

Stirlingmotoren

de.wikibooks.org

25. August 2014

On the 28th of April 2012 the contents of the English as well as German Wikibooks and Wikipedia projects were licensed under Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported license. A URI to this license is given in the list of figures on page 29. If this document is a derived work from the contents of one of these projects and the content was still licensed by the project under this license at the time of derivation this document has to be licensed under the same, a similar or a compatible license, as stated in section 4b of the license. The list of contributors is included in chapter Contributors on page 27. The licenses GPL, LGPL and GFDL are included in chapter Licenses on page 33, since this book and/or parts of it may or may not be licensed under one or more of these licenses, and thus require inclusion of these licenses. The licenses of the figures are given in the list of figures on page 29. This PDF was generated by the \LaTeX typesetting software. The \LaTeX source code is included as an attachment (`source.7z.txt`) in this PDF file. To extract the source from the PDF file, you can use the `pdfdetach` tool including in the `poppler` suite, or the <http://www.pdfplabs.com/tools/pdftk-the-pdf-toolkit/> utility. Some PDF viewers may also let you save the attachment to a file. After extracting it from the PDF file you have to rename it to `source.7z`. To uncompress the resulting archive we recommend the use of <http://www.7-zip.org/>. The \LaTeX source itself was generated by a program written by Dirk Hünninger, which is freely available under an open source license from http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:Dirk_Huenniger/wb2pdf.

Inhaltsverzeichnis

0.1	Überblick	1
0.2	Abgrenzung von anderen Motorarten und Besonderheiten	2
0.3	Geschichtliche Entwicklung	2
0.4	Funktionsprinzip	5
0.5	Prozesse	9
0.6	Marktüberblick	18
0.7	Vorteile des Stirlingmotors	20
0.8	Anwendungsgebiete	21
0.9	Zukunft der Stirlingmaschine	22
0.10	Neue Antriebsart	23
0.11	Modellmotoren	23
0.12	Datenbanken	24
0.13	Literaturhinweise	25
0.14	Weblinks	26
0.15	Quellen	26
1	Autoren	27
	Abbildungsverzeichnis	29
2	Licenses	33
2.1	GNU GENERAL PUBLIC LICENSE	33
2.2	GNU Free Documentation License	34
2.3	GNU Lesser General Public License	35

w:Stirlingmotor¹ Die Bezeichnung **Stirlingmotor** ist ein Sammelbegriff für die vielfältigen Varianten derjenigen Motoren (Wärme­kraft­ma­schinen), bei denen der Stirlingprozess noch abgeleitet werden kann.

0.1 Überblick

Der Stirlingmotor ist eine Maschine, in der ein Gas² als Arbeitsmedium in einem geschlossenen Raum erwärmt wird, Volumenänderungsarbeit auf einen Arbeitskolben überträgt und in mechanische Arbeit umsetzt. Das Gas wird danach abgekühlt.

1 <http://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor>
2 <http://de.wikipedia.org/wiki/Gas>

0.2 Abgrenzung von anderen Motorarten und Besonderheiten

Beim Stirlingmotor bleibt das Gas innerhalb des Motors und wird *nicht ausgetauscht*. Das bedeutet, dass er, abgesehen von einer ggf. durch Verbrennung betriebenen externen Wärmequelle, ohne die Emission von Abgasen arbeitet.

Darin unterscheidet sich dieser Motor z. B. von Dampfmaschinen und Verbrennungsmotoren, denn bei *Dampfmaschinen* wird der Wasserdampf außerhalb des Zylinder³s erhitzt, in den Zylinder geleitet und nach der (ggf. mehrstufigen) Entspannung abgelassen. Bei *Verbrennungsmotoren*, wie z. B. dem Ottomotor⁴ oder dem Dieselmotor⁵ wird das Gas (Kraftstoff⁶-Luft-Gemisch) innerhalb des Zylinders durch Verbrennung⁷ erhitzt und nach der Entspannung ausgetauscht.



Abb. 1 Prinzip Ottomotor

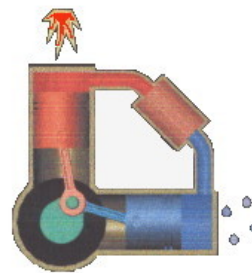


Abb. 2 Prinzip Stirlingmotor

0.3 Geschichtliche Entwicklung

0.3.1 Erfinder unter Druck

Die Dampfmaschine⁸ leitete die industrielle Revolution⁹ ein. Sie trieb Webstühle, Schiffe oder Eisenbahnen an. Doch anfangs wollte sie niemand haben.

„*Ich bin nicht wahnsinnig!*“, rief Salomon de Caus. „*Ich habe eine Erfindung gemacht, die das Land bereichern muss.*“ De Caus hat eine Dampffontäne konstruiert. Doch Dampffontänen benötigt im Paris des 17. Jahrhunderts niemand, de Caus' Ideen auch nicht. Seine Rufe verhallen zwischen den Gitterstäben einer Pariser Irrenanstalt.“

3 <http://de.wikipedia.org/wiki/Zylinder%20%28Technik%29>

4 <http://de.wikipedia.org/wiki/Ottomotor>

5 <http://de.wikipedia.org/wiki/Dieselmotor>

6 <http://de.wikipedia.org/wiki/Kraftstoff>

7 <http://de.wikipedia.org/wiki/Verbrennung>

8 <http://de.wikipedia.org/wiki/Dampfmaschine>

9 <http://de.wikipedia.org/wiki/industrielle%20Revolution>

Der britische Marquis of Worcester, Edward Somerst, besucht den Irren eher zufällig und urteilt später: „Ihr haltet das größte Genie unserer Zeit gefangen. In meinem Vaterland England würde dieser Mann, statt im Kerker zum Wahnsinn gebracht zu werden, mit Reichtümern überschüttet werden!“ Der Marquis überschätzt sein Vaterland. Zurück in England wird er als angeblicher Spion enttarnt und im Tower von London eingekerkert. Dort schrieb er ein Buch, in das er Boote ohne Segel und andere Merkwürdigkeiten kritzelte. Das kleine Buch bekommt der französische Physiker und Arzt Denis Papin¹⁰ (1647 - 1712) in die Hände. Er kennt es bald auswendig und ist begeistert von der Idee, mit Dampfdruck Maschinen anzutreiben. Als Erstes bastelt er einen Dampfkochtopf¹¹, den er um 1680 öffentlich vorführt. Das gute Stück fliegt Papin mit einem lauten Knall um die Ohren. Der Spott ist groß. Doch mit einer weiteren Erfindung, dem Sicherheitsventil, gelingt das Experiment. 1689 geht Papin nach Deutschland, entwirft ein U-Boot und die erste funktionstüchtige Dampfmaschine. Mit ihr hat er viel vor.

Doch Papin ist kein Geschäftsmann. Seine Ideen lässt er sich vom Engländer Thomas Savery¹² stehlen, der sie verbessert und verkauft. Papin sieht keinen Pfennig. Seine letzten Ersparnisse steckt er in einen Werbegag: Mit einem dampfbetriebenen Schaufelradboot will er von Kassel nach London schippern und so die Machbarkeit seiner Ideen beweisen. Er kommt nicht weit. Bei Münden wird ihm die Weiterreise verweigert, das Boot an Land geschleppt und in seine Einzelteile zerlegt. Papin ist am Ende und stirbt um das Jahr 1712 herum einsam und unbekannt in einem Londoner Elendsviertel. Den Erfolg hat ein anderer: Der britische Ingenieur James Watt¹³ (1736 - 1819). Er sichert sich die Patente und bringt die Entwicklung der Dampfmaschine voran.

Damit werden auch zwei andere Erfindungen machbar: Das Dampfschiff¹⁴ und die Dampflokomotive¹⁵. Um beide entbrennt ein heftiger Streit. George Stephenson¹⁶ beantragt 1825 im britischen Unterhaus das erste Eisenbahnnetz zwischen Manchester und Liverpool und prophezeit, dass es in ein paar Jahrzehnten keine Postkutschen mehr geben wird, sondern nur noch stählerne Gleise, die alle Länder der Welt durchziehen.

Die Abgeordneten beschimpfen ihn als Schwindler und Scharlatan. Sie äußern ihre Bedenken: Die Maschine werde mit Feuer angetrieben. Wenn es regne, würde das Feuer erlöschen. Wenn Sturm aufkommt, würde das Feuer angefacht werden und der Kessel explodieren. Pferde würden vor der Lokomotive scheuen und so eine öffentliche Gefahr darstellen. Ein Gutachter der Pariser Académie des sciences¹⁷ schreibt: Die schnelle Bewegung der Reisenden könnte eine Gehirnkrankheit, das Delirium furiosum hervorrufen.

Die Parlamentsabgeordneten kippen das Projekt, aber Stephenson und seine Lok sind längst abgefahren. Ein halbes Jahr später lädt er die hohen Herren zu einer Probefahrt von Darlington nach Stockton (Stockton and Darlington Railway¹⁸) ein. Als sich die 8 Tonnen schwere

10 <http://de.wikipedia.org/wiki/Denis%20Papin>

11 <http://de.wikipedia.org/wiki/Schnellkochtopf>

12 <http://de.wikipedia.org/wiki/Thomas%20Savery>

13 <http://de.wikipedia.org/wiki/James%20Watt>

14 <http://de.wikipedia.org/wiki/Dampfschiff>

15 <http://de.wikipedia.org/wiki/Dampflokomotive>

16 <http://de.wikipedia.org/wiki/George%20Stephenson>

17 <http://de.wikipedia.org/wiki/Acad%C3%A9mie%20des%20sciences>

18 <http://de.wikipedia.org/wiki/Stockton%20and%20Darlington%20Railway>

Dampflok mit 38 Wagen in Bewegung setzt, bricht Jubel aus. „Die Verrückten hatten mal wieder gewonnen.“

0.3.2 Robert Stirling

Schottland zu Beginn des 19. Jahrhunderts: In der Gemeinde des Pfarrers Robert Stirling mussten selbst sechsjährige Kinder in den Kohlebergwerken arbeiten. Sie schoben und zogen Kohlenkübel durch die engen Stollen und krochen dabei nicht selten auf allen Vieren. Häufig stand der Boden unter Wasser. Es gab zwar Pumpen, die von James Watts Dampfmaschine¹⁹ angetrieben wurden. Ihre Kessel und Leitungen standen unter gefährlich hohem Dampfdruck und platzten zu dieser Zeit häufig. Robert Stirling²⁰ wollte, getrieben von dem Gedanken die schwere und gefährliche Arbeit etwas leichter und sicherer zu machen, eine Maschine konstruieren, die auch ohne den gefährlichen Dampf arbeitet. Er erhielt als 26-Jähriger ein Patent auf ein neues Verfahren zum Antrieb von Maschinen.

