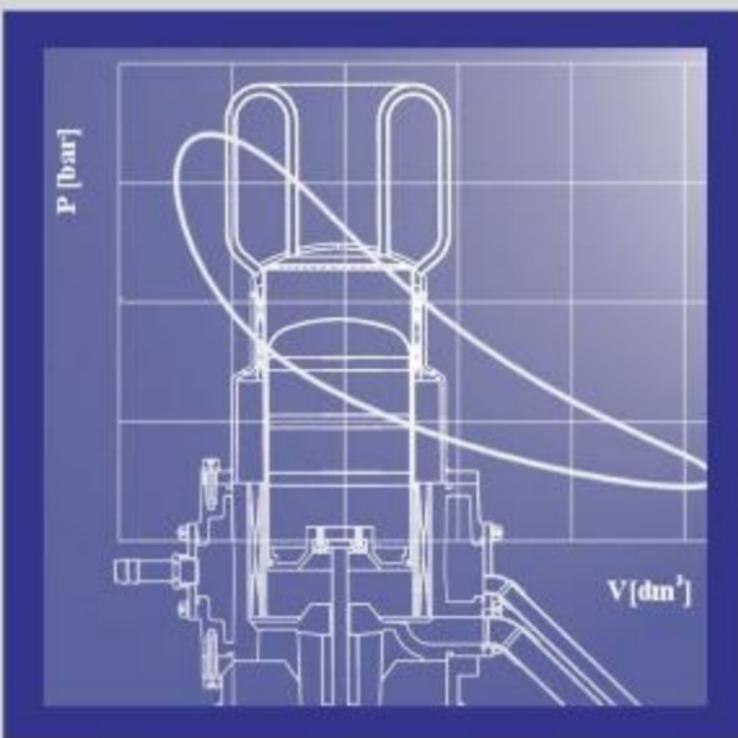


Frank Schleder

Stirlingmotoren

Thermodynamische Grundlagen,
Kreisprozessrechnung und
Niedertemperatur- und Freikolbenmotoren



Frank Schleder
Stirlingmotoren

Dipl.-Ing. (FH) Frank Schleder

Stirlingmotoren

Thermodynamische Grundlagen

Kreisprozessrechnung

Niedertemperatur- und Freikolbenmotoren

4., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Vogel Buchverlag

Dipl.-Ing. (FH) **FRANK SCHLEDER**
Jahrgang 1969

- Berufsausbildung zum Radio- und Fernsehtechniker,
- Fachabitur,
- Studium der Elektrotechnik mit Schwerpunkt Energietechnik,
- Teilnahme an dem europäischen Weiterbildungsstudium ARENEE: “Ökologischer und ökonomischer Energieeinsatz“,
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Trier,
- Leitung und Bearbeitung eines Forschungsprojekts zu Niedertemperatur-Stirlingmotoren an der Fachhochschule Trier,
- Selbstständige Tätigkeit in Beratung und Entwicklung in den Bereichen Maschinenbau und erneuerbare Energien
- Anstellung bei einem Energieversorger für den Bereich Kraft-Wärme-Kopplung und Erneuerbare Energien

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3195-3
4. Auflage. 2011

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2002 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Umschlaggrafik: Schnittzeichnung des Stirlingmotors ST 05 G aus dem Zeichnungssatz – Der Stirlingmotor ST 05 G, Gammatyp 0,3–0,5 kW, 3. überarbeitete Ausgabe von Dieter Viebach – mit freundlicher Genehmigung entnommen.

Satz: Reproduktionsfertige Vorlagen des Autors

Vorwort

*„Einfachheit verlangt
nach japanischer Auffassung
sehr viel Arbeit.
Kompliziert sein ist einfach.“*
[CARLOS GHOSN, Nissan-Chef]

Der Stirlingmotor ist eine der ältesten Wärmekraftmaschinen – er wurde vor Otto- und Dieselmotor erfunden – und er erlebt, nachdem er fast in Vergessenheit geraten war, heute eine Renaissance. Seine besonderen Eigenschaften machen ihn zu einer wichtigen Maschine für die Nutzung regenerativer Energien und für die Realisierung von Kraft-Wärme-Kopplung im Bereich kleiner Leistungseinheiten. Er kann so einen Beitrag zur Sicherung unserer Existenzgrundlagen leisten.

