des p,v-Indikators befestigen. Dabei ist darauf zu achten, dass sich in der untersten Stellung des Arbeitskolbens der Schwinghebel knapp unterhalb seiner obersten Stellung befinden soll. In der obersten Stellung des Arbeitskolbens soll der Schwinghebel bis knapp oberhalb seiner untersten Stellung gezogen worden sein. Der Schwinghebel soll sich bei der Auf- und Abbewegung des Kolbens zwischen seinem oberen und seinem unteren Anschlag bewegen können, ohne einen von beiden zu berühren.

Eine Feineinstellung kann durch eine leichte Drehung der ganzen optischen Bank vorgenommen werden.

Das Millimeterpapier wird nun so auf den Projektionsschirm gelegt, dass der Nullpunkt des Diagramms rechts unten liegt.

Bei richtig angeschlossenem p,v-Indikator und laufendem Motor kann nun das p,v-Diagramm auf dem Millimeterpapier nachgezeichnet werden. Dabei ist zu beachten, dass das p,v-Diagramm spiegelverkehrt gezeichnet wird.

Die Skalierung des p,v-Diagramms erfolgt nach dem Zeichnen. Der Hubraum des Motors beträgt 150 cm^3 und wird auf der Abszisse aufgetragen. Die Druckdifferenz zwischen oberem und unterem Totpunkt beträgt ca. 1 bar und wird auf der Ordinate aufgetragen.

Durch Ermitteln des Flächeninhaltes der Indikatorkurve kann die vom Kreisprozess je Motorumdrehung abgegebene mechanische Leistung in $\text{Newton} \cdot \text{Meter}$ angegeben werden.

Die an der Motorachse verfügbare Leistung ist erheblich kleiner, da die innere Reibung des Motors überwunden werden muss. Insbesondere wird im Leerlaufbetrieb die gesamte vom Kreisprozess abgegebene Leistung von der inneren Reibung der Maschine aufgezehrt.

5.2.3 Leistungsmessung und Wirkungsgradbestimmung

Mit diesem Versuch soll die an der Motorachse verfügbare mechanische Leistung und damit die **mechanische Arbeit W_{mech}** ermittelt werden.

- **Messung**

Die vom Motor abgegebene Leistung wird mit Hilfe eines Pronyschen Zaums gemessen. Dazu ist zuerst die **Länge des Hebelarms**, d. h. die Strecke zwischen Nabenmitte und Aufhängepunkt der Gewichte bzw. des Kraftmessers, zu messen. Dann Bremse auf die Bremsnabe des Motors aufstecken und durch Anziehen der Schrauben den Anpressdruck der Bremsbacken erhöhen. Dadurch wird der Motor abgebremst. Das erforderliche Gegenmoment zum Bremsmoment wird durch Einhängen der Gewichte auf der einen Seite und durch Einhängen des Kraftmessers auf der anderen Seite aufgebracht. Die Zahl der Gewichte und der Anpressdruck ist so zu variieren, dass die gewünschte Motordrehzahl erreicht und die Bremse momentenfrei im Gleichgewicht ist. Dabei sollte die **Drehzahl des Motors nicht unter 120/min** sinken. Drehzahl messen und notieren.

Mit den beiden Vielfachmessgeräten wird die an der Heizwendel anliegende **Spannung** (Messbereich: 15 V Wechselspannung, Messung parallel zum Stromkreis) und die **Stromstärke** (Messbereich: 15 A, Messung in Reihe), und damit die zugeführte Leistung bzw. die **zugeführte Wärme Q_{zu}** gemessen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Messbereich des Amperemeters (15 A) nicht überschritten wird.

Achtung

Bei der Strommessung müssen die Messgerätebuchsen „15 A“ und „I“ verwendet werden, weil sonst das Messgerät zerstört wird.

Die abgegebene Leistung ergibt sich aus dem Produkt aus Bremsmoment und Winkelgeschwindigkeit des Motors. Daraus wird die bei jeder Umdrehung abgegebene Arbeit berechnet.

Der effektive Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine lässt sich aus dem Verhältnis der gewonnenen mechanischen Nutzenergie zu der zugeführten Wärmeenergie berechnen.

5.2.4 Bestimmung der abgeführten Wärme

- **Messung**

Bei der Bestimmung der abgeführten Wärme wird genauso vorgegangen, wie bei der Bestimmung der Reibungsverluste. Die Kühlwassereintrittstemperatur wird aus 5.1 übernommen. Die **aktuelle Kühlwassertemperatur** (in Betrieb) wird gemessen.

Die **Motordrehzahl** ist ebenfalls zu messen und zu notieren.

Mit den gemessenen Werten lässt sich die **abgeführte Wärmeenergie Q_{ab}** pro Umdrehung berechnen.

Zur Berechnung des thermodynamischen Wirkungsgrades des idealen Prozesses ist mit Hilfe der Glühfarbentabelle die Temperatur der Heizwendel zu bestimmen.