Der erste Motor, der nach Stirlings Prinzip arbeitete, war sehr einfach konstruiert. Er wurde später noch entscheidend weiterentwickelt. Es wurde ein zweites Schwungrad hinzugefügt und das Arbeitsgas²¹ verändert bzw. dessen Druck erhöht. Am Anfang des 20. Jahrhunderts waren weltweit ca. 250.000 Stirlingmotoren im Einsatz als Tischventilatoren, Wasserpumpen oder Antriebe für Kleingeräte. Sie versorgten Privathaushalte und kleine Handwerksbetriebe mit mechanischer Energie. Als sich Otto-, Diesel- und Elektromotoren immer weiter verbreiteten, wurden die Stirlingmotoren zunehmend vom Markt verdrängt.

0.3.3 Entwickler 1816 bis 1980

Auszug aus den Namen der Meilensteine in der Entwicklungsgeschichte:

- Robert Stirling²² (1816 - 1827)
- Ericson (1833 - 1860)
- Lehmann (1866)
- Stenberg (1877)
- van Rennes (1878)
- Ericson (1880)
- Robinson (1883 - 1889)
- Ringbom (1907)
- Malone (1931)
- Philips (1938)
- Meijer (1953)
- Kolin (1980 - 1985)
- Carlquist (1980 - 1990)
- Senft (1984)

19 <http://de.wikipedia.org/wiki/Dampfmaschine>

20 <http://de.wikipedia.org/wiki/Robert%20Stirling>

21 <http://de.wikipedia.org/wiki/Arbeitsgas>

22 <http://de.wikipedia.org/wiki/Robert%20Stirling>

0.3.4 Entwickler in Deutschland 1808 bis 1885

1860 versuchte man auch in der Maschinenfabrik Klett & Co zu Nürnberg, (*kalorische Maschinen*) einzuführen. Im Jahre 1885 entstanden zwei Normaltypen für 1 und 3 PS. Ende 1860 waren es bereits 60 Maschinen.

Überlebt hat nur eine Maschine des Baujahrs 1863. Sie wurde in der Fabrik selbst bis Ende der 80er Jahre des 19. Jahrhunderts zum Antrieb von 8-10 Farbmühlen eingesetzt, kam danach ins Depot des Nürnberger Verkehrsmuseums und geriet dann in Vergessenheit.

Erst 1998 tauchte sie wieder auf und wurde von einer Gruppe historisch interessierter Mitarbeiter der MAN Dieselmotorenfabrik Nürnberg betriebsfähig restauriert.

Die Maschine weist einige Unterschiede zum Original von John Ericsson auf. Es sind keine Konstruktionsunterlagen überliefert, auch Patente wurden nicht beantragt - übrigens auch nicht von Ericsson. Bayern war damals offenbar kein lukrativer Markt aus amerikanischer Sicht.

0.4 Funktionsprinzip

0.4.1 Funktionsbeschreibung (vereinfacht)

Vereinfacht dargestellt besteht ein Stirlingmotor aus einem geschlossenen Zylinder, in welchem sich ein Kolben (AK=Arbeitskolben) befindet. Der Zylinderkörper schließt ein Arbeitsgas, beispielsweise Luft ein. Dieses Gas hat zunächst eine Umgebungstemperatur, die Anfangstemperatur T_1 .

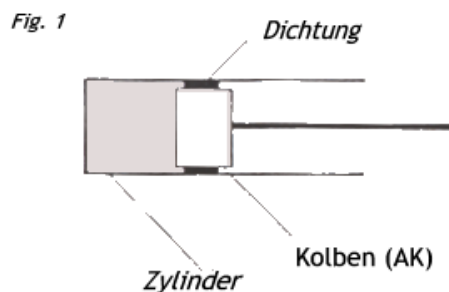


Abb. 3 Pos. T_1, P_1 im PV-Diagramm



Abb. 4 Pos. T_2, P_2 im PV-Diagramm

Wird dem Zylinder Wärme zugeführt, so erwärmt sich auch das eingeschlossene Arbeitsgas. Dies hat einen Druckanstieg im Zylinder zur Folge. Der Kolben wird dadurch nach außen

geschoben und kann somit Arbeit verrichten. Dabei dehnt sich das Arbeitsgas aus. Die Endlage (OT=oberer Totpunkt) ist der Punkt T3 im PV-Diagramm.

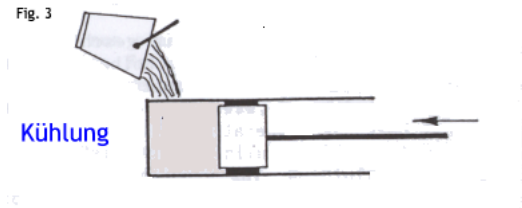


Abb. 5 Pos. T3,P3 im PV-Diagramm

Wird nun dem Zylinder Wärme durch Kühlung entzogen, so kühlt sich auch das eingeschlossene Gas ab. Es entsteht ein Unterdruck und der Kolben wird zurück verschoben. Der äußere Luftdruck drückt den Kolben nach innen.

Hat das Gas im Zylinder wieder die gleiche Temperatur wie vor der Erwärmung, so wird auch der Kolben seine Ausgangslage wieder einnehmen. Dieser Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden.

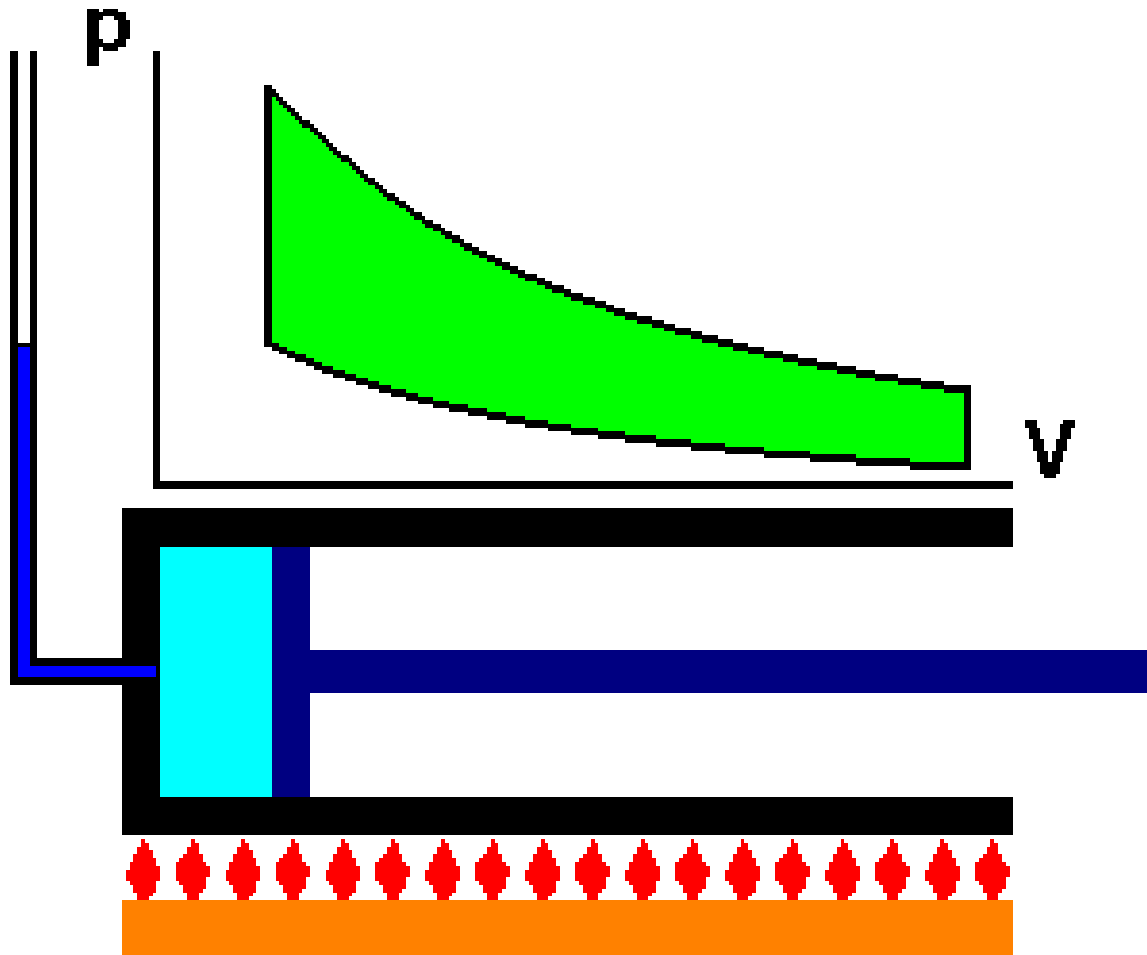


Abb. 6 Animation eines Stirlingmotors mit PV-Diagramm

0.4.2 Arbeits- und Verdrängerkolben

Das abwechselnde Heizen und Abkühlen des Arbeitszylinders ist natürlich unwirtschaftlich. Um den Motor schneller drehen lassen zu können, ist eine kontinuierliche Beheizung in einem Bereich des Motors und eine kontinuierliche Kühlung in einem anderen Bereich des Motors nötig. Man braucht dazu dann einen zweiten Kolben. Dieser zweite Kolben wird als Verdrängerkolben (VK) bezeichnet.

