



**Band 34**

M. Sc.  
Daniel Großberndt

# **Kopplungsmechanismen kombinierter Radial-Axialgleitlager**



Technische Universität Clausthal

# **Kopplungsmechanismen kombinierter Radial-Axialgleitlager**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Daniel Großberndt, M. Sc. RWTH

aus Oldenburg

genehmigt von der

Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau

der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

24.11.2023

**Vorsitzender der Promotionskommission:** Prof. Dr. rer. nat. A. Weber

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

**Berichterstatter:** Dr.-Ing. habil. T. Hagemann

**Berichterstatter:** Prof. Dr.-Ing. A. Lohrengel

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und  
Energiewandlungsmaschinen

Band 34

**Daniel Großberndt**

**Kopplungsmechanismen kombinierter  
Radial-Axialgleitlager**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag  
Düren 2024

### **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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9370-4

ISSN 1611-8154

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze, für die interessante Aufgabenstellung, die zahlreichen motivierenden Gespräche sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen beim Bearbeiten meiner Aufgaben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Lohrengel danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferates. Für den Vorsitz der Promotionskommission möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. A. Weber bedanken.

Meine besondere Wertschätzung und mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. habil. T. Hagemann, der mich durch unsere vielen Gespräche und Diskussionen in besonderem Maße fachlich unterstützt hat.

Weiterhin gilt mein Dank allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften des Institutes, die zum Gelingen dieser Arbeit und zu dem ausgesprochen angenehmen Arbeitsklima am Institut beigetragen haben.

Wesentliche Teile dieser Arbeit stammen aus dem Forschungsprojekt „Kombinierte Radial-Axialgleitlager“ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA), das über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wurde. Den Mitgliedern des betreuenden Arbeitskreises Gleitlager der FVA und der Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) unter der Leitung von Herrn K. Steff und Herrn S. Wolking danke ich für die konstruktiven Anregungen in den zahlreichen Diskussionen.

Ein ganz besonders herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre persönliche und finanzielle Unterstützung meine Ausbildung und damit auch diese Promotion ermöglicht haben.



## Abstract

Für kombinierte Radial-Axialgleitlager existiert kein experimentell validiertes Berechnungsverfahren. Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung und Validierung von Berechnungsverfahren mit denen die in solchen Lagern wirkenden Kopplungsmechanismen abgebildet werden können. Dafür werden zwei Kopplungsansätze verfolgt.

Der erste Ansatz wird durch die Entwicklung eines iterativen Berechnungsverfahrens umgesetzt. Hierbei werden der Radial- und der Axialteil getrennt voneinander berechnet und über gemeinsame Randbedingungen gekoppelt. Diese Kopplungsrandbedingungen werden iterativ so bestimmt, dass die Massen- und Energieerhaltung an den Modellschnittstellen erfüllt werden. Weiterhin wird ein monolithisches Berechnungsverfahren als zweiter Ansatz entwickelt. In diesem Fall werden die zu lösenden Gleichungssysteme der Lagerteile unter Berücksichtigung der notwendigen Kopplungsgleichungen zu gemeinsamen Gleichungssystemen des Gesamtlagers fusioniert. Die im Rahmen des iterativen Berechnungsverfahrens iterativ zu bestimmenden Randbedingungen sind im monolithischen Fall dann direkter Teil der Lösung dieser Systeme.

Gute Übereinstimmungen zeigt der Abgleich der Berechnungsergebnisse beider Berechnungsverfahren mit experimentellen Ergebnisse aus der Literatur, sodass so Funktionsfähigkeit der entwickelten Berechnungsverfahren nachgewiesen werden kann.

Durch die monolithisch gekoppelte Energiegleichung können lokale Temperaturverteilungen an den Schnittstellen der Lager aufgelöst und damit die lokale Wechselwirkung der Temperaturverteilungen in den Lagerteilen abgebildet werden. Weiterhin zeigt der monolithische gegenüber dem iterativen Berechnungsansatz deutliche Vorteile bei der numerischen Stabilität und den Rechenzeiten.

Der Mehrwert der entwickelten Berechnungsverfahren gegenüber den in der industriellen Praxis gängigen Berechnungsansätzen kann anhand verschiedener Parameterstudien dargestellt werden. Demnach ist die korrekte hydraulische und energetische Kopplung sowohl der Schmierfilme als auch der Festkörper entscheidend, um den Schmierstoffdurchsatz und das Temperaturniveau beider Lagerteile korrekt vorherzusagen.