Darüber hinaus geht eine besondere Faszination für mich – wie auch für viele andere, die den Stirlingmotor kennen gelernt haben – von der Einfachheit dieser Maschine aus. So kommt die Stirlingmaschine völlig ohne Ventile und dem damit verbundenen aufwendigen Ventiltrieb aus. Bei Freikolbenmotoren entfällt sogar der Kurbeltrieb. Die mathematische Beschreibung des realen Stirlingprozesses ist dennoch äußerst komplex und wird häufig aufgrund des einfachen Aufbaus der Maschine unterschätzt.

Mit diesem Buch möchte ich all denen, die sich näher mit dieser Maschine beschäftigen wollen, einen Einblick in die Thermodynamik, die spezifischen Konstruktionsmerkmale und Anwendungen ermöglichen.

Zahlreiche Maschinen haben mittlerweile einen hohen Entwicklungsstand erreicht, verschiedene Modelle sind am Markt verfügbar. Der Weg dorthin war lang und nicht ohne Rückschläge; so sind selbst in der jüngsten Vergangenheit Firmen wieder verschwunden, andere streben mit neuen verbesserten Konzepten an den Markt. Es wurden Freikolben-Stirlingmotoren weiterentwickelt und befinden sich derzeit im Feldtest. Mit diesem Schritt wurde der Aufbau des Motors nochmals drastisch vereinfacht; statt eines Kurbeltriebs schwingen die Kolben frei an Federn. Da so nochmals ein Quantensprung in der Reduktion des Wartungsaufwands möglich wird, kann diese Technologie zur Schlüsseltechnologie für Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung werden.

