

Theoretische und experimentelle Analysen von Flugtriebwerksrotoren zur aktiven Schwingungsminderung mit Piezostapelaktoren

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Filip Lebo

aus Mostar

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. A. Dreizler
Tag der Einreichung:	07.12.2010
Tag der mündlichen Prüfung:	09.02.2011

Darmstadt 2010

D 17

Forschungsberichte Mechatronik & Maschinenakustik

Filip Lebo

**Theoretische und experimentelle Analysen von
Flugtriebwerksrotoren zur aktiven Schwingungs-
minderung mit Piezostapelaktoren**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0026-9

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau, ehemals Institut Mechatronik im Maschinenbau, der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann gilt mein besonderer Dank für die Anregung zu dieser Arbeit und für die wissenschaftliche Betreuung. Sein großes Interesse an der Thematik und seine stetige freundliche Unterstützung waren für mich eine hohe Motivation und Bereicherung. Das von ihm entgegengebrachte Vertrauen und die großen Freiräume, die er mir einräumte, haben wesentlich zu einer angenehmen und produktiven Arbeitsatmosphäre beigetragen.

Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht danke ich für die fortwährend gute Zusammenarbeit und für die vielen fruchtbaren Gespräche, die stets eine Bereicherung und Stütze waren.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. A. Dreizler danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates und das große Interesse, das er dieser Arbeit entgegenbrachte.

Mein besonderer Dank gilt meinen Arbeitskollegen am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau für die großartige Zusammenarbeit und für viele anregende Fachgespräche. Das freundschaftliche Miteinander am Institut hat das Arbeiten ganz wesentlich erleichtert. Ebenso danke ich allen Studenten, die im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten einen aktiven Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Dank gebührt auch den Herrn W. Rausch und U. Rodenhäuser für die umfangreichen Werkstattarbeiten, die im Zuge des Prüfstandaufbaus nötig wurden.

Zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern für den Rückhalt und die stetige Förderung meiner Interessen und bei meiner lieben Silvija für ihre Geduld und ihr Verständnis während der gesamten Zeit dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit	3
2 Grundlagen der Piezoaktorik	5
2.1 Der piezoelektrische Effekt	5
2.2 Zur Auslenkung	6
2.3 Bauformen	7
2.3.1 Stapelaktoren (Linearaktoren)	7
2.3.2 Biegeaktoren (Bimorph- und Multimorphaktoren)	9
2.3.3 Scheraktoren	10
2.4 Altern und Hysterese	11
2.5 Bauformgegenüberstellung und -auswahl	12
3 Rotorprüfstand	15
3.1 Versuchsrotor	15
3.1.1 Skalierung	16
3.1.2 Fertigung	18
3.1.3 Rotorlagerung	21
3.2 Eigenschaften und Aufbau des Prüfstands	23
3.2.1 Neuartige Übertragungsglieder	29
3.3 Auswahl geeigneter Piezostapelaktoren	32
3.3.1 Strom-Spannungs-Beziehung	33
3.3.2 Kapazität	34
3.3.3 Steifigkeit	35
3.3.4 Stellkraft und -hub	36
3.3.5 Ausgewählter Piezostapelaktor	37
3.3.6 Ausgewählter Leistungsverstärker	40
3.4 Elastisches Wuchten	42

