



**Band 35**

M. Sc.  
Philipp Winking

**Experimentelle und theoretische  
Untersuchung eines stark verkanteten  
Axialgleitlagers mit mechanischem  
Schiefstellungsausgleich**



# **Experimentelle und theoretische Untersuchung eines stark verkanteten Axialgleitlagers mit mechanischem Schiefstellungsausgleich**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik

und Maschinenbau

der Technischen Universität Clausthal

vorgelegt von

**M. Sc. Philipp Winking**

geboren in Bochum

Tag der mündlichen Prüfung

12. 09. 2023

---

**Vorsitzender der Promotionskommission:** Prof. Dr. rer. nat. A. Weber  
**Hauptberichterstatter:** Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze  
**Berichterstatter:** Prof. Dr. sc. ETH A. Hasse

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und  
Energiewandlungsmaschinen

Band 35

**Philipp Winking**

**Experimentelle und theoretische Untersuchung  
eines stark verkanteten Axialgleitlagers mit  
mechanischem Schiefstellungsausgleich**

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 978-3-8440-9468-8

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

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze, für das entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation und die Gestaltungsfreiheit bei der Bearbeitung meiner Aufgaben.

Herrn Prof. Dr. ETH A. Hasse danke ich für das Interesse an meiner Arbeit, die Übernahme des Koreferats und der damit verbundenen Arbeit.

Meine besondere Wertschätzung gilt Herrn Dr.-Ing. C. Kraft und Herrn Dr.-Ing. T. Hagemann, die mich maßgeblich fachlich unterstützt haben.

Den Kollegen der Werkstatt und allen anderen Mitarbeitern des Instituts danke ich für die Möglichkeit des Teilens von Ressourcen und das ausgesprochen angenehme Klima während der Zusammenarbeit und darüber hinaus. Weiterhin gilt mein Dank allen aktuellen nicht genannten sowie ehemaligen Kollegen und wissenschaftlichen Hilfskräften, besonders Herrn A. Thies, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für ein jederzeit offenes Ohr und den unkomplizierten Umgang mit den Formalitäten des wissenschaftlichen Alltags möchte ich mich bei E. M. Thomas bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Verwandten und Freunden, die mich nicht nur in fachlichen Fragestellungen unterstützt haben.

Meinen Eltern möchte ich für die Geduld und die uneingeschränkte Bereitschaft zur Unterstützung während meines Studiums und der Promotion danken.

Ein ganz besonderer lieber Dank gilt meiner Frau für ihr Verständnis und den Rückhalt bei meiner Tätigkeit.

Clausthal 01.11.2023



---

## Abstract

Die Optimierung von Lagerungen in Bezug auf Effizienz und Funktionssicherheit ist speziell im Hinblick auf Axiallagerungen von großer Wichtigkeit. Für eine sichere Auslegung von Gleitlagern ist im Allgemeinen die Berücksichtigung einer zur Lagerfläche, durch Einflüsse wie Planlauftoleranz oder Querschub, verkantet laufenden Welle notwendig. Durch die Verkantung wird das Lager asymmetrisch belastet, somit werden einzelne Segmente sehr stark beansprucht. Dies steht im Widerspruch zu einem effizienten Lager.

Zum Ausgleich einer für einen sicheren Betrieb zu großen Verkantung ist eine sich der Schiefstellung anpassende Lagerung zielführend. In einer Variante dieser Lagerung können sich die einzelnen Segmente durch einen Mechanismus entsprechend der anliegenden Kraft absenken und anheben. Ein solcher Mechanismus ist allerdings durch innere Reibung und die Kinematik in seinem Vermögen, sich auf die Welle auszurichten, eingeschränkt. Zur Auslegung des Lagers stellt sich nun die Frage, in welcher Größenordnung die verbleibende Verkantung zwischen der Schiefstellung der Welle und dem nachgestellten Lager liegt.