Mein Dank gilt allen Personen und Firmen, die mir Informationen und Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben, den Verlagsmitarbeitern für die nun schon langjährige, aber immer noch hervorhebenswert gute Zusammenarbeit, und allen, die diesem Buch den Weg gebnet haben.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 5 |
| Inhaltsverzeichnis | 7 |
| Einleitung | 11 |
| 1 Wärmekraftmaschinen für niedrige Temperaturen und regenerative Energien | 13 |
| 2 Der Stirlingprozess | 17 |
| 2.1 Prinzip | 17 |
| 2.2 Wirkungsgrad des Idealprozesses | 21 |
| 2.3 Arbeit des Idealprozesses | 23 |
| 2.4 Arithmetischer Mitteldruck des Prozesses..... | 23 |
| 2.5 Der Bewegungsablauf in der Maschine | 24 |
| 2.6 Wärmekraft- oder Arbeitsmaschine..... | 25 |
| 2.7 Drehrichtung und deren Umkehr | 25 |
| 2.8 Der Regenerator..... | 25 |
| 2.8.1 Temperaturprofil | 26 |
| 2.8.2 Wärme im Regenerator | 26 |
| 2.8.3 Regeneratorverlust/-wirkungsgrad..... | 27 |
| 2.9 Verdichtungsverhältnis | 28 |
| 2.9.1 Verdichtungsverhältnis von Alpha-Maschinen..... | 28 |
| 2.9.2 Verdichtungsverhältnis von Gamma-Maschinen | 30 |
| 2.9.3 Verdichtungsverhältnis von Beta-Maschinen | 30 |
| 2.10 Arbeitsgase | 31 |
| 3 Grundtypen | 33 |
| 3.1 Unterscheidung nach der Art der Kolbenführung..... | 33 |
| 3.2 Unterscheidung nach der Art der Arbeitsraumkonfiguration | 33 |
| 3.3 Alpha-Maschine | 34 |
| 3.4 Gamma-Maschine..... | 34 |
| 3.5 Beta-Maschine..... | 35 |
| 4 Doppelt wirkende Stirlingmaschinen | 37 |
| 4.1 Zweizylinder doppelt wirkender Stirling nach FRANCHOT | 37 |
| 4.2 Drei- bis Sechszylinder doppelt wirkender Stirling nach SIEMENS | 37 |
| 5 Eigenschaften und Konstruktionsmerkmale von Stirlingmotoren | 39 |
| 5.1 Eigenschaften von Stirlingmotoren | 39 |
| 5.2 Aufladung und Abdichtung des Arbeitsraums..... | 39 |
| 5.2.1 Die Rollmembran-Dichtung..... | 40 |
| 5.3 Kurbeltriebe für kinematische Stirlingmotoren | 41 |
| 5.3.1 Das Rhombengetriebe | 41 |
| 5.3.2 Das Schiefscheibengetriebe | 42 |
| 5.3.3 Das Taumelscheibengetriebe | 43 |
| 5.4 Erhitzer-Wärmetauscher..... | 44 |
| 5.4.1 Werkstoff-Beanspruchung von Erhitzer-Wärmetauschern | 44 |
| 5.4.2 Wärmerohr(Heat-Pipe)-Erhitzer | 44 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.4.3 | Geometrische Bauformen von Erhitzer-Wärmetauschern | 45 |
| 5.5 | Verdrängerkolben für Hochtemperaturmotoren | 47 |
| 5.5.1 | Qualitative Abschätzung der Strahlungswärmeverluste im Verdränger | 47 |
| 6 | Freikolben-Stirlingmotoren | 51 |
| 6.1 | Mathematische Beschreibungen zum Freikolben-Stirling | 52 |
| 6.2 | Übertragungsverhalten gedämpfter Feder-Masse-Schwinger | 53 |
| 7 | Die Luftvorwärmung für Stirlingmotor-Brennersysteme | 55 |
| 7.1 | Temperaturerhöhung durch Luftvorwärmung | 56 |
| 7.2 | Effizienzsteigerung durch Luftvorwärmung | 57 |
| 7.3 | Stickoxide | 59 |
| 8 | Beispiele realer Maschinen..... | 61 |
| 8.1 | Die Solo-161..... | 61 |
| 8.2 | Die Sunmaschine® von Weber Solartechnik | 70 |
| 8.3 | Biomasse-Stirlingmotor von Stirling DK, Dänemark..... | 72 |
| 8.4 | Der ST 05 G von Viebach | 75 |
| 8.4.1 | Der ST 05 G-G..... | 77 |
| 8.5 | Der Niedertemperatur-Solar-Stirling Sunwell 50® von Weber Solartechnik..... | 79 |
| 8.6 | Das Freikolben-Stirlingmotor-Energiemodul der Stirling Systems AG | 80 |
| 8.7 | Mini-BHKW mit Freikolben-Stirlingmotor von Bosch Thermotechnik | 82 |
| 8.8 | WhisperGen™ – Mini-BHKW mit 4-Zylinder-Stirlingmotor | 84 |
| 9 | Berechnungsverfahren und deren Klassifizierung..... | 89 |
| 9.1 | Klassische Einteilung der mathematischen Analysemethoden..... | 89 |
| 9.2 | Klassifizierung nach Organ | 90 |
| 9.2.1 | Kasseler Klassifizierung | 90 |
| 9.3 | Faustformeln..... | 90 |
| 9.3.1 | Der Beale-Faktor..... | 90 |
| 9.3.2 | Der West-Faktor | 91 |
| 10 | Schmidt-Analyse..... | 93 |
| 10.1 | Schmidt-Analyse für Alpha-Maschine | 94 |
| 10.1.1 | Formelzeichenlegende | 94 |
| 10.1.2 | Funktionen der Volumina | 94 |
| 10.1.3 | Effektive Totraumtemperatur..... | 94 |
| 10.1.4 | Effektive Regenerator-Gastemperatur | 95 |
| 10.1.5 | Druck als Funktion des Kurbelwinkels | 98 |
| 10.1.6 | Arbeit und Leistung | 100 |
| 10.1.7 | Extremdrücke..... | 101 |
| 10.1.8 | Beispielrechnung | 101 |
| 10.2 | Schmidt-Analyse für Gamma-Maschine | 104 |
| 10.3 | Schmidt-Analyse für Beta-Maschine..... | 106 |
| 10.3.1 | Ermittlung des Überlappungsvolumens | 106 |
| 11 | Auslegungsdiagramme..... | 111 |
| 11.1 | Normierung der Arbeit | 111 |
| 11.2 | Schmidt-Arbeit als Funktion der Expansionstemperatur | 113 |
| 11.3 | Schmidt-Arbeit als Funktion des Totvolumens | 114 |
| 11.4 | Schmidt-Arbeit als Funktion des Phasenverschiebungswinkels..... | 115 |
| 12 | Massenströme in der Stirlingmaschine | 117 |
| 13 | Regeneratorberechnung | 121 |
| 13.1 | Der Wirkungsgrad von Rekuperatoren | 122 |
| 13.2 | Wirkungsgrad des Regenerators | 123 |
| 13.3 | Wärmeübergangsberechnung nach MIYABE | 126 |
| 13.4 | Wärmeübergangsberechnung | 128 |
| 13.5 | Wärmeleitung in der Regenerator-Matrix..... | 128 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 14 | Verluste und Wirkungsgrad | 131 |
| 14.1 | Shuttle-Verluste | 131 |
| 14.2 | Wärmeströme | 132 |
| 15 | Leistungssteigerung und -regelung | 133 |
| 15.1 | Aufladung | 133 |
| 15.2 | Leistungsregelung..... | 135 |
| 16 | Niedertemperaturmotoren | 137 |
| 16.1 | Verdichtungsverhältnis und Reibung | 138 |
| 16.1.1 | Bestimmung der Reibarbeit | 141 |
| 17 | Messungen an einer solaren Niedertemperatur-Stirling-Versuchsmaschine | 147 |
| 18 | Geschichtlicher Rückblick | 151 |
| 18.1 | Geschichte der Wärmekraftmaschinen | 151 |
| 18.2 | Geschichte der Stirlingmotoren | 152 |
| 19 | Thermodynamische Grundlagen konzentrierender Solarkollektoren | 155 |
| | Formelzeichen und griechisches Alphabet | 159 |
| | Quellen- und Literaturverzeichnis | 165 |
| | Stichwortverzeichnis | 169 |

