

Axialer Ölfluss durch Wälzlager unterschiedlicher Bauformen

D i s s e r t a t i o n
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Frank Seebode
aus Stade

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

Tag der mündlichen Prüfung
1. Juni 2011

Hauptberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. G. Poll

D 104

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 15

Frank Seebode

**Axialer Ölfluss durch Wälzlager
unterschiedlicher Bauformen**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0356-7

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 entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Schwarze für die Betreuung meiner Dissertation. Für alle wissenschaftlichen Arbeiten am Institut gewährte er mir größtmöglichen Freiraum, gleichzeitig aber auch die notwendige Hilfe und Unterstützung.

Ich danke sehr herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Poll für die gute Zusammenarbeit im Projekt Leistungsdichte Wälzlager, sein Interesse an dieser Arbeit, die bereitwillige Übernahme des Korreferates und die damit verbundene Arbeit.

Diese Arbeit enthält viele experimentelle Untersuchungen. Mein Dank gilt besonders allen Mitarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften für ihre große Hilfe bei Aufbau und Durchführung dieser Versuche.

Ein herzlicher Dank geht an die Institutswerkstatt um Herrn Eisfelder für sehr gute Arbeiten und noch bessere Ratschläge sowie an das Sekretariat und die IT für die großartige Unterstützung.

Ich möchte mich sehr bei den Institutsmitarbeitern für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen sowie die aktive Unterstützung bedanken. Vielen Dank, liebe Kollegen, für das hervorragende Institutsklima!

Zum Dank verpflichtet bin ich Herrn Weber der Firma Reintjes sowie dem Arbeitskreis Wälzlager der FVA für die konstruktive Zusammenarbeit.

Ganz herzlich danke ich meiner Frau für ihren Beistand zu jeder Zeit sowie meinen Eltern und meiner Familie, die mir durch ihre uneingeschränkte Unterstützung das Studium und die Promotion ermöglicht haben.

Clausthal-Zellerfeld im Februar 2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	4
2.1 Schmierung von Wälzlagern	4
2.2 Erhöhung des Bewegungswiderstandes durch Planscharbeit	9
2.3 Replenishment / zu langsames Nachfließen des Schmierstoffes	9
2.4 Reservoirform	11
2.5 Widerstandsverhalten	12
3 Prüfstand	14
3.1 Prüfstandsanforderungen	14
3.2 Prüfstandsaufbau	14
3.3 Prüfkopf	16
3.4 Durchflussmessung	17
3.5 Überlaufgestaltung	18
3.6 Prüfkopf für Planschverluste und Druckmessungen	20
3.7 Sensorik und Messprogramm	22
4 Experimentelle Ergebnisse	24
4.1 Versuchsplanung	24
4.2 Zylinderrollenlager	28
4.2.1 Überlaufgestaltung	30
4.2.2 Maximal erreichbare Drehzahl und Planschverluste am Zylinderrollenlager	33
4.2.3 Einfluss von Bordgeometrie und Käfigbauform	36
4.2.4 Einfluss der Lagerbreite	38
4.2.5 Kennfeldversuche	38
4.3 Rillenkugellager	43
4.3.1 Maximal erreichbare Drehzahl und Planschverluste im Rillenkugellager	46
4.3.2 Kennfeldversuche	48
4.4 Schrägkugellager	51
4.4.1 Versuche mit zwei Schrägkugellagern in X-Anordnung	53
4.4.2 Kennfeldversuche	54

