



Der Stirling-Motor

Susanne Wagner, WS 08/09; Christian Ziebell, WS 18/19

Gliederung

1	Funktionsprinzip des Stirling-Motors	1
2	Der Stirling-Motor – B-Typ	3
3	Theoretische Betrachtung	6
3.1	Thermodynamik des Kreis-Prozesses	6
3.2	Wirkungsgrad	7
4	Aufbau Modell-Motor	8

Einstieg 1: In der heutigen Zeit stehen wir vor einem Energie-Problem. Die fossilen Brennstoffe werden knapp, weshalb es immer wichtiger wird sich mit regenerativen Energien und deren Anwendung zu beschäftigen.

Mit dem Stirling-Motor als Wärme-Kraft-Maschine kann man beispielsweise die Sonnen-Energie nutzen.

Einstieg 2: Nie wie zuvor warnten die Forscher und Umwelt-Schützer vor dem rapide steigenden CO₂-Gehalt in der Luft. Dadurch geraten die Automobil-Bauer immer mehr unter Druck und müssen sich nach alternativen Antriebs-Möglichkeiten umschaun. Eine Möglichkeit sind Elektro-Autos. Diese sind zwar für die Stadt-Luft gut, aber durch die Batterie-Herstellung ökologisch nicht wirklich besser. Für die Lithium-Akkus werden Unmengen an Grund-Wasser verbraucht.

Aus diesem Grund schauen wir uns einen fast in Vergessenheit geratenen Motor an und prüfen, ob dieser nicht als möglicher Antrieb in einem Kraftfahrzeug eingesetzt werden kann.

1 Funktionsprinzip des Stirling-Motors

Stoffe dehnen sich bei Erwärmung aus, wobei in Gasen die kinetische Energie und der Druck steigt. Bei Kühlung geschieht das Gegenteil, der Stoff zieht sich zusammen.

Dies kann man gut an folgendem Experiment nachvollziehen:

Experiment: Volumen-Veränderungen von Gasen bei Erwärmung und Kühlung

Material:

- Becherglas
- Gummi-Membran, z. B. Luft-Ballon, Gummi-Handschuh
- Klebe-Film oder Haushalts-Gummi
- Teelicht und Gestell
- Bleistift, o. ä.
- Eis

Durchführung: Die Gummi-Membran wird mit Hilfe des Klebe-Films oder des Haushalts-Gummis über das Becherglas gespannt und der Bleistift darauf gelegt.

Nun wird das Reagenzglas über das Teelicht und anschließend nach kurzer Abkühlung in das Eis gestellt.

Beobachtung:



Abb. 1: Luft in abgeschlossenem Raum

Im Ausgangs-Zustand hat die Luft im abgeschlossenen Behälter dieselbe Temperatur wie die außerhalb, es ist keine Wölbung der Membran erkennbar.



Abb. 2: Luft in abgeschlossenem Raum unter Wärme-Einfluss

Bei Erwärmung dehnt sich die Luft im Behälter aus, die Membran wölbt sich nach oben.



Abb. 3: Luft in abgeschlossenem Raum unter Kälte-Einfluss

Bei Kühlung zieht sich die Luft im Behälter zusammen, die Membran wölbt sich nach unten.

Wärme-Kraft-Maschinen wie der Stirling-Motor nutzen dieses Prinzip und wandeln so Wärme in mechanische Energie um:

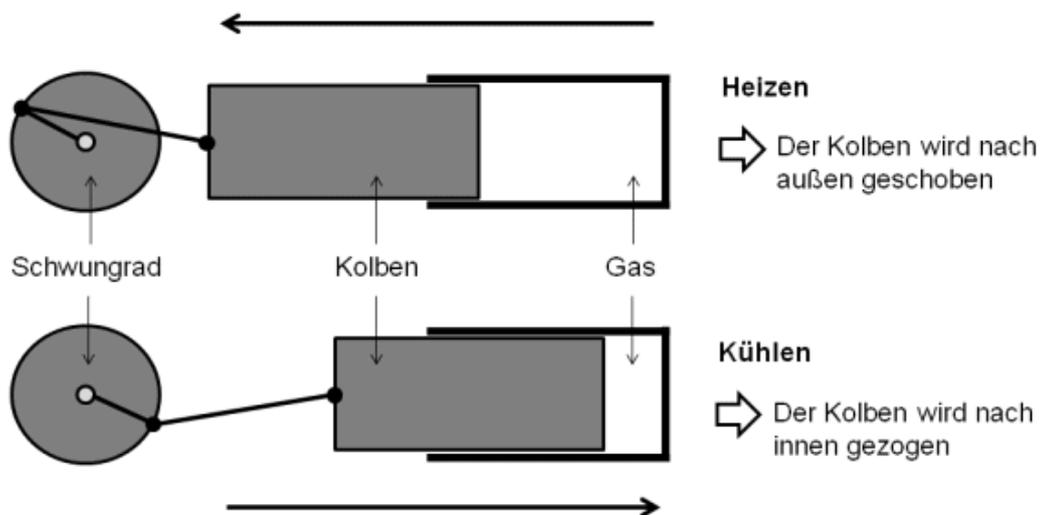


Abb. 4: Prinzip der Umwandlung von Wärme in mechanische Energie

Durch Wärme-Zufuhr und Kühlung kann ein Kolben in einem Zylinder bewegt werden, diese Bewegung wird mit Pleuel und Schwungrad in eine Kreis-Bewegung umgewandelt, die beispielsweise einen Generator antreiben kann.

2 Der Stirling-Motor – B-Typ

Der B-Typ des Stirling-Motors besteht aus einem Zylinder und zwei Kolben, wobei der obere Teil des Zylinders gekühlt, der untere beheizt wird. Die Kolben sind beweglich über Pleuel-Stangen um 90° versetzt an einem Schwungrad befestigt.

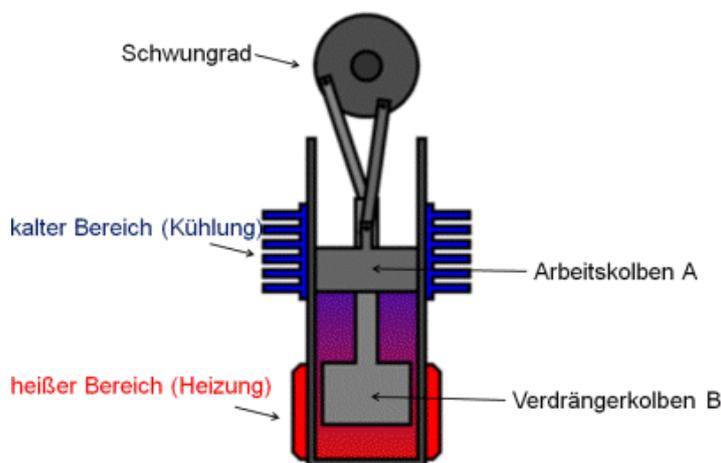


Abb. 5: Der B-Typ des Stirling-Motors [5]

Eine komplette Umdrehung des Schwungrads kann in die folgenden vier Schritte (Takte) unterteilt werden:

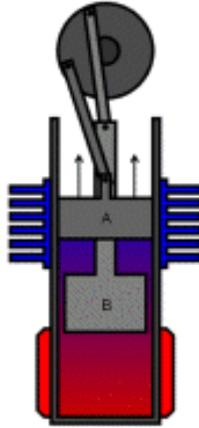


Abb. 6: Takt 1 [5]

Das Gas ist komprimiert und kühl im unteren warmen Bereich des Zylinders. Dort wird es erwärmt, dehnt sich aus und drückt den Arbeits-Kolben A nach oben.

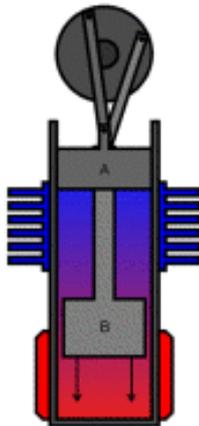


Abb. 7: Takt 2 [5]

Das Gas ist maximal expandiert und heiß, der Schwung des Schwing-Rades drückt den Verdränger-Kolben B nach unten, das Gas wird in den kalten Bereich des Zylinders verschoben.

