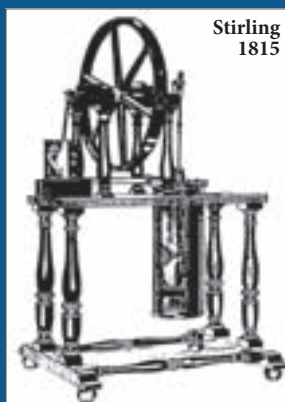
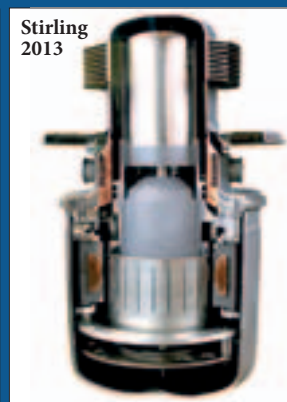


Martin Werdich
Kuno Kübler



Stirling
1815



Stirling
2013

Stirling-Maschinen

Grundlagen · Technik · Anwendungen



Martin Werdich
Kuno Kübler

Stirling-Maschinen

Grundlagen - Technik - Anwendungen

Den Findern gewidmet:
James & Robert Stirling

Über Anregungen freut sich

Kuno Kübler
Mutter-Teresa-Str. 20
81829 München
Email: kuno.kuebler@maxi-dsl.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-936896-73-2

- 1.- 10. Auflage 1991 -2005
- 11. überarbeitete, erweiterte Auflage 2007
unter ISBN 978-3-936896-29-9
- 13. überarbeitete und neu gestaltete Auflage 2013

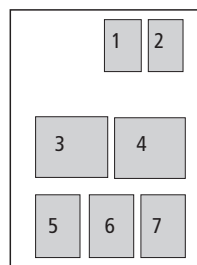
© ökobuch Verlag, Staufen b. Freiburg, 1991, 2013
<http://www.oekobuch.de/>

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Funk, Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, Einspeicherung in EDV-Anlagen, Tonträger jeder Art und auszugweisen Nachdruck, sowie die Rechte der Übersetzung sind vorbehalten.

Karikaturen: W. Wesinger, München, www.waldah.de
Druck: Beltz Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza

Bilder auf der Titelseite

- 1 Historische Zeichnung
- 2 Microgen Stirling, aufgeschnitten. Quelle: ÖkoFen
- 3 Solarskulptur Sunwash. Photo: O. Hein
- 4 SM 34 von Stirling Danmark 2013. Photo: Wudag
- 5 Pelletmatic Smart_e mit Stirlingm. Photo: ÖkoFen
- 6 Dish-Stirling-System. Photo: E. Weber
- 7 Vitotwin 300 W Brennwerttherme. Photo: Viessmann



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Grundlagen der Heißgas- und Stirlingmaschinen	6
1.1 Geschichtliche Entwicklung	6
1.2 Das Funktionsprinzip des Stirlingmotors	16
1.3 Thermodynamische Grundlagen	17
1.3.1 Begriffserläuterungen	17
1.3.2 Ideale Prozesse / Vergleichsprozesse	18
1.3.3 Der reale Stirlingprozess	22
1.4 Vorzüge des Heißgasmotors	25
2 Typologie der Heißgasmaschinen	28
2.1 Einfach wirkende Motoren	28
2.2 Doppelt wirkende Motoren	29
2.3 Freikolben-Stirling-Maschinen	30
2.4 Freizylinder-Stirling-Maschinen	33
2.5 Hybridmotoren	34
2.6 Der Flachplatten-Stirlingmotor (Kolin)	35
2.7 Flüssigkolbenmaschinen	36
2.8 Die Vuilleumiermaschine (regenerative Wärmepumpe)	37
2.9 Ericsson-Maschinen	38
3 Ausführung des Triebwerks	39
3.1 Kurbeltriebwerke	39
3.2 Das Taumelscheibentriebwerk	42
3.3 Das Schiefscheibentriebwerk	43
3.4 Das Rhombentriebwerk	44
3.5 Rotationskolbenmaschinen	45
3.6 Hydrostatisches Verdrängertriebwerk	46
4 Wärmequellen	47
4.1 Feste Brennstoffe	47
4.2 Flüssige Brennstoffe	50
4.3 Gasförmige Brennstoffe	51
4.4 Sonnenenergie	52
4.5 Abwärmenutzung	54
4.6 Energie aus Niedertemperaturwärme	54
4.7 Thermische Energiespeicher	57
4.8 Thermochemische Speicher	57
4.9 Energie aus radioaktiven Isotopen	58
4.10 Metallverbrennung	58
5 Allgemeine Probleme der technischen Realisierung	59
5.1 Dichtungen	59
5.1.1 Kolbenstangendichtung	59
5.1.2 Kolbendichtungen	60
5.1.3 Abdichtung von Freikolbenmotoren	60