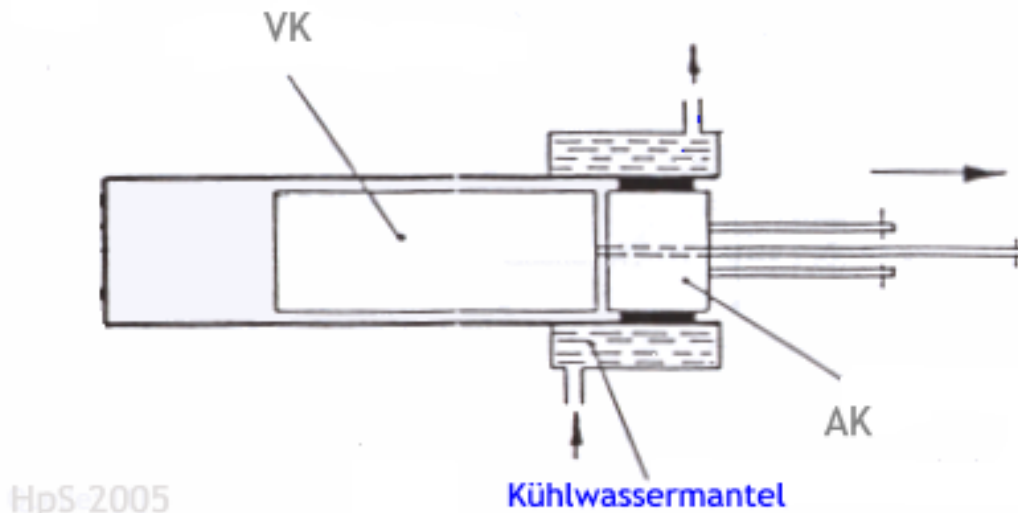


Abb. 7 Mit Arbeits- und Verdrängerkolben

Der Verdrängerkolben ist etwas kleiner als der Innendurchmesser des Zylinders, damit das Arbeitsgas um ihn herum von der einen auf die andere Seite des Kolbens strömen kann. Er wird durch einen geeigneten Mechanismus so gesteuert, dass sich das Arbeitsgas im richtigen Moment an der richtigen Stelle befindet.

Wenn das Arbeitsgas von der heißen Seite auf die kalte Seite geschoben wird, lässt man dieses durch ein Drahtgeflecht hindurchströmen, damit ein Teil der Wärme dort gespeichert wird, bis es vom kalten Raum wieder zurückkommt. Diesen Wärmespeicher bezeichnet man als Regenerator²³. Aufgrund des Zieles, hohe Wirkungsgrade zu erreichen, haben moderne Stirlingmotoren einen Regenerator eingebaut. Ohne ihn müsste die bis zu fünffache Wärmelast zusätzlich zu- und über den Kühlkreislauf wieder abgeführt werden. Damit sinkt auch der Wirkungsgrad stark ab.

(Beispiel: mit RE $Q_{zu} = 0,2 \text{ kW}$, ohne RE müsste $Q_{zu} = 1,0 \text{ kW}$ sein um gleiche Wellenleistung zu erreichen). Nachstehende Skizze zeigt einen Motor mit allen wesentlichen Bauteilen (Gehäuse, Antrieb, Arbeits-, Verdrängerkolben und Regenerator).

0.4.3 Beispiel Motoraufbau

²³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Regenerator>

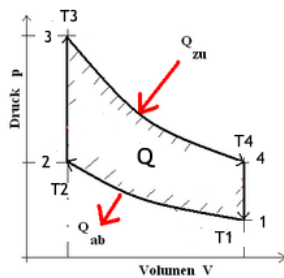


Abb. 8 Beispiel eines pV-Diagramms

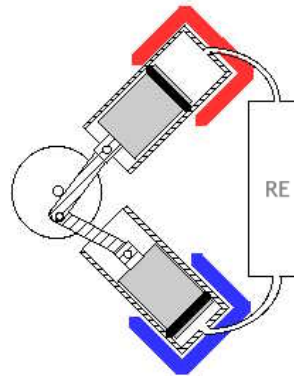


Abb. 9 Schema Erhitzer und Kühler

Heutzutage findet man fast nur noch Modell-Heißluftmotoren ohne Regenerator vor. Stirlingmaschinen mit kleinen Leistungen nutzen dabei den Gasspalt um den Verdränger als Regenerator. Durch die Bewegung des Verdrängers wird Gas vom Expansionsraum an den Seiten des Verdrängers vorbei in den Kompressionsraum geschoben und umgekehrt. Wenn die Leistung der Maschine klein genug ist, reicht die Speicherfähigkeit der Zylinder- und Verdrängerwände in dem Spalt aus, um einen regenerativen Effekt zu erzielen und den Wirkungsgrad der Maschine anzuheben.

0.4.4 Abkürzungen im Artikel

Folgende Abkürzungen finden im Artikel Anwendung.

- AK: Arbeitskolben
- VK: Verdrängerkolben
- R: Regenerator

STMOT2²⁴ - Computerprogramm zur Berechnung des Wärmekraftprozesses und der Dynamik von a-Typ-Stirlingmotoren.

- P-V: Druck-Volumen-Diagramm
- T-S: Temperatur-Entropie-Diagramm
- OT: Oberer Totpunkt
- UT: Unterer Totpunkt
- S: Kolbenweg

0.4.5 Zeichenerklärung im Artikel

Lit[]	Literaturhinweise [-]
Gl()	Hinweise auf eine Gleichung [-]
Fig.	Bezug auf eine Zeichnung / ein Diagramm [-]

24 <http://web.archive.org/20010421070814/www.geocities.com/peterfette/fette.htm>

Abb.	Bezug auf eine Abbildung [-]
Pos.Nr.	Bezug auf eine Position / Zeichnung [-]
A	Fläche [m]
c	Spez. Wärme [kJ/kg*K]
C	Celsius [°]
D	Transmissionsgrad [%]
d	Durchmesser [m]
F	Kraft [N]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
G-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad [%]
h	Höhe [m]
J	Massenträgheitsmoment [kg * m ²]
K	Kelvin [K]
k-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient [%]
m	Masse [kg]
M	Moment [N/m]
N	Heizleistung [Watt]
n	Anzahl [-]
P	Leistung [kW]
p	Druck [bar]
Q	Übertragene Energie [J]
Ri	Gaskonstante [J/kg*K]
r	Radius [m]
T	Temperatur [K] oder [°C]
t	Zeit [s]
U	Innere Energie [J]
V	Volumen [dm ³]
W	Arbeit [Watt]

alpha, beta, gamma - Ausführungsformen des Stirlingmotors [-]

d	Dichte [kg/m ³]
h	Wirkungsgrad [%]
j	Kurbelwinkel [°]
k	Adiabatexponent [-]
e	Ausnutzungsgrad [%]
D()	Differenz einer Größe [-]

0.5 Prozesse

0.5.1 Kreisprozess

Der Kreisprozess²⁵ ist ein Prozess, bei dem ein System seinen Anfangspunkt wieder erreicht. Für solche Kreisprozesse lassen sich verschieden Wirkungsgrade angeben:

- *Thermischer Wirkungsgrad*: im idealen Prozess das Verhältnis von Nutzarbeit zur zugeführten Wärme
- *Exergetischer Wirkungsgrad*: im reversiblen (idealen) Kreisprozess das Verhältnis von Nutzarbeit und der Exergie²⁶ der zugeführten Wärme
- *Innerer Wirkungsgrad*: das Verhältnis der Arbeit des irreversiblen Prozesses zu der des idealisierten Kreisprozesses

²⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kreisprozess>

²⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Exergie>

- *Mechanischer Wirkungsgrad*: Verhältnis der Kupplungsarbeit zur inneren Arbeit des Kreisprozesses
- *Gesamtwirkungsgrad (oder auch Nutzwirkungsgrad genannt)*: das Verhältnis von Kupplungsarbeit zu zugeführter Wärme

Allgemeines zum Kreisprozess

Es ist üblich, dass man zunächst einmal Annahmen und Voraussetzungen definiert, auf die die nachfolgenden Erklärungen fußen werden:

- Der Stirlingprozess kann rechtsläufig (Uhrzeigersinn) oder linksläufig (entgegen dem Uhrzeigersinn) durchfahren werden.
 - rechtsläufig: Motor
 - linksläufig: Kältemaschine
 - gekoppelt: Wärmepumpe
- Der Motor wird konstant beheizt und konstant gekühlt.
- Bei jeder Umdrehung der Kurbelwelle wird immer die gleiche Nutzarbeit verrichtet. (Achtung: Dies bedeutet nicht, dass das Drehmoment als Funktion des Kurbelwinkels konstant ist!)
- Jede Umdrehung erfolgt in der gleichen Zeit wie die vorhergehende Umdrehung. (Achtung: Dies bedeutet nicht notwendigerweise, dass die Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle an allen Winkelpositionen konstant ist!)
- Im Motor befindet sich immer eine konstante Gasmasse. Leckverluste gibt es nicht. Diese konstante Gasmasse erfährt während einer Umdrehung in den verschiedenen Regionen des Motors unterschiedliche Zustandsänderungen. Jedoch herrscht bei einer bestimmten Kurbelwinkelstellung immer wieder der gleiche Zustand bezüglich der Druck- und Temperaturverteilung, wie er während der vorhergehenden Umdrehung bei dieser Kurbelwinkelstellung auch bestand. Diese Annahme ist die Definition für den thermodynamischen Kreisprozess. Anders ausgedrückt: Ein thermodynamischer Kreisprozess ist ein geschlossener Prozess, der periodisch wiederkehrend mit ein und derselben Arbeitsfluidmasse abläuft (Im Stirlingmotor ist dieses Arbeitsfluid ein Gas), bei dem man nur dafür sorgt, dass am Ende jeder Periode der Anfangszustand wieder erreicht wird. Das kann man erzielen, wenn die Zustandsänderungen in diesem Kreisprozess umkehrbar sind.

Arbeitsprozesse stellt man anschaulicherweise im P-V-Diagramm und T-S-Diagramm dar.

Auf diesen Prozess wurde der 1. Hauptsatz der Thermodynamik angewendet. Der Satz von der Erhaltung der Energie besagt für den Sonderfall der Ausdehnungsarbeit, auf die es beim Stirlingmotor ankommt.

0.5.2 Stirlingprozess

Dieser Prozess dient als Vergleichsprozess für Stirlingmaschinen und besteht aus 2 Isothermen und 2 Isochoren und wird üblicherweise mit dem PV- und TS-Diagramm dargestellt.