Einleitung

Im Zeitalter unübersehbarer Umweltschäden, die auf die intensive Nutzung fossiler Energieträger zurückzuführen sind, ist die Suche nach umwelt- und sozialverträglicheren Energieträgern zwingend notwendig. Hier stellen die regenerativen Energien die einzig nachhaltige Alternative dar.

Doch auch bei der weiteren Nutzung fossiler Energieträger in einer Übergangszeit bis zur konsequenten Nutzung regenerativer Energieträger können Effizienz gesteigert und Emissionen gesenkt werden. Eine wichtige Technologie stellt die Kraft-Wärme-Kopplung dar. Jeder Wärmekraftprozess (Dampfkraft-, Gasturbinen-Prozess, Otto-, Diesel- und Stirlingmotor) kann, physikalisch bedingt, nur einen Teil der eingesetzten Wärme in mechanische und so in elektrische Energie umwandeln. Abwärme fällt zwangsläufig an. Mit der Kraft-Wärme-Kopplung wird diese ebenfalls genutzt, und die Gesamtwirkungsgrade können so drastisch erhöht werden. Diese Nutzung der Abwärme ist prinzipiell auch bei Großkraftwerken möglich und wird auch in Form von so genannter Fernwärme realisiert; da Wärme aber – anders als elektrische Energie – weit weniger gut über größere Strecken transportiert werden kann, ist die Kraft-Wärme-Kopplung erst in Verbindung mit dezentralen Kraftwerken kleiner Leistung ideal.

Auf der Basis von Dampfkraftprozessen mit Wasser oder auch organischen Fluiden (ORC) existieren Technologien, die ebenfalls Biomasse, geothermische oder solare Wärme in Strom verwandeln können. Zum Beispiel bietet die Firma Spilling [54] schon seit langem Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis von Kolbendampfmaschinen für Leistungen zwischen 25 kW und 1500 kW je Motor an. Während diese Dampfkraftprozesse eher für größere Leistungseinheiten geeignet sind, zeichnet sich der Stirlingmotor für kleine Leistungseinheiten aus.

Der Stirlingmotor kann aufgrund der Wärmezufuhr mittels Wärmetauscher solare Wärme wie auch Wärme aus Feuerungen mit Biobrennstoffen nutzen und kann beim Betrieb mit fossilen Energieträgern wie Erdgas eine hohe Effizienz und sehr niedrige Abgasemissionswerte erzielen.

Verschiedene Unternehmen haben kleine Blockheizkraftwerke auf Basis von Stirlingmotoren entwickelt bzw. entwickeln daran.

Für die Anwendung Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung im Bereich elektrischer Leistungen unterhalb von 5 kW kann der Stirlingmotor in einer Sonderform – der Freikolben-Stirlingmaschine – zu einer Schlüsseltechnologie für diesen Einsatz werden, da diese Bauart den Bauaufwand und vor allem den Wartungsaufwand drastisch reduzieren kann.

Eine Sonderform von Stirlingmaschinen, die so genannten Niedertemperatur-Stirlingmotoren, arbeiten auch noch mit extrem kleinen Temperaturdifferenzen. Werden sie ebenfalls solar beheizt, können sie ihre Wärme auch aus einfachen Flachkollektoren beziehen. Diese erreichen zwar nur niedrige Temperaturniveaus in der Größenordnung von 100 °C [35], sind aber sehr einfach aufgebaut, können auch diffuse Solarstrahlung, wie man sie bei bedecktem Himmel vorfindet, noch nutzen und brauchen keine aufwendige Nachführung. Ob eine derartige Anlage für Industrieländer sinnvoll ist, ist äußerst fraglich, da die Leistungsdichten dieser Maschinen sehr gering sind. Für Dritte-Welt-Länder erscheint diese

Technik, besonders aufgrund ihrer Einfachheit, sehr gut mit der dortigen Infrastruktur vereinbar zu sein.

