

**Ölzuführungseinfluss bei schnell laufenden, hoch
belasteten Radialgleitlagern unter Berücksichtigung
des Lagerdeformationsverhaltens**

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Thomas Hagemann
aus Alfeld (Leine)

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

Tag der mündlichen Prüfung
16.12.2011

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Brenner

Hauptberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. J. Glienicke

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 17

Thomas Hagemann

**Ölzuführungseinfluss bei schnell laufenden, hoch
belasteten Radialgleitlagern unter Berücksichtigung
des Lagerdeformationsverhaltens**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2012

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., 2011

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0800-5

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

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze gilt mein besonderer Dank für die interessante Aufgabenstellung, die stets motivierenden Diskussionen und Gespräche, sowie das große, mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Glienicke danke ich neben der Übernahme des Korreferates herzlich für das große Interesse an meiner Arbeit, die vielen intensiven fachlichen Diskussionen und die Unterstützung während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Brenner danke ich für den Vorsitz der Prüfungskommission und die damit verbundenen Mühen.

Weiterhin gilt mein Dank allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften des Institutes, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Allen voran bin ich Herrn Dipl.-Ing. M. Müller, Herrn Dipl.-Ing. D. Porzig sowie Herrn Dr.-Ing. Ü. Mermertas zum Dank verpflichtet. Allen übrigen Mitarbeitern des Institutes danke ich für das hervorragende Arbeitsklima.

Diese Arbeit beinhaltet wesentliche Ergebnisse der Forschungsvorhaben „Verbesserte Radialgleitlagerberechnung“ und „Gleitlager-Lebensdauer“, die von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. finanziell gefördert wurden. Den Mitgliedern des betreuenden Arbeitskreises Gleitlager der FVA und der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) unter Leitung von Herrn Dipl.-Ing. A. Schmitz und Herrn Dipl.-Ing. A. Schubert danke ich für die wertvollen Anregungen im Rahmen zahlreicher Diskussionen.

Ein ganz besonders lieber Dank gilt meinen Eltern für die finanzielle Unterstützung während meiner Ausbildung und meiner Frau Andrea für das Verständnis und den Rückhalt bei meiner Tätigkeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.3 Zielsetzung und Lösungsweg	10
2 Theoretische Beschreibung des Lagermodells	14
2.1 Schmierspaltströmung und Druckverteilung	14
2.1.1 Reynolds'sche Differenzialgleichung	14
2.1.2 Verallgemeinerung der Reynolds'schen Differenzialgleichung	17
2.1.3 Randbedingungen für die Lösung der verallgemeinerten Reynolds'schen Differenzialgleichung	22
2.1.4 Implizite Berechnung des Turbulenzeinflusses	23
2.2 Thermisches Lagermodell	25
2.2.1 Energiegleichung für den Schmierfilm	25
2.2.2 Wärmeleitungsgleichungen für die Welle und die Segmente	28
2.2.3 Randbedingungen des energetischen Lagermodells	29
2.3 Geometrische Beschreibung des Lagers	29
2.4 Modellierung des instationären Lagerbetriebsverhaltens	31
2.4.1 Einstellung der JFO-Randbedingungen auf Basis einer Volumenstrombilanz	33
2.4.2 Beschreibung der instationären Gaskavitation durch ein Zweiphasenmodell	36
2.5 Verfahren zur Berechnung der instationären Wellenverlagerung	38
2.5.1 Dynamische Verlagerungsberechnung durch Lösung der Bewegungsgleichungen	38
2.5.2 Quasistationäre Gleichgewichtssiteration	39

3	Ölzführungsmodell.....	42
3.1	Bestimmung der Schmierstoffmengen.....	44
3.2	Modell für die thermische Taschenmischung	46
4	Lagerkennwerte	56
5	Radialgleitlagerberechnungsprogramm COMBROS	59
5.1	Grundstruktur des Programms COMBROS	60
5.2	Bestimmung des mechanischen Gleichgewichtes und des Strömungszustandes.....	63
5.3	Bestimmung des thermischen Gleichgewichtes im Lager	65
6	Verifikation des Berechnungsprogramms COMBROS und Identifikation von Sensitivitäten unterschiedlicher Modellierungen	67
6.1	Vergleich mit dem Radialgleitlagerberechnungsprogramm ALP3T 4.3.1	69
6.2	Einfluss der Schmierstoffzuführung bei stationären Betriebsbedingungen.....	72
6.3	Instationäre Betriebsbedingungen	80
6.3.1	Verifikation der nichtlinearen dynamischen Berechnung anhand eines Kippsegmentlagers	82
6.4	Sensitivitätsanalyse zur Identifikation des Einflusses der erweiterten Modellierung	85
6.4.1	Schmierstoffmengen	85
6.4.2	Kennwerte der Schwingungsrechnung.....	87
6.4.3	Reibkraft.....	90
6.4.4	Hydrostatik und Hybridbetrieb	93
6.5	Bewertung der betrachteten Verfahren zur Berechnung des instationären Lagerbetriebsverhaltens.....	95
7	Untersuchungen bei extremen Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung des Lagerdeformationsverhaltens.....	97

7.1	Bestimmung der thermomechanischen Deformationen und ihre Berücksichtigung bei der Berechnung des Lagerbetriebsverhaltens	99
7.2	Analyse der thermischen Verhältnisse eines kreiszylindrischen Lagers bei hoher dynamischer Beanspruchung	106
7.3	Beschreibung des Betriebsverhaltens eines Kippsegmentlagers für Großturbinenanwendungen	111
7.3.1	Vergleich der gemessenen und berechneten Lagerbetriebseigenschaften	112
7.3.2	Näherungsweise Beschreibung der Deformationen	119
7.3.3	Verifikation der näherungsweisen Beschreibung der Deformationen	124
7.3.4	Analyse des Schmierstoffzuführungseinflusses	129
7.3.5	Mögliche Ursachen für Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Betriebsverhalten	131
7.4	Einfluss der Deformationen auf das Betriebsverhalten eines Kippsegmentlagers mittlerer Baugröße	134
8	Zusammenfassung	137
9	Literaturverzeichnis	141