Stirling Kreisprozess

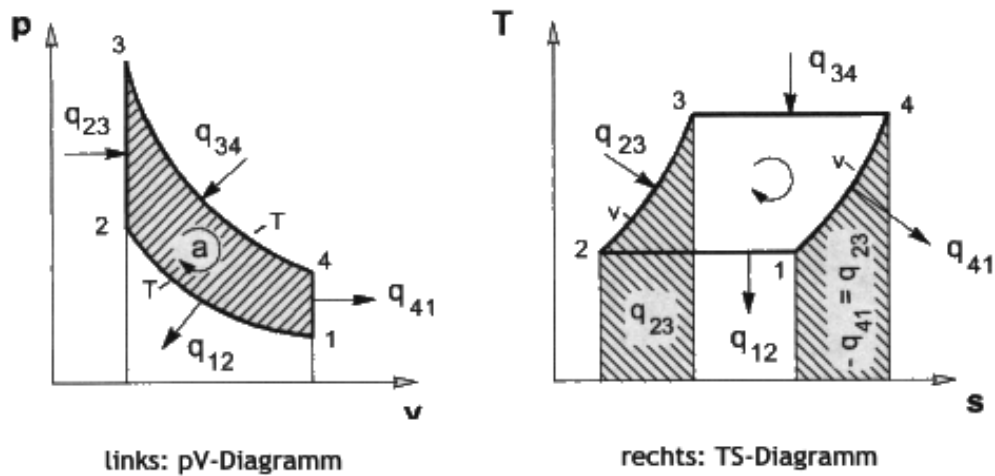


Abb. 10

Der Stirling-Kreisprozess wird verwirklicht durch eine Maschine mit zwei Kolben bestehend aus einem Verdränger- und Arbeitskolben. Das folgende Schema zeigt einen Stirlingmotor mit axialer Kolbenanordnung im Zylinder (Philips-Stirlingmotor).

Schema eines Stirlingmotors
mit axialer Anordnung der Kolben im Zylinder (Philips)

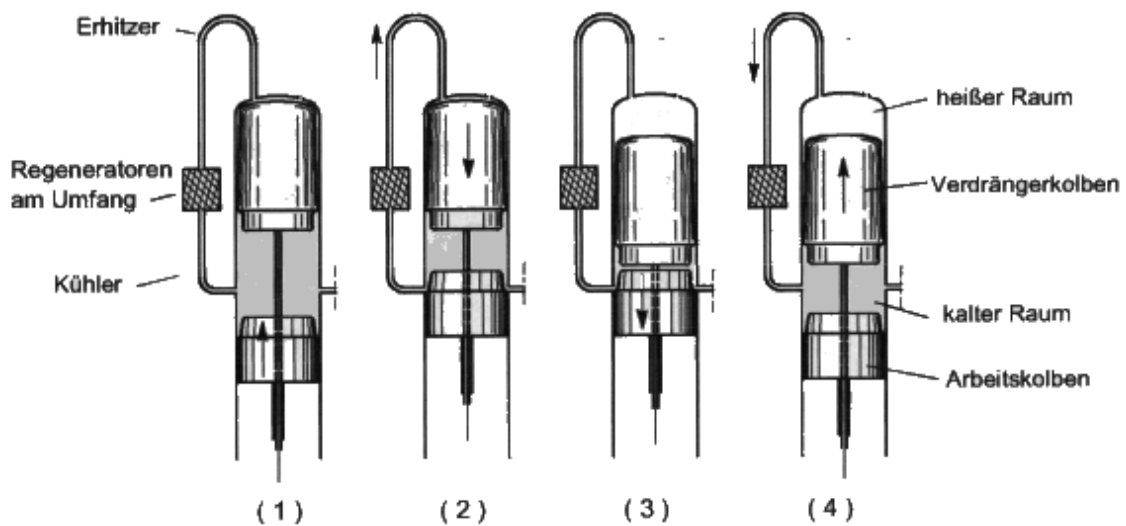


Bild zeigt die Kolbenstellung in den Diagrammeckpunkten des Vergleichsprozess

Abb. 11

Die mit (1,2,3,4) gekennzeichneten Kolbenstellungen sind die Diagrammeckpunkte des Stirling-Vergleichsprozesses im pV- und im Ts-Diagramm.

Stirlingprozess (ideal)

Der Idealprozess der Stirlingmaschine lässt sich durch vier Zustandsänderungen beschreiben und im folgenden pV-Diagramm darstellen.

Das Arbeitsmedium wird in einem Kreisprozess²⁷ aus zwei Isotherme²⁸n und zwei Isocho-
re²⁹n periodisch expandiert³⁰ und komprimiert³¹. Im pV-Diagramm³² ist die vom Graphen
umschlossene Fläche die von der Maschine im ideal Fall verrichtete Arbeit.

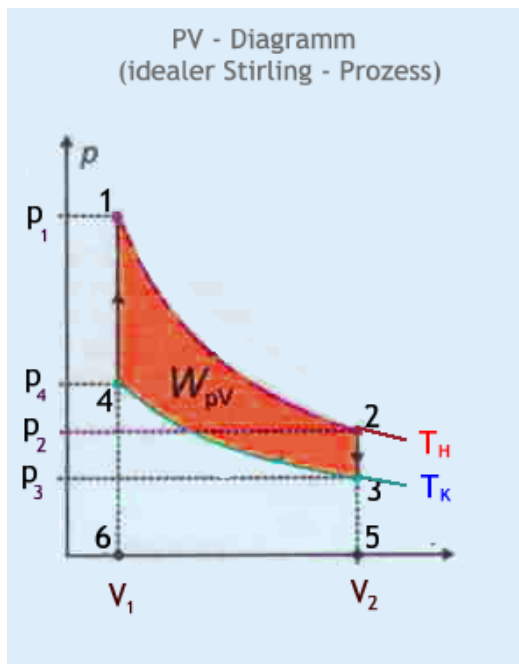


Abb. 12 pV-Diagramm Abb.4

Die folgenden Prozessbeschreibung ist nur gültig für den unaufgeladenen Stirlingmotor. Beim aufgeladenen Prozess pendeln die Drücke um einen Mitteldruck, der höher als der Atmosphärendruck ist.

In der nachfolgenden Abb. 5 ist der Prozessablauf I - IV näherungsweise dargestellt.

- I. Linie 1 --> 2: Isotherme³³ Expansion, $T_H = \text{konstant}$, bei der Wärme Q_{12} aufgenommen und Arbeit W_{12} abgegeben wird. (Dies bedeutet eine Zustandsänderung der eingeschlossenen Luft, bei der Wärme abgeführt wird, ohne dass sich die Temperatur

27 <http://de.wikibooks.org/wiki/Kreisprozess>

28 <http://de.wikibooks.org/wiki/Isotherme>

29 <http://de.wikibooks.org/wiki/Isochore>

30 <http://de.wikibooks.org/wiki/Expansion>

31 <http://de.wikibooks.org/wiki/Verdichtung>

32 <http://de.wikibooks.org/wiki/pV-Diagramm>

33 <http://de.wikibooks.org/wiki/Isotherme>

ändert. Das Luftvolumen wird dadurch kleiner, der äußere Luftdruck schiebt den Kolben in den Zylinder, der Druck im Zylinder steigt an.)

- II. Linie 2 --> 3: Isochore³⁴ Abkühlung. $V_2 = \text{konstant}$ bei der Wärme Q_{23} abgegeben wird. (Dies bedeutet, dass hier eine Zustandsänderung der eingeschlossenen Luft stattfindet, bei der das Volumen konstant bleibt, Druck und Temperatur werden größer und erreichen das Maximum, weil Wärme aus dem Regenerator an das Arbeitsgas übergeht.)
- III. Linie 3 --> 4: Isotherme³⁵ Kompression, $T_K = \text{konstant}$, bei der Wärme Q_{34} abgegeben und Arbeit W_{34} zugeführt. (Dies bedeutet eine Zustandsänderung der eingeschlossenen Luft, bei der Wärme zugeführt wird, ohne dass sich die Temperatur ändert.)
- IV. Linie 4 --> 1: Isochore Erwärmung, $V_1 = \text{konstant}$, bei der Wärme Q_{41} aufgenommen wird. (Dies bedeutet, dass hier eine Zustandsänderung der eingeschlossenen Luft stattfindet, bei der das Volumen konstant bleibt, Druck und Temperatur sinken ab und erreichen das Minimum, weil Wärme aus dem Arbeitsgas (eingeschlossene Luft) an den Regenerator übergeht.)

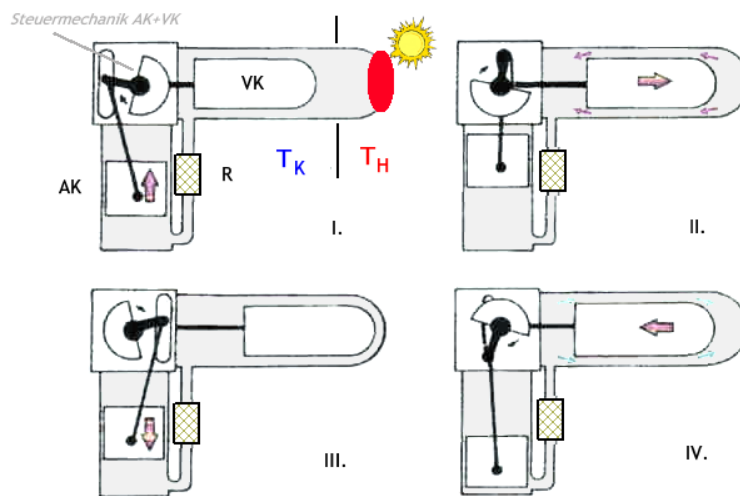


Abb. 5

Pedro Severa 5/2005

Abb. 13 Abb. 5 Prozessablauf

Zu den verwendeten Abkürzungen siehe *Begriffserklärung*.

Zusammenfassung

Warum kann der Stirling-Motor Arbeit abgeben?

Antwort in einem Satz: **Man braucht nur ein Wärmegefälle**

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

- T_h = oberste Temperatur

³⁴ <http://de.wikibooks.org/wiki/Isochore>

³⁵ <http://de.wikibooks.org/wiki/Isotherme>

- T_k = niedrigste Temperatur

In der Phase I. der isothermen Expansion bei der hohen Temperatur (T_H) nimmt der das Gas im geschlossenen Zylinder Wärme auf und wandelt sie vollständig in Arbeit um. Der Druck (p) des Gases erzeugt auf die Fläche (A) des Arbeitskolben (AK) eine Kraft ($F = p \cdot A$). Bewegt sich dieser Kolben um die Strecke (Δs) nach oben, so beträgt die dabei abgegebene Arbeit:

$$|W| = F \cdot \Delta s = p \cdot A \cdot \Delta s = p \cdot \Delta V$$

Im pV -Diagramm des idealen Stirlingprozesse (Abb. 4) erkennt man anschaulich als (rot) dargestellt die Fläche 1256 unter der Isothermen T_H wieder.