Aber auch industrielle Abwärme lässt sich so mittels (Niedertemperatur-)Stirlingmotor in mechanische bzw. elektrische Energie verwandeln.

Das vorliegende Buch behandelt die allgemeinen Grundlagen der Stirlingmaschinenteknik, deren Thermodynamik, erläutert die Besonderheiten von Freikolben-Stirlingmotoren sowie Niedertemperatur-Stirlingmotoren und zeigt typische Anwendungen wie Solarkraftwerke und die Kraft-Wärme-Kopplung mit niedrigsten Abgasemissionen anhand realer Maschinen auf.

1 Wärmekraftmaschinen für niedrige Temperaturen und regenerative Energien

Für den Betrieb einer Wärmekraftmaschine ist das Temperaturniveau der zu- und abgeführten Wärme keineswegs gleichgültig. So zeigt schon der Carnotprozess, der den bestmöglichen Wirkungsgrad für ein gegebenes Temperaturfenster besitzt, dass der Wirkungsgrad η mit fallender oberer Prozesstemperatur fällt.

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

So liegt sein Wert für 100 °C oberer Prozesstemperatur und 25 °C Umgebungstemperatur als untere Prozesstemperatur nur noch bei 20%. Nun ist aber dieser theoretische Prozess praktisch nicht umsetzbar, so dass reale Wirkungsgrade nochmals deutlich darunter liegen und bei diesem Temperaturfenster nicht wesentlich höher als 5% sein dürften.

An dieser Stelle lohnt es sich, einige grundsätzliche Gedanken zur Bedeutung des Wirkungsgrads einer Anlage zu machen.

Er ist als das Verhältnis der abgegebenen Nutzarbeit zur zugeführten Wärme definiert. Für die Nutzung fossiler Brennstoffe war und ist diese Kenngröße einer Energieanlage somit von zentraler Bedeutung, da der Brennstoff eingekauft werden muss, während die abgegebene Leistung, z. B. elektrischer Strom, entsprechend vergütet wird. Der Wirkungsgrad bestimmt somit neben der energetischen auch die finanzielle Effizienz der Anlage.

Darüber hinaus sind mit der Nutzung fossiler Energieträger auch zahlreiche Umweltbelastungen verbunden. Für eine gewünschte Ausgangsenergie nehmen diese Belastungen somit zu, wenn der Wirkungsgrad der Anlage sinkt und so mehr Brennstoff und Abgase umgesetzt werden müssen, um die gleiche Ausgangsenergie zu erzeugen.

Nutzt eine Energieanlage aber regenerative Energieträger wie z. B. solare Strahlung, ist der „Brennstoff“ kostenlos und umweltneutral. Kosten und Umweltbelastungen entstehen dann (bis auf die Wartung und Entsorgung der Anlage) nur noch durch den Bau der Anlage, nicht durch deren Betrieb. Der Wirkungsgrad erhält eine etwas andere Bedeutung. Eine solche Anlage sollte somit *bezogen auf deren Investitionskosten* eine möglichst hohe Leistung haben. Das Ziel ist damit eine Leistungs- statt Wirkungsgradoptimierung der Anlage.

Der Wirkungsgrad verschiedener Anlagenkomponenten wie der Wärmekraftmaschine geht aber trotzdem in diese Leistungs-Kosten-Optimierung mit ein, da er die Größe und den Aufwand der vorgeschalteten Anlagenteile mitbestimmt. D. h., ist der Wirkungsgrad eines solar beheizten Stirlingmotors klein, so fallen vorgeschaltete Kollektor bzw. Spiegel und Absorber entsprechend groß aus, um am Ende die gleiche mechanische oder elektrische Leistung zu erhalten. Ein geringer Wirkungsgrad der Maschine erhöht so über die Kosten für z. B. Spiegel oder Brenner die Gesamt-Anlagenkosten und erschwert damit deren Rentabilität. Auf die Gesamtanlage bezogen bleibt das Ziel trotzdem die Optimierung der Leistung, bezogen auf die Investitionskosten.

