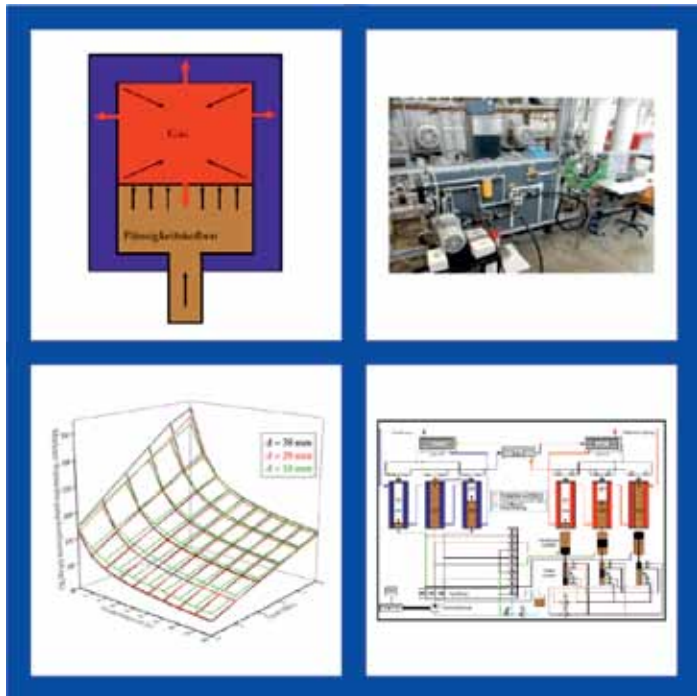


Magnus Schober

Numerische und experimentelle Analyse des energetischen Wirkungsgrades von Flüssigkeit- kolbenstirlingmaschinen



Numerische und experimentelle Analyse des energetischen Wirkungsgrades von Flüssigkeitskolbenstirlingmaschinen

Der technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander Universität
Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von
Magnus Schober
aus Hutthurm

Als Dissertation genehmigt von
der technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 12.04.2018

Vorsitzender des Prüfungsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker
Prof. Dr.-Ing. Michael Deichsel
Prof. Dr .rer. nat. Andreas Hornung

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und
Anlagentechnik

Band 35

Magnus Schober

**Numerische und experimentelle Analyse
des energetischen Wirkungsgrades von
Flüssigkeitkolbenstirlingmaschinen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5991-5

ISSN 1614-3906

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„ Die Wirklichkeit, von der wir sprechen können, ist nie die Wirklichkeit an sich, sondern [...] eine von uns gestaltete Wirklichkeit“

Werner Heisenberg, (1901-1976)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik der Friedrich Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Sie wurde durch verschiedene Personen erst ermöglicht, deren Beiträge ich an dieser Stelle würdigen möchte. Zunächst danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Deichsel für seine immerwährende und uneingeschränkte Unterstützung, während der vergangenen Jahre. Seine fachliche und soziale Kompetenz hat die Realisierung des Forschungsprojektes und insbesondere meine persönliche Entwicklung ungemein gefördert. Er verstand es immer, ein sehr angenehmes Arbeitsumfeld an der Fakultät zu schaffen und sorgte für Motivationsschübe und Lösungsansätze, wann immer Bedarf bestand. Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Schlücker möchte ich besonders für die Möglichkeit danken, unter seiner Betreuung promovieren zu dürfen. Er hat mich wie selbstverständlich am Lehrstuhl aufgenommen und eine eigenverantwortliche Bearbeitung der Problemstellung ermöglicht. Sein unglaublicher Wissensfundus, gepaart mit großer Hilfsbereitschaft und Geduld haben die Entstehung der Arbeit wesentlich unterstützt. Für die Übernahme des Begutachtung der Arbeit, danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. A. Hornung. Ein besonderer Dank geht zudem an das Unternehmen AGO AG, vertreten durch Herrn Dr.-Ing. K. Ramming, für die Finanzierung und Mitgestaltung des Forschungsprojektes (Förderkennzeichen: 03ET1025A). Meinen lieben Kollegen an der Hochschule, wie am Lehrstuhl, danke ich für die ausgedehnten fachlichen und gesellschaftlichen Diskussionen, sowie für das freundschaftliche Verhältnis. Ihr habt damit die Zeit als Doktorand zu einem besonderen Erlebnis gemacht, an das ich mich stets gerne zurückerinnern werde. Weiterhin bin ich den Absolventen Thomas Göbel, Alexander Melzig und Heiko Geißler zu großem Dank verpflichtet, die mit Ihren Abschlussarbeiten meine Arbeit bereichert