5.2	Arbeitsdruck	60
5.3	Wärmetauscher	60
5.4	Arbeitsmedium	62
5.5	Materialien	63
5.6	Temperatur- und Leistungsregelung	64
6	Einsatz der Heißgasmaschinen	65
6.1	Wärmepumpen und Kaltwassersätze	65
6.1.1	Kältemaschinen nach dem Stirlingprozess	66
6.1.2	Stirlingmotor treibt Wärmepumpe an	67
6.1.3	Fremdmotor treibt Stirlingwärmepumpe an	67
6.1.4	Stirlingmotor treibt Stirlingwärmepumpe an	68
6.1.5	Wärmemaschine nach dem Vuilleumier-Prinzip	68
6.2	Der Heißgasmotor und seine Anwendung	69
6.2.1	Stirlingmotor als Fahrzeugantrieb	69
6.2.2	Stirlingmotoren für Schiffe	69
6.2.3	Pumpen und Verdichter	72
6.2.4	Stromerzeugung	73
6.2.5	Kombination von stationärer und mobiler Verwendung.....	74
7	Entwicklung und Marktüberblick	77
7.1	Nutzmotoren	77
7.2	Von der Kleinserie zur Großserie.....	85
7.3	Wechselvolle Zeiten für Stirling-Entwickler	89
7.4	Motoren für Ausbildung, Schule und Hobby	97
7.4.1	Modellmotoren	97
7.4.2	Experimentalmotoren	100
7.5	Hinweise zum Bau eines Stirlingmotor-Modells von G.Eith	103
8	Zusammenfassung	109
8.1	Einteilung	109
8.2	Ergebnisse	111
8.3	Erwartungen	112
9	Anhang	114
9.1	Verwendete Literatur	114
9.2	Adressenverzeichnis	119
10	Stichwortverzeichnis	124

Vorwort

Die Neuauflage dieses Buches wendet sich in allgemein verständlicher Form an den breiten Leserkreis, der sich für das Thema „Stirling-Maschinen“ interessiert. Das Buch gibt eine Übersicht über Stirlingmaschinen, ihre systematische Einteilung, Anwendung und den Stand der Technik heute (2013). Es ist im Wesentlichen eine Literaturrecherche, bei der auch die umfangreiche englischsprachige Literatur soweit wie möglich berücksichtigt wurde.

Ich widme diese Arbeit Herrn Willi Ried und seiner Frau, die mir nach seinem viel zu frühen Tod eine große Menge Unterlagen zukommen ließ, mit denen Herr Ried 25 Jahre lang an einer Rotationskolben-Stirlingmaschine gearbeitet hat, aber nie den erhofften Durchbruch erreichte.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mir durch Korrespondenz und Übersendung von Unterlagen halfen, diese Arbeit so umfassend auszuführen:

Mr. Cooke-Yarborough, Michael Novi (Joanneum), H. Aschenbrenner (PTB Braunschweig), Department of Energy, W.A. Tomazic (NASA), Dipl.-Ing. C. Müller, (IHK), Dr.-Ing. Hörler (ETH-Zürich), A.J. Organ (Uni Cambridge), H. Carlsen (TU-Dänemark), R.M. Schaubach (Thermacore), H. Schager, H. Meschendorf, H. Beck (ECOS), H. Vieweg (Autor), H. Viebach, Klaus Kramer, Eckhart Weber, Ing. P. Lista, Hubert Eckl, Ferdinand Waldkircher, Gerhard Eith.