Bezüglich der Thermodynamik ist noch eine andere Größe von großer Bedeutung, das so genannte *Arbeitsverhältnis* bzw. der *Mitteldruck* des Prozesses. Für einen Idealprozess ist dies bedeutungslos, nicht aber im Hinblick auf die Umsetzbarkeit des Idealprozesses in die Realität.

CERBE und HOFFMANN [15] haben das Arbeitsverhältnisses r_w wie folgt definiert:

$$r_w = \frac{W_{ab}}{W_t^-} \quad \text{mit} \quad W_t^- = \int V \cdot dp \quad \text{für} \quad V \cdot dp < 0$$

Statt des Bezugs auf die *technische* Arbeit erscheint alternativ eine Definition mit der Volumenänderungsarbeit ebenso sinnvoll:

$$r_w^* = \frac{W_{ab}}{W^-} \quad \text{mit} \quad W^- = -\int p \cdot dV \quad \text{für} \quad -p \cdot dV < 0$$

W_{ab} vom Gesamtzyklus netto abgegebene Arbeit (indizierte Arbeit oder Fläche in der p - V -Schleife)

W^- während eines Teilzyklusses brutto abgegebene Arbeit (oft gleich der Expansionsarbeit)

W^+ während eines Teilzyklus brutto aufgenommene Arbeit

[15]

Zur Erläuterung:

$$W_{ab} = W^+ + W^-$$

Das Arbeitsverhältnis r_w bewertet den *idealen* Kreisprozess im Hinblick auf seine Umsetzbarkeit mit verlustbehafteten Maschinen oder Anlagen in einen *realen* Prozess. Es entspricht – vereinfacht ausgedrückt – dem Verhältnis von Netto-Arbeit zur umgesetzten Arbeit.

In jeder realen Maschine wie z. B. einer Turbine entstehen Verluste, die absolut um so höher sind, je höher die umgesetzte Leistung dieser Maschine ist. Ist nun die Arbeitsabgabe während eines Prozessabschnitts im Vergleich zur gesamten abgegebenen Arbeit sehr hoch, entstehen in diesem Prozessabschnitt proportional hohe Verluste, die die Nutzarbeit entsprechend stark reduzieren. Ist die Netto-Arbeit (indizierte Arbeit) klein, schlagen die Verluste stark zu Buche. Dies ist ein Grund dafür, dass der als Idealprozess so gute Carnotprozess in der Praxis so schwer anzunähern ist.

Ist das Arbeitsverhältnis eines Prozesses hoch, so kann man sich Maschinen mit schlechterem Wirkungsgrad leisten.

Niedertemperatur-Stirlingmotoren zeichnen sich im Allgemeinen durch ein sehr hohes Arbeitsverhältnis aus. Dies erkennt man im p - V -Diagramm dieser Maschinen daran, dass fast auf dem ganzen Zyklus Arbeit nach außen abgegeben wird. Ein hohes Arbeitsverhältnis ist notwendige Bedingung, um bei den oft extrem niedrigen oberen Prozesstemperaturen dieser Motoren überhaupt noch arbeiten zu können, da bei diesen Temperaturen die indizierten Arbeiten bereits recht klein gegenüber den Reibarbeiten der Maschine sind.

Eine etwas andere, aber von der Grundaussage ähnliche Größe ist der *indizierte Mitteldruck*. Er ist definiert als abgegebene Arbeit, bezogen auf die ΔV -Linie im p - V -Diagramm.

