

**Thermisches und mechanisches Verformungsverhalten
mittig abgestützter Kreissegmentlager**

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Abdelhakim Laabid
aus Marrakech / Marokko

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

Tag der mündlichen Prüfung
30. September 2010

Prüfungsvorsitz: Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts
Hauptberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze
Mitberichterstater: Prof. Dr.-Ing. Stefan Hartmann

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 14

Abdelhakim Laabid

**Thermisches und mechanisches
Verformungsverhalten mittig
abgestützter Kreissegmentlager**

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., 2010

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 978-3-8440-0377-2

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 entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze, der mir die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit gab und durch seine Unterstützung und seine zahlreichen Ratschläge Ihren Fortgang förderte.

Herrn Prof. habil. Dr.-Ing. Stefan Hartmann danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit, seine kritische Durchsicht und die damit verbundene Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke auch dem leider inzwischen verstorbenen Prof. habil. Dr.-Ing. Hans-Jörg Barth für die intensive Betreuung meines ersten Projektes am Institut.

Ein herzliches Dankeschön an Frau Britta Hessari und Frau Ewa Türck.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Eisfelder, den Mitarbeitern der mechanischen und elektronischen Werkstatt.

Meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Hardwig Blumenthal, Dr. Ludwig Brouwer, Dipl.-Ing. Thomas Hagemann, Dipl.-Ing. Frank Seebode, Dr.-Ing. Ümit Mermertas, , Dipl.-Ing. Daniel Porzig, Dipl.-Ing. Daniel Becker, Dipl.-Ing. Xiaojiang Si und Dipl.-Ing. Peter Pfeiffer danke ich für das angenehme Arbeitsklima sowie Herrn Dipl.-Math. Christian Kraft und Dipl.-Ing. Mario Müller für die intensive Zusammenarbeit.

Mein herzlichster Dank gebührt meinen Eltern Rkia und Mohamed, dem Rest meiner Familie und Frau Helga Mai.

Diese Arbeit widme ich meiner Frau Mounia und meiner Tochter Rokaya.

Göttingen im Juli 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Stand der Forschung	2
1.3	Zielsetzung.....	9
2	Kenngößen	12
2.1	Lagerwerkstoffe.....	12
2.2	Viskosität.....	13
2.3	Dichte	15
2.4	Wärmeleitkoeffizient.....	15
2.5	Spezifische Wärmekapazität.....	16
2.6	Wärmeübergangskoeffizient.....	16
2.7	Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl.....	17
2.8	Wärmeausdehnungskoeffizient.....	18
3	Tribologisches System und physikalische Rechenräume	19
3.1	Dimensionslose Größen	22
3.2	Zweidimensionaler Spalt für die Druckgleichung.....	23
3.3	Dreidimensionale Räume für die Energiegleichungen.....	26
3.4	Finite Volumen Methode	29
4	Druckgleichung.....	31
4.1	Massenerhaltung	31
4.2	Impulserhaltung.....	32
4.3	Reynolds´sche Differenzialgleichung.....	37
4.4	Kavitation	39

4.5	Diskretisierung der Druck- und Kavitationsdifferenzialgleichung	41
5	Energiegleichung.....	52
5.1	Energiegleichung im Schmierpalt.....	52
5.2	Energiegleichung im Segment	54
5.3	Energiegleichung in der Spurscheibe	55
5.4	Randbedingungen	55
5.5	Diskretisierung der Energiedifferenzialgleichungen.....	58
5.5.1	Diskretisierung der Energiegleichung für den Schmierfilm	60
5.5.2	Diskretisierung der Energiegleichung für das Segment.....	63
5.5.3	Diskretisierung der Energiegleichung für die Spurscheibe	65
5.5.4	Randbedingungen	69
6	Verformung	72
6.1	Verformungsberechnung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode.....	74
6.2	Verformungsberechnung mit Näherungsgleichung	76
6.3	Kopplung der Druck-, Temperatur- und Verformungsberechnung.....	79
7	Aufbau von COMBROS A.....	81
8	Thermoelastisches Verformungsverhalten von Kreissegmentlagern	88
8.1	Verifikation von COMBROS A	88
8.2	Verformungsberechnungsmethoden im Vergleich	90
8.3	Thermische und elastische Verformung	99
8.4	Optimierte Näherungsgleichung	106
8.5	Vergleich von Kreis- und Kreissektorsegmentlagern	111
8.6	PTFE als Werkstoff für Kreissegmentlager	115
9	Zusammenfassung	122
10	Literaturverzeichnis.....	125