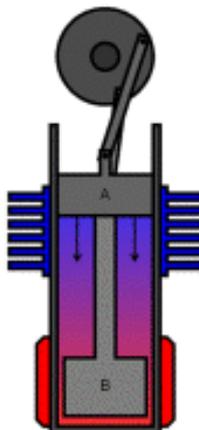


Abb. 8: Takt 3 [5]

Das Gas ist im kalten Bereich des Zylinders, durch die Kühlung und den Schwung des Schwing-Rades wird das Gas komprimiert, der Arbeits-Kolben A bewegt sich nach unten.

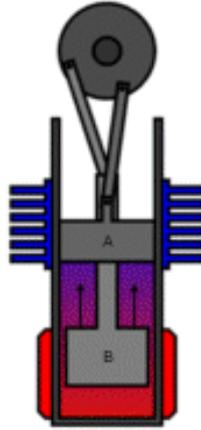


Abb. 9: Takt 4 [5]

Das Gas ist komprimiert und kühl, der Schwung des Schwung-Rades zieht den Verdränger-Kolben B nach oben, das Gas wird in den heißen Bereich verschoben. (Schritt 1 kann beginnen)

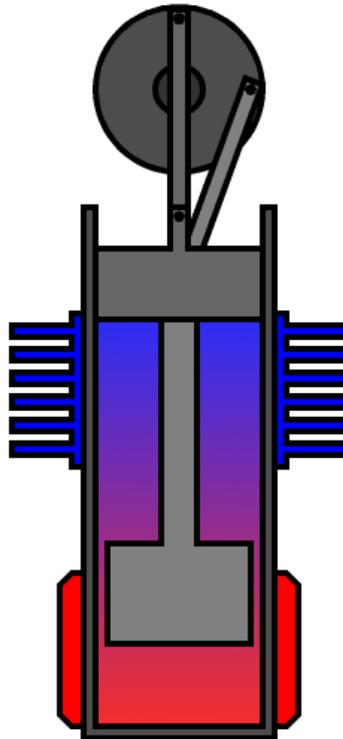


Abb. 10: Stirling-Motor B-Typ in Betrieb [5]

[Animation](#)