Während der Phase III. der isothermen Kompression bei niedriger Temperatur (T_K) muss weniger Arbeit zugeführt werden, die Fläche 4356 unter der Isothermen (T_K) ist kleiner. Bei einer Umdrehung des Motors ist daher die vom Kreislauf umschlossene Fläche 1234 gerade die Arbeit W_{pv} , die insgesamt abgegeben wird.

Je besser der Wirkungsgrad, um so größer ist die dargestellte Fläche, desto mehr Arbeit kann der Motor abgeben.

Stirlingprozess (real)

Der ideale Stirlingprozess ist, wie auch alle anderen idealen Kreisprozesse, nicht genau zu realisieren. Das nachstehende Diagramm (Abb. 5) zeigt mit der Fläche (*gelb*) die **reale Leistung**, die zur Nutzung verbleibt, im Vergleich zum vorstehenden idealen Prozess-Diagramm.

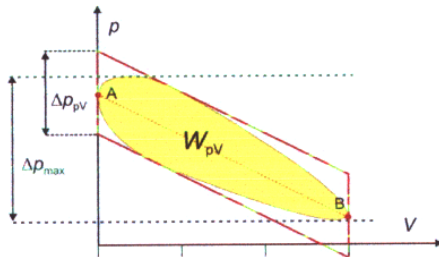


Abb. 14 pV -Diagramm Abb. 5

Die folgenden Auflistung der Gründe dafür ist gleichzeitig auch eine Einführung in die Problematik des Stirlingmotors.

Gründe für Wirkungsgradverluste

(Einige) Gründe, warum der reale Prozess vom idealen abweicht:

- *Dissipation durch mechanische Reibung*
- *Eine diskontinuierliche Kolbensteuerung ist nur begrenzt realisierbar.*

Um den Wirkungsgrad zu verbessern (der Prozess wird in den Ecken besser ausgefahren) und w:Totraum³⁶ so klein wie möglich zu halten, ist eine diskontinuierliche Kolbensteuerung sinnvoll. Der Nachteil ist höherer Verschleiß durch mechanische Belastung und die Geräuschentwicklung.

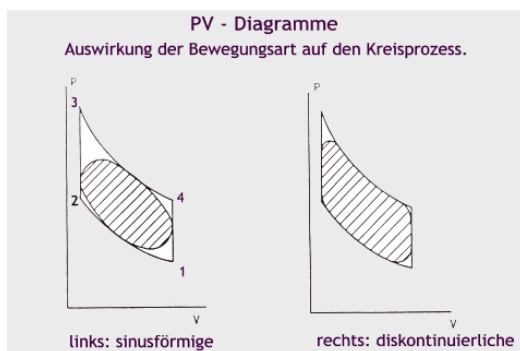


Abb. 15 pV-Diagr. Auswirkung der Bewegungsart

- *Gasgeschwindigkeit ist zu hoch*, dadurch werden isotherme Zustandsänderungen nur schlecht realisiert
- *Regeneratorwirkungsgrad von 100 % wird nicht erreicht*
- *Totraumeffekte*

Im Idealfall befindet sich das gesamte Arbeitsmedium (Gas) im Expansions- und Kompressionsraum. Selbst bei bis 1999 realisierten Motoren beträgt der Totraum noch ca. 30 bis 50 % des Gesamtvolumens. Meistens befinden sich in diesen Toträumen (auch Schadräumen genannt) die Wärmetauscheraggregate wie Erhitzer, Regeneratoren, Kühler. Dadurch geänderte Volumenverhältnisse bringen auch veränderte Druckverhältnisse mit sich, die sich sehr negativ auf den Gesamtwirkungsgrad auswirken.

- *Wärmeverlust durch das Material*

Dieser Wärmeverlust entsteht durch den Wärmestrom entlang des Zylinders nach außen in Richtung Temperaturgefälle.

- *Dissipation durch Arbeitsgas- und Druckverlust*
- *Adiabatikverluste*

Dieser Verlust tritt bei Stirlingmaschinen mit einer Nenndrehzahl von mehr als 200 U/min verstärkt auf. Die Kompression und Expansion laufen dabei so schnell ab, dass der Wärmefluss, die für eine Isothermie nötig wäre, nicht mehr Schritt halten kann. Ergebnis ist der Druckanstieg bei der Kompression bzw. ein steiler Druckabfall bei der Expansion.

³⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Totraum>

Simulation der Arbeitsweise

Die Web-Seite hinter den folgenden Links zeigt den Arbeitsablauf eines Stirlingmotors der Baureihe Alpha mit den dazugehörigen Diagrammen. Simulatorprogramm³⁷, alternativ auch bei Peter Fette Hier³⁸(Durch Anklicken der mittleren blauen Taste wird der Motor in Betrieb gesetzt.)

Das im Programmablauf dargestellte pV-Diagramm (unten links) zeigt auch den Unterschied von idealem und realen Kreisprozess. Die Abweichung durch Verluste (Totraum usw.) sind dort deutlich erkennbar.

0.5.3 Carnot-Prozess

Der Carnot-Prozess ist ein idealtypischer Kreisprozess, dem das Fluid in einer Wärmekraftmaschine folgen muss, um nach dem Durchlaufen des Prozesses den selben energetischen Zustand zu haben wie am Beginn des Prozesses. Der Prozess ist reversibel, d.h. die Richtung, in der der Prozess durchlaufen wird, ist umkehrbar. Der Carnot-Prozess ist ein wichtiger Grundprozess der Thermodynamik, er wird als "idealer theoretischer Vergleichsprozess" verwendet, um reale Prozesse zu untersuchen. *Mehr Details*³⁹

0.5.4 Sonstige Prozesse

Die nachstehenden Prozess zum Vergleich zum Stirlingprozess:

- Gleichdruckprozesse:
 - Dieselmotor⁴⁰
- Gleichraumprozesse:
 - Ottomotor⁴¹
- Sonstige Vergleichsprozesse:
 - Clausius-Rankine-Prozess, dient als Vergleichsprozess für Dampfmaschinen und besteht aus 2 Isotropen und 2 Isobaren.
 - Ericson-Prozess, dient als Vergleichsprozess für geschlossenen Gasturbinenanlagen, besteht aus 2 Isothermen und 2 Isobaren.
 - Seiliger-Prozess⁴², besteht aus 2 Isentropen, einer Isobaren und 2 Isochoren und dient als Vergleichsprozess für Verbrennungsmotoren.
 - Vuilleumier-Prozess für die Vuilleumier-Maschine und besteht aus einem geheizten rechtslaufenden (geheizter Zylinder) und einen linkslaufenden (kalter Zylinder) Kreisprozess. Werden die jeweiligen Zylinder nicht einzeln, sondern im Ganzen betrachtet, so heben sich die Integrale gegenseitig auf, das bedeutet, dass zum Betreiben dieser Maschine nur noch die mechanische Eigenreibung zu überwinden ist. (Anwendung findet die Maschine bei Wärmepumpen und Kältemaschinen).

37 <http://michael.abendschoen.bei.t-online.de/Stirlinga.html>

38 <http://www.stirling-fette.de/alphadia.htm>

39 <http://de.wikipedia.org/wiki/Carnot-Maschine>

40 <http://de.wikibooks.org/wiki/Dieselmotor>

41 <http://de.wikibooks.org/wiki/Ottomotor>

42 <http://de.wikibooks.org/wiki/Seiliger-Prozess>

0.5.5 Formeln

Thermischer Wirkungsgrad/Prozesswirkungsgrad

Der **thermische Wirkungsgrad** gibt das Verhältnis von der gewonnenen technischen Leistung⁴³ zum zugeführten Wärmestrom⁴⁴ in einer Wärmekraftmaschine⁴⁵ an:

$$\eta_{th} = \frac{-P_{th}}{\dot{Q}}$$

mit η_{th} als dem thermischen Wirkungsgrad, P_{th} der gewonnenen technischen Leistung und \dot{Q} dem zugeführten Wärmestrom.

Der thermische Wirkungsgrad wird als Bewertungsmaß für die Effektivität des Prozesses benutzt, daher wird er auch **Prozesswirkungsgrad** genannt.

Leistungsberechnung

Die Kolin-Formel beruht auf mathematischer Ableitung thermodynamischer Gesetze und gilt nur für unaufgeladene Maschinen im Niedertemperaturbereich. (siehe: Flachplatten-Stirlingmotor⁴⁶)

Für Maschinen, die einen Mitteldruck, der höher als der Atmosphärendruck ist, verwenden oder bei großen Temperaturbereichen wird die Wellenleistung meist jedoch nach der Beale⁴⁷-Zahl berechnet. Anmerkung: Um schnell und dennoch einigermaßen sicher die zu erwartende Wellenleistung zu erhalten, kann die Kolin-Formel verwendet werden. klk Formel nach Prof. Ivo Kolin:

$$N = \frac{V \cdot \Delta T^3}{2 \cdot 10^8}$$

N = Wellenleistung in kW
 V = kleinstes Arbeitsvolumen in dm³ oder Liter,
 wobei alle Toträume abgezogen werden sollten. V = Vzyylinder - vverdränger
 TΔ = Temperaturdifferenz in Kelvin⁴⁸ (TΔ = Tmax - Tmin)
 Tmax = maximal Temperatur (T3 im PV-Diagramm) in Kelvin
 Tmin = minimal Temperatur (T1 im PV-Diagramm) in Kelvin

Formel nach Beale-Zahl:

$$N = 0,015 \cdot f \cdot p_m \cdot V_o$$

43 <http://de.wikibooks.org/wiki/Leistung>

44 <http://de.wikibooks.org/wiki/W%C3%A4rmestrom>

45 <http://de.wikibooks.org/wiki/W%C3%A4rmekraftmaschine>

46 <http://de.wikibooks.org/wiki/Flachplatten-Stirlingmotor>

47 <http://de.wikibooks.org/wiki/Beale>

N = Wellenleistung in W
0,015 Beale-Konstante (empirisch, dimensionslos)
 f = Zahl der Arbeitsspiele je Sekunde
 p_m = Mitteldruck in bar
 V_0 = Volumen, welches vom Arbeitskolben durchfahren wird in cm^3

Beide vorgenannte Formeln dienen nur der Ermittlung der ungefähren Wellen-Leistung. Für genau Angabe sind Laborversuche unumgänglich.

