

Experimentelle Untersuchung von Quetschfilmdämpfern mit Hilfe aktiver Magnetlager

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Krüger

aus Bensheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. H. Birkhofer
Tag der Einreichung:	23. April 2009
Tag der mündlichen Prüfung:	30. Juni 2009

Darmstadt 2009
D17

Forschungsberichte Mechatronik & Maschinenakustik

Thomas Krüger

**Experimentelle Untersuchung von
Quetschfilmdämpfern mit Hilfe aktiver Magnetlager**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8601-9

ISSN 1616-5470

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

*Im normalen Leben wird es einem gar nicht bewusst,
dass der Mensch unendlich mehr empfängt, als er gibt,
und dass Dankbarkeit das Leben erst reich macht.
Man überschätzt das eigene Wirken und Tun
in seiner Wichtigkeit gegenüber dem,
was man nur durch andere geworden ist.*

Dietrich Bonhoeffer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mechatronik und Maschinenakustik der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Nordmann gilt mein außerordentlicher Dank: für die Betreuung der Arbeit, für seine vielen fachlichen Impulse, für die kompromisslos beständige, begeisterte und begeisternde Unterstützung und Förderung nicht nur in den Momenten der Lichtblicke. Die optimalen Rahmenbedingungen für das wissenschaftliche Arbeiten – kreative, motivierende Atmosphäre – verdanke ich maßgeblich seiner von Freundlichkeit und Offenheit geprägten, zuvorkommenden Art.

Herrn Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer danke ich herzlich für das Interesse an dieser Arbeit und die bereitwillige Übernahme des Korreferats.

Diese Arbeit wurde möglich durch die freundliche Unterstützung der MTU Aero Engines GmbH. Den Herren Dr.-Ing. Adrian Rienäcker und Dr.-Ing. Wolfgang Diepolder danke ich sehr für die regelmäßigen fachlichen Gespräche, in denen wir gemeinsam viele technische Detailprobleme erörtert, bedacht und zur Lösung geführt haben.

Besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Kollegen am Fachgebiet für das gute Arbeitsklima. Insbesondere danke ich den Herren Dr.-Ing. Martin Aenis und Dr.-Ing. Eric Knopf, die mein Interesse an aktiven Magnetlagern geweckt haben und die Ahnung von der nicht vernachlässigbaren Bedeutung der Strukturdynamik zur Gewissheit werden ließen. Danke, Eric, für unsere Touren durch den Wald, nicht nur bei Schnee. Ich danke Herrn Dr.-Ing. Christof Klesen, ohne den ich die Arbeit am Fachgebiet niemals aufgenommen hätte. Herrn Dr.-Ing. Ulrich Schönhoff danke ich für die faszinierenden Gespräche über die wahren Tiefen der Regelungstechnik, Herrn Dr.-Ing. Ulrich Oldendorf für manchen ersparten Gang zum Großen Brockhaus. Herr Dr.-Ing. Thomas Grönsfelder teilt mit mir das Interesse an Quetschfilmdämpfern. Ich danke ihm für unser Vergleichen von Simulations- und Messdaten sowie die rege Diskussion darüber. Herrn Dipl.-Ing. Eric Ngondi danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und seine konzentrierte Beschäftigung damit. Herrn Dipl.-Ing. Martin Ernst verdanke ich, Dinge unternommen zu haben, die jenseits eingefahrener Normalität liegen. Noch heute bin ich in Gedanken gerne mit ihm am Gaislachkogel oder zwischen Oberstdorf und Riva unterwegs. Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Norman Butzek für unser intensives gemeinsames Arbeiten – in Hannover und am Fachgebiet – und für unsere unzähligen, bereichernden Gespräche fachlicher und persönlicher Natur vor, zwischen und nach dem Tagesgeschäft.

