



**Band 31**

Dipl.-Ing.  
Philipp Zemella

# **Frequenzabhängigkeit der Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten schnellaufender Gleitlager**



# **Frequenzabhängigkeit der Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten schnelllaufender Gleitlager**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Philipp Zemella  
aus Hamburg

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

Tag der mündlichen Prüfung  
28.04.2022

**Vorsitzender:**

Prof. Dr. rer. nat. Alfred Weber

**Betreuer:**

Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze

**Weitere Gutachter:**

PD Dr.-Ing. habil. Thomas Hagemann

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und  
Energiewandlungsmaschinen

Band 31

**Philipp Zemella**

**Frequenzabhängigkeit der Steifigkeits- und  
Dämpfungskoeffizienten schnelllaufender Gleitlager**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8959-2

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**

An dieser Stelle möchte ich mich sehr bei Prof. Schwarze bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben und mit seiner Unterstützung mitgewirkt hat, diese Arbeit im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen durchzuführen. Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Lohrengel danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferates. Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. A. Weber bedanke ich für den Vorsitz der Prüfungskommission und die damit verbundenen Mühen.

Fachlich wurde diese Arbeit in besonderem Maße von Dr.-Ing. habil. T. Hagemann und Dr.-Ing. D. Vetter unterstützt. Mein herzlichster Dank für die vielen konstruktiven Gespräche und Hinweise, sowie Euer Interesse an meiner Arbeit. Weiterhin gilt mein Dank allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften des Institutes, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Wesentliche Teile dieser Arbeit stammen aus dem Forschungsprojekt „Dynamische Kippsegmentlagermodellierung“ der Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. gefördert wurde. Herrn Dipl.-Ing. E. Schüler und Herrn Dipl.-Ing. A. Schmitz und den Mitgliedern des betreuenden Arbeitskreises Gleitlager der FVV und der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) unter Leitung von Herrn Dipl.-Ing. K. Steff danke ich für die konstruktiven Anregungen in den zahlreichen Diskussionen.



## **Kurzfassung**

Die dynamischen Koeffizienten von Gleitlagern sind stark drehzahl- und lastabhängig. Für Kippsegmentlager zeigt die Gleitlagertheorie bei konstanten Randbedingungen frequenzabhängige dynamische Lagerkoeffizienten im KC-Modell. Bisherige theoretische Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit dynamischer Koeffizienten von Kippsegmentlagern erfolgen zumeist unter abweichenden Randbedingungen und Modelltiefen. Eine einheitliche Beschreibung eines frequenzabhängigen dynamischen Lagerverhaltens in einem Gleitlagerberechnungsprogramm ist nicht vorhanden. Die für die Validierung der Lagermodelle notwendigen Messungen stellen aufgrund ihrer Komplexität hohe Anforderungen an den Prüfaufbau. Dokumentierte Untersuchungen zeigen daher mitunter widersprüchliche Ergebnisse in Bezug auf die theoretischen Lagermodelle und zwischen den durchgeführten Versuchen. Durch Experimente gesichert ist der Einfluss der Strukturelastizität auf die dynamischen Koeffizienten. In Bezug auf den theoretisch vorhandenen Effekt des Schmierfilms fehlt jedoch ein experimenteller Nachweis für die Frequenzabhängigkeit der dynamischen Koeffizienten bei Kippsegmentlagern. In der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die in der Literatur beschriebenen Modelle zur dynamischen Beschreibung von Kippsegmentlagern aufbereitet und in das Gleitlagerberechnungsprogramm Combros R integriert. Im erweiterten Kippsegmentlagermodell werden bei der Berechnung der dynamischen Lagerkoeffizienten Segmentträgheiten und –massen berücksichtigt. Die daraus resultierenden Effekte auf das Rotor-Lager-System können somit in Rotordynamikanalysen einfließen. Im Mittelpunkt der Arbeit steht der experimentelle Nachweis der aus dem Schmierfilm resultierenden frequenzabhängigen Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten. Hierzu wurden zwei Prüflagerkonfigurationen ausgewählt, die sich in Bezug auf die Frequenzabhängigkeit der dynamischen Koeffizienten stark unterscheiden. Sämtliche Elastizitäten, die sich außerhalb des Schmierfilms befinden und bekanntermaßen einen starken Einfluss auf die Lagerkoeffizienten besitzen, wurden in separaten Experimenten erfasst. Die Auswertung der Koeffizienten im KC-Modell zeigt gute Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen des erweiterten Kippsegmentlagermodells und den experimentell ermittelten Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten. Zudem zeigen die experimentellen Ergebnisse ein klares Indiz für den theoretisch vorhergesagten Frequenzeinfluss der Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten des Schmierfilms im KC-Modell. Abschließende Untersuchungen zu den Auswirkungen der Segmentträgheiten und –massen mit dem erweiterten Lagermodell auf das Rotor-Lager-System zeigen in Übereinstimmung mit bisherigen Literaturergebnissen zusätzliche Eigenwerte und einen geringeren Sicherheitsabstand zu kritischen Drehzahlen.



