

Einfluss äußerer Lasten auf das Stabilitätsverhalten von Gleitlagerungen eines PKW-Abgasturboladers

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
DIPL.-ING. SHUO LI
aus Ürümqi (China)

genehmigt von der Fakultät für
Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
05. Oktober 2016

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 23

Shuo Li

**Einfluss äußerer Lasten auf das Stabilitätsverhalten
von Gleitlagerungen eines PKW-Abgasturboladers**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2016

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze

2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4875-9

ISSN 1611-8154

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Industrie-Promovend bei der Continental Automotive GmbH am Standort Regensburg, Abteilung Turbolader Simulation.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. H. Schwarze, dem Leiter des Institutes für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal, für die Übernahme des Hauptreferates und die fortwährend großzügige Unterstützung und Betreuung. Herrn Professor Dr.-Ing. A. Rienäcker, dem Leiter des Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik, möchte ich sehr danken für das große Interesse an dieser Arbeit, die Übernahme des Korreferates sowie für die detaillierte fachliche Beratung und die Anregungen zu Verbesserungen der Arbeit.

Herrn Dr.-Ing. S. Tuzcu, dem firmeninternen Betreuer, und Herrn Dr.-Ing. M. Klaus, dem Leiter der Abteilung Turbolader Simulation der Continental Automotive GmbH, danke ich sehr herzlich für die fachliche Begleitung, die konstruktiven Vorschläge bei der Modellentwicklung und das sorgfältige Korrekturlesen der Dissertation.

Bei Teamkollegen Michael Deml, Michael Baldauf sowie allen Mitarbeitern der Regensburger und Clausthaler Arbeitsgruppe bedanke ich mich ebenfalls für das gute Arbeitsklima und die gute Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren.

Meinem Freundeskreis aus Regensburg und Karlsruhe möchte ich für die stetige Ablenkung und den Ausgleich danken, ohne sie wäre die Durchführung der Arbeit nicht so unbeschwert möglich gewesen.

Meinen Eltern möchte ich danken, die mich während meinem gesamten Studium unterstützt und mir daher die grundlegenden Möglichkeiten für meinen Werdegang gegeben haben. Meiner lieben Frau Ye He ist die vorliegende Arbeit gewidmet.

Regensburg, Oktober 2016

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	v
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Abgasturbolader	3
2.2 Lagerung von Abgasturboladern	4
2.2.1 Radiallager	4
2.2.2 Axiallagerung	7
2.3 Hydrodynamik	9
2.3.1 Reynoldssche Differentialgleichung	9
2.3.2 Randbedingungen	11
2.3.3 Sommerfeldzahl	13
2.3.4 Stribeck-Kurve	15
2.4 Rotordynamik	16
2.4.1 Newtonsche Bewegungsgleichung	17
2.4.2 Reduktion	17
2.4.3 Modaltransformation im Zustandsraum	22
2.4.4 Modale Parameter	22
2.4.5 Modalanalyse	24
2.4.6 Synchrone und Subsynchrone Schwingungen	26
3 Stand der Forschung	31
3.1 Modellbildung	31
3.1.1 Rotor	31
3.1.2 Radiallager	32
3.1.3 Axiallager	36
3.2 Einflüsse auf die Rotordynamik	37
3.2.1 Unwucht	37
3.2.2 Buchsendrehzahl	38
3.2.3 Schmierstoff	38

3.2.4	Lagergeometrie	39
3.2.5	Radgeometrie	40
3.2.6	Axiallager	40
4	Methodik und Modellentwicklung	41
4.1	Rotormodell	42
4.1.1	Zeitliche Integration	42
4.1.2	Verschiebungs- und Kraftvektor	43
4.1.3	Systemmatrizen	44
4.1.4	Modifizierte Systemmatrizen	48
4.1.5	Verifikation und Validierung des Rotormodells	49
4.2	Radiallagermodell	55
4.2.1	Impedance Methode	55
4.2.2	Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten	58
4.2.3	Festkörperkontaktmodell	63
4.2.4	Modellerweiterung auf Schwimmbuchsenlager	64
4.3	Axiallagermodell	66
4.3.1	Analytische Ansätze	67
4.3.2	Mechanische Kopplung mit ATL-Rotormodell	69
5	Verifikation und Validierung des Modells	71
5.1	Laval-Rotor	71
5.1.1	Modellparameter	71
5.1.2	Verifikation des RoDyS-Schwimmbuchsenlagermodelles	72
5.2	Axiallagermessung	74
5.2.1	Prüfstand	74
5.2.2	Validierung des RoDyS-Axiallagermodelles	74
5.3	Reibleistungsmessung	77
5.3.1	Prüfstand	77
5.3.2	Nachbildung des Prüfstands	79
5.3.3	Validierung des RoDyS-Lagermodelles	80
5.4	Wellenbahnmessung	83
5.4.1	Vorstudie: Einfluss von Modellparameter	84
5.4.2	ATL1 mit Baugröße SK1	90
5.4.3	ATL2 mit Baugröße SK2	95
5.4.4	ATL3 mit Baugröße SK1	98

6	Simulationsergebnisse	101
6.1	Ausgangsrechnung	101
6.2	Einfluss der Strömungskraft	103
6.2.1	Einfluss der Axialkraft	103
6.2.2	Validierung am Prüfstand	113
6.2.3	Einfluss der Radialkraft	117
6.2.4	Drehzahlabhängige Axial- und Radialkraft	128
6.3	Einfluss der Unwucht	129
6.4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	132
7	Zusammenfassung	135
	Literaturverzeichnis	139
	Anhang	
A	Mathematische Umformungen	151
A.1	Timoshenko Balkenelement	151
A.2	Balkenelement in Axial- und Torsionschwingung	154
A.3	Details des Reglerentwurfs für Import der gemessenen Wellenbahn . . .	154
A.3.1	Reduziertes MISO ¹ -Zustandsraummodell	154
A.3.2	PIDT1-Regler	155
A.3.3	PT1-Regler als Vorfilter	155
A.4	Temperaturabhängige Viskosität	156
A.5	Temperaturabhängiges Lagerspiel	157

¹Multi Input-Single Output