Frau Ursula Willner, der Sekretärin des Fachgebiets, danke ich für die immerfort zuverlässige Erledigung aller Buchhaltungs- und Verwaltungsaufgaben und – viel wichtiger – das tägliche Guten Morgen mit Blick in mein Arbeitszimmer. Ein herzliches Dankeschön für die angenehme Zusammenarbeit sage ich Frau Dipl.-Des. Sabine Backhaus und Frau Dipl.-Ing. Birgit Lampert, den Damen des Medienbüros, dem sonnigsten aller nur denkbaren Büros. Dankbar bin ich ferner den Mitarbeitern der Werkstatt, Herrn Walter Rausch und Herrn Uwe Rodenhäuser, für die praxisnahe Beratung sowie die Fertigung der Prüfstandteile.

Meinen Freunden danke ich über alles, dass sie so viele Absagen von mir in Kauf genommen haben – und mir nach wie vor die Freundschaft halten. Es ist ein großes Glück, dass es Euch gibt.

Danke sage ich meinen Eltern für ihre Unterstützung über all die Jahre hinweg.

Danke an Christiane. Ohne ihr Verständnis und ihren Rückhalt wäre nichts möglich.

Bensheim, im April 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Hinführung zum Thema	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Stand der Forschung	4
1.3	Motivation und Zielsetzung	9
2	Theoretische Grundlagen	13
2.1	Quetschfilmdämpfer	13
2.1.1	Konstitutive Beziehungen Newtonscher Flüssigkeiten	13
2.1.2	Schichtenströmung Newtonscher Fluide	14
2.1.3	Reibungsdominierte hydrodynamische Schmierung	17
2.1.4	Reynoldsgleichung für den Quetschfilmdämpfer	17
2.1.5	Hydrodynamische Kräfte	19
2.2	Aktive Magnetlager	27
2.2.1	Funktionsweise	27
2.2.2	Einsatz zur Kraftmessung	30
3	Der Prüfstand	35
3.1	Aufbau	35
3.1.1	Quetschfilmdämpfer	35
3.1.2	Magnetlager	40
3.1.3	Welle	43
3.1.4	Hydraulikkreislauf	44
3.1.5	Signalverarbeitung	46
3.2	Mechanische Eigenschaften	48
3.2.1	Welle	49
3.2.2	Gehäuse	50
3.2.3	Dynamische Betrachtung	55
4	Vorbereitung der experimentellen Untersuchung	57
4.1	Beschreibung in Fourierkoeffizienten	57
4.2	Koordinatensysteme	58
4.3	Kraftmessung bei großen Wegen	59
4.3.1	Vorüberlegungen zur Messmethode	59
4.3.2	Kalibrierung der Hallsensoren	62
4.3.3	Statische Kraftkalibrierung	66
4.3.4	Dynamische Kraftkalibrierung	70
4.3.5	Erzielte Messgenauigkeit	74
4.4	Untersuchung der Spaltfunktion	76
4.4.1	Vermessung der Rundheit	76
4.4.2	Temperaturabhängige Kalibrierung	79
4.4.3	Normierung	83
4.5	Versuchsparameter	84

4.6	Allgemeiner Ablauf	86
4.7	Kräftegleichgewicht	87
4.8	Bestimmung von Fluidkraft und Bewegung	88
4.9	Weganregung und deren praktische Umsetzung	92
5	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung	97
5.1	Statische Kräfte	97
5.1.1	Überblick	97
5.1.2	Vergleich der Bauweisen ohne und mit Zuführnut	99
5.1.3	Vergleich der Anzahl von Zuführungen	101
5.1.4	Superponierbarkeit	102
5.1.5	Bewertung	103
5.2	Dynamische Kräfte	105
5.2.1	Anwendbarkeit der Fourierbeschreibung	105
5.2.2	Anteil der Fluidkräfte an den Gesamtkräften	108
5.2.3	Rundheit der erzeugten Bewegungsbahnen	108
5.2.4	Darstellungsform der Kraftverläufe	110
5.2.5	Einfluss von Orbitradius und Orbitfrequenz	113
5.2.6	Einfluss des Zuführdrucks	115
5.2.7	Einfluss der Zuführung	116
5.2.8	Betrachtung gemittelter Kraftgrößen	117
5.2.9	Zwischenbewertung	122
5.3	Vergleich mit einer Finite-Elemente-Lösung	123
6	Rotordynamische Betrachtung	131
6.1	Bestimmung dynamischer Koeffizienten	131
6.1.1	Die dynamische Kräftebilanz für stationären Betrieb	131
6.1.2	Identifikation	133
6.1.3	Entdimensionierung der Kräftebilanz	137
6.1.4	Qualität der Identifikation	138
6.1.5	Ergebnisse	142
6.2	Stabilitätsbetrachtung für den starren Rotor	146
6.2.1	Dimensionslose Zustandsgleichung	147
6.2.2	Stabilitätsgrenzen	150
6.3	Dimensionslose Unwuchtgrenzen	153
7	Zusammenfassung und Ausblick	161