Sensitivitätsanalysen der Kopplungsmechanismen bezüglich verschiedener Geometrievariationen der beiden Lagerteile weisen darauf hin, dass sich die Intensität der Kopplungseffekte durch eine gezielte Änderung der lokalen Abflusswiderstände im Radial- und Axialteil beeinflussen und sich so beispielsweise das Temperaturniveau im belasteten Axialteil deutlich senken lässt, ohne den Gesamtdurchsatz des kombinierten Radial-Axialgleitlagers signifikant zu steigern.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Stand der Forschung .....	3
1.3	Zielsetzung und Lösungsweg .....	8
<b>2</b>	<b>Modellierung hydrodynamischer Radial- und Axialgleitlager</b> .....	<b>9</b>
2.1	Radialgleitlager .....	9
2.1.1	Hydrodynamisches Lagermodell .....	9
2.1.2	Thermisches Lagermodell .....	19
2.1.3	Randbedingungen des Radialgleitlagermodells .....	21
2.2	Axialgleitlager .....	24
2.2.1	Hydrodynamisches Lagermodell .....	24
2.2.2	Thermisches Lagermodell .....	27
2.2.3	Randbedingungen des Axialgleitlagermodells .....	30
2.3	Numerische Lösung der Differenzialgleichungen .....	33
2.4	Gleitlagerberechnungsprogramme .....	36
<b>3</b>	<b>Modellierung kombinierter Radial-Axialgleitlager</b> .....	<b>38</b>
3.1	Erweiterung der Systemgrenzen der bestehenden Radial- und Axiallagerberechnungsprogramme .....	38
3.2	Modellierung der Verluste im Übergangsbereich zwischen Radial- und Axialschmierspalt .....	43
3.3	Iteratives Berechnungsverfahren für kombinierte Radial-Axialgleitlager .....	49
3.3.1	Umsetzung des iterativen Berechnungsmodells .....	53
3.4	Monolithisches Berechnungsverfahren für kombinierte Radial-Axialgleitlager .....	54
3.4.1	Hydraulische Kopplung der Schmierfilme .....	56
3.4.2	Energetische Kopplung der Schmierfilme .....	66

3.4.3	Energetische Kopplung der Festkörper .....	72
3.4.4	Umsetzung des monolithischen Berechnungsmodells .....	77
<b>4</b>	<b>Validierung der Berechnungsmodelle .....</b>	<b>80</b>
4.1	Experimentelle Untersuchungen .....	80
4.2	Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverteilungen .....	82
4.3	Vergleich gemessener und berechneter Drehzahl-Last-Kennlinien.....	89
<b>5</b>	<b>Einfluss der Kopplungsmechanismen auf berechnete Lagerbetriebsgrößen.....</b>	<b>94</b>
5.1	Vergleich des iterativen und monolithischen Berechnungsverfahrens .....	95
5.2	Einfluss der Kopplungsrandbedingungen .....	99
5.3	Einfluss geometrischer Lagergrößen auf die Kopplungsmechanismen.....	109
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>123</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>126</b>

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Symbole

$A$	Fläche, Systemmatrix	$P$	Druckähnliche Variable
$a$	Koeffizient der Systemmatrix	$Pe$	Pecletzahl
$b$	Breite, Lagerbreite	$Pr$	Prandtlzahl
$CP$	Dimensionierungsfaktor Druck	$p$	Druck
$CV$	Dimensionierungsfaktor Volumenstrom	$\bar{p}$	Spezifische Lagerbelastung
$CQ$	Dimensionierungsfaktor Wärmestrom	$Q$	Wärme
$c$	Spezifische Wärmekapazität	$\Delta R$	Radiales Lagerspiel
$D$	Lagerinnendurchmesser	$Re$	Reynoldszahl
$d$	Wellendurchmesser	$r$	Wellenradius, radiale Koordinate
$F$	Füllungsgrad	$S_0$	Lösungsvektor
$F_0, \dots, F_4$	Viskositätsfaktoren	$T$	Temperatur
$f_c$	Viskositätskorrektur Couetteströmung	$t$	Zeit
$g$	Gravitationskonstante	$t_{SS}$	Dicke der Spurscheibe
$H$	Dimensionslose Spalthöhe	$u$	Strömungsgeschwindigkeit
$h$	Lokale Spalthöhe	$V$	Volumen
$h_{ax,sum}$	Axiales Summenspiel	$x, y$	Kartesische Koordinaten
$K$	Kavitationsindex	$\hat{y}$	Dimensionslose Spalthöhenkoordinate
$K_t$	Erwärmungskennzahl	$\bar{y}, \bar{z}$	Dimensionslose Koordinate
$K_x, K_z, K_r, K_\phi$	Turbulenzkorrekturfaktoren		
$n$	Drehzahl		

### Griechische Symbole

$\alpha_B$	Bunsenkoeffizient	$\sigma_0$	Koeffizient des Lösungsvektors
$\gamma_{seg}$	Segmentverkipfung Axiallager	$\tau_w$	Wandschubspannung
$\eta$	Dynamische Viskosität	$\bar{\tau}_C$	Turbulenzkorrektur Couetteströmung
$\eta_t$	Scheinviskosität	$\nu$	Kinematische Viskosität
$\vartheta$	Dimensionslose Temperatur	$\Phi$	Dissipation
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\phi$	Angulare Koordinate
$\lambda_t$	Scheinkonduktivität	$\psi$	Relatives Lagerspiel
$\Pi$	Dimensionsloser Druck	$\psi_v$	Profilierung
$\rho$	Dichte	$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

## Subskripte

<i>0</i>	Bezugszustand, bilanziertes Kontrollvolumen	<i>min</i>	minimal
<i>ax</i>	Axialteil	<i>monol</i>	monolithisch
<i>eff</i>	effektiv	<i>rad</i>	Radialteil
<i>E, H, N, S, W, V</i>	Nachbarkontrollvolumen	<i>seg</i>	Segment
<i>e, h, n, s, w, v</i>	Kontrollvolumengrenze	<i>sf</i>	Schmierfilm, Seitenfluss
<i>iter</i>	iterativ	<i>ss</i>	Spurscheibe
<i>LS</i>	Lagerschale, Lagerseite	<i>t</i>	turbulent
<i>max</i>	maximal	<i>zu</i>	Zuführung