0.6 Marktüberblick

Das Konzept der Stirlingmaschine - seit Anfang des letzten Jahrhunderts bekannt - wird heute wieder aufgegriffen und weiterentwickelt, da diese Maschine geringe Schadstoffemissionen und günstige Eigenschaften für dezentrale Energieversorgung aufweist. Stirlingmotoren können dazu beitragen, fossile Energieträger sehr sauber und rationell zu verwerten und verschiedene regenerative Energien zu nutzen.

Durch die im Vergleich zu Otto- und Dieselmotoren geschlossenen Arbeitsräume und die Energiezufuhr über einen Wärmetauscher sind sie unabhängig von Verbrennungsverfahren oder Brennstoffen. Es können kontinuierlich arbeitende Gas- oder Ölbrenner, aber auch konzentrierte Solarstrahlung oder - mit Einschränkungen - feste Brennstoffe als Energiequelle verwendet werden. Rückstände aus der Verbrennung können nicht in das Innere des Motors eindringen, was geringen Verschleiß bzw. Wartungsaufwand bedeutet.

Moderne Stirlingkonzepte sehen allgemein stationäre Aggregate vor, die über einen angekoppelten Generator Strom erzeugen.

0.6.1 Hersteller, Produkte, Forschung

Europa

- Firma Sunmachine, Nürnberg, Deutschland

Die Firma Sunmachine <http://www.sunmachine.de> entwickelt seit dem Jahr 2005 ein Blockheizkraftwerk, welches mit Holzpellets befeuert wird. Die Anlage soll private Hausheizungen ersetzen oder ergänzen. Durch die Verwendung einer speziellen Brennertechnik (Upside-Down) soll eine fast rückstandslose Verbrennung erreicht werden. Erste Prototypen des Stirlingmotors wurden von <http://www.ve-ingenieure.de> entwickelt.

Technische Daten
Stirlingmotor
Zylinderanzahl: 1
Zylindervolumen: 520 ccm
Drehzahlbereich: 500-1000 U/min
Arbeitsgas: Stickstoff
Arbeitsdruck: 33 bar
Motorwirkungsgrad: 33-36%
Einheit gesamt
Netzeinspeiseleistung: 1,5 - 3 kW

Thermische Leistung: 4,5 - 10,5 kW
 Wirkungsgrad elektrisch: 20-25%
 Gesamtwirkungsgrad: ca. 90%
 Vorlauftemperatur max.: 85° C
 Rücklauftemperatur optimal
 (für Brennwertbetrieb): 30° C
 Schallemissionen: 49-54 dB
 Gewicht: ca. 350 KG
 Maße LXBXH in mm: 800x1200x1500

- Firma SAARBERG, Saarbrücken

SAARBERG hat die Entwicklungen eingestellt. (August 1999)

Die ersten Berührungspunkte der Saarbergwerke AG mit der Stirling-Motortechnik ergaben sich durch die Übernahme der Firma Bomin Solar im Jahre 1990. Die Firma Ecker Maschinenbau GmbH & Co. KG wurde von den Saarbergwerken beauftragt, für Bomin 20 Stirling-Maschinen mit einer elektrischen Leistung von 3 kW zu optimieren. Der so genannte ST 20/1 erreichte 20 kW bei einem Wirkungsgrad von 36 %.

Nach der Auslieferung dieser Maschinen Anfang 1992 wurde eine Projektgruppe Stirling Saar gegründet, mit dem Ziel die Grenzbedingungen für den Stirling-Einsatz aufzuzeigen. Sie bestand aus den Stadtwerken Saarbrücken, der Vereinigten Saar-Elektrizitäts-AG, der Saarberg Fernwärme und der Ecker Maschinenbau. Schnell wurde klar, dass in verschiedenen Nischenanwendungen die Stirling-Maschine durchaus sinnvoll betrieben werden kann. Ziel war es, mit dem "natürlichen Grubengasvorkommen", der mehr oder weniger frei ausgasenden Kohlenbereiche, mit dem Primärenergieträger Grubengas den ST zu betreiben.

(Im Saarland ist das Aufkommen an Grubengas etwa gleichgroß der theoretisch nutzbaren Biogasmenge. Im Gegensatz zum Biogas sind jedoch das ausschöpfbare Potenzial und die Verfügbarkeit erheblich höher. Quelle: M. Kaltschmitt: *Energiegewinnung aus Biomasse im Kontext des deutschen Energiesystems*. Artikel in Zeitschrift: *Energieanwendung* S. 19-25; Nr. 1 Jan./Feb. 1995)

Nach Festlegung der Randparameter entschloss man sich zur Übernahme einer eigenen Lizenz für Großmaschinen bis 400 kW und meldete diese zum Europapatent an. Saarberg erhielt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung(BMBF) einen Forschungsauftrag zur Anpassung einer Stirling-Maschine mittlerer Leistung. Nach dem Konkurs der Firma Ecker übernahmen die Saarbergwerke das Forschungsvorhaben und das Ecker-Europapatent.

- Firma SOLO Stirling GmbH, Sindelfingen

SOLO beschäftigt sich seit 1990 mit der Stirling-Technologie. Erster Schritt auf diesem Gebiet war der Bau von 9-kW-Motoren in Solarausführung für die Versuchsanlage "Distal" (von Schlaich, Bergemann und Partner, SBP, Stuttgart). SBP vergab die Lizenz der bezüglich Lebensdauer und Zuverlässigkeit am höchsten entwickelten Stirlingmaschine SPS V 160 an SOLO und schloss einen Vertrag zur Nutzung mit SOLO.

Die solare Ausföhrung Dish-Stirlingmotor⁴⁹ wurde von der ursprünglich gasbeheizten Maschine abgeleitet. Die Anlage in Almeria ging 1991 in Betrieb und hat seitdem über 20.000 Betriebsstunden erfolgreich gelaufen. Sie markiert eine Spitzenstellung unter den solaren

⁴⁹ <http://de.wikibooks.org/wiki/Dish-Stirlingmotor>

Energietechniken. Um die Entwicklungs- und Forschungsarbeiten an Stirlingmotoren im Stuttgarter Raum zu koordinieren, wurde die "Arbeitsgemeinschaft Stirling" (AGS) gegründet, deren Partner DLR, SBP, SOLO und das ZSW sich auf die Weiterentwicklung des V-160-Konzeptes und marktfähige Anwendungen konzentrieren.

Die Entwicklung der V 160 begann in den 70er Jahren bei der USAB-Tochter SPS in Schweden. Dabei standen folgende Ziele im Vordergrund:

- einfacher, kostengünstiger Motor,
- hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit,
- geringer Wartungsaufwand,
- stationärer Einsatz.

Die V 160 markiert damit die höchste Entwicklungsreife für stationäre Einsatzfälle. Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Maschine haben ein hohes Niveau erreicht. Mit Wartung oder Verschleißteilaustausch ist erst zwischen 5.000 und 10.000 Laufstunden zu rechnen.

Mittlerweile wurde von SOLO der Stirlingmotor komplett überarbeitet, die "161" wird im Werk Sindelfingen gefertigt. Leistung und Wirkungsgrad konnten verbessert, Fertigungskosten gesenkt, die Zuverlässigkeit und Lebensdauer weiter stabilisiert werden. Erste Prototypen des "161" wurden ab Winter 1995 erprobt, inzwischen werden komplette BHKWs und Solarmaschinen gefertigt und in weiteren Langzeitversuchen getestet.

Sonstige Länder

USA

- USAB

Die Entwicklung der V 160 von SOLO begann in den 70er Jahren bei der USAB in den USA. Tochtergesellschaft SPS in Schweden.

Die Firma siedelte später nach Ann Arbor in den USA über und baute insgesamt 150 Einheiten und damit die höchste Stückzahl aller jemals gebauten Stirlingmotoren für Wärmepumpen und Generatorantrieb. Es wurden Langzeitversuche und erste Einsätze bei Kunden durchgeführt. Die akkumulierte Betriebszeit liegt zwischen 350.000 und 400.000 Stunden. Auf einzelnen Maschinen sind über 28.000 Betriebsstunden nachgewiesen.

- Sunpower Inc. Ohio

Freikolben-Stirling-Maschinen zur Computerkühlung.

0.7 Vorteile des Stirlingmotors

- Vielstofffähigkeit
- Schwingungsarmut
- Relativ hohe Wirkungsgrade erreichbar
- Wartungsfreundlichkeit
- Nutzung der Niedertemperatur

- zum Beispiel: Flachplatten-Stirlingmotor⁵⁰
- Geschlossenes System
 - Arbeitsgas bleibt immer in der Maschine, dadurch sehr leise (keine Auspuffgeräusche).
- Leistungsregelung in weiten Bereichen möglich
- Einsatz neuer Werkstoffe

0.8 Anwendungsgebiete

0.8.1 Kraft-Wärme-Kopplung

Stirlingmotoren als Antrieb in Blockheizkraftwerken weisen Vorteile auf, die gerade bei kleinen, dezentralen Anlagen zum Tragen kommen:

- Die Wartungsintervalle von Stirlingmotoren liegen mit 5.000 bis 10.000 Stunden sehr hoch, die Wartungskosten gerade bei kleinen Leistungen um 10 kW deutlich unter denen von Gas-Ottomotoren.
- Die Schadstoff-Emissionen von Stirling-Brennern heutiger Technologie können mindestens 10 Mal niedriger als bei Gas-Ottomotoren mit Katalysator liegen, sie entsprechen den Werten von modernen Gasbrennern.
- Durch die variable Leistungsabgabe ist eine optimale Anpassung an den Energiebedarf möglich.