haben. Meiner Mutter Evi danke ich für die zielstrebige Unterstützung in der Schulzeit, meinem Vater Sepp besonders für die Unterstützung beim Aufbau des Versuchsstandes und beiden für die schöne gemeinsame Lebenszeit. Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Claudia für ihr Verständnis während der entbehrungsreichen Mess-, Simulations- und Schreibphasen. Sie hat mich aufgerichtet wenn es nötig war und mir immer bewusst gemacht, dass es ein schönes, gemeinsames Leben neben der Arbeit gibt. Ohne euch alle hätte ich es nicht geschafft! Vielen Danke dafür.

Freystadt, im September 2017

Magnus Schober

Abstract

The Stirling engine has some advantages like, working from any heat source, high theoretical efficiency and quiet operation. In order to solve problems of actual Stirling engines, like poor heat transfer between the working gas and surrounding walls, difficulties in sealing low molecular weight gases at high pressure and efficiency losses due to continuous cylinder movement with overlapping cycle steps, the liquid piston concept is intended to improve the efficiency of compression and expansion steps in the Stirling process. Within this concept a liquid piston instead of a solid piston is utilized to compress or expand a gas, to realize near isothermal processes. The liquid piston shows good sealing characteristics, arising from the perfect adaptation of a liquid to an arbitrarily shaped wall, while the high efficiency stems from intensive heat transfer, between working gas and surrounding walls during the process, due to a low volume to surface ratio.

In order to obtain design guidelines for liquid piston Stirling engines with maximum power and efficiency, a simulation model is developed in this work. The heat transfer between the working gas and the surrounding walls is an important information for the simulation model. For this reason a computational fluid dynamics (CFD) model is presented in addition, analysing the heat transfer by the influence of compression time and diameter of a cylindrical working chamber. In order to verify the CFD-model, the results are compared to measured experimental data from a testing device. The results showed a good match in local temperature and pressure between CFD-model and experimental data. Results display heat transfer coefficients of 80 - 340 W/m²/K at different working chamber diameter and cycle time. These results were applied to the simulation model for liquid piston Stirling engines. The considered application scenario involves the use of waste heat from a gas engine to power the liquid piston Stirling engine for additional electricity generation. The case study analyses the operation for an en-

gine configuration with eight working chambers in shell and tube heat exchanger design. After optimizing the hydraulic components, pipes and valves the results show, an electrical power output of 32,5 kW and an efficiency of 45,4 %.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Abstract	iii
1 Einleitung	1
2 Die Stirlingmaschine	5
2.1 Der idealisierte Stirling-Kreisprozess	5
2.2 Typologie	9
2.3 Wärmeübertrager in Stirlingmaschinen	15
2.3.1 Erhitzer	16
2.3.2 Regenerator	17
2.3.3 Kühler	21
2.4 Stand der Stirlingmaschinen-Technik	22
2.5 Schwachpunkte der Stirlingmaschine	28
2.5.1 Kontinuierliche Kolbenbewegung	28
2.5.2 Totraumeffekte	31
2.5.3 Abweichung isothermer Zustandsänderung	33
2.5.4 Gasleckagen	36
2.5.5 Weitere Verluste	38
2.6 Potential von Flüssigkeitskolbenstirlingmaschinen	42
3 Wissensstand zu Flüssigkeitskolbenstirlingmaschinen	45
4 Theoretische Grundlagen zu Flüssigkeitskolben	59
4.1 Funktionsprinzip und Eigenschaften	59
4.2 Bauformen	62
4.3 Thermodynamik von Gaskompression und -expansion	65
4.3.1 Isotherme Zustandsänderung	65
4.3.2 Isentrope Zustandsänderung	68

