



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

MB

FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU

Instationäres Verhalten schwimmbuchengelagerter Rotoren unter Berücksichtigung masseerhaltender Kavitation

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Steffen Nitzschke

geb. am 24.05.1981 in Haldensleben

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: J.-Prof. Dr.-Ing. Elmar Woschke
Prof. Dr.-Ing. Rainer Nordmann
Prof. Dr.-Ing. Jens Strackeljan

Promotionskolloquium am 07.12.2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	3
1.2	Stand der Forschung	4
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	8
2	Anregungsmechanismen	10
2.1	Schwingungsverhalten schwimmbuchsenlagerter Rotoren	10
2.2	Fluid-Whirl und Fluid-Whip	11
2.3	Mechanismen am schwimmbuchsenlagerter Rotor	15
3	Theorie	17
3.1	Hydrodynamik von Schwimmbuchsenlagern	17
3.1.1	Bewegungsgleichung eines Fluids	17
3.1.2	Reynoldssche Differentialgleichung	19
3.1.3	Masseerhaltende Kavitation	22
3.1.4	Randbedingungen	24
3.1.4.1	Ölzufuhr über eine Tasche	25
3.1.4.2	Hydraulische Kopplung	26
3.1.5	Numerische Lösung	28
3.1.5.1	Diskretisierung mittels FVM	28
3.1.5.2	Lösung der nichtlinearen Gleichungen	33
3.2	Thermodynamik von Schwimmbuchsenlagern	35
3.2.1	Thermischer Zustand von Abgasturboladern	35
3.2.2	Thermisches Modell	37
3.2.3	Auswirkungen auf die Hydrodynamik	39
3.3	Rotordynamik des Turboladerrotors	42
3.3.1	Timoshenko-Balkentheorie	42
3.3.1.1	Kinematik	42
3.3.1.2	Formänderungsenergie und Steifigkeitsmatrix	43
3.3.1.3	Arbeit der Trägheitskräfte und Massenmatrizen	47
3.3.1.4	Arbeit der äußeren Kräfte	50
3.3.2	Starre Rotoren	51
4	Interaktion	52
4.1	Integration der Bewegungsgleichungen	52
4.2	Relativkinematik	54
4.2.1	Spaltfunktion	54
4.2.2	Spaltänderungsfunktion	56
4.2.3	Spaltfüllungsgrad	57

4.3	Resultierende Kräfte und Momente am Schwimmbuchsenlager	58
4.3.1	Rauheitskontakt	58
4.3.2	Kräfte und Momente im Schmierfilm	61
4.3.3	Kräfte und Momente in den Kommunikationsbohrungen	64
5	Validierung	66
5.1	Radialgleitlager	66
5.1.1	Radialgleitlager unter stationärer Last	66
5.1.2	Radialgleitlager unter dynamischer Last	69
5.1.3	Unwuchtbelasteter Rotor in Radialgleitlagern	73
5.2	Schwimmbuchsenlager	77
5.2.1	Semi-floating ATL	77
5.2.1.1	ATL 1	78
5.2.1.2	ATL 2	82
5.2.2	Schwimmbuchsendrehzahl bei stationärer Last	85
5.2.3	Full-Floating ATL	88
5.2.3.1	ATL 1	90
5.2.3.2	ATL 2	94
6	Einfluss der hydrodynamischen Modellierung	99
6.1	Zusätzliche Modellierungsstufen	99
6.1.1	Gümbel	99
6.1.2	Kurzlager	100
6.1.3	Kennfeld	101
6.2	Untersuchtes full-floating ATL Modell	104
6.3	Auswirkung auf das Schwingungsverhalten	105
6.4	Auswirkung auf tribologische Größen	116
7	Zusammenfassung und Ausblick	122
A	Anhang	125
A.1	Formfunktionen für das Timoshenko-Balkenelement	125
A.2	Elementmatrizen für das Timoshenko Balkenelement	128
A.3	Elementmatrizen für den starren Rotor	135
A.4	Modelldaten full-floating ATL	135
A.4.1	MKS Daten	135
A.4.2	FE Daten Welle	138
A.4.3	Lagerdaten äußere Schmierfilme	138
A.4.4	Lagerdaten innere Schmierfilme	139
A.4.5	Tribologische Daten	139
A.4.6	Materialdaten	139
	Literaturverzeichnis	140