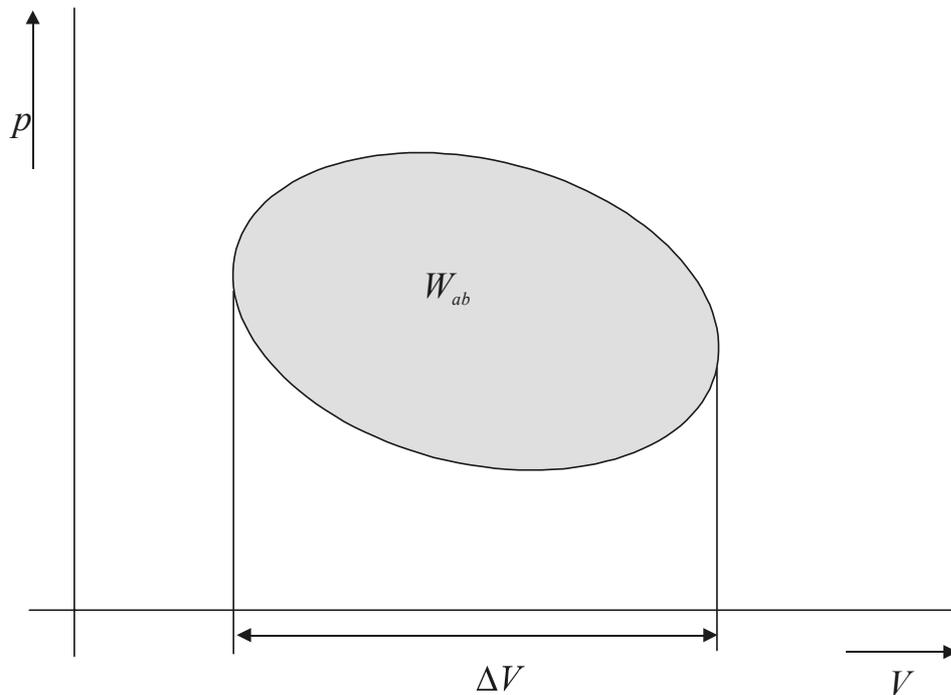


Bild 1.1 Definition des indizierten Mitteldrucks

$$p_{mi} = \frac{W_{ab}}{\Delta V}$$

Die Namensgebung indizierter Mitteldruck ist ein wenig irreführend. Der Begriff Mitteldruck suggeriert den *arithmetischen* Mittelwert des Drucks über einem Zyklus. Dieser errechnet sich aus dem Integral des Innendrucks *über dem Kurbelwinkel*, während die Arbeit als Integral *über dem Volumen* berechnet wird. Der Kurbelwinkel ist aber für einen Zyklus eine *stetig anwachsende* Größe, während sich das Volumen *zyklisch* ändert und am Ende des Zyklus wieder zum Anfangsvolumen zurückfindet.

$$p_{mi} = \frac{\oint_{\text{Zyklus}} p dV}{\Delta V} = \frac{W_{ab}}{\Delta V}$$

statt :

$$p_m = \frac{\int_0^{2\pi} p d\alpha}{2\pi}$$

Besser wäre es, den indizierten Mitteldruck als *Literarbeit* oder *Volumenarbeit* zu bezeichnen, da in der Definition des indizierten Mitteldrucks die Arbeit eines Zyklus auf das *Hubvolumen* bezogen wird.

Bitte beachten Sie, dass der in der Stirlingliteratur gebräuchliche und auch in diesem Buch verwendete, Mitteldruck p_m den *arithmetischen* Mitteldruck bezeichnet.

Der indizierte Mitteldruck ist eine im Verbrennungsmotorenbau übliche Größe. Das Arbeitsverhältnis findet dort keine Anwendung, es erscheint eher für Prozesse mit Strömungsmaschinen wie Gasturbinen und Dampfkraftprozesse als sinnvoll.

Tatsächlich sind die beiden Kenngrößen inhaltlich nicht exakt identisch. Bitte betrachten Sie dazu die beiden Prozesse in Bild 1.2.

Vergrößert sich das Totvolumen V_2 zu V_2^* , während die Prozessschleife erhalten bleibt, bedeutet dies ein sinkendes Arbeitsverhältnis r_w . Der indizierte Mitteldruck bleibt hingegen konstant.

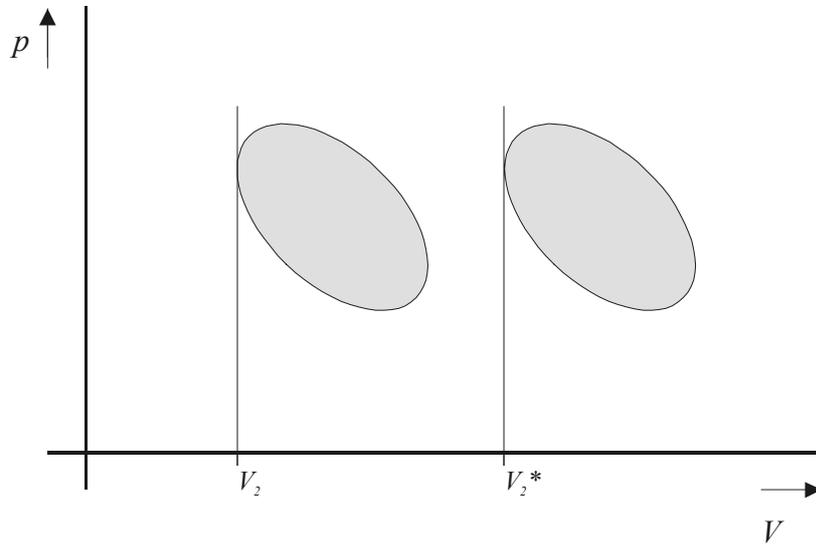


Bild 1.2 Prozesse gleichen indizierten Mitteldrucks

2 Der Stirlingprozess

2.1 Prinzip

Anhand des Bewegungsablaufes in der Maschine erhält man eine anschauliche Vorstellung dieses Prozesses.