4.3.3	Polytrope Zustandsänderung	71
4.4	Vergleich der Zustandsänderungen	73
5	Versuchseinrichtung und Messtechnik	75
5.1	Konzeptionierung des Versuchszylinders	75
5.2	Aufbau des Versuchsstands	78
5.3	Messtechnische Ausstattung	83
5.3.1	Optoelektronische Füllstanderfassung	84
5.3.2	Druckmessung	85
5.3.3	Temperaturmessung mit Thermoelementen	86
5.4	Verifizierung der Kolbenbewegung	99
5.5	Ölfilm an der Wand des Kompressionsraums	102
5.6	Versuchsablauf	102
6	Numerische Strömungssimulation	107
6.1	Theorie der Strömungssimulation	107
6.1.1	Erhaltungsgleichungen	107
6.1.2	DNS und Turbulenzmodellierung	109
6.1.3	Dynamische Anpassung des Rechnernetzes	111
6.1.4	Kriterien der Netzqualität	112
6.2	Numerische Modellierung	114
6.2.1	Simulationsgeometrie	114
6.2.2	Randbedingungen und Einstellungen	116
6.2.3	Stoffdaten	120
6.2.4	Erstellung des Rechengitters	121
6.2.5	Sensitivitätsanalyse zur Ergebnisunabhängigkeit	123
6.2.6	Auswahl des Turbulenzmodells	127
6.2.7	Adiabates Erprobungszenario	129
7	Numerische und experimentelle Analyse des Kompressionsraums	131
7.1	Ergebnisse des Experiments	131
7.1.1	Volumenänderung des Arbeitsgases	131
7.1.2	Druckverlauf des Arbeitsgases	132
7.1.3	Analyse der lokalen Temperaturentwicklung	133

7.2	Simulationsverifikation durch experimentelle Ergebnisse . . .	137
7.2.1	Ergebnisvergleich für verschiedene Taktzeiten . . .	138
7.3	Beurteilung des Strömungssituation	145
7.4	Analyse des Temperaturfeldes	148
7.5	Einflussfaktoren des Verdichtungsprozesses	151
7.5.1	Verdichtungszeit	151
7.5.2	Kompressionsraumgeometrie	153
7.5.3	Verdichtungswirkungsgrad	156
7.5.4	Ergebnisvergleich mit dem Wissensstand	157
8	Projektierung einer Stirlingmaschine mit Flüssigkeitskolben	161
8.1	Aufbau und Prozessablauf	162
8.2	Darstellung der Einzelkomponenten	167
8.2.1	Konstruktiver Aufbau der Arbeitszylinder	167
8.2.2	Innerer Wärmeübertrager	170
8.2.3	Abgas- und Kühlwasserwärmeübertrager	171
8.2.4	Förderpumpen	173
8.2.5	Einbauventile und Rohrnetz	175
8.2.6	Verschiebezylinder	178
8.2.7	Sintermetallventil	181
8.3	Auswahl und Eigenschaften der Systemfluide	182
9	Berechnung und Energetische Bewertung	189
9.1	Modellierung der Arbeitszylinder	190
9.2	Ablauf des Berechnungsprozesses	192
9.2.1	Isotherme Prozessschritte	193
9.2.2	Isochore Prozessschritte	203
9.2.3	Druckverlustbetrachtung	207
9.3	Bilanzierungs- und Anlagenkennwerte	209
9.4	Integration der Wärmeübertragungsmodelle	211
9.5	Verifikationprozess des Berechnungsmodells	217
9.6	Parameterstudien zur Maschinenoptimierung	218
9.6.1	Einfluss der Kompressionsraumgeometrie	219
9.6.2	Vergößerung der Wärmeübertragerfläche durch Innenrohrrippen	221

9.6.3	Einfluss von Abgas- und Kühlwasserwärmeübertrager	225
9.6.4	Schädliche Wirkung des Ölfilms	226
9.6.5	Auswirkung des Verdrängungsverhältnisses	228
9.7	Ermittlung einer optimalen Anlagenkonfiguration	229
9.8	Verluste der optimalen Anlagenkonfiguration	232
10	Zusammenfassung	239
11	Literaturverzeichnis	245
12	Symbolverzeichnis	257
13	Abkürzungsverzeichnis	261
14	Indexverzeichnis	263
A	Anhang	265
A.1	Übersicht der Automatisierungsoberfläche	265
A.2	Benutzeroberfläche Gesamtsimulation	266
A.3	Lebenslauf	267