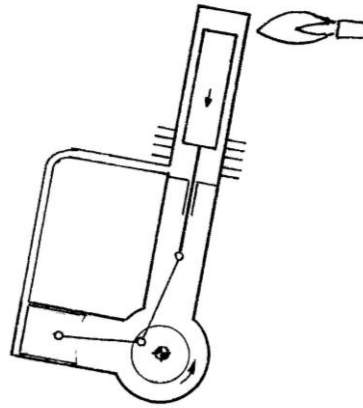
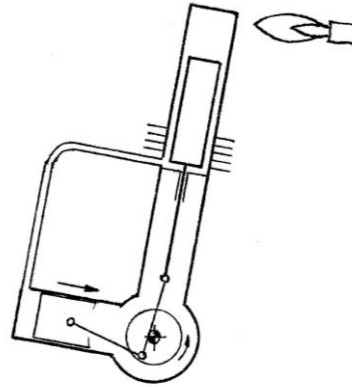


Funktionsweise eines langsam laufenden Stirlingmotors

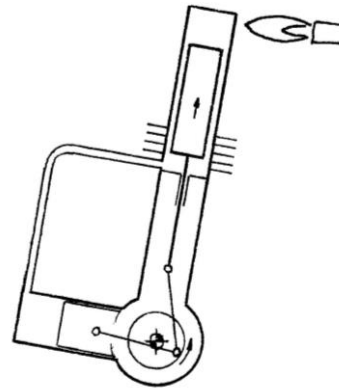
- 1) (zwischen a und b)
Der Verdrängerkolben bewegt sich nach unten. An ihm vorbei strömt die Luft in den heißen Teil, erwärmt sich dabei und erzeugt einen höheren Druck als im Getriebe.



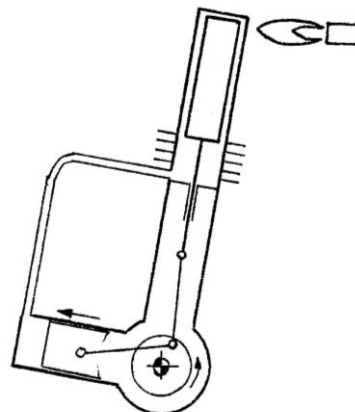
- 2) (zwischen b und c)
Der erhöhte Druck pflanzt sich im Kaltteil und im Überströmrohr fort und drückt den Arbeitskolben nach rechts: Die Pleuelstange wird ein erstes Mal angetrieben. Dabei sinkt der Druck auf das Niveau des Getriebedrucks.



- 3) (zwischen c und d)
Der Verdrängerkolben bewegt sich nach oben. Die heiße Luft gelangt in den kalten Teil, wobei sie sich abkühlt und ein Unterdruck gegenüber dem Getriebe erzeugt wird.



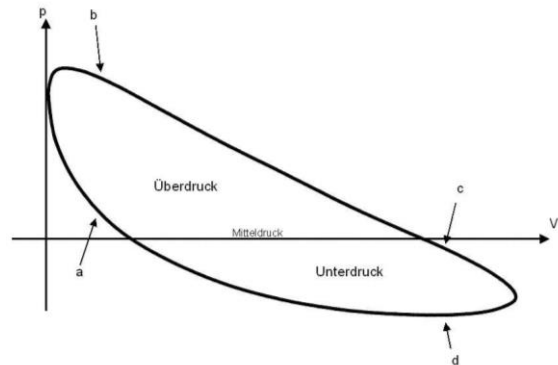
- 4) (zwischen d und a)
Der Unterdruck pflanzt sich im Überströmrohr fort und saugt den Arbeitskolben nach links: Die Pleuelstange wird ein zweites Mal angetrieben. Dabei erhöht sich der Druck wieder auf das Niveau des Getriebedrucks.



Ein langsam laufender Stirlingmotor besitzt also innerhalb einer Kurbelumdrehung einen Drucktakt (b nach c) und einen Saugtakt (d nach a). Beide Takte besitzen ein positives Drehmoment. Lediglich kurz vor den Totpunkten wird das Schwungrad benötigt.