Symbolverzeichnis**Großbuchstaben**

C	[-]	Kavitationsgebiet
D	[-]	Koeffizient des diffusiven Anteils
F	[-]	Füllungsgrad
F _L	[N]	Tragkraft des Lagers
F _i	[-]	Integralterme
H	[-]	dimensionslose Schmierstalthöhe
K	[-]	Kavitationsindex
K _t	[-]	Erwärmungskennzahl
M	[Nm]	Moment
Nu	[-]	<i>Nusselt-Zahl</i>
P	[-]	Druckähnliche Variable
Pe	[-]	<i>Péclet-Zahl</i>
Pr	[-]	<i>Prandtl-Zahl</i>
Q	[m ³ /s]	Volumenstrom
Re ₀	[-]	nominelle <i>Reynolds-Zahl</i>
Re ₀ [*]	[-]	modifizierte <i>Reynolds-Zahl</i>
So	[-]	<i>Sommerfeld-Zahl</i>
T	[°C]	Temperatur

Kleinbuchstaben

c	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität
h	[m]	Schmierfilmhöhe
h_B	[m]	Bezugshöhe
h_K	[m]	Keilhöhe
$h_{\text{Stütz}}$	[m]	Stützhöhe
$k(\varphi)$	[-]	Korrekturfunktion für Verformung
l	[m]	tragende Länge des Segmentes bezogen auf den mittleren Radius des Lagers
l_K	[m]	Länge der Keifläche bezogen auf den mittleren Radius des Lagers
m	[kg]	Masse
m_d	[-]	Anzahl der Kontrollvolumina in Umfangsrichtung
n_d	[-]	Anzahl der Kontrollvolumina in radialer Richtung
n_y	[-]	Anzahl der Kontrollvolumina in axialer bzw. Höhenrichtung
p	[Pa]	ortsabhängiger Druck
\dot{q}	[m ³ /s]	Fluss
r	[m]	radiale Koordinate
r_a	[m]	Außenradius des Segmentes
r_i	[m]	Innenradius des Segmentes
r_m	[m]	Mittlerer Radius des Segmentes

s	[-]	Anzahl der dreidimensionalen Volumenelemente
t	[m]	Segmentdicke / Zeit
u	[m/s]	Geschwindigkeitsvektor
y	[m]	Höhenkoordinate

Griechische Buchstaben

α	[Rad]	Anstellwinkel von Kippsegmenten
ε	[-]	Abbruchfehler
η	[Pa.s]	Dynamische Viskosität
ϑ	[-]	dimensionslose Temperatur
λ	[W/(Km)]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[kg/m ³]	Dichte
τ	[N/m ²]	Schubspannung
φ	[Rad]	Umfangskoordinate
ω	[s ⁻¹]	Winkelgeschwindigkeit des Läufers
Π	[-]	Dimensionsloser Druck
Φ	[-]	Dissipation
ψ	[-]	Relatives Lagerspiel
Ω	[Rad]	Segmentumschließungswinkel

Indices für das Kontrollvolumen

0	Bezugsgröße / vom Kontrollvolumen
B bzw. b	Unten

E bzw. e	Osten
N bzw. n	Norden
S bzw. s	Süden
T bzw. t	Oben
W bzw. w	Westen

Indices

C	<i>Couette</i>
F	Fliehkraft
I	von der Schnittstelle (Interface)
k	des Abstützpunktes
m	gemittelte Größe
Öl	Schmierspalt
P	<i>Poiseuille</i>
r	Komponente in radialer Richtung
sa	Segmentanfang
se	Segmentende
Seg	vom Segment
SS	von der Spurscheibe
T	von der Ölzuführungstasche
y	Komponente in Höhenrichtung
zu	zugeführte Größe (Ölzuführbereich)
φ	Komponente in Umfangsrichtung

Mathematische Kurzschreibweisen

.	Ableitung nach der Zeit
'	erste Ableitung
-	dimensionslose Größe
~	dimensionslose normierte Größe
δ	der Rand von
Δ	Differenz