3.5	Messdatenverarbeitung	47
3.6	Reglerimplementierung	49
4	Modellbildung	51
4.1	Rotormodell	51
4.1.1	Gyroskopischer Effekt	52
4.2	Mechanische nichtrotierende Komponenten	54
4.2.1	Aufhängung	54
4.2.2	Kupplung	58
4.3	Elektronische Komponenten	59
4.3.1	Verstärkereigendynamik	59
4.3.2	Signalfilter	60
4.4	Nichtlinearitäten	61
4.4.1	Aktormodellierung mit Preisach-Hystereseeoperator	61
4.4.2	Totzeit-Einfluss	70
5	Regelung	73
5.1	Modellfreie PDT ₁ -Regelung	73
5.2	Modellbasierte LQG-Regelung	74
5.2.1	Kalman-Beobachter	76
6	Numerische u. experimentelle Untersuchung	79
6.1	Strukturdämpfung	79
6.2	Modalanalyse am Rotor	81
6.2.1	Rotor ungefesselt	82
6.2.2	Rotor gefesselt	83
6.3	Aktorvalidierung	84
6.4	Modellabgleich bei stillstehendem Rotor	85
6.5	Instationärer Hochlauf	86
6.6	Hochlaufversuche mit Regelung	87
6.7	Verhalten bei Aktorausfall	91
7	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Literaturverzeichnis	95
A	Anhang: MATLAB-Tools	101
B	Anhang: Prüfstandsdaten	103
B.1	Modellkonstanten	103
B.2	Experimentelle Modalanalyse	104
B.3	Rotorlagerung	105
C	Anhang: Reglerprozess	106
C.1	MATLAB-Modelle	106

Abkürzungsverzeichnis

AC-Motor	Wechselstrom-Motor
AD-Wandler, ADC	Analog-Digital-Wandler
ALGL	Axial-Linear-Gelenk-Lager
Bus	System zur Datenübertragung zwischen mehreren Systemen
CAD	Computer-Aided Design
DA-Wandler, DAC	Digital-Analog-Wandler
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSS	Front Stub Shaft
Hrsg.	Herausgeber
HVPZT	Hoch-Volt piezoelektrischer Stapelaktor
I/O	Input/Output
ISA	Industry Standard Architecture
LE	Lagerebene
LPS	Low Pressure Shaft
LQG	Linear-Quadratischer Optimalregler mit gaußschen Störungssignalen
LQR	Linear-Quadratischer Optimalregler
LVPZT	Nieder-Volt piezoelektrischer Stapelaktor
PDT ₁	Proportional-Differential-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung
PZT	Plumbum-Zirkonat-Titanat, stellvertretend für piezoelektrischer Stapelaktor
QFD	Quetschfilmdämpfer
RC-Glied	Elektronische Schaltung bestehend aus Widerstand und Kondensator
RSS	Rear Stub Shaft
SE	Sensorebene
TD	Turbine Dummy
TTL	Transistor-Transistor-Logik

WE	Wuchtebene
ZRD	Zustandsraumdarstellung

Formelverzeichnis

Notation

x, X	Skalar
$\bar{x}$	komplexe Größe
$\hat{x}, \widehat{X}$	Amplitude
$\boldsymbol{x}$	Vektor
$\boldsymbol{X}$	Matrix
$\dot{(\)}$	Ableitung nach der Zeit
$\boldsymbol{X}^T$	Transponierte der Matrix

Große griechische Buchstaben

$\hat{\Gamma}$	Preisach-Hystereseeoperator
Δ	Differenz, Änderung, Bereich
Θ_A	Polares Antriebs-Massenträgheitsmoment
Θ_K	Polares Kupplungs-Massenträgheitsmoment
Θ_{LG}	Äquatoriales Massenträgheitsmoment Lagergehäuse 2/3
Θ_p	$= \Theta_A + \Theta_K + \Theta_R$
Θ_R	Polares Rotor-Massenträgheitsmoment
$\Theta_{R,eq(ref. z_m)}$	Äquatoriales Rotor-Massenträgheitsmoment
Λ	logarithmisches Dekrement
Ψ_{nlin}	nichtlineare Strecke
$\tilde{\Psi}_{lin}$	lineare geschätzte Strecke
$\Omega_{2,2}$	2. kritische Gleichlauf-Winkelgeschwindigkeit
Ω	Winkelgeschwindigkeit des Rotors
Ω_{kr}	höchste kritische Winkelgeschwindigkeit im Betriebsbereich
Ω_{max}	maximale Winkelgeschwindigkeit

