

Einfluss thermischer und mechanischer Effekte auf das Stabilitätsverhalten von ATL-Gleitlagerungen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für
Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der
Technischen Universität Clausthal

vorgelegt von:

Jens Diebener
aus Hamm (Westf.)

Datum der mündlichen Prüfung:
29 Juli 2015

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise
die der Volkswagen AG.

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 21

Jens Diebener

**Einfluss thermischer und mechanischer Effekte auf
das Stabilitätsverhalten von ATL-Gleitlagerungen**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3967-2

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Doktorand der Volkswagen AG und Gastwissenschaftler am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze, für die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation, die fachliche Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Pischinger danke ich herzlich für das Interesse an dieser Arbeit und die bereitwillige Übernahme des Korreferats. Für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Esderts bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. W. Kujawski, der durch seine unermüdliche Unterstützung in allen fachlichen und auch persönlichen Angelegenheiten den Grundstein für den Erfolg dieser Arbeit gelegt hat. Außerdem danke ich den Herren Dr.-Ing. T. Hagemann, Dr.-Ing. D. Porzig, Dipl.-Math. C. Kraft, Dr.-Ing. M. Pavlov, Dipl.-Ing. M. Findeisen, Dipl.-Ing. (FH) A. Bollmann und Dipl.-Ing. (FH) C. Ortmann, die mich in besonderem Maße fachlich unterstützten. Des Weiteren gedenke ich meines Freundes und Kollegen, Herrn M. Sc. L. Dhri[†].

Bei Herrn Dr.-Ing. B. Lär möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, diese Arbeit im Rahmen des Doktorandenprogramms der Volkswagen AG bearbeiten zu dürfen, sowie für die Chancen, die sich hieraus ergaben. Weiterhin gilt mein Dank allen Kollegen der Volkswagen AG, sowie den aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Institutes, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir durch uneingeschränkte persönliche und finanzielle Unterstützung meine Ausbildung und die Promotion ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis, Indizes und Abkürzungen	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Stand der Technik	2
2 Theorie und Grundlagen	5
2.1 Theorie der Mehrkörpersimulation	5
2.1.1 Bewegungen des ATL-Rotors im Raum	5
2.1.2 Impulssatz, Drallsatz und Bewegungsgleichung	8
2.1.3 Gyroskopische Effekte	9
2.1.4 Flexible Körper in der MKS	10
2.2 Hydrodynamische Schmierungstheorie	17
2.2.1 Hydrodynamischer Druckaufbau	17
2.2.2 Reibung im Schmierfilm	21
2.2.3 Gleitlagerinstabilitäten: Halbfrequenz-Wirbel, „Oil-Whirl“ und „Oil-Whip“	24
2.3 Rotordynamik	25
2.3.1 Laval-Läufer in Gleitlagern	25
2.3.2 Laval-Läufer in Schwimmbuchsenslagern	27
3 Gleitlager in der Mehrkörpersimulation	33
3.1 Die Reynold'sche Differentialgleichung	33

3.1.1	Randbedingungen in der Reynold'sche Differentialgleichung - Kavi- tation	35
3.2	Numerische Umsetzung der Differentialgleichung	36
3.3	Einbindung der Hydrodynamik in die Mehrkörpersimulation	43
4	Versuchstechnik	45
4.1	Versuchsträger	45
4.2	Messverfahren	48
4.3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	50
4.3.1	ATL-Dynamik-Prüfstand	50
4.3.2	Heißgas-Prüfstand	52
4.3.3	Methodik der Auswertung und Darstellung	53
5	Modellbildung	57
5.1	Mechanisches Ersatzmodell	57
5.1.1	Modellierung des ATL-Rotors	57
5.1.2	Modellierung des ATL-Gesamtsystems	59
5.2	Gleitlagermodell	62
5.2.1	Verkantung in den Gleitlagern	63
5.2.2	360° Nuten	63
5.3	Thermische Effekte in der Lagerung	65
5.3.1	Konstante Lagertemperatur	65
5.3.2	Abbildung dynamischer Lagertemperaturen - Modell 3	68
6	Vergleich von Messung und Simulation	71
6.1	Versuchsträger A	71
6.2	Versuchsträger B	72
6.3	Versuchsträger C	73
6.4	Analyse einer Hochlaufsimulation	75
7	Sensitivitätsstudien	81
7.1	Verkantung in den Lagerstellen	82
7.2	Unwucht	83
7.3	Lagertemperaturen - thermische Randbedingungen	88
7.4	Verhältnis der Lagerspiele zwischen innerem und äußerem Schmierfilm	92
8	Zusammenfassung und Ausblick	97
8.1	Zusammenfassung	97

8.2 Ausblick	99
Literaturverzeichnis	101