

Band 26

M. Sc.
Daniel Vetter

**Lineare und nichtlineare Einflüsse
von Gleitlagern auf das Schwingungs-
verhalten schnell laufender und leicht
belasteter Vertikalrotoren**



**Lineare und nichtlineare Einflüsse von Gleitlagern auf das
Schwingungsverhalten schnell laufender und leicht belasteter
Vertikalrotoren**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
M. Sc. Daniel Vetter
aus Naila

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

Tag der mündlichen Prüfung
31.07.2019

Dekan: Prof. Dr.-Ing. V. Wesling

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. A. Rienäcker

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 26

Daniel Vetter

**Lineare und nichtlineare Einflüsse von Gleitlagern
auf das Schwingungsverhalten schnell laufender
und leicht belasteter Vertikalrotoren**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7206-8

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 • E-Mail: 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 Gespräche und den großen Freiraum beim Bearbeiten meiner Aufgaben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Rienäcker danke ich für das Interesse an dieser Arbeit, die Übernahme des Korreferates und für die lehrreichen fachlichen Gespräche.

Weiterhin gilt mein Dank allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften des Institutes, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Allen voran danke ich Herrn Dr.-Ing. T. Hagemann, der mich in besonderem Maße fachlich unterstützt hat.

Wesentliche Teile dieser Arbeit stammen aus dem Forschungsprojekt „Vertikalmaschinendynamik“ 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. Den Mitgliedern des betreuenden Arbeitskreises Gleitlager der FVV und der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) unter Leitung von Herrn Dipl.-Ing. A. Schmitz, Herrn Dipl.-Ing. A. Schubert und Herrn Dr.-Ing. Ü. Mermertas danke ich für die konstruktiven Anregungen in den zahlreichen Diskussionen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und Großeltern, sowie meiner Großtante und meinem Großonkel, für die finanzielle Unterstützung während meines Studiums und die ständige Ermutigung während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Abstract

Gleitgelagerte, vertikale Maschinen stellen aufgrund der spezifischen Schmierfilmeigenschaften ein nichtlineares Schwingungssystem dar. Im Gegensatz zum Großteil der horizontalen Maschinen existiert in den Führungslagern vertikaler Rotoren keine definierte statische Gleichgewichtslage infolge einer Gewichtskraft. Da die durch Unwuchten oder andere Zwangsanregungen hervorgerufenen dynamischen Kräfte, gegenüber den statischen Kräften meist überwiegen, besitzt das Systemverhalten eine Abhängigkeit vom Betrag der anregenden Kraft.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Verifikation von Berechnungsmodellen und -algorithmen für die Analyse des Schwingungsverhaltens von Maschinen mit vertikalem Rotor. Hierfür werden systematisch Variationsrechnungen am nichtlinearen System mit unterschiedlicher Modelltiefe durchgeführt, um dessen Eigenschaften und Sensitivitäten besser zu verstehen. Dazu wird ein dynamisches Kippsegmentlagermodell entwickelt, in dem die Segmente als träge Körper abgebildet werden. Die Beschreibung der Schmierpaltströmung erfolgt mit der numerischen Lösung einer verallgemeinerten Reynolds'schen Differenzialgleichung unter Berücksichtigung der zeitlichen Ölmengenverteilung.

Als wesentliche Einflussgrößen auf das nichtlineare Resonanzverhalten haben sich die Verhältnisse von statischer zu dynamischer Last, sowie Lagersteifigkeit zu Abstützungssteifigkeit herausgestellt. Darüber hinaus können beim Kippsegmentlager Staudruckeffekte am Segmentbeginn und mechanische Segmentaufbiegungen einen signifikanten Einfluss auf das Resonanzverhalten besitzen.

In einigen Parameterbereichen kann eine lineare Beschreibung des Systems ausreichend sein. Zur quantitativen Beurteilung des Gültigkeitsbereiches linearer dynamischer Beschreibungen der Lagereigenschaften wird eine Störungsrechnung höherer Ordnung angewendet. Die Störungsrechnung führt auf ein nichtlineares Kraftgesetz für die Beschreibung der Schmierfilmrückstellkräfte. Dies ermöglicht die Verifizierung einer linearen Rotordynamikanalyse ohne die explizite Durchführung einer nichtlinearen Berechnung.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	III
1. Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Stand der Forschung.....	4
1.3 Zielsetzung und Lösungsweg	10
2. Theoretische Modellbeschreibung	14
2.1 Methoden zur Lösung des dynamischen Rotor-Lager-Verhaltens.....	14
2.1.1 Lineare Analyse	14
2.1.2 Nichtlineare Analyse	15
2.2 Modellierung der elastischen Rotorwelle	17
2.3 Beschreibung des Radiallagermodells	20
2.3.1 Schmierpaltströmung und Druckverteilung.....	20
2.3.2 Segmentdynamik	24
2.3.3 Geometrische Beschreibung des Lagerspalts.....	27
2.3.4 Elastizität der Segmentabstützung.....	29
2.3.5 Festkörpertragdruck	31
2.3.6 Thermisches Lagermodell.....	32
2.3.7 Dynamische Schmierstoffmengenbilanz im hydrostatischen Taschenbereich.....	34
2.3.8 Beschreibung der dynamischen Lagerkräfte auf Basis einer Störungsrechnung.....	36
2.3.9 Linearisierte dynamische Lagereigenschaften	43
2.3.10 Erweiterte Lagermodellierung: Druckanstieg am Segmentbeginn und mechanische Segmentaufbiegung	44
2.4 Beschreibung des Axiallagermodells.....	49
2.4.1 Schmierpaltströmung und Druckverteilung.....	49

2.4.2	Linearisierte Axiallagerkoeffizienten.....	52
3.	Verifikation und Validierung des Lagermodells	56
3.1	Verifikation des volldynamischen Kippsegmentlagermodells	56
3.2	Validierung des volldynamischen Kippsegmentlagermodells	58
4.	Untersuchung des Systemverhaltens am vertikalen Lavalläufer .	62
4.1	Linearisierungshypothese.....	62
4.2	Variationsrechnungen am Lavalläufer in Kippsegmentlagern.....	65
4.2.1	Untersuchung verschiedener Lagervarianten	66
4.2.2	Einfluss der statischen Lagerlast.....	69
4.2.3	Einfluss des Druckanstiegs am Segmentbeginn und der mechanischen Segmentaufbiegung	71
4.3	Variationsrechnungen am Lavalläufer in Festsegmentlagern	75
5.	Näherungsverfahren	81
5.1	Näherungsverfahren für Festsegmentlager	81
5.1.1	Beschreibung des Verfahrens	81
5.1.2	Verifikation des nichtlinearen Näherungsverfahrens	84
5.1.3	Validierung des nichtlinearen Näherungsverfahrens	87
5.1.4	Berücksichtigung des veränderlichen Füllungsgrades	89
5.2	Näherungsverfahren für Kippsegmentlager	90
5.3	Gültigkeitsprüfung der linearen Theorie mittels Störungsrechnung höherer Ordnung	95
5.4	Approximation der kritischen Drehzahl vertikaler Maschinen	103
6.	Beispiele ausgeführter Maschinen	108
6.1	Hydro-Kraftwerksanlage mit Francis-Turbine in 3-Lager Anordnung.	108
6.2	Hydro-Kraftwerksanlage mit Pelton-Turbine und Kippsegmentlagern	122
6.3	Pumpenwelle einer Pumpspeicher-Hydrokraftwerksanlage	129
7.	Zusammenfassung	135
8.	Literaturverzeichnis	140