3 Theoretische Betrachtung

3.1 Thermodynamik des Kreis-Prozesses

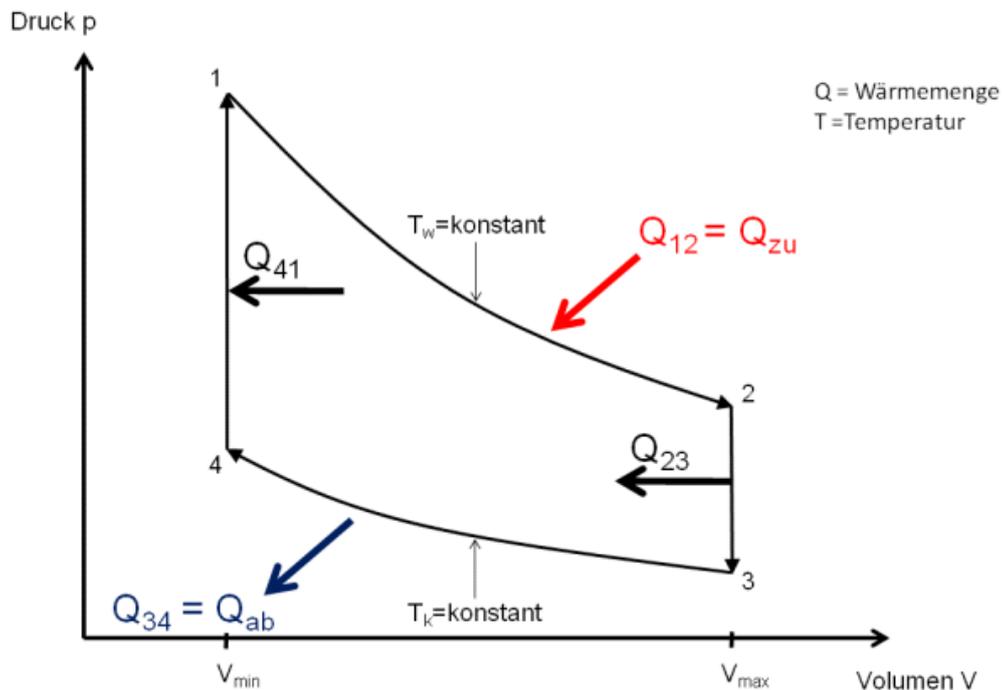


Abb. 11: ideales p-V-Diagramm des Kreis-Prozesses

von 1 nach 2: **isotherme Expansion** ($T_w = \text{konstant}$)

Wärme-Menge „ Q_{zu} “ wird zugeführt, das Volumen wird größer, der Druck dadurch kleiner. (Takt 1)

von 2 nach 3: **isochore Wärmeabfuhr** ($V_{\max} = \text{konstant}$)

Bei gleichbleibendem Volumen sinkt der Druck durch die Verschiebung des Gases in den kalten Bereich weiter ab, Verdrängerkolben B nimmt Q_{23} auf. (Takt 2)

von 3 nach 4: **isotherme Kompression** ($T_k = \text{konstant}$)

Wärmemenge Q_{ab} wird abgeführt, das Volumen wird kleiner, der Druck dadurch etwas größer. (Takt 3)

von 4 nach 1: **isochore Wärmezufuhr** ($V_{\min} = \text{konstant}$)

Bei gleichbleibendem Volumen steigt der Druck durch die Verschiebung des Gases in den warmen Bereich, der Verdrängerkolben B gibt Q_{41} ab. (Takt 4)

Die Zustands-Änderungen gehen fließend ineinander über und überlagern sich auch so weit, so dass sie praktisch nur schwer nachzuvollziehen sind.

Da der Stirling-Motor ein abgeschlossenes System ist gilt $\Delta U = 0$. Damit lässt sich der erste Hauptsatz der Thermodynamik

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

wobei:

$\Delta U =$ innere Energie

$\Delta Q =$ Wärme Menge

$\Delta W =$ Arbeit

vereinfachen und es gilt:

$$\Delta Q = -\Delta W \quad \text{bzw.} \quad Q = -W$$

3.2 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis von Nutz-Arbeit zu zugeführter Wärme:

$$\eta = \frac{|W_N|}{Q_{zu}}$$

Die Nutz-Arbeit „ W_N “ kann man als Summe von „ Q_{zu} “ und „ Q_{ab} “ schreiben, damit ergibt sich:

$$\eta = \frac{Q_{zu} + Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{Q_{12} + Q_{34}}{Q_{12}} = 1 + \frac{Q_{34}}{Q_{12}}$$

Da wie oben begründet $Q = -W$ und die Arbeit in diesem Fall Volumen-Arbeit ist, lassen sich die beiden Wärme-Mengen wie folgt umformen:

$$Q_{12} = -W_{ab} = \int_1^2 p \Delta V = \int_1^2 \frac{nRT_W}{V} \Delta V = nRT_W \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = nRT_W \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{max}}\right)$$

$$Q_{34} = -W_{zu} = \int_3^4 p \Delta V = \int_3^4 \frac{nRT_k}{V} \Delta V = nRT_k \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = nRT_k \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{max}}\right)$$

Einsetzen in Wirkungsgrad ergibt:

$$\eta = 1 - \frac{T_k}{T_W}$$

Der Wirkungsgrad ist somit nur von der Temperatur-Differenz der beiden Kolben abhängig. Hierbei handelt es sich auch um den Carnot'schen-Wirkungsgrad. Er gibt das Maximum an, das in diesem Temperatur-Bereich an Arbeit erreicht werden kann. (im idealen Fall ca. 60% in der Praxis zurzeit ca. 40%).