Hierfür wird ein mathematisches Modell erstellt, das diese verbleibende Schiefstellung abhängig von der inneren Reibung, den äußeren Kräften und der Lagerkennwerte auf Grundlage der Kinematik des Mechanismus bestimmt. Neben der Modellierung des Mechanismus wird ein Prüfstand konstruiert, mit dessen Hilfe die im System verbleibende Schiefstellung bei verschiedenen starken initialen Verkantungen und Belastungen bei einem breiten Spektrum an Umfangsgeschwindigkeiten aufgezeichnet werden kann. Die experimentelle Untersuchung des Ausgleichsmechanismus zeigt einen großen Einfluss der Entwicklung der Kraft im Schmierpalt auf das Systemverhalten. Außerdem wird bei verkanteter Spurscheibe trotz des Ausgleichsmechanismus unabhängig von den Betriebsbedingungen immer eine Restschiefeinstellung im Experiment und in der Modellierung identifiziert.

Das Ergebnis der Arbeit ist die Bewertung von Einflussgrößen auf die Restschiefeinstellung durch das vereinfachte mechanische Modell und die Messung mittels des Prüfstands, sowie der Vergleich mit Daten aus der Literatur.

Mit den in der Literatur gefundenen Aussagen findet sich eine gute Übereinstimmung. Der direkte Vergleich zwischen der Modellierung und den experimentell ermittelten Restschiefeinstellungen zeigt eine ausreichend gute Übereinstimmung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Stand der Forschung . . . . .	9
1.2	Problembeschreibung . . . . .	19
1.3	Zielsetzung . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Modellierung des Lagerausgleichs</b>	<b>22</b>
2.1	Druckaufbau im Schmierspalt . . . . .	22
2.2	Beschreibung des Ausgleichsmechanismus . . . . .	27
2.3	Analytische Berechnung des Lagerausgleichs . . . . .	29
2.4	Eindeutigkeit der Lösung . . . . .	37
2.5	Untersuchung der Lagersegmente . . . . .	39
2.6	Numerische Lösung des Gleichungssystems . . . . .	42
2.7	Modellvergleich . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Axiallagerprüfstand</b>	<b>51</b>
3.1	Lasteinleitung . . . . .	57
3.2	Prüflager . . . . .	59
3.3	Aufbringen der Schiefstellung . . . . .	60
3.4	Auslegung der Welle und Frequenzganganalyse . . . . .	62
3.4.1	Rotordynamische Analyse . . . . .	63
3.4.2	Frequenzganganalyse . . . . .	64
3.5	Sensorik . . . . .	67
3.5.1	Wegmessung . . . . .	68
3.5.2	Temperaturmessstellen . . . . .	69
3.5.3	Drehmoment- und Kraftmessung . . . . .	71
3.5.4	Messunsicherheiten . . . . .	72
3.6	Hydraulik . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Experimentelle und theoretische Untersuchung</b>	<b>75</b>
4.1	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	75
4.1.1	Messung unterschiedlicher Lasten und Schiefstellungen . . . . .	76

---

4.1.2	Ermittlung der Restschiefstellung . . . . .	82
4.1.3	Restschiefstellung in Abhängigkeit der Drehzahl . . .	84
4.1.4	Restschiefstellung in Abhängigkeit der Last und Zuführtemperatur . . . . .	86
4.2	Untersuchung der Schmierfilmkraft . . . . .	89
4.3	Analytische Untersuchungen . . . . .	92
4.3.1	Restschiefstellung in Abhängigkeit der Drehzahl . . .	93
4.3.2	Restschiefstellung in Abhängigkeit der Zuführtemperatur	94
4.3.3	Restschiefstellung in Abhängigkeit der Last . . . . .	95
4.3.4	Restschiefstellung in Abhängigkeit des Reibwerts . . .	96
4.4	Vergleich der Untersuchungen . . . . .	98
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>105</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	105
5.2	Ausblick . . . . .	109
	<b>Literatur</b>	<b>111</b>
	<b>A Symbolverzeichnis</b>	<b>119</b>
	<b>B Abkürzungen</b>	<b>122</b>