Literatur	165
Anhang	173
A Polpaarkräfte in einer Magnetlagerachse	175
B Messergebnisse	177
B.1 Kennfelder der statischen Fluidkräfte	177
B.2 Dynamische Fluidkräfte mit Radial- und Tangentialkomponenten . . .	195
B.3 Vergleich zwischen Messung und Berechnung	201
C Dynamische Koeffizienten	203
C.1 Dynamische Koeffizienten nach analytischen Näherungslösungen	203
C.2 Identifizierte dynamische Koeffizienten	205
D Dimensionslose Unwuchtgrenzen	211
D.1 Ohne Nut, drei Zuführungen	211
D.2 Mit Nut, drei Zuführungen	215
D.3 Mit Nut, zwei Zuführungen	219
D.4 Mit Nut, eine Zuführung	223

Notation

Lateinische Lettern

Skalare Größen

A	Polschuhfläche
$\hat{A}$	resultierende Lagerkraft des Magnetlagers A
B	1.) Gesamtbreite des Quetschfilmdämpfers 2.) magnetische Flussdichte
$\hat{B}$	resultierende Lagerkraft des Magnetlagers B
b_g	Breite der Zuführnut
b_p	Polschuhbreite
c	Korrekturfaktor
D	1.) Durchmesser 2.) modaler Dämpfungsgrad
d	Dämpfung
D_h	hydraulischer Durchmesser
d_{rr}, d_{tt}	Hauptdämpfungskoeffizienten
d_{rt}, d_{tr}	Nebendämpfungskoeffizienten
E	auf den relativen Orbitradius bezogene Systemantwort
e	absolute Exzentrizität, absoluter Orbitradius
e_{zul}	Auswuchtgüte nach DIN 1940-1 [14]
F	Kraft
f	Frequenz
G	Gewichtskraft
g	Erdbeschleunigung
H	1.) dimensionslose Spaltfunktion 2.) magnetische Feldstärke 3.) dynamische Nachgiebigkeit
$\tilde{H}$	auf Spalthöhe h_0 bezogene dynamische Nachgiebigkeit
h	1.) absolute Spalthöhe 2.) horizontale Koordinate 3.) statische Nachgiebigkeit
h_0	nominale, absolute Spalthöhe
h_g	Höhe der Zuführnut

I	elektrischer Strom
I_0	Vormagnetisierungsstrom
I_x	Steuerstrom
i	imaginäre Einheit ($\sqrt{-1}$)
k	statische Steifigkeit
k_i	Kraft-Strom-Faktor
k_s	Kraft-Weg-Faktor
k_{rr}, k_{tt}	Hauptsteifigkeitskoeffizienten
k_{rt}, k_{tr}	Nebensteifigkeitskoeffizienten
L_p	Polschuhlänge
l	Länge
m	Masse
m_u	Unwuchtmasse
m_{rr}, m_{tt}	Hauptträgheitskoeffizienten
m_{rt}, m_{tr}	Nebenträgheitskoeffizienten
n	Anzahl der Windungen pro Polpaar
p	Druck
Q	Fluidkraft
R	1.) Zapfenradius 2.) Korrelationskoeffizient
r	Bewegungsradius
r_u	Unwuchtradius
Re	Reynoldszahl
Re_Q	Quetschfilmdämpfer-Reynoldszahl
Re_{Q0}	Resonanzreynoldszahl
s	Laplace-Variable
s_0	Luftspalt
s_x	Auslenkung im Magnetfeld
So	Sommerfeldzahl
So^*	frequenzabhängige Sommerfeldzahl ($So^* = So \cdot Re_Q$)
T	Temperatur
t	Zeit
u_i	Geschwindigkeitskomponente in Richtung i
V	Volumen
$\dot{V}$	Volumenstrom

v	vertikale Koordinate
W	magnetische Energie
w	lokale magnetische Energiedichte
x	translatorische Koordinate
y	translatorische Koordinate
Z	Fliehkraft