Wer mit physikalischen Begriffen und dem pV-Diagramm etwas anfangen kann, dem sei gesagt, dass die oben aufgeführten 4 Phasen folgende Fach-Bezeichnungen tragen:

- 1) Isochore Kompression (zwischen a und b)
- 2) Isotherme Expansion (zwischen b und c)
- 3) Isochore Expansion (zwischen c und d)
- und
- 4) Isotherme Kompression (zwischen d und a)



Das ist allerdings nur die halbe Wahrheit, denn die vier Phasen oben gelten wie gesagt nur für langsam laufende Stirlingmotoren, und heutige Stirlingmotoren laufen alles andere als langsam.

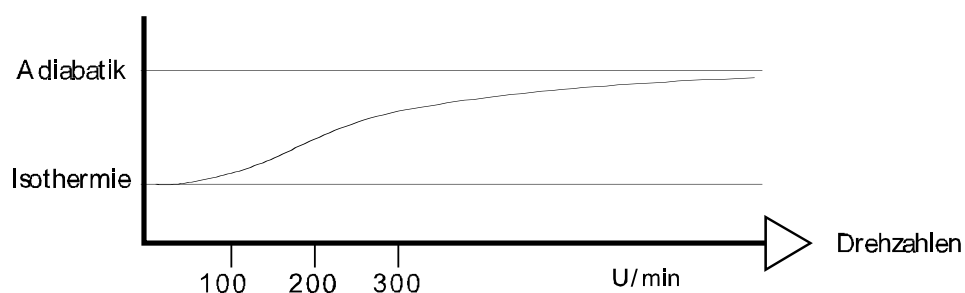
Nur, was heißt langsam? Um diese Frage zu klären, müssen wir etwas tiefer in die Thermodynamik eintauchen.

Isotherme Kompression heißt, dass das tiefe Temperaturniveau des Gases durch eine Kühlung des Kompressionszylinders aufrecht gehalten wird, und zwar über die gesamte Dauer der Kompression hinweg.

Isotherme Expansion heißt, dass das hohe Temperaturniveau des Gases durch eine Erhitzung des Expansionszylinders aufrecht gehalten wird, und zwar über die gesamte Dauer der Expansion hinweg.

Die Frage ist, wie schnell kann ein Gas im Inneren eines Zylinders von außen nachgekühlt bzw. nachgewärmt werden? Tests haben ergeben, dass dies bereits bei 60 Umdrehungen pro Minuten nicht mehr ganz der Fall ist, wenn von einem Liter auf 0,5 Liter komprimiert wird. Bei kleineren Motoren, die von 100 cm³ auf 50 cm³ komprimieren, liegt dieser Punkt bei 100 Umdrehungen pro Minute.

Komprimiert bzw. expandiert man schneller, so muss man eine Temperaturveränderung in Kauf nehmen, die das pV-Diagramm völlig verändern. Ab ca. 400 Umdrehungen pro Minute kann man deutlich von adiabatischen Zustandsänderungen sprechen.



Bereits die Stirlingmotoren des 19. Jahrhunderts liefen in dem Mischbereich. Seit 1937, als Philipps damit begann, die Motoren aufzuladen, gibt es keine Leistungs-Stirlingmotoren mehr mit Drehzahlen unter 600.

Angesichts dieser Tatsache ist es ein Witz, dass im Physikstudium und in der Fachliteratur der Stirling-Kreisprozess immer noch mit zwei isothermen Zustandsänderungen dargestellt wird.