Ein ganz besonderes Dankeschön möchte ich auch folgenden Damen und Herren sagen, die mir aktiv mit Rat und Tat zur Seite standen:

dem Team von Prof. Dr. H. Krauch, Walter Arn, Dipl.-Ing. Walter Kufner, Dipl.-Ing. Günter Banholzer, Friedrich Munzinger und Dr.-Ing. Blumenberg, sowie meinen beiden Professoren, Herrn Prof. Dipl.-Ing. Benno Kirchgäßner und Herrn Dipl.-Ing. Heinz Schnell sen.

Die Überarbeitung der vorliegenden 13. Auflage war erforderlich geworden, um die Fortschritte in der Stirlingmotorentwicklung festhalten zu können (z.B. Beginn der Serienfertigung für Stirling-Mikroheizkraftwerke). Diese Aufgabe wie auch die Bearbeitung ab der 7. Auflage im Jahr 1999 hat dankenswerter Weise Kuno Kübler übernommen.

Für diese aktualisierte Fassung möchte ich außerdem Tim Lohrmann und Georg Harhaus danken. Sie haben mit sehr großem Engagement über mehrere Monate hinweg und mit fundiertem Fach- und Sachverstand diese vorliegende Fassung zu etwas Besonderem gemacht und trotz der hohen Bandbreite zu größter Fachtiefe verholten.

Die 1.Auflage 1991 bis zur 12.Auflage 2011 dokumentiert die Entwicklung der Stirlingmotor-Technologie bis 2007. In der vorliegenden Überarbeitung sind einige früher beschriebene Einzelentwicklungen entfallen.

Im Juni 2013

Martin Werdich

1 Grundlagen der Heißgas- und Stirlingmaschinen

„Schöne Worte sind nichts, wenn keine Taten folgen.“ Dieser Satz betrifft all diejenigen, die erfinden und entwickeln, was das Zeug hält, aber über Prototypen und Veröffentlichungen nicht hinauskommen (und das sind die meisten). Die wenigsten wissen, dass über die Stirlingtechnik sehr viel bekannt ist. Es werden zur Zeit ca 100.000 Maschinen diesen Prinzips pro Jahr produziert, wobei die meisten als Kälteerzeuger arbeiten.

Der Stirlingmotor ist wohl eines der beliebtesten Objekte für Bastler und Erfinder. Nicht umsonst umfasst die Literatur, die ich für meine Diplomarbeit und dieses Buch zusammengetragen habe, professionell geschriebene Bücher ebenso wie Skizzen, Zeitausschnitte und Meinungen aus aller Welt. Zu-

sammengenommen wiegt diese Sammlung etwa 120 kg. Um am Ende zu einer möglichst objektiven Einschätzung zu kommen, war es notwendig, nicht nur diese umfangreiche und oft verwirrende Literatur, sondern auch das Nichtgeschriebene, die Meinung von Erfindern, Bastlern und Ingenieuren zu hören und zu verarbeiten.

Der Begriff *Stirlingmotor* wird hier im Buch als Sammelbegriff für die vielfältigen Varianten derjenigen Wärmekraftmaschinen bezeichnet, bei denen der Stirlingprozess (Kapitel 1.3.3) noch erkennbar ist. Genau genommen gehört die Stirlingmaschine zur Familie der Heißgasmotoren, zu der auch die Rindermaschine (Kapitel 2.1) und die Siemensmaschine (Kapitel 2.2) gehören.

1.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Entwicklungsgeschichte der Stirlingmaschine zu schreiben, gleicht der Aufgabe, ein „unendliches Puzzle“ zu einem vollständigen Bild zusammenzusetzen. Das kann jedoch kaum vollständig gelingen, denn sehr viele Ideen gingen unter, ohne je veröffentlicht zu werden. Andere Neu- oder Weiterentwicklungen und Erfindungen wurden ein paarmal gemacht, manchmal auch zur gleichen Zeit. Darüber hinaus war es mir nicht möglich, an verschiedene Literatur heranzukommen, da doch einiges gehütet oder nicht offiziell vertrieben wird.