Vektoren

A	gerichtete Fläche im Magnetfeld
B	gerichtete magnetische Flussdichte
D_r	Vektor der von der Radialgeschwindigkeit abhängigen Dämpfungen
D_t	Vektor der von der Tangentialgeschwindigkeit abhängigen Dämpfungen
F	Kraftvektor
F_U	Unwuchtkraftvektor
H	gerichtete magnetische Feldstärke
Q	Fluidkraftvektor
s	geschlossener Weg im Magnetfeld
So^*	Sommerfeldzahlvektor, frequenzabhängig
x	Verschiebungsvektor in kartesischen Koordinaten
z	Verschiebungsvektor in Polarkoordinaten

Matrizen und Tensoren

A_z	dimensionslose Zustandsmatrix des Gesamtsystems
B_z	dimensionslose Eingangsmatrix des Gesamtsystems
C_z	dimensionslose Ausgangsmatrix des Gesamtsystems
D	Dämpfungsmatrix
G	Übertragungsmatrix
I	Einheitsmatrix
K	Steifigkeitsmatrix
K_r	Steifigkeitsmatrix des in weichen Federn gelagerten, starren Rotors
$\tilde{K}$	dynamische Steifigkeitsmatrix (Steifigkeitsfrequenzgang)
M	Massenmatrix
M_r	Massenmatrix des in weichen Federn gelagerten, starren Rotors

Griechische Lettern

Skalare Größen

α	halber Winkel zwischen zwei Polschuhen eines Elektromagneten
α_{rr}, α_{tt}	dimensionslose Hauptträgheitskoeffizienten
α_{rt}, α_{tr}	dimensionslose Nebenträgheitskoeffizienten
β	1.) relative Lagerbreite 2.) bezogene Flussdichte
β_{rr}, β_{tt}	dimensionslose Hauptdämpfungskoeffizienten
β_{rt}, β_{tr}	dimensionslose Nebendämpfungskoeffizienten
Γ	kalibrierter Hallsensor-Messwert
γ	Winkellage des Zapfens
$\dot{\gamma}$	Winkelgeschwindigkeit des Zapfens um die Lagerschalenmitte
γ_{rr}, γ_{tt}	dimensionslose Hauptsteifigkeitskoeffizienten
γ_{rt}, γ_{tr}	dimensionslose Nebensteifigkeitskoeffizienten
δ	relative Abweichung
ε	relative Exzentrizität, relativer Orbitradius
$\dot{\varepsilon}$	relative Radialgeschwindigkeit
ε'	dimensionslose Radialgeschwindigkeit
ε''	dimensionslose Radialbeschleunigung
ζ	1.) dimensionslose Koordinate in Breitenrichtung 2.) dimensionslose radiale Verschiebung
ζ'	dimensionslose Geschwindigkeit
ζ''	dimensionslose Beschleunigung
η	1.) dynamische Viskosität 2.) bezogene Frequenz 3.) auf den Luftspalt bezogene relative Auslenkung (Magnetlager- y -Achse)
Θ	elektrische Durchflutung
λ	Volumenviskosität
λ_k	Eigenwert
μ	Permeabilität
μ_0	Permeabilität im Vakuum, $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$
μ_r	relative (werkstoffspezifische) Permeabilität
ν	kinematische Viskosität
ξ	auf den Luftspalt bezogene relative Auslenkung (Magnetlager- x -Achse)
Π	dimensionsloser Druck

