



Fortschritte in der Maschinenkonstruktion

herausgegeben von D. Bartel und K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

M. Sc. Markus Kroneis

**Methodenentwicklung zur  
thermo-elastohydrodynamischen  
Simulation am Stellkolben einer  
Axialkolbenmaschine**

Januar 2023  
Lehrstuhl für Maschinenelemente  
und Tribologie

# **Methodenentwicklung zur thermo-elastohydrodynamischen Simulation am Stellkolben einer Axialkolbenmaschine**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von M. Sc. Markus Kroneis

geb. am 27.07.1990 in Speyer

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel

Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze

Promotionskolloquium am 13.12.2022



Fortschritte in der Maschinenkonstruktion

Band 1/2023

**Markus Kroneis**

**Methodenentwicklung zur thermoelasto-  
hydrodynamischen Simulation am Stellkolben  
einer Axialkolbenmaschine**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8917-2

ISSN 1615-7192

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Industriepromovend in der Abteilung für Produktentwicklung der Bosch Rexroth AG sowie in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Mein besonderer Dank gilt Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Bartel, Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Tribologie, für die wissenschaftliche Betreuung, den stets konstruktiven und bereichernden Austausch sowie die hilfreiche Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze, Leiter des Instituts für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen an der Technischen Universität Clausthal, bedanke ich mich für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens. Ebenfalls sei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Rottengruber für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gedankt.

Herrn Dr.-Ing. L. Bobach, wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie, danke ich für die ständige Hilfsbereitschaft hinsichtlich Numerik und Tribologie.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn G. Mohn, Abteilungsleiter der Produktentwicklung, für die Ermöglichung der Industriepromotion und die vielseitige Unterstützung bedanken. Herrn R. Scheerer danke ich besonders für die hervorragende Betreuung der Arbeit. Die zahlreichen Fachgespräche, die persönliche Unterstützung und die motivierenden Worte haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Meinem Doktorandenkollegen B. Yarahmadi danke ich für sein offenes Ohr, auch über die Arbeit hinausgehend. Für den Austausch bezüglich der Simulation danke ich Herrn S. Haug und Herrn Z. Gradwohl. Den Kollegen Dr. D. Breuer, K. Bauckhage, Dr. U. Bräckelmann, A. Apperger und E. Leipersberger sei für die Beiträge während der Prüfstandskonstruktion gedankt. Herrn P. Wrzalik und Herrn T. Gekle danke ich stellvertretend für die Unterstützung beim Prüfstands Aufbau.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin Natalie, meiner Familie und besonders bei meinen Eltern Maria und Reinhold bedanken, die mich zu jeder Zeit großartig unterstützt haben. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.



## Kurzfassung

In Schrägscheiben-Axialkolbenmaschinen stellt der hydrodynamisch geschmierte Kontakt zwischen dem Stellkolben und der Stellkammer ein hoch belastetes tribologisches System dar. Aufgrund der sehr geringen Relativgeschwindigkeit und dem ständigen Wechsel der Bewegungsrichtung ist eine vollständig hydrodynamisch geschmierte Kolbenführung nicht realisierbar. Stattdessen treten Festkörpertraganteile auf, welche an der Bauteiloberfläche Reibung und gegebenenfalls Verschleiß verursachen können.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine tribologische Berechnungsmethode für den Kontakt zwischen dem Stellkolben und der Stellkammer und liefert damit einen wichtigen Beitrag für die konstruktive Auslegung der Kolben/Zylinder-Paarung. Die entwickelte Simulation beinhaltet eine thermo-elastohydrodynamische Berechnung des Schmierspalts und eine Mehrkörpersimulation des Stellsystems. Für den Druckaufbau im Schmierpalt wird die verallgemeinerte Reynolds'sche Differentialgleichung für kompressible und laminare Strömungen mit nicht-Newton'schen Fluidverhalten sowie variabler Dichte und dynamischer Viskosität verwendet. Die Berechnung der Mehrkörperdynamik basiert auf dem Newton-Euler-Verfahren und bildet die Starrkörperbewegung des Stellsystems ab. Die Kopplung der thermo-elastohydrodynamischen Berechnung mit der Mehrkörpersimulation erfolgt durch ein Berechnungsverfahren mit beschleunigten Rechenzeiten.