5.3 Der Stirlingmotor als Wärmepumpe oder Kältemaschine

In dieser Betriebsweise wird dem Stirlingmotor mechanische Energie zugeführt; das heißt er wird angetrieben. Abhängig von der Drehrichtung wird entweder dem Zylinderkopf Wärme entzogen und dem Kühlwasser zugeführt oder umgekehrt. Man kann auf diese Weise den Zylinderkopf beheizen oder abkühlen. Die Drehrichtung des Motors hat nichts damit zu tun, ob der Prozess rechts- oder linksläufig ist. Die beiden in diesem Abschnitt beschriebenen Betriebsweisen sind **linksläufige Prozesse**, die Arbeit in Wärme umwandeln.

- **Zylinderkopf**

Um die Temperaturabsenkung bzw. -erhöhung im Zylinderkopf messen zu können, das Thermometer mit dem Messbereich von -50 °C . bis 120 °C in den dafür vorgesehenen Zylinderkopfdeckel einschieben und mit der Mutter sicher festklemmen. Den Zylinderkopfdeckel mit der Heizwendel von dem Zylinderkopf ab- und den vorbereiteten Deckel auf den Zylinderkopf aufschrauben.

- **Motor**

Der Stirlingmotor wird nun mit dem Elektromotor über den Keilriemen so angetrieben, dass die Drehrichtung die gleiche ist wie bei dem als Wärmekraftmaschine betriebenen Motor (im Uhrzeigersinn). Der Motor wird nun als Kältemaschine betrieben.

- **Messung**

Den Temperaturabfall am Thermometer beobachten. Nach einiger Zeit stellt man fest, dass sich die Temperatur nicht mehr ändert. Es hat sich ein Gleichgewicht eingestellt zwischen der Wärme, die dem Zylinderkopf durch den Kreisprozess entzogen wird und der Wärme, die durch das Temperaturgefälle von außen zugeführt wird.

Nun wird die Drehrichtung des Antriebs umgekehrt. Der Motor wird nun als Wärmepumpe betrieben.

- **Messung**

Die Temperatur am Thermometer beobachten. Die Temperatur steigt rasch an, bis sich wieder ein Gleichgewicht zwischen zugeführter und abfließender Wärme bildet.

Derselbe Versuch kann nochmals anschaulich wiederholt werden, indem das Thermometer durch ein mit etwas Wasser gefülltes Reagenzglas ersetzt wird.

5.3.1 Leistungszifferbestimmung beim linksläufigen Prozess

Um die Leistungsziffer des Kälteprozesses zu bestimmen, ist die dem Prozess zu- und die von ihm abgeführte Wärmemenge zu bestimmen.

Die abgeführte Wärmemenge lässt sich, wie unter 5.2.4 beschrieben, über das Kühlwasser bestimmen. Die zugeführte Wärme wird dadurch bestimmt, dass dem Zylinderkopf durch die Heizwendel des beheizbaren Thermometers soviel Wärme zugeführt wird, dass seine Temperatur immer gleich der Außentemperatur ist.

- **Zylinderkopf**

In den Zylinderkopfdeckel das beheizbare Thermometer einschrauben und an den roten Kleinspannungstrafo anschließen. Mit den beiden Vielfachmessgeräten Strom und Spannung messen.

Achtung

Verdrängerkolben darf in keiner Position die Heizwendel berühren (zur Kontrolle Motor von Hand durchdrehen), da diese sonst zerstört wird

- **Motor**

Der Stirlingmotor wird nun vom Elektromotor in Uhrzeigerrichtung angetrieben.

- **Trafo**

Mit dem Kleinspannungstrafo wird die Heizleistung so geregelt, dass die Zylinderkopftemperatur immer gleich der Außentemperatur ist. Das bedeutet, dass die dem Zylinderkopf vom Kreisprozess entzogene Wärme gleich der dem Zylinderkopf elektrisch zugeführten Wärme ist.

- **Messung**

Wenn dieser Gleichgewichtszustand erreicht ist, Strom und Spannung messen.

Die Motordrehzahl ist ebenfalls zu messen und zu notieren. Damit kann die **zugeführte Wärme Q_{zu}** bestimmt werden.

Die vom Kreisprozess abgeführte Wärme ist wie in 5.2.4 beschrieben zu messen.

Betrachtet man den Prozess als Wärmepumpenprozess, bei dem das Kühlwasser erwärmt werden soll, so ist die Wärmeziffer

$$\varepsilon_W = \frac{Q_{ab}}{W_{zu}}$$

mit $W_{zu} = Q_{ab} - Q_{zu}$

gilt $\varepsilon_W = \frac{Q_{ab}}{Q_{ab} - Q_{zu}}$

Betrachtet man den Prozess als Kältemaschinenprozess, bei dem der Zylinderkopf abgekühlt werden soll, so gilt für die Kälteziffer

$$\epsilon_k = \frac{Q_{zu}}{W_{zu}} = \frac{Q_{zu}}{Q_{ab} - Q_{zu}}$$

6 AUSWERTUNG

6.1 Bestimmung der Reibungsverluste

Temperaturdifferenz

Kühlwassereintrittstemperatur $T_{k,e} =$ °C

Kühlwasseraustrittstemperatur

t [s]									
$T_{k,a}$ [°C]									

Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{k,a} - T_{k,e} =$ K

Kühlwasserstrom

Dauer t = s

Volumen V = cm³

Kühlwasserstrom $\dot{V} = \frac{m^3}{s}$

Drehzahl n = $\frac{1}{min} = \frac{1}{s}$

Wärmekapazität von Wasser $c_p = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

Reibungsverlust pro Umdrehung $Q_{V_R} = \dot{V} * \rho_w * c_p * \Delta T =$ J

6.2 Der Stirlingmotor als Wärmekraftmaschine

6.2.1 p,v-Diagramm

Skalierung des Millimeterpapiers auf dem Projektionsschirm

Skalierfaktor für Druck $e_p = \frac{\frac{N}{m^2}}{mm} \quad (\Delta p \approx 1bar = 10^5 \frac{N}{m^2})$

$$\text{Skalierfaktor für Volumen } e_v = \frac{\text{m}^3}{\text{mm}} \quad (\Delta V = 150\text{cm}^3 = 0,00015\text{m}^3)$$

Indizierte Arbeit

$$\mathbf{W_{ind} = e_p * e_v * A = \quad \quad \quad \mathbf{J}}$$

6.2.2 Leistungsmessung

Bremsarbeit pro Umdrehung

Hebel (halbe Länge des Prony'schen Zaums) $r =$ m

Bremskraft $F_B =$ N

Bremsarbeit pro Umdrehung $W_{\text{mech}} = r * F_B * 2 * \pi =$ J

Zugeführte Wärme pro Umdrehung

Spannung $U =$ V

Strom $I =$ A

Drehzahl $n = \frac{1}{\text{min}} = \frac{1}{\text{s}}$

Zugeführte Wärme pro Umdrehung $Q_{\text{zu}} = \frac{U * I}{n} =$ J

Abgeführte Wärme pro Umdrehung

Kühlwassereintrittstemperatur $T_{k,e} =$ °C

Kühlwasseraustrittstemperatur $T_{k,a} =$ °C

Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{k,a} - T_{k,e} =$ K

Drehzahl $n = \frac{1}{\text{min}} = \frac{1}{\text{s}}$

Abgeführte Wärme pro Umdrehung $Q_{\text{ab}} = \dot{V} * \frac{\rho_w * c_p * \Delta T}{n} =$ J

6.2.3 Wirkungsgrade

Heizwendeltemperatur $T_o =$ °C

Kühlwassertemperatur im Betrieb $T_u = T_{k,max} =$ °C

Thermodynamischer Wirkungsgrad

des idealen Prozesses

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_u}{T_o} =$$

Gütegrad

$$\eta_g = \frac{W_{ind}}{W} = \frac{W_{ind}}{Q_{zu} * \eta_{th}} =$$

Innerer Wirkungsgrad

$$\eta_i = \frac{W_{ind}}{Q_{zu}} =$$

Mechanischer Wirkungsgrad

$$\eta_m = \frac{W_{mech}}{W_{ind}} =$$

Effektiver Wirkungsgrad

$$\eta_{eff} = \frac{W_{mech}}{Q_{zu}} =$$

Kontrolle: Effektiver Wirkungsgrad

$$\eta_{eff} = \eta_m * \eta_g * \eta_{th} =$$

6.3 Der Stirlingmotor als Wärmepumpe und Kältemaschine

Zugeführte Wärme pro Umdrehung

$$\text{Spannung } U = \quad \quad \quad V$$

$$\text{Strom } I = \quad \quad \quad A$$

$$\text{Drehzahl } n = \quad \quad \quad \frac{1}{\text{min}} = \quad \quad \quad \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{Zugeführte Wärme pro Umdrehung } Q_{\text{zu}} = \frac{U \cdot I}{n} = \quad \quad \quad \text{J}$$

Abgeführte Wärme pro Umdrehung

$$\text{Kühlwassereintrittstemperatur } T_{\text{k,e}} = \quad \quad \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{Kühlwasseraustrittstemperatur } T_{\text{k,a}} = \quad \quad \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperaturdifferenz } \Delta T = T_{\text{k,a}} - T_{\text{k,e}} = \quad \quad \quad \text{K}$$

$$\text{Drehzahl } n = \quad \quad \quad \frac{1}{\text{min}} = \quad \quad \quad \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{Abgeführte Wärme pro Umdrehung } Q_{\text{ab}} = \dot{V} \cdot \frac{\rho_{\text{w}} \cdot c_{\text{p}} \cdot \Delta T}{n} = \quad \quad \quad \text{J}$$

$$\text{Es gilt: } W_{\text{zu}} + Q_{\text{zu}} = Q_{\text{ab}} \quad \Rightarrow \quad W_{\text{zu}} = Q_{\text{ab}} - Q_{\text{zu}}$$

$$\text{Wärmeziffer } \epsilon_{\text{W}} = \frac{Q_{\text{ab}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{Q_{\text{ab}}}{Q_{\text{ab}} - Q_{\text{zu}}} =$$

$$\text{Kälteziffer } \epsilon_{\text{K}} = \frac{Q_{\text{zu}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{Q_{\text{zu}}}{Q_{\text{ab}} - Q_{\text{zu}}} =$$