Bild 2.1 zeigt den schematisierten Aufbau einer Stirlingmaschine mit den Kolben in den vier signifikanten Punkten des Zyklus.

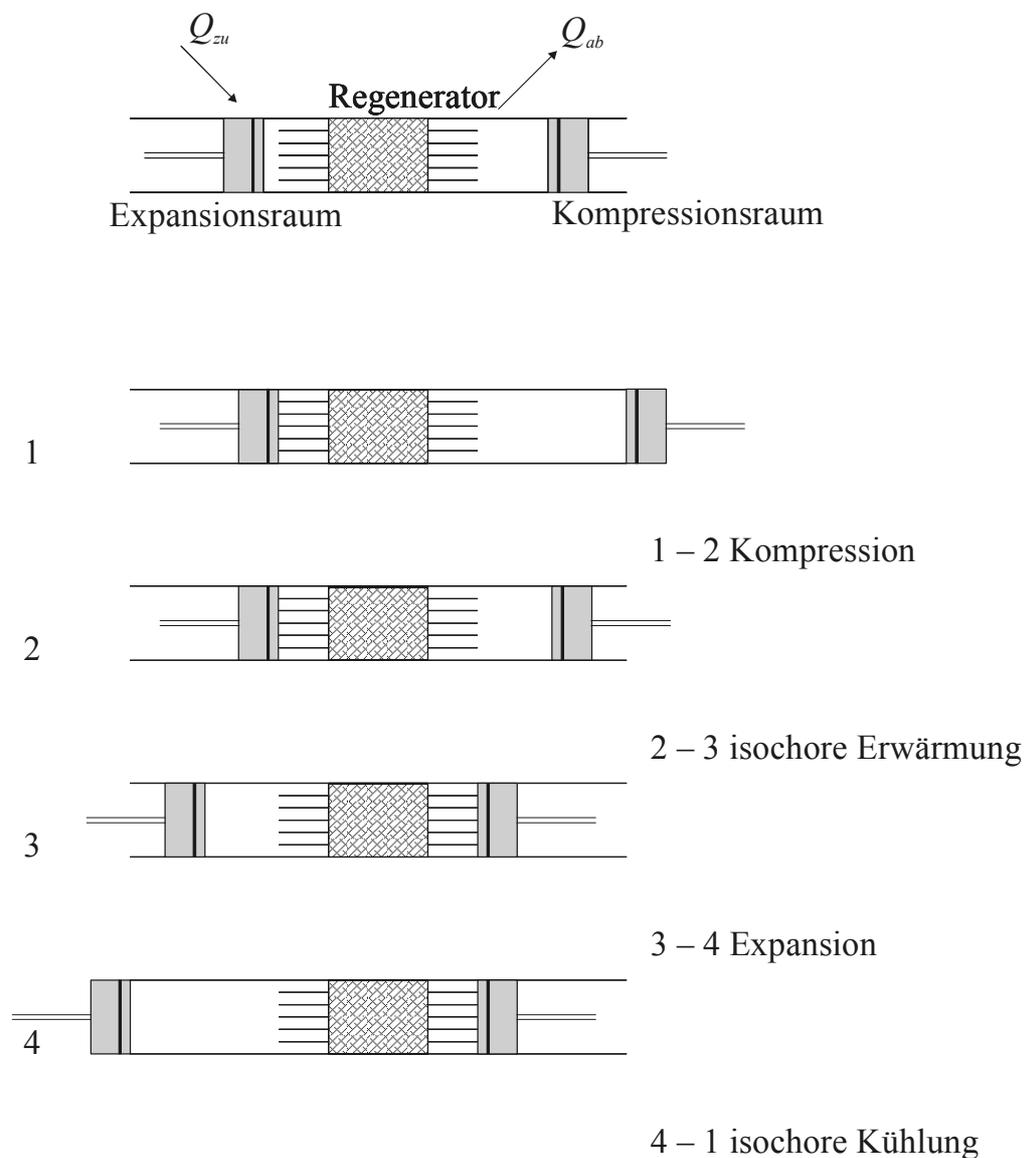


Bild 2.1 Arbeitsprinzip des Stirlingprozesses