Diese Temperatur-Differenz kann zum Beispiel durch Nutzung der Sonne erzeugt werden, beispielsweise in Spanien und Afrika werden bereits solche Wärme-Kraftwerke umgesetzt:



Abb. 12: Deutsches Eurodish-Stirling-Projekt in Spanien [6]

4 Aufbau Modell-Motor

- Arbeits-Kolben im Kühl-Zylinder
- Verdränger-Kolben im Heiz-Zylinder
- Abgeschlossenes Arbeitsgas
- Anordnung der Zylinder im 90°-Winkel
- Verbindung der Zylinder über Pleuel-Stangen und einem Antriebsrad
- Schwung-Rad
- Regenerator
- Wärme-Quelle



Abb. 13: Modell eines Stirling-Motors [10] von Claudio Minonzo

Experiment: Vorführung Stirling-Motor

Material:

- Modell eines Stirling-Motors
- Heiß-Luft-Föhn

Durchführung: Mit Hilfe des Heißluftföhns den Stirlingmotor beheizen und zum Laufen bringe.

Versuche den Motor zunächst langsam laufen zu lassen und anschließend lass den Motor schnell laufen.

Beobachtung: Der Motor braucht relativ lange bis er anläuft. Er startet auch nur wenn man ihn zu Beginn anschiebt. Bei dem Versuch den Motor langsam laufen zu lassen wird ersichtlich, dass die Geschwindigkeits-Steuerung sehr schwer zu regulieren ist. Im Schnell-Lauf wird die Leistung, die in dem Motor steckt, ersichtlich.

Zusammenfassung: Mit dem Stirling-Motor kann man (Sonnen-)Wärme in Arbeit umwandeln und somit ein Wärme-Kraftwerk betreiben. Er arbeitet in vier Takten und sein Wirkungsgrad hängt nur von der erreichten Temperatur-Differenz ab, ist aber in der Praxis noch nicht optimal. Der Stirling-Motor bleibt dennoch ein interessantes Objekt, da er viele positive Eigenschaften hat. Er kann mit vielen Stoffen (sogar Luft) betrieben werden, ist wartungsfreundlich und produziert (im Normalfall) keine Abgase.

Abschluss: *Der Stirling-Motor ist für einen alternativen Antrieb im Kraftfahrzeug eher ungeeignet. Ein gut konstruierter Stirling-Motor besitzt zwar in etwa den gleichen Wirkungsgrad wie ein herkömmlicher Diesel-Motor, ist aber durch die schwierige Geschwindigkeits-Regulierung und lange Anlauf-Zeit eher ungeeignet. Auch der Vorteil, dass alternative Rohstoffe wie Holz zur Betreibung des Motors genutzt werden können, kommt im Kraftfahrzeug durch die begrenzte Lade-Möglichkeiten nicht zum Tragen. Der Stirling-Motor hat seine Vorteile in stationären Bereich so wie zum Beispiel in Abb. 12 als Solar-Anlage.*

Quellen:

1. M. Werdich, K. Kübler: Stirlingmaschinen Grundlagen - Technik - und Anwendung, ökobuch, Staufen bei Freiburg, 1999, 7. Auflage
2. F. Schleder: Stirlingmotoren Thermodynamische Grundlagen, Kreisprozessberechnung und Niedertemperatur- und Freikolbenmotoren, Vogel, Würzburg, 2008, 3. Auflage
3. Dr. W. Häfner: Skriptum zum Modul PC II, Universität Bayreuth, SS 2008.
4. https://www.deutschlandfunk.de/elektroautos-gut-fuer-die-stadtluft-schlecht-fuer-die-umwelt.697.de.html?dram:article_id=392370, 30.12.2019
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine, 30.12.2019
6. <http://www.fvee.de/bildmaterial/bilder-zu-forschungsthemen/solkraftwerke-und-thermie/>, 30.12.2019
7. https://www.klassenarbeiten.de/referate/physik/stirlingmotor/stirlingmotor_2.htm, 06.01.2020
8. <https://www.energie-lexikon.info/stirlingmotor.html>, 06.01.2020
9. <http://www.c-turbines.ch/frameset.html>, 06.01.2020
10. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20445681>, 06.01.2020