4.5	Vierpunktlager.....	57
4.5.1	Kombination Vierpunktlager/Zylinderrollenlager.....	58
4.5.2	Vergleich mit Messungen am Getriebeprototyp.....	60
4.5.3	Kennfeldversuche.....	62
4.6	Pendelrollenlager.....	64
4.6.1	Kennfeldversuche.....	65
4.7	Kegelrollenlager.....	68
4.7.1	Einfluss der Lagerbreite.....	69
4.7.2	Kennfeldversuche.....	70
5	CFD-Simulation.....	73
5.1	Grundlagen.....	73
5.1.1	Grundgleichungen.....	73
5.1.2	Lösung der Erhaltungsgleichungen.....	74
5.1.3	Lösung der Zweiphasenströmung.....	76
5.1.4	Generierung des Rechengitters.....	76
5.2	Ergebnisse der Strömungssimulationen.....	78
5.2.1	Volumenstrom.....	78
5.2.2	Ölverteilung.....	79
5.2.3	Drehzahlkennlinie.....	80
5.3	Ergebnisdiskussion.....	82
6	Technisch – mathematisches Modell.....	83
6.1	Wälzlagerkammern.....	83
6.2	Wellenschragstellung.....	86
6.3	Durchströmter Querschnitt.....	88
6.4	Berechnung Rohrreibungszahl.....	90
6.5	Berechnung Druckverlust.....	90
6.6	Durchflussberechnung.....	91
6.7	Korrektur der Reservoirform.....	92
6.8	Reservoirschragstellung und Ölringausbildung.....	93
6.9	Programmablauf.....	96
6.10	Rechenergebnisse.....	97
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	101
8	Literatur.....	104
A.	Anhänge.....	108

Symbolverzeichnis

Großbuchstaben

A, A_K	Oberfläche eines Kontrollvolumens	$[\text{mm}^2]$
B, B_{ZU}	Lagerbreite, Breite des Ölzuführraums	$[\text{mm}]$
D	Lochkreisdurchmesser Überlaufbohrung	$[\text{mm}]$
D_R	Innendurchmesser des Ölzuführraums	$[\text{mm}]$
D_1, D_2	Innendurchmesser des Lageraußenrings, des Käfigs	$[\text{mm}]$
F	durchströmte Gesamtfläche	$[\text{mm}^2]$
F_A, F_B	äußere, innere Lagerkammerfläche	$[\text{mm}^2]$
$F_{A_{\text{bez}}}$	Anteil des benetzten Querschnitts äußere Lagerkammern	$[\]$
$F_{B_{\text{bez}}}$	Anteil des benetzten Querschnitts innere Lagerkammern	$[\]$
F_G	Gewichtskraft	$[\text{N}]$
F_{GN}	Normalanteil der Gewichtskraft	$[\text{N}]$
$F_{R_{\text{Ages}}}, F_{R_{\text{Bges}}}$	äußere, innere Ringfläche	$[\text{mm}^2]$
$F_{R_{\text{SA}}}, F_{R_{\text{SB}}}$	Fläche der benetzten äußeren, inneren Ringsegmente	$[\text{mm}^2]$
F_Z	Zentrifugalkraft	$[\text{N}]$
H_{kor}	korrigierte Überlaufhöhe	$[\text{mm}]$
$H_{\text{kor,bWQ}}$	korrigierte Höhe des benetzten Wälzlagerquerschnitts	$[\text{mm}]$
$H_{\text{Ü}}$	Überlaufhöhe	$[\text{mm}]$
H_{φ}	Höhe aus Wellenschrägstellung	$[\text{mm}]$
$H_{\varphi,bWQ}$	Anhebehöhe benetzter Querschnitt aus Wellenschrägstellung	$[\text{mm}]$
ΔH_V	Verlusthöhe	$[\text{mm}]$
\bar{T}	Einheitstensor	$[\]$
KOR	Korrekturfaktor Ölingausbildung	$[\]$
KSW	Korrekturfaktor Wellenschrägstellung	$[\]$
P/C	relative Belastung	$[\]$
Q	Volumetrischer Quellterm	$[\]$
Q_{Mx}, Q_{My}, Q_{Mz}	volumetrischer Quellterm in x-, y-, z-Richtung	$[\]$
R	Innenradius des Ölzuführraums	$[\text{mm}]$
Re	Reynoldszahl	$[\]$
U_A, U_B	Umfang äußere, innere Lagerkammer	$[\text{mm}]$
V	Kontrollvolumen	$[\text{mm}^3]$
\dot{V}	axialer Ölfluss	$[\text{l}/\text{min}]$
W	dimensionslose Geschwindigkeit	$[\]$