Kleine griechische Buchstaben

$\bar{\alpha}$	Einflusszahl
α, β	Schwellenwerte des Preisach-Operators
α_D, β_D	Freie Konstanten für Dämpfungsmaß
$\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$	Hystereeseoperator
$\delta_{23,i}$	Abklingkoeffizient der Rotoraufhängung
ε_R	Prozessrauschen
$\varepsilon_T, \varepsilon_T$	Permittivität
ζ	Dämpfungsgrad des PZT Leistungsverstärkers
η, η_i	bezogene Drehzahl
θ_F	Fügetemperatur
$\mu(\alpha, \beta)$	Preisachfunktion
μ_r	Lager-Reibbeiwert
$\nu_1^{elast}, \nu_2^{elast}$	1. und 2. Biegeeigenform
$\nu_1^{starr}, \nu_2^{starr}$	1. und 2. Starrkörpereigenform
ν_L	kinematische Viskosität von Luft
ν_R	Messrauschen
ν_{ru}	Haftbeiwert
ϱ	Dichte
ϱ_L	Dichte von Luft
σ_V	Vergleichsspannung
φ_0, φ_1	Winkellage für 0-Lauf, 1-Lauf
$\varphi_{23,i}$	Eigenvektoren der Aufhängung
φ_A	Winkellage Antrieb
φ_R	Winkellage Rotor
$\varphi_t(s)$	Phasengang des Totzeitgliedes
$\varphi_{t,r,max}(s)$	maximale Phasenverlust im Betriebsbereich aufgrund von Totzeit
ω	Resonanzfrequenz des Rotors
$\omega_{0,i}$	Eigen-Kreis-Frequenz des ungedämpften Schwingers
$\omega_{23,i}$	Eigen-Kreis-Frequenz der Rotoraufhängung
ω_T, ω_{TD}	Eckfrequenzen eines Lead-Lag-Gliedes

Große lateinische Buchstaben

$A, \widetilde{A}, A_{nlin}$	Systemmatrix, geschätzte $\sim$, nichtlineare $\sim$
A_P	PZT Querschnittsfläche
$B, \widetilde{B}, B_{nlin}$	Eingangsmatrix, geschätzte $\sim$, nichtlineare $\sim$
$C, \widetilde{C}$	Ausgangsmatrix, geschätzte $\sim$
C_{fil}	Kapazität im Anti-Aliasing-Filter
C_{HV}	Kapazität eines PZT im Hochvoltbetrieb
C_P	Kapazität eines PZT
D_{23}	Dämpfungsmatrix Rotoraufhängung
$D_{23,i}$	Dämpfungsmaß Rotoraufhängung
ID	Innendurchmesser Piezorohr
D_Λ	Dämpfungsmaß über logarithmisches Dekrement bestimmt
D, D	elektrische Verschiebungsdichte
D_i	Lehrsches Dämpfungsmaß
D^i	irreversibler Anteil von D
D_P	PZT Durchmesser
D_{PS}	Dämpfungsmatrix Prüfstand
D_R	Dämpfungsmatrix Rotor
D^r	reversibler Anteil von D
E, E	elektrische Feldstärke
$F(\alpha', \beta')$	Ausgangsgröße für $T(\alpha', \beta')$
$F(\alpha_0, \beta_0)$	Ausgangsgröße für $T(\alpha_0, \beta_0)$
F_1	Vorspannkraft
$F_{1,2}$	Umlaufende Unwuchtkraft für 1. biegekritische Gleichlauf-Drehzahl
F_2	Unwuchtbelastung
F_{Last}	Gesamtkraft an Piezokeramik bzw. am Piezoaktor
$F_{Last,max}$	maximal zulässige Gesamtkraft an Piezokeramik bzw. am Piezoaktor
$F_{LE1}, F_{LE2}, F_{LE3}$	Lagerkräfte an Lagerebenen 1, 2 und 3
F_m	mittlere Belastung
F_P, f_P	generierte Kraft eines PZT
$F_{P,eff}$	effektive generierte Kraft eines PZT
$F_{P,eff,max}$	maximale effektive generierte Kraft eines PZT
$F_{P,max}$	maximal generierbare Kraft eines PZT, Blockierkraft