1.1 Rev. Robert Stirling D.D., der Erfinder des Stirlingmotors

Um die Gegenwart zu begreifen und eine vernünftige Heißgasmaschine nach dem Stand der Technik bauen zu können, ist es notwendig und sinnvoll, die Entwicklungsgeschichte zu kennen, aus ihr zu lernen und auf ihr aufzubauen. Dabei ist die Geschichte des Stirlingmotors mit der Geschichte der Thermodynamik und der Werkstoffentwicklung so eng verbunden, dass diese nicht unabhängig voneinander beschrieben werden können.

An Stelle einer ausführlichen, verwirrenden Erzählung sind die wichtigen Stationen und Fakten in den beiden folgenden Tabellen übersichtlich zusammengestellt.

Weltweit arbeiten heute über 100 Firmen, Universitäten und andere Forschungseinrichtungen an der Entwicklung und Verbesserung der Stirlingmaschinen und deren Anwendungen. Ein Verzeichnis der uns bekannten Adressen befindet sich am Ende des Buches in Kapitel 9.2.

In der folgenden Tabelle 1.2 sind die den Verfassern bekannt gewordenen Stirlingmotoren mit ihren technischen Daten (erreichte Leistungen, Wirkungsgrade usw.) zusammengestellt. Alle diese Motoren wurden gebaut und mehr oder weniger erfolgreich getestet.

Lehrmodelle 98
 Leistungsregelung 64
 Leistungsverluste 107
 Leistungszahl 18, 20
 LOHC-Wasserstoffspeicher 83
 Luft 62

Magnet Motor 96
 Marktübersicht 77
 Martini-Verdrängermotor 34
 Maschinenbauart 110
 Masse 105
 Materialien 63
 Mayer & Cie 96
 mechanischer Wirkungsgrad 18
 Membran-Freikolben-Stirling 33
 Messgeräte 107
 Metallverbrennung 58
 Microgen-Motor 53, 85, 88
 Mikro-Heizkraftwerk 75
 Mikro-KWK-Anlage 75, 82, 89, 112
 Mitteldruckänderung 64
 Moch 80
 Modellmotoren 97

Niedertemperatur-Stirlingmotor 99
 Niedertemperaturwärme 26, 54, 111
 Niedrigsttemperatur-Stirling 54
 Nutzarbeit 18
 Nutzenergie 25
 Nutzmotoren 77
 Nutzwirkungsgrad 18

ÖkoFen 87
 Otto-Prozess 20

Pendel-Freikolben-Stirling 34
 Pendelverluste 24
 Pflanzenöl 50
 Philips-Stirlingmotor 41
 Pickup-System 76
 Planck-Prozess 21
 Pumpen 72

Raumflugkörper 52
 realer Stirling-Prozess 22
 regenerativer Verdränger 28
 regenerative Wärmepumpe 37
 Regenerator 16, 18, 61, 105
 Regeneratorwirkungsgrad 23
 Resonanz-Stirlingmotor 32
 Rhombtriebwerk 44

Ridermotor 27
 Ringbom-Motor 34
 Rollsockendichtung 59
 Ross yoke drive 41
 Rostfeuerung 47
 Rotationskolbenmaschinen 45

Schadstoffemissionen 89
 Schiefscheibentriebwerk 43
 Schiffe 69
 Schwingungsarmut 25, 111
 Schwungradmasse 107
 Seiliger-Prozess 21
 Senft 54
 Siemens-Freikolbenmotor 31
 Siemensgetriebe 42
 Siemens-Heißgasmotor 29, 42
 Single-Phase Power (SPP) 81
 Solar-Dish-System 74
 solardynamisches System 52
 solare Energiesysteme 52, 76
 Solar-Flachplattenstirling 100
 Solarskulptur Sunwash 55
 Solar-Stirlingmotor 54, 55
 Solo Kleinmotoren 85, 89
 Sonnenenergie 52
 spezifische Gaskonstante 18
 ST 05 G 100
 stationäre Anlagen 74
 Stickstoff 62
 Stirling-Entwickler 89
 Stirling-Kreisprozess 112
 Stirlingmodellmotor 97, 103
 Stirlingmotor 6, 16, 69
 Stirling Power Module 80
 Stirling-Prozess 21, 22
 Stirling-Wärmepumpe 31, 32, 67
 STM Power 81
 Stromerzeugung 73
 Strömungsenergieverlust 106
 Sunmachine 94, 95
 Sunpulse 78
 Sunwash 55
 swash plate drive 43