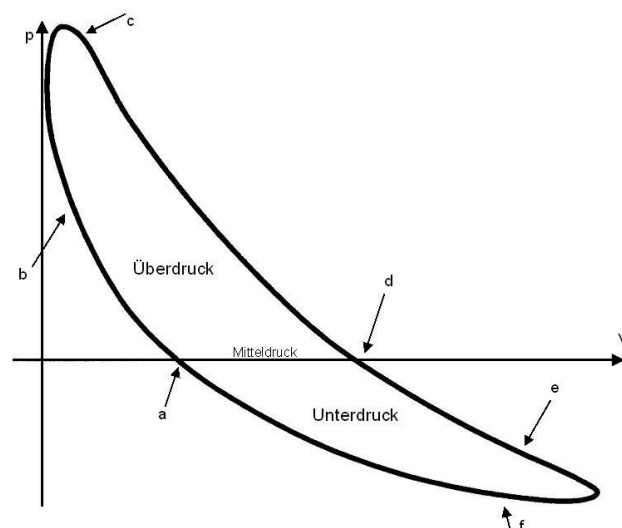
Man könnte über die Affäre mit einem lächelnden Auge hinwegsehen, wenn es da nicht einen sehr ernsten Aspekt gäbe. Schaut man sich das neue pV-Diagramm mit den Adiabaten genauer an (siehe unten), dann fällt auf, dass die Druckspitze auf der Überdruckseite fast doppelt so hoch ist. Dies bedeutet dann im Mittel, dass die Lagerstellen ca. 60% stärker belastet werden. Jede Mehrbelastung um 10% bewirkt aber bereits eine Lebensdauer-Reduktion um 27%. Bei der Mehrbelastung von 60% bleiben nur noch 20% der Lebensdauer übrig! Wehe, jemand legt seine Lager nach dem oberen und nicht nach dem unteren pV-Diagramm aus, dessen Firma bzw. Heißgasmotor-Projekt wird scheitern! Aus diesem Grund ist es dringend notwendig, das pV-Diagramm mit Adiabaten in die Stirling-Fachwelt einzuführen.

Sinnvoll und zweckmäßig scheint es mir dabei, die beiden Adiabaten jeweils noch einmal zu teilen, so dass unser neues pV-Diagramm sechs statt vier Phasen hat. Die Teilung ergibt sich durch den Mitteldruck im Gehäuse. Während bei langsam laufenden Stirlingmotoren die pV-Kurve bei Punkt b und d gleichzeitig auch durch den Mitteldruck geht, fangen bei modernen Stirlingmotoren die isochoren Zustandsänderungen erst deutlich später an. Die adiabaten Zustandsänderung davor rufen ein negatives Drehmoment hervor. Sie bilden im unten abgebildeten pV-Diagramm die Strecken zwischen Punkt a und b und zwischen d und e.

Man nimmt diese negativen Drehmomente bei modernen Stirlingmaschinen in Kauf, weil der Zugewinn an Leistung einfach überwältigend ist. Die hohen Drehzahlen machen diese Leistung möglich, und mit ihnen sehr gute Leistungsgewichte. Das bedeutet, dass die Motoren plötzlich kompakt werden, keine riesigen Gestelle mehr darstellen. Aus den zum Teil hausgroßen Motoren des 19. Jahrhunderts sind handliche Aggregate geworden – ein großer Fortschritt!

Die 6 Phasen eines modernen Stirlingmotors

- 1) Adiabate Kompression (zwischen a und b) [negatives Drehmoment]
- 2) Isochore Kompression (zwischen b und c) [schwaches negatives Drehmoment]
- 3) Adiabate Expansion (zwischen c und d) [positives Drehmoment]
- 4) Adiabate Expansion (zwischen d und e) [negatives Drehmoment]
- 5) Isochore Expansion (zwischen e und f) [schwaches negatives Drehmoment]
- 6) Adiabate Kompression (zwischen f und a) [positives Drehmoment !]



Funktionsweise eines modernen Stirlingmotors

- 1) (zwischen a und b)
Vom Schwungrad angetrieben komprimiert der Arbeitskolben das Arbeitsgas. Dabei wird Wärme frei, die nicht weggekühlt werden kann, wodurch der Druck zusätzlich steigt. Zu Beginn dieser Phase waren Arbeitsgas-Druck und Getriebedruck gleich, am Ende liegt der Arbeitsgas-Druck ca. 40% höher als der Mitteldruck im Getriebe.
- 2) (zwischen b und c)
Der Verdrängerkolben wird durch sein Kurbeltriebwerk nach unten bewegt. An ihm vorbei strömt das Arbeitsgas in den heißen Teil, erwärmt sich dabei und erzeugt einen noch höheren Druck, der nun bei ca. 80% über dem Mitteldruck liegt. Diese Druckerhöhung pflanzt sich auch durch das Überströmrohr in den Arbeitszylinder fort.
- 3) (zwischen c und d)
Der Arbeitskolben wird durch den Überdruck in Richtung Getriebe gedrückt und treibt die Kurbel an. Dabei verliert das Arbeitsgas seinen hohen Druck und kühlt merklich ab. Da es nicht schnell genug nachgewärmt werden kann, senkt die Abkühlung im weiteren Verlauf den Druck zusätzlich. Schließlich wird der Mitteldruck erreicht.