Π^*	dimensionsloser Druck ($\Pi^* = \Pi \cdot Re_Q$)
π	Kreiszahl
P	Lagerparameter
ρ	Dichte
σ	Standardabweichung
$\Delta\sigma$	relative Schwankung der Sommerfeldzahl
ς	Hallsensorsignal
τ	1.) dimensionslose Zeit 2.) bezogene Temperatur
v	auf die Spalthöhe bezogene Auswuchtgüte
Φ	magnetischer Fluss
φ	1.) Umfangswinkelkoordinate 2.) Phasenwinkel
ψ	1.) nominale, relative Spalthöhe 2.) Phasenwinkel
Ω	Winkelgeschwindigkeit
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems
ω_d	Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems
$\overline{\Omega}$	hydrodynamisch wirksame Winkelgeschwindigkeit

Vektoren

$\mathbf{A}$	dimensionsloser Trägheitsvektor
$\mathbf{\Gamma}$	dimensionsloser Steifigkeitsvektor
ζ	dimensionsloser Verschiebungsvektor
ζ'	dimensionsloser Geschwindigkeitsvektor
ζ''	dimensionsloser Beschleunigungsvektor
$\mathbf{Y}$	Richtungsvektor der dimensionslosen Unwucht

Matrizen und Tensoren

$\mathbf{A}$	dimensionslose Trägheitsmatrix des Quetschfilmdämpfers
$\tilde{\mathbf{A}}$	dimensionslose Trägheitsmatrix des Gesamtsystems
$\mathbf{B}$	dimensionslose Dämpfungsmatrix des Quetschfilmdämpfers
$\tilde{\mathbf{B}}$	dimensionslose Dämpfungsmatrix des Gesamtsystems
$\mathbf{\Gamma}$	dimensionslose Steifigkeitsmatrix des Quetschfilmdämpfers
$\tilde{\mathbf{\Gamma}}$	dimensionslose Steifigkeitsmatrix des Gesamtsystems
δ_{ij}	Kroneckerdelta (Komponenten des Einheitstensors)

ϵ_{ij}	Deformationsgeschwindigkeitstensor
σ_{ij}	Spannungstensor

Kalligraphische Lettern

$\Im\{\cdot\}$	Imaginärteil
$\mathcal{O}(\cdot)$	Größenordnung
$\Re\{\cdot\}$	Realteil

Hochgestellte Indizes

$+$	oberes Polpaar
$-$	unteres Polpaar
$'$	Ableitung nach der dimensionslosen Zeit

Tiefgestellte Indizes

A	Magnetlager A
abs	absolut
B	Magnetlager B
C	Kreisbahn
c	1.) berechnet 2.) Cosinus-Anteil
d	dynamisch
E	Ellipse
e	Effektivwert
eff	effektiv
F	Eisen
$\mathcal{F}$	Fourierdarstellung
H	Hauptrichtung
h	horizontal
i	Zähler
ist	Istwert
j	Zähler
k	Zähler

L	Luftspalt
m	gemessen
nom	nominell
Q	1.) Querrichtung 2.) Quetschfilmdämpfer
r	Radialkomponente
rel	relativ
ref	Bezugswert, Referenzwert
s	1.) statisch 2.) Sinus-Anteil
$soll$	Sollwert
t	Tangentialkomponente
v	vertikal
$\parallel$	parallel
$\perp$	senkrecht

Übergeschriebene Zeichen

$\dot{(\cdot)}$	Ableitung nach der Zeit
$\hat{(\cdot)}$	Amplitude
$\widehat{(\cdot)}$	komplexe Amplitude
$\overline{(\cdot)}$	Mittelwert

Abkürzungen

AMB	aktives Magnetlager
DSP	Digitaler Signalprozessor
PC	Personal Computer
QFD	Quetschfilmdämpfer