Zur Validierung der Simulation wird ein neuartiger Komponentenprüfstand entwickelt. Dieser ermöglicht die Reibkraftmessung zwischen Stellkolben und Stellkammer und dient zur Erfassung der räumlichen Stellkolbenlage. Für den Vergleich von Versuch und Simulation werden verschiedene Parametervariationen durchgeführt. Hierbei werden der Simulation die realen Oberflächenkonturen übergeben. Die analysierten Wirkzusammenhänge zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und dem Versuch.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse. Zudem wird ein Ausblick gegeben, welcher die Weiterentwicklung der Simulationsmethode und deren Anwendung auf weitere Kolben/Zylinder-Kontakte beschreibt.

---



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Stand der Forschung.....	5
1.2.1 Berechnungsgrundlagen tribologischer Systeme.....	5
1.2.2 Kolben/Zylinder-Kontakt in Axialkolbenmaschinen.....	11
1.2.2.1 Forschungsarbeiten zur Simulation .....	12
1.2.2.2 Forschungsarbeiten zum Prüfstandsaufbau .....	15
1.3 Ziel und Inhalt der Arbeit.....	17
<b>2 Simulationsmodell .....</b>	<b>19</b>
2.1 Mehrkörpersimulation.....	20
2.1.1 Kinematik und Kinetik des Stellsystems .....	20
2.1.2 Kräfte und Momente .....	23
2.1.3 Bewegungsgleichung und Freiheitsgrade .....	33
2.2 Thermo-elastohydrodynamische Simulation .....	39
2.2.1 Elastohydrodynamik .....	39
2.2.1.1 Spalthöhenverteilung und Geschwindigkeiten.....	39
2.2.1.2 Elastische Verformung .....	44
2.2.1.3 Reynolds'sche Differentialgleichung .....	48
2.2.1.4 Schmierstoffeigenschaften .....	50
2.2.2 Mischreibungmodell.....	53
2.2.3 Mikrohydrodynamik .....	55
2.2.4 Temperaturberechnung und thermische Verformung.....	62

2.3	Kopplung der Mehrkörper- und TEHD-Simulation.....	65
2.3.1	Vorsimulation zur Berechnung der externen Kolbenbelastung.....	66
2.3.2	Gekoppelte TEHD-Simulation des Kolben/Zylinder-Kontakts.....	70
<b>3</b>	<b>Prüfstandsversuche .....</b>	<b>76</b>
3.1	Mechanischer Aufbau und Funktionsprinzip .....	77
3.2	Hydraulischer Aufbau .....	80
3.3	Verifizierung der Reibkraftmessung .....	81
3.4	Versuchsparameter und Versuchsmatrix.....	84
3.5	Versuchsergebnisse .....	88
<b>4</b>	<b>Validierung des Simulationsmodells.....</b>	<b>95</b>
4.1	Versuchsspezifische Simulationsrandbedingungen .....	95
4.1.1	Oberflächenkonturen der Mantelflächen .....	96
4.1.2	Festkörperkontaktdruckkurve und Flussfaktoren .....	98
4.1.3	Grenzreibungszahl .....	101
4.2	Ergebnisse der Simulation.....	102
4.3	Vergleich von Versuch und Simulation .....	111
4.3.1	Temperaturvariation.....	111
4.3.2	Druckvariation .....	115
4.3.3	Positionsvariation.....	117
4.3.4	Frequenzvariation .....	119
4.3.5	Amplitudenvariation .....	122
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>124</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>128</b>