---

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis . . . . .	iii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Stand der Forschung . . . . .	3
1.3 Zielsetzung . . . . .	12
<b>2 Dynamische Modellierung von Kippsegmentlagern</b>	<b>13</b>
2.1 Lagerkoeffizienten des festgehaltenen Kippsegmentes . . . . .	13
2.2 Lagerkoeffizienten des frei beweglichen masselosen Kippsegmentes . . . . .	18
2.2.1 Einfluss einer endlichen Segmentabstützungssteifigkeit . . . . .	22
2.2.2 Überlagerung der Feder- und Dämpferkräfte der Einzelsegmente . . . . .	25
<b>3 Erweiterung des Kippsegmentlagermodells</b>	<b>28</b>
3.1 Modell mit Rotor- und Segmentkippfreiheitsgrad und unendlich steifer Segmentabstützung . . . . .	30
3.2 Modell mit Rotor- und Segmentkippfreiheitsgrad und endlich steifer Segmentabstützung . . . . .	32
3.3 Modell mit Rotor- und Lagerfreiheitsgraden, Segmentkippfreiheitsgrad und endlich steifer Segmentabstützung . . . . .	34
<b>4 Auswahl geeigneter Prüflager</b>	<b>39</b>
<b>5 Messung von dynamischen Lagerkoeffizienten</b>	<b>42</b>
5.1 Einrichten des Prüflagers . . . . .	47
5.2 Auswertung der Messwerte und Bestimmung der Messunsicherheit . . . . .	49
5.3 Adaption des Erregersignals . . . . .	54

<b>6</b>	<b>Analyse der Strukturelastizität</b>	<b>60</b>
6.1	Experimentelle Ermittlung der Abstützungselasticität . . . . .	62
6.2	Modellierung der Strukturelastizität mittels FEM . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>72</b>
7.1	Ermittlung der dynamischen Koeffizienten . . . . .	75
7.2	Parameterstudien zum frequenzabhängigen KC-Modell . . . . .	87
7.3	Einfluss des Lagermodells auf die Dynamik eines Rotor-Lager-Systems . .	95
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>104</b>
	<b>Literatur</b>	<b>106</b>