Um diese Eigenschaften zu demonstrieren und weitere Betriebserfahrung zu gewinnen, führt SOLO zur Zeit eine Felderprobung mit insgesamt 20 Stirling-Heizkraft-Modulen durch, die den Motor 161, einen Asynchron-Generator, einen Wasser-Wärmetauscher und eine elektronische Regelung beinhalten. Dieses Vorhaben wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unterstützt. Es ist in zwei Phasen unterteilt, die zweite Phase begann im Sommer 1998.

Im Zeitraum 1995 bis 2000 liefen 16 Motoren im Erdgaseinsatz in Dauererprobung. Etwa 120.000 Betriebsstunden wurde akkumuliert, auf einzelnen Motoren über 24.000 Stunden. Weitere Erprobungen dauern noch an. Die Maschinen sind zwischenzeitlich nach DVGW zertifiziert, die Serienproduktion hat begonnen.

Zielgruppe: Energieversorger, Wohnbaugesellschaften, Kommunen und private Hausbesitzer
Bis Ende 2005 sind bereits rund 50 Maschinen bei Endkunden ausgeliefert und in Betrieb genommen worden.

0.8.2 Solarenergienutzung

⁵⁰ <http://de.wikibooks.org/wiki/Flachplatten-Stirlingmotor>



Abb. 16 10-kW-Anlage in Spanien

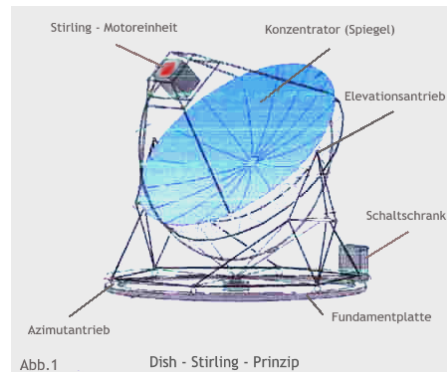


Abb. 17 Schema Dish-Anlage

Die Entwicklung der Dish-Stirling-Systeme geht unter Federführung von Schlaich, Bergermann und Partner weiter. Auf Grund von Betriebserfahrungen in Almeria, Spanien wurden neue Konzentratoren mit vollautomatischer Nachführung und verringerten Fertigungskosten konzipiert. Mitte 1997 wurden mit Unterstützung der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg drei weitere 10-kW-Dish-Stirling-Systeme mit SOLO Motoren in Almeria errichtet.

0.8.3 Nutzung fester Brennstoffe

Da Stirlingmotoren unabhängig von der Art der zugeführten Wärme arbeiten, ist auch die Verwendung von festen Brennstoffen wie Holz, C4-Pflanzen, Stroh etc. möglich. Die technische Umsetzung ist jedoch aufgrund der Ascheerweichung ab 1000 °C nicht einfach. In einem von der EU unterstützten Vorhaben wurde 1995 ein Stirlingmotor mit speziellem Erhitzer für den Betrieb in einer Wirbelschicht-Holzfeuerung (CIEMAT Spanien) getestet. Ein weiteres Vorhaben (Graz Österreich) arbeitet mit anderen Verbrennungskonzepten. Mit entsprechenden Anlagen sollen Energiepflanzen oder landwirtschaftliche und industrielle Abfälle dezentral als Strom- und Wärmequelle genutzt werden können, die Entwicklung ist aber noch nicht abgeschlossen.

0.9 Zukunft der Stirlingmaschine

Bei steigendem Umweltbewusstsein und weiterer Verteuerung des Rohöls bietet der Stirling-Motor in verschiedenen Einsatzbereichen Marktpotenzial:

- Heißgasmaschine als Stromlieferant
 - feste Brennstoffe, auch Abfallverwertung
 - flüssige und gasförmige Brennstoffe
- Nutzung regenerativer Energien aus primärer Biomasse
 - Abfallprodukte aus der Landwirtschaft, pflanzliche Reststoffe
 - Holzreste, Holzhackschnitzel, aufbereiteter Niederwald
- sekundäre Biomasse und Abfallgase
- Klärgase, Faulgase (Exkrement), Deponiegase
- Gicht- und Kokereigas, Grubengas

- Nutzung der direkten Sonnenenergie
- Kältemaschine als FCKW-freies Kühlaggregat

0.10 Neue Antriebsart

Einen mit Schall betriebenen (thermo-akustischen) Stirlingmotor haben die Physiker Scott Backhaus und Gregory Swift am Los Alamos National Laboratory in New Mexico 1999 entwickelt.

Wie bei einem üblichen Stirlingmotor wird auch hier Wärme in Bewegung umgewandelt. Ein thermisches Austauschelement, der Regenerator, erhitzt und kühlt ein Gas im Wechsel und zwingt es zu zyklischer Expansion und Kompression. Doch im Gegensatz zu herkömmlichen Maschinen treibt die Gasbewegung keinen schwingenden Kolben an, sondern generiert eine Schallwelle. Diese breitet sich innerhalb einer ringförmigen Röhre aus, wobei eine kleine Blende einen zirkulierenden Fluss verhindert. Mit 100 Hertz wird die Welle von dort aus in einen Resonator eingespeist und an dessen offenem Ende aufgefangen. Dadurch lassen sich zum Beispiel hochleistungsfähige Lautsprecher anregen oder zur Stromerzeugung Magnete in Spulen bewegen.

Wird umgekehrt die Schallwelle von außen zugeführt, kann deren kinetische Energie genutzt werden, um einem Medium Wärme zu entziehen. So eignen sich nun auch, neben den bereits bekannten Energiequellen, akustische Wellen dazu, Klimaanlage und Kühlschränke zu betreiben, die keine umweltschädlichen Treibgase wie FCKW⁵¹ benötigen, sondern auf der Basis von Helium⁵² funktionieren. Quelle: [99] Übersetzung aus spanischer Veröffentlichung 2001, Pedro Servera

0.11 Modellmotoren

0.11.1 Versuchsmotoren

- ST05G ("Viebachmotor")

Der ST05G ist ein 500 Watt Experimentalmotor für Micro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Er wurde 1992 von Dieter Viebach entwickelt und in Form von Bauanleitungen und Gussteilesätzen vertrieben. In der Folgezeit entstanden an Universitäten, Berufsschulen aber auch bei interessierten Laien zahlreiche Motoren dieser Bauart. Viebach sorgte seit Beginn des Projektes durch Rundbriefe für Austausch und Vernetzung aller Aktiven, so daß der Motor zahlreiche Weiterentwicklungen erfuhr. Jüngster Ableger ist der ST05G-CNC http://ve-ingenieure.de/projekt_st05g_cnc.html. Die Zusammenstellungszeichnung des ST05G steht heute unter einer Creative Commons-Lizenz (CC-BY-NC-SA) zum Download zur Verfügung.

51 <http://de.wikibooks.org/wiki/FCKW>

52 <http://de.wikibooks.org/wiki/Helium>



Abb. 18 Motor ST05G (Viebach)



Abb. 19 ST05 (geänderter Erhitzerkopf)

0.12 Datenbanken

0.12.1 Motorendaten

Technische Daten verschiedener Motoren

Typ	Stirlingmotor 161 von SOLO	Viebachmotor ST05G	Sunmachine
Arbeitsweise	einfachwirkende 90°-V-2-Maschine	Gamma-Motor in 90°V-Anordnung	Alpha-Motor in 90°V-Anordnung
Arbeitsvolumen	160 ccm	425 ccm	520 ccm
Wellenleistung	3-10 kW bei 1500 1/min	500 W bei 500 1/min	3 kW el. bei 1000 1/min
Motorwirkungs- grad	30 % inkl. Bren- ner	ca. 22 %	ca. 25 %
Generatorwir- kungsgrad	92 %	-	ca. 80% inkl. Um- richter
Erhitzertempera- tur	650 °C	650 °C	750 °C
Kühlwassertem- peratur	50 - 60 °C	20 - 75 °C	30 - 75 °C
Arbeitsgas	Helium	Luft/Stickstoff	Stickstoff
Mittlerer Arbeits- druck	30 - 150 bar	10 bar	30 bar
Leistungsregelung	Druckregelung	-	Drehzahlregelung
Regelart	elektronisch	-	elektronisch
Startvorgang	vollautomatisch über Programm	Anwendungsspe- zifisch	vollautomatisch über Programm

Technische Daten verschiedener Motoren

Motorkontrolle	diverse Kontrollen im Programm	Anwendungsspe- zifisch	diverse Kontrollen im Programm
Serviceintervall	5.000 - 10.000 Stunden	1000 Stunden	1x jährlich
Elektrische Daten	400 V, 50 Hz, 9 kWe	Anwendungsspe- zifisch	1-phasig 230 Volt 50 Hz, Netzanbin- dung über Um- richter

0.12.2 Computerprogramme

- STMOT2⁵³ - Computerprogramm zur Berechnung des Wärmekraftprozesses und der Dynamik von α -Typ-Stirlingmotoren

0.13 Literaturhinweise

- Allgemein:
 - Walter Kufner: *Stirlingmaschinen einfacher Bauart*. Hergensweiler, Ausgabe 1995
 - La Universidad de Zaragoza, Thermodynamik, Physik, 2003
- Technik:
 - Peter Fette: *Stirlingmotor Forschung und Programmentwicklung zur Berechnung des Wärmekraftprozesses und der Dynamik von (Alpha-Typ) Stirlingmotoren*. April 2005 <http://www.stirling-fette.de>
 - *Solar thermal electricity generation: Lectures from the summer school at the Plataforma Solar de Almería*. Mallorca: Colección Documentos Pedro Servera.
 - W. Schiel, D. Laing: *Survey on Solar-Electric*. 10th ISEC Osnabrück, ISBN 3-931384-38-1
 - F. Schmelz: *Die Leistungsformel des Stirlingmotors*. Polygon-Verlag, ISBN 3-928671-3
 - Martin Werdich, Kuno Kübler: "Stirling-Maschinen". Ökobuch Verlag, ISBN 3-922964-966
 - Frank Schleder: "Stirlingmotoren". Vogel Verlag ISBN: 3-802319907
 - Dieter Viebach: "Der Stirlingmotor einfach erklärt und leicht gebaut" ökobuch-Verlag, ISBN 978-3-936896-31-2 (8. verbesserte Auflage 2009) Einführung in die Stirlingmotor Technologie, ein 0,5 kW Experimentalmotor vorgestellt, Baupläne für 3 Modelle ohne Dreh- und Fräsarbeiten für Schüler und Azubis.
- Geschichte:
 - Matschoss, Conrad: *Geschichte der Maschinenfabrik Nürnberg*. In: Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie, Band 5, 1913, S. 262
 - Matschoss, Conrad: *Grosse Ingenieure*. J. F. Lehmanns Verlag, München 1954
 - N. N.: *Inventarkarte 513 des Verkehrsmuseums (?)*. Nürnberg, letzter Eintrag 1971
 - Kugler: *Rückblick auf die Entwicklung des Dampfkesselbaues bei der Maschinenfabrik Nürnberg*. Nürnberg, 1913