Taumelscheibentriebwerk 42
 technische Daten 11
 technische Realisierung 59
 Temperaturregelung 64
 Temperaturstrahlungsverluste 107
 thermische Energiespeicher 57
 thermoakustischer Generator 32
 thermoakustische Maschine 84

thermochemische Speicher 57
 thermodynamische Grundlagen 17
 Torf 49
 Totraumeffekte 23, 64
 Totvolumen 106
 transportable Anlagen 73
 Triebwerk 39
 Typologie 27

U-Boot-Antrieb 58, 71
 Umlaufkolbenmaschine 45, 46
 Universität von Dänemark 80

Vaillant 87, 88
 Verbrennungstemperatur 47
 Verdichter 72
 Verdränger 16, 27
 Verdrängerkolben 16
 Verdrängersteuerung 40
 Vergleichsprozess 18, 21
 Verluste 24
 Viebach 100
 Vielstofffähigkeit 25, 111
 Viessmann 86
 Vitotwin 86
 Volumenverhältnis 104
 Vuilleumiermaschine 25, 37, 68, 112
 Vuilleumier-Prozess 21, 68

Wärmekraftmaschine 19
 Wärmepumpe 26, 65, 67
 Wärmequellen 47
 Wärmetauscher 60, 63, 111
 Wärmeübergang 106
 Wärmeverluste 24
 Wartungsfreundlichkeit 25, 111
 Wasser 63
 Wasserstoff 62
 Wasserstoffspeicher 83
 Weber 55, 82, 95
 WhisperGen 85, 90
 Winkelhebeltriebwerke 40
 Wirbelschicht-Feuerung 47, 48, 49
 Wirkungsgrad 18, 24, 25, 47, 111
 wobble plate drive 42

Yachten 71

Zusammenwirkens der Kolben 110
 Zustandsänderung 17
 Zylinderanordnung 39
 Zylinderraumzuordnung 110

Dipl.-Ing. Martin Werdich, Jahrgang 1963, gelernter Maschinenschlosser, schrieb seine Diplomarbeit über Stirling-Motoren. Daraus entstand dieses Buch. Nach mehreren Jahren als Entwickler und Projektleiter in renommierten Firmen arbeitet er heute als Experte und Autor für technische Risikoanalyse (www.werdichengineering.de).

Dipl.-Ing. Kuno Kübler, Jahrgang 1959, leitet seit über 25 Jahren den Arbeitskreis Stirlingmotor München. 2006 gründete er die interdisziplinäre Projektgruppe Stirling an der Hochschule München für angewandte Wissenschaften. 2011 wurde er von der Stadt München mit dem Umweltpreis ausgezeichnet und sein Engagement als Solar- und Nachhaltigkeitspionier über drei Jahrzehnte gewürdigt.



Den Stirling-Motoren wird eine große Zukunft vorausgesagt, da diese Wärmekraftmaschinen im Gegensatz zu Otto- und Dieselmotoren nicht auf einen bestimmten Brennstoff festgelegt sind, sondern von außen zugeführte Wärmeenergie aus beliebigen Quellen, z.B. aus Sonnenenergie und sogar Niedertemperatur-Abwärme in mechanische Energie umwandeln können. Der Stirlingprozess ist darüberhinaus auch zur Kälteerzeugung und für Wärmepumpenbetrieb geeignet.

Firmen in der ganzen Welt arbeiten inzwischen an technischen Verbesserungen und deren Umsetzung in die Serienproduktion. Die ersten Blockheizkraftwerke sind auf dem Markt.

Das Buch gibt einen Überblick über die Grundlagen, die Technik und die Bauformen der Stirling-Maschinen. Es geht auf die Vor- und Nachteile der verschiedenen Motorkonzepte ein, zeigt den Entwicklungsbedarf und beschreibt die heute verfügbaren Maschinen.

Eine einführende Information für Ingenieure, Studenten und technisch Interessierte, mit ausführlichem Hersteller- und Literaturverzeichnis.

ISBN 978-3-936896-73-2