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzip des QFD	1
1.2	Übliche Bauformen von Quetschfilmdämpfern	3
2.1	Koordinaten für die Schichtenströmung	15
2.2	Koordinaten für die Reynoldsgleichung	18
2.3	Exemplarische Druckverteilung für $\varepsilon = 0,5$ und $\varepsilon' = 0,05$	21
2.4	Anteile an der Druckverteilung (Lagermitte, $\zeta = 0$)	22
2.5	Einfluss der Bewegungsgrößen auf die Druckverteilung	22
2.6	Sommerfeldzahlen nach Kurzlager- und 2π -Theorie	23
2.7	Vergleich überlagerter stat. und dyn. Druckverteilung mit Kavitation	25
2.8	Sommerfeldzahlen nach Kurzlager- und 2π -Theorie mit Kavitation	26
2.9	Prinzipieller Aufbau eines Magnetlagers	27
2.10	Magnetisierungskurve und relative Permeabilität für 4%-Si-Eisenblech	28
2.11	Elektromagnetische Kraft	29
2.12	Differenzanordnung und -ansteuerung	31
2.13	Theoretischer Kraftfehler nach Flusssdichte- und k_i - k_s -Methode	33
3.1	Prüfstand	36
3.2	QFD am Prüfstand	37
3.3	Zu- und Abfluss im QFD-Gehäuse	39
3.4	Bedeutung der Magnetlager für die Identifikation des QFD	40
3.5	Aufbau der Magnetlager	41
3.6	Anordnung der Pole und der Hallsensoren	42
3.7	Welle	43
3.8	Hydraulikkreislauf	44
3.9	Signalfluss am Prüfstand	47
3.10	Frei-freie Biegeeigenformen I und II der Welle	49
3.11	Statische Nachgiebigkeit der Welle	50
3.12	FE-Modelle und Eigenformen der Gehäuse	51
3.13	Amplituden der gemessenen Übertragungsfunktionen der Gehäuse	52
3.14	Deformation der Gehäuse infolge statischer Last	53
3.15	Bezogenes Übertragungsverhalten von Welle, QFD- und AMB-Gehäuse	56
4.1	Koordinatensysteme	59
4.2	Flusssdichteverteilung aus FE-Berechnung	60
4.3	Referenzkraft, Hallsensorkraft und relativer Fehler aus FE-Modell	61
4.4	Referenz-, Hallsensorkraft und relat. Fehler (FE) bei Variation von I_0	62
4.5	Signalfluss von Hallsensor nach Kraft	63
4.6	Bestimmung des Schwerpunkts der Welle	64
4.7	Kräfte in pos. und neg. Richtung	65
4.8	Entwicklung der Korrekturfaktoren $c^\pm$ bei der Hallsensor-Kalibrierung	66
4.9	Positionen zur Untersuchung des statischen Kraftmessfehlers	67
4.10	Positionsabhängiger statischer Kraftmessfehler (Magnetlager A)	67