Kleinbuchstaben

\bar{c}	Relativgeschwindigkeit im rotierenden System	[mm/s]
d	Durchmesser Überlaufbohrungen	[mm]
d_h	hydraulischer Durchmesser	[mm]
d_m	mittlerer Durchmesser	[mm]
d_{WK}	Wälzlagerkörperdurchmesser	[mm]
d_1, d_2	Außendurchmesser des Käfigs	[mm]
f	Gesamtfluss	[kg/mm ² s]
g	Ortsfaktor	[mm/s ²]
h_1	Höhe der Mitte des unteren Wälzkörpers	[mm]
h_2	Höhe der Oberkante Käfig an der Stelle unterer Wälzkörper	[mm]
h_3	Höhe der Oberkante des unteren Wälzkörpers	[mm]
m	Masse Volumenelement	[kg]
n	Drehzahl	[min ⁻¹]
\bar{n}	Normaleneinheitsvektor	[]
$n_{dWKA,B}$	Anzahl der durchflossenen äußeren, inneren Lagerkammern	[]
n_{Ring}	Wellendrehzahl, ab der ein vollständiger Öling vorliegt	[min ⁻¹]
n_{WK}	Anzahl Wälzkörper	[]
$n \cdot d_m$	Drehzahlkennwert	[mm/min]
p	Druck	[Pas]
Δp_v	Strömungsverlust	[Pas]
r_i, r_a	Radius der Innen-, Außenlaufbahn des Wälzkörpers	[mm]
t	Zeit	[s]
Δt	Zeitschrittweite	[s]
u, v, w	Geschwindigkeitskomponente in x-, y-, z-Richtung	[mm/s]
\vec{u}	Geschwindigkeitsvektor	[mm/s]
v	Strömungsgeschwindigkeit	[mm/s]
\vec{x}	Ortsvektor im Relativsystem	[mm]
x, y, z	Achsenkoordinaten	[mm]
Δx	Ortschrittweite	[mm]
Δ	Laplace-Operator	[]
∇	Nabla-Operator	[]

Griechische Buchstaben

α	Volumenanteil eines Fluids in einem Kontrollvolumen	[]
α_k	Formfaktor	[]
α_1	Ablösungswinkel	[rad]
β	skalierte Reynoldszahl	[]
ε_F	Abbruchschranke	[]
ζ	Widerstandskennwert	[]
η	dynamische Ölviskosität	[Pas]
λ	Rohrreibungszahl	[]
$\bar{\vartheta}$	mittlere Öltemperatur	[°C]
ϑ_{ab}	Ölabführtemperatur	[°C]
ϑ_{zu}	Ölzuführtemperatur	[°C]
λ_f	Füllungsgrad	[]
ν	kinematische Ölviskosität	[mm ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
$\bar{\tau}$	viskoser Spannungstensor	[]
ϕ	Geschwindigkeitskomponente	[mm/s]
φ	Wellenschrägstellungswinkel	[rad]
$\omega, \bar{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]
ω_{RS}	Winkelgeschwindigkeit des Wälzkörpersatzes	[rad/s]
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$	Winkel am Wälzkörper	[rad]
$\eta, \theta, \kappa, \tau$	Winkel am Ölreservoir	[rad]

Abkürzungen

CFD	C omputational F luid D ynamics, numerische Strömungsmechanik
EHD	E lastohydrodynamik
FVM	F inite- V olumen- M ethode
QUICK	Q uadratic Interpolation for C onvective K inematics
SIMPLE	S emi- I mplicit M ethod for P ressure L inked E quations
VOM	V olume- O f- F luid
KeRoLa	Kegelrollenlager
PeRoLa	Pendelrollenlager
RiKuLa	Rillenkugellager
SchräKuLa	Schräggkugellager
ViePuLa	Vierpunktlager
ZyRoLa	Zylinderrollenlager