53 <http://www.stirling-fette.de/program.htm#HG>

- N. N.: *Akten der Königlich-Bayrischen Staatskanzlei (heute: Bayrisches Hauptstaatsarchiv)*. München 1825 - 1877

0.14 Weblinks

- Einführung: Wie arbeitet ein Stirlingmotor überhaupt?⁵⁴ - P. Fette
- Berechnung des Wärmekraftprozesses und der Dynamik von (Alpha-Typ)-Stirlingmotoren⁵⁵ - P. Fette

0.15 Quellen

- [1] Dipl.-Ing. FH Walter Kufner, Hergensweiler <http://www.kufner-stirling.de>
- [2] Peter Fette Stirlingmotor Forschung und Programmentwicklung <http://www.stirling-fette.de>
- [3] Ivo Kolvin, Stirling Motoren, UNI Zagreb
- [4] HpS-solar, Messtechnische Geräte, Wangen
- [5] Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborn, Solo Motoren, Heidelberg
- [99] Eigenes Archiv des Verfassers

(Alle vorgenannten Quellen haben ihr Einverständnis zur Veröffentlichung erteilt.)

Kategorie: Buch⁵⁶

54 <http://www.stirling-fette.de/howdo.htm>

55 <http://www.stirling-fette.de/inhaltb.htm>

56 <http://de.wikibooks.org/wiki/Kategorie%3ABuch>

1 Autoren

Edits	User
1	Dirk Huenniger ¹
1	Juetho ²
4	Klaus Eifert ³
8	MichaelFrey ⁴
1	NeuerNutzer2009 ⁵
1	Philipendula ⁶
2	ThePacker ⁷

¹ http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:Dirk_Huenniger
² <http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:Juetho>
³ http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:Klaus_Eifert
⁴ <http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:MichaelFrey>
⁵ <http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:NeuerNutzer2009>
⁶ <http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:Philipendula>
⁷ <http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer:ThePacker>

Abbildungsverzeichnis

- GFDL: Gnu Free Documentation License. <http://www.gnu.org/licenses/fdl.html>
- cc-by-sa-3.0: Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>
- cc-by-sa-2.5: Creative Commons Attribution ShareAlike 2.5 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>
- cc-by-sa-2.0: Creative Commons Attribution ShareAlike 2.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>
- cc-by-sa-1.0: Creative Commons Attribution ShareAlike 1.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/>
- cc-by-2.0: Creative Commons Attribution 2.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>
- cc-by-2.0: Creative Commons Attribution 2.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>
- cc-by-2.5: Creative Commons Attribution 2.5 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/deed.en>
- cc-by-3.0: Creative Commons Attribution 3.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.en>
- GPL: GNU General Public License. <http://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.txt>
- LGPL: GNU Lesser General Public License. <http://www.gnu.org/licenses/lgpl.html>
- PD: This image is in the public domain.
- ATTR: The copyright holder of this file allows anyone to use it for any purpose, provided that the copyright holder is properly attributed. Redistribution, derivative work, commercial use, and all other use is permitted.
- EURO: This is the common (reverse) face of a euro coin. The copyright on the design of the common face of the euro coins belongs to the European Commission. Authorised is reproduction in a format without relief (drawings, paintings, films) provided they are not detrimental to the image of the euro.
- LFK: Lizenz Freie Kunst. <http://artlibre.org/licence/lal/de>
- CFR: Copyright free use.

- EPL: Eclipse Public License. <http://www.eclipse.org/org/documents/epl-v10.php>

Copies of the GPL, the LGPL as well as a GFDL are included in chapter Licenses⁸. Please note that images in the public domain do not require attribution. You may click on the image numbers in the following table to open the webpage of the images in your webbrowser.

1	Daniel B, Pedro Servera, Túrelío	
2	Bdk, Pedro Servera, Túrelío	
3	Bdk, Original uploader was Tmennink ⁹ at nl.wikipedia ¹⁰	GFDL
4	Bdk, Original uploader was Tmennink ¹¹ at nl.wikipedia ¹²	GFDL
5	Bdk	
6	Bdk	
7	Bdk	
8	Bdk	
9	Bdk	
10	Bdk	
11	Bdk	
12	Bdk	
13	Bdk	
14	Bdk	
15	Bdk	
16	Bdk	
17	Bdk	
18	Bdk	
19	Bdk	

9 <http://nl.wikipedia.org/wiki/User:Tmennink>

10 <http://nl.wikipedia.org>

11 <http://nl.wikipedia.org/wiki/User:Tmennink>

12 <http://nl.wikipedia.org>

2.3 GNU Lesser General Public License

GNU LESSER GENERAL PUBLIC LICENSE

Version 3, 29 June 2007

Copyright © 2007 Free Software Foundation, Inc. <<http://fsf.org/>>

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.

This version of the GNU Lesser General Public License incorporates the terms and conditions of version 3 of the GNU General Public License, supplemented by the additional permissions listed below. 0. Additional Definitions.

As used herein, “this License” refers to version 3 of the GNU Lesser General Public License, and the “GNU GPL” refers to version 3 of the GNU General Public License.

“The Library” refers to a covered work governed by this License, other than an Application or a Combined Work as defined below.

An “Application” is any work that makes use of an interface provided by the Library, but which is not otherwise based on the Library. Defining a subclass of a class defined by the Library is deemed a mode of using an interface provided by the Library.

A “Combined Work” is a work produced by combining or linking an Application with the Library. The particular version of the Library with which the Combined Work was made is also called the “Linked Version”.

The “Minimal Corresponding Source” for a Combined Work means the Corresponding Source for the Combined Work, excluding any source code for portions of the Combined Work that, considered in isolation, are based on the Application, and not on the Linked Version.

The “Corresponding Application Code” for a Combined Work means the object code and/or source code for the Application, including any data and utility programs needed for reproducing the Combined Work from the Application, but excluding the System Libraries of the Combined Work. 1. Exception to Section 3 of the GNU GPL.

You may convey a covered work under sections 3 and 4 of this License without being bound by section 3 of the GNU GPL. 2. Conveying Modified Versions.

If you modify a copy of the Library, and, in your modifications, a facility refers to a function or data to be supplied by an Application that uses the facility (other than as an argument passed when the facility is invoked), then you may convey a copy of the modified version:

* a) under this License, provided that you make a good faith effort to ensure that, in the event an Application does not supply the function or data, the facility still operates, and performs whatever part of its purpose remains meaningful, or * b) under the GNU GPL, with none of the additional permissions of this License applicable to that copy.

3. Object Code Incorporating Material from Library Header Files.

The object code form of an Application may incorporate material from a header file that is part of the Library. You may convey such object code under terms of your choice, provided that, if the incorporated material is not limited to numerical parameters, data structure layouts and accessors, or small macros, inline functions and templates (ten or fewer lines in length), you do both of the following:

* a) Give prominent notice with each copy of the object code that the Library is used in it and that the Library and its use are covered by this License. * b) Accompany the object code with a copy of the GNU GPL and this license document.

4. Combined Works.

You may convey a Combined Work under terms of your choice that, taken together, effectively do not restrict modification of the portions of the Library contained in the Combined Work and reverse engineering for debugging such modifications, if you also do each of the following:

* a) Give prominent notice with each copy of the Combined Work that the Library is used in it and that the Library and its use are covered by this License. * b) Accompany the Combined Work with a copy of the GNU GPL and this license document. * c) For a Combined Work that displays copyright notices during execution, include the copyright notice for the Library among these notices, as well as a reference directing the user to the copies of the GNU GPL and this license document. * d) Do one of the following: o 0) Convey the Minimal Corresponding Source under the terms of this License, and the Corresponding Application Code in a form suitable for, and under terms that permit, the user to recombine or relink the Application with a modified version of the Linked Version to produce a modified Combined Work, in the manner specified by section 6 of the GNU GPL for conveying Corresponding Source. o 1) Use a suitable shared library mechanism for linking with the Library. A suitable mechanism is one that (a) uses at run time a copy of the Library already present on the user's computer system, and (b) will operate properly with a modified version of the Library that is interface-compatible with the Linked Version. * e) Provide Installation Information, but only if you would otherwise be required to provide such information under section 6 of the GNU GPL, and only to the extent that such information is necessary to install and execute a modified version of the Combined Work produced by recombining or relinking the Application with a modified version of the Linked Version. (If you use option 4d0, the Installation Information must accompany the Minimal Corresponding Source and Corresponding Application Code. If you use option 4d1, you must provide the Installation Information in the manner specified by section 6 of the GNU GPL for conveying Corresponding Source.)

5. Combined Libraries.

You may place library facilities that are a work based on the Library side by side in a single library together with other library facilities that are not Applications and are not covered by this License, and convey such a combined library under terms of your choice, if you do both of the following:

* a) Accompany the combined library with a copy of the same work based on the Library, uncombined with any other library facilities, conveyed under the terms of this License. * b) Give prominent notice with the combined library that part of it is a work based on the Library, and explaining where to find the accompanying uncombined form of the same work.

6. Revised Versions of the GNU Lesser General Public License.

The Free Software Foundation may publish revised and/or new versions of the GNU Lesser General Public License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns.

Each version is given a distinguishing version number. If the Library as you received it specifies that a certain numbered version of the GNU Lesser General Public License “or any later version” applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that published version or of any later version published by the Free Software Foundation. If the Library as you received it does not specify a version number of the GNU Lesser General Public License, you may choose any version of the GNU Lesser General Public License ever published by the Free Software Foundation.

If the Library as you received it specifies that a proxy can decide whether future versions of the GNU Lesser General Public License shall apply, that proxy's public statement of acceptance of any version is permanent authorization for you to choose that version for the Library.