# Symbolverzeichnis

$A$	Fläche in $\text{m}^2$	$J_p$	Trägheitsmoment in $\text{kg m}^2$
$a$	Beschleunigung in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$J_p^*$	Mod. polares Trägheitsmoment in $\text{kg}$
$A_n$	Amplitude	$k$	Steifigkeitskoeffizient in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$
$a_v$	Abstützungsverhältnis	$k_d$	Dynamische Abstützungssteifigkeit in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$
$B$	Lagerbreite in $\text{m}$	$k_s$	Scheitelfaktor
$c$	Dämpfungskoeffizient in $\frac{\text{Ns}}{\text{m}}$	$k_s$	Statische Abstützungssteifigkeit in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität in $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	$K_x, K_z$	Turbulenzkorrekturfaktoren
$D$	Dämpfung in %	$k_{p,rad}$	Segmentabstützungssteifigkeit in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$
$D$	Dämpfungsgrad	$\mathbf{M}$	Massenmatrix in $\text{kg}$
$D$	Lagerdurchmesser in $\text{m}$	$m_{ij}$	Virtuelle Masse in $\text{kg}$
$d$	Segmentdicke in $\text{m}$	$m_p$	Segmentmasse in $\text{kg}$
$e$	Exzentrizität in $\text{m}$	$m_r$	Rotormasse in $\text{kg}$
$e_0$	Statische Zapfenverlagerung in $\text{m}$	$m_s$	Statormasse in $\text{kg}$
$F$	Kraft in $\text{N}$	$N$	Anzahl der Segmente
$\mathbf{F}$	Kraftvektor in $\text{N}$	$n$	Anzahl der Messungen
$F_0$	Statische Kraft in $\text{N}$	$n$	Drehzahl in $\frac{1}{\text{min}}$
$f_D$	Gedämpfte Eigenfrequenz in $\text{Hz}$	$p$	Druck in $\text{Pa}$
$f_e$	Erregerfrequenz in $\text{Hz}$	$\bar{p}$	Spezifische Lagerbelastung in $\text{MPa}$
$f_s$	Drehfrequenz in $\text{Hz}$	$P_v$	Verlustleistung in $\text{W}$
$\mathbf{G}$	Übertragungsfunktion	$q$	Koppelsteifigkeit in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$
$h$	Schmierspalthöhe in $\text{m}$	$R_0$	Zielsignal
$h_0$	Statische Schmierspalthöhe in $\text{m}$	$R_a$	Radius des Abstützpunktes in $\text{m}$
$H_{ij}$	Übertragungsfunktion	$R_p$	Segmentradius in $\text{m}$
$\mathbf{I}$	Trägheitsmatrix in $\text{kg m}^2$	$S$	Wegsignal in $\text{m}$

$s$	Standardabweichung	$\Gamma$	Logarithmisches Dekrement
$T$	Messzeit in s	$\gamma$	Wellenverlagerungswinkel in $^\circ$
$T$	Temperatur in $^\circ\text{C}$	$\gamma_0$	Statischer Verlagerungswinkel in $^\circ$
$t$	Zeit in s	$\Omega$	Schwingfrequenz in rad
$\mathbf{T}$	Transformationsmatrix	$\omega$	Drehfrequenz in rad
$T_a$	Äq. Massenträgheitsmoment in $\text{kg m}^2$	$\omega$	Winkelgeschwindigkeit in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
$T_p$	Pol. Massenträgheitsmoment $\text{kg m}^2$	$\Psi$	Lagerspiel in $\%$
$u$	Messunsicherheit	$\psi$	Segmentverschiebungsvektor in m
$u$	Umfangsgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\Psi_v$	Profilierung
$\mathbf{u}$	Verschiebungsvektor Rotor, Lager in m	$\rho$	Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$\dot{V}$	Volumenstrom in $\frac{1}{\text{min}}$	$\theta$	Phasenwinkel in rad
$x, y, z$	Kartesische Koordinaten	$\varphi$	Winkel in $^\circ$
$X, Y$	Störungen	$\zeta$	Lagerkoordinate in m
$X$	Eingangssignal		
$\bar{x}$	Mittelwert		
$\mathbf{x}$	Bewegungsvektor in m		
$x_s, y_s$	Schwerpunktskoordinate in m		
$Y$	Ausgangssignal		
DOF	degrees of freedom		
LBP	Last zwischen die Abstützpunkte		
LOP	Last auf den Abstützpunkt		
ZRM	Zustandsraummodell		
$\alpha$	Lastwinkel in $^\circ$		
$\alpha_e$	Einbauwinkel in $^\circ$		
$\beta$	Segmentumschließungswinkel in $^\circ$		
$\delta$	Kippwinkel in $^\circ$		
$\epsilon$	Dehnung in $\frac{\text{m}}{\text{m}}$		
$\eta$	Lagerkoordinate in m		
$\eta$	dyn. Viskosität in Pa s		