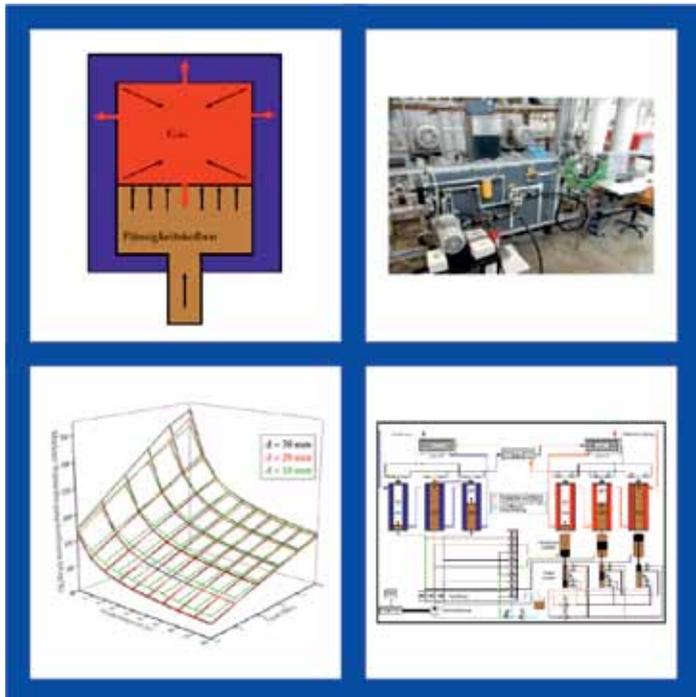


Magnus Schober

## 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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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/m<sup>2</sup>/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

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Die Stirlingmaschine</b>	<b>5</b>
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
<b>3 Wissensstand zu Flüssigkeitskolbenstirlingmaschinen</b>	<b>45</b>
<b>4 Theoretische Grundlagen zu Flüssigkeitskolben</b>	<b>59</b>
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
<b>5</b>	<b>Versuchseinrichtung und Messtechnik</b>	<b>75</b>
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
<b>6</b>	<b>Numerische Strömungssimulation</b>	<b>107</b>
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
<b>7</b>	<b>Numerische und experimentelle Analyse des Kompressionsraums</b>	<b>131</b>
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
<b>8</b>	<b>Projektierung einer Stirlingmaschine mit Flüssigkeitskolben</b>	<b>161</b>
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
<b>9</b>	<b>Berechnung und Energetische Bewertung</b>	<b>189</b>
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	Vergrößerung 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
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>239</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>245</b>
<b>12</b>	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>257</b>
<b>13</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>261</b>
<b>14</b>	<b>Indexverzeichnis</b>	<b>263</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>265</b>
A.1	Übersicht der Automatisierungsoberfläche . . . . .	265
A.2	Benutzeroberfläche Gesamtsimulation . . . . .	266
A.3	Lebenslauf . . . . .	267