4.11	Statische Kalibrierkoeffizienten in Abhängigkeit der Flusssdichteniveaus	68
4.12	Polynomkoeffizienten für die statischen Kalibrierkoeffizienten	69
4.13	Auswirkung der statischen Kraftkalibrierung auf die gemessenen Kräfte	70
4.14	Gemessene dynamische Kraftbeträge aus Bewegung und Hallsensoren .	71
4.15	Verhältnis zwischen dynamischer Hallsensorkraft und Referenzkraft A_x	72
4.16	Auswirkung der stat. Kalibrierung auf die dyn. Kraftmessgenauigkeit .	73
4.17	Dynamische Kraftmessgenauigkeit nach stat. und dyn. Kalibrierung . .	74
4.18	Vermessung der Spaltfunktion	77
4.19	Pfade zur Vermessung der Spaltfunktion	77
4.20	Beispiel für eine gemessene Spaltfunktion	78
4.21	Rundheitsfehler einiger Spaltfunktionen (Reproduzierbarkeit)	78
4.22	Positionen der Temperatursensoren	79
4.23	Kennwerte zur Erfassung der temperaturabh. Lage der Spaltfunktion .	80
4.24	Abtastung der Spaltfunktion bei veränderlichen Temperaturen	81
4.25	Temperaturabhängigkeit der Spaltfunktion	83
4.26	Normierung der Spaltfunktion	84
4.27	Viskosität über der Temperatur für zwei synthetische Öle und Wasser .	85
4.28	Freikörperbild für das dynamische Kräftegleichgewicht	87
4.29	Dynamisches FE-Balkenmodell der Welle	88
4.30	Entwicklung der relativen Abweichung δ während einer Iteration	91
4.31	Abweichungen zwischen gemessenen und geschätzten Spaltfunktionen .	94
4.32	Blockschaltbild des positionsgeregelten Systems	94
4.33	Iteratives Verfahren zum Stellen der Weganregung	96
5.1	Positionsraster	97
5.2	Abhängigkeiten einiger mittlerer statischer Fluidgrößen	98
5.3	Positionsabhängige Kennfelder der statischen Fluidkraft: ohne/mit Nut	99
5.4	Bezogene statische Fluidkraft: ohne/mit Nut	100
5.5	Positionsabhängige Kennfelder der statischen Fluidkraft: Zuführungen .	101
5.6	Bezogene statische Fluidkraft: Zuführungen	102
5.7	Bezogene statische Fluidkraft (3 und 2 Zuführungen): superponiert . .	103
5.8	Fourierspektren der dynamischen Weg- und Kraftsignale	105
5.9	Orbit mit zwei Harmonischen	106
5.10	Rohsignal und aus Fourierkoeffizienten synthetisierte Signale	106
5.11	Korrelation und Standardabweichung: Rohsignale, synthet. Signale . .	107
5.12	Verhältnis zwischen Fluidkräften und Magnetlagerkräften	109
5.13	Beispiele für die Qualität der Rundheit von Orbits	110
5.14	Polare Darstellung von Weg und Kraft	112
5.15	Einfluss des Orbitradius auf die Fluidkräfte	113
5.16	Einfluss der Orbitfrequenz auf die Fluidkräfte	114
5.17	Einfluss des Zuführdrucks auf die Fluidkräfte	115
5.18	Einfluss der Zuführbohrungen auf die Fluidkräfte	116
5.19	Einfluss der Nut auf die Fluidkräfte	117
5.20	Beispiel für Mittelwerte und Schwankungen eines Kraftverlaufs	118
5.21	Gemessene Sommerfeldzahlen, gemittelt über einen Umlauf	120

5.22	Relative Schwankung der gemessenen Sommerfeldzahlen	121
5.23	Axiale Druckverteilungen ohne Zuführnut und mit mittlerer Nut	123
5.24	Druckverteilungen, berechnet mit SFDfEM	125
5.25	Dampfdruck von Wasser um 16°C	126
5.26	Vergleich von Sommerfeldzahlen (Messung, FE-Lösung und Kurzlager)	127
5.27	Vergleich von Sommerfeldzahlen, gemittelt über einen Umlauf	128
5.28	Relative Schwankung der Sommerfeldzahlen (Messung und FE-Lösung)	129
6.1	Ellipsen- und kreisförmige Anregung sowie deren Differenz	136
6.2	Prinzipielle Übereinstimmung zwischen Modellansatz und Messung	139
6.3	Bezog. Standardabweichungen zw. gemessenen und identifz. Kräften	141
6.4	Dynamische Koeffizienten, Variation des Zuführdrucks	143
6.5	Dynamische Koeffizienten, Variation der Zuführung	144
6.6	Dynamisches Ersatzmodell des starren Rotors in QFD	147
6.7	Koordinatensystem des unwuchtbehafteten, starren Rotors	148
6.8	Eigenwerte von $\mathbf{A}_z$ in Abhängigkeit des Orbitradius	150
6.9	Stabilitätsgrenzen bei teilweise negativen Dämpfungskoeffizienten	151
6.10	Stabilitätsgrenzen: maximale Orbitradien über dem Lagerparameter	152
6.11	Beispiele für bezogene Systemantworten $ E_j(Re_Q) $	155
6.12	Unwuchtgrenzen in Abhängigkeit der Resonanzreynoldszahl	157
6.13	Unwuchtgrenzen in Abhängigkeit der Unwucht	158
6.14	Unwuchtgrenzen in Abhängigkeit des Zuführdrucks	159
6.15	Unwuchtgrenzen in Abhängigkeit der Zuführung	160
B.1	Übersicht über die gemessenen statischen Kraftkennfelder	178
B.2	mit Nut / eine Zuführung / 1,0 bar	179
B.3	mit Nut / eine Zuführung / 2,0 bar	180
B.4	mit Nut / eine Zuführung / 4,0 bar	181
B.5	mit Nut / eine Zuführung / 8,0 bar	182
B.6	mit Nut / zwei Zuführungen / 1,0 bar	183
B.7	mit Nut / zwei Zuführungen / 2,0 bar	184
B.8	mit Nut / zwei Zuführungen / 4,0 bar	185
B.9	mit Nut / zwei Zuführungen / 8,0 bar	186
B.10	mit Nut / drei Zuführungen / 1,0 bar	187
B.11	mit Nut / drei Zuführungen / 2,0 bar	188
B.12	mit Nut / drei Zuführungen / 4,0 bar	189
B.13	mit Nut / drei Zuführungen / 8,0 bar	190
B.14	ohne Nut / drei Zuführungen / 1,0 bar	191
B.15	ohne Nut / drei Zuführungen / 2,0 bar	192
B.16	ohne Nut / drei Zuführungen / 4,0 bar	193
B.17	ohne Nut / drei Zuführungen / 8,0 bar	194
B.18	Einfluss des Orbitradius auf die dynamischen Fluidkräfte	196
B.19	Einfluss der Orbitfrequenz auf die dynamischen Fluidkräfte	197
B.20	Einfluss des Zuführdrucks auf die dynamischen Fluidkräfte	198

B.21 Einfluss der Zuführbohrungen auf die dynamischen Fluidkräfte	199
B.22 Einfluss der Nut auf die dynamischen Fluidkräfte	200
B.23 Abweichung der Sommerfeldzahlen zwischen FE-Lösung und Messung . .	202
C.1 Dynamische Koeffizienten nach Kurzlagertheorie	204
C.2 Identifizierte dynamische Koeffizienten: ohne Nut, drei Zuführungen . .	206
C.3 Identifizierte dynamische Koeffizienten: mit Nut, drei Zuführungen . . .	207
C.4 Identifizierte dynamische Koeffizienten: mit Nut, zwei Zuführungen . . .	208
C.5 Identifizierte dynamische Koeffizienten: mit Nut, eine Zuführung	209
D.1 Unwuchtgrenzen: ohne Nut, drei Zuführungen / $\Pi^* = 1,7$	212
D.2 Unwuchtgrenzen: ohne Nut, drei Zuführungen / $\Pi^* = 6,8$	213
D.3 Unwuchtgrenzen: ohne Nut, drei Zuführungen / $\Pi^* = 27,2$	214
D.4 Unwuchtgrenzen: mit Nut, drei Zuführungen / $\Pi^* = 1,7$	216
D.5 Unwuchtgrenzen: mit Nut, drei Zuführungen / $\Pi^* = 6,8$	217
D.6 Unwuchtgrenzen: mit Nut, drei Zuführungen / $\Pi^* = 27,2$	218
D.7 Unwuchtgrenzen: mit Nut, zwei Zuführungen / $\Pi^* = 1,7$	220
D.8 Unwuchtgrenzen: mit Nut, zwei Zuführungen / $\Pi^* = 6,8$	221
D.9 Unwuchtgrenzen: mit Nut, zwei Zuführungen / $\Pi^* = 27,2$	222
D.10 Unwuchtgrenzen: mit Nut, eine Zuführung / $\Pi^* = 1,7$	224
D.11 Unwuchtgrenzen: mit Nut, eine Zuführung / $\Pi^* = 6,8$	225
D.12 Unwuchtgrenzen: mit Nut, eine Zuführung / $\Pi^* = 27,2$	226

Tabellenverzeichnis

3.1	Abmessungen der Quetschfilmdämpfer	38
3.2	Technische Daten der Magnetlager	40
3.3	Technische Daten der Welle	43
3.4	Technische Daten der Hydraulikkomponenten	45
3.5	Koeffizienten zur Beschreibung der Bauteil-Nachgiebigkeiten	54
4.1	Zusammenstellung der statischen und dynamischen Kraftmessfehler	75
5.1	Parameterabhängigkeiten in gemessenen und berechneten Kräften	130
6.1	Standardabweichungen für die Beispiele aus Bild 6.2	140