$F_{Unwucht}, F_U$	Unwuchtkraft
$F_{Scheibe}$	Gewichtskraft der Rotorscheibe
G	Auswucht-Gütestufe
$G_{fil}(s)$	Übertragungsfunktion des Anti-Aliasing-Filters
$\mathbf{G}_R$	Kreiselmatrix
$G_t(s)$	Übertragungsfunktion des Totzeitgliedes
$G_{ver}(s)$	Übertragungsfunktion des Verstärkereigendynamik
I_a	Dauerstrom
J	Gütefunktional
$\mathbf{K}_{23}$	Steifigkeitsmatrix Rotoraufhängung
$\mathbf{K}$	Regelmatrix
K	Verstärkungsfaktor des PZT Leistungsverstärkers
K_P	Proportionalkonstante eines Lead-Lag-Gliedes
$\mathbf{K}_{PS}$	Steifigkeitsmatrix Prüfstand
$\mathbf{K}_R$	Steifigkeitsmatrix Rotor
L	Länge eines PZT
ΔL_0	maximale Längenänderung eines PZT
ΔL	Längenänderung eines PZT
$\mathbf{L}_K$	Rückführmatrix
$\Delta L_{P,eff}$	effektive Längenänderung eines PZT
$\Delta L_{P,eff,max}$	maximale effektive Längenänderung eines PZT
L_{PK}	Länge einer Piezokeramik
ΔL_{PK}	Längenänderung einer Piezokeramik
$L(t)$	Abgrenzungslinie in der Preisach-Ebene
$\mathbf{M}_{23}$	Massenmatrix Rotoraufhängung
M_k	lokales Maximum
$\mathbf{M}_{PS}$	Massenmatrix Prüfstand
$\mathbf{M}_R$	Massenmatrix Rotor
$\mathbf{P}$	Lösung der Matrix-Riccatigleichung
$\mathbf{Q}, \mathbf{R}$	LQ-Wichtungsmatrizen
Q_k	trapezförmiger Teilbereich der Preisach-Ebene
R_{emin}	Mindest-Streckgrenze
R_{fil}	Widerstand im Anti-Aliasing-Filter
R_Z	Rauheit
S^+, S^-	positive und negative Teilebenen der Preisach-Ebene
$\mathbf{S}, S$	mechanische Verzerrungen

S_E	Sicherheit gegen Passungsrost
S_F	Fließsicherheit
$S_{F\min}$	Mindestfliesicherheit
S^i	irreversibler Anteil von S
S^r	reversibler Anteil von S
S_{ru}	Rutschsicherheit
S_{rumin}	Mindestrutschsicherheit
$T(\alpha', \beta')$	dreieckförmiger Teilbereich der Preisach-Ebene
$T(\alpha_0, \beta_0)$	vollständiger Bereich der Preisach-Ebene
$\mathbf{T}, T$	mechanische Spannungen
T, T_D	Zeitkonstanten eines Lead-Lag-Gliedes
T_A	Mindest-Antriebsmoments
T_B	Beschleunigungsmoment
T^d	Periodendauer
T_F	$= T_{MF} + T_{RF}$
T_{kr}	erforderliches Antriebsmoment zur Resonanzdurchfahrt
T_{max}	maximales Antriebsmoment
T_{mess}	Abtastzeit $= 1/f_{mess}$
T_{MF}	Verlustmomente aufgrund von Lagerreibung im Antrieb
T_{RF}	Verlustmomente aufgrund von Lagerreibung am Rotor
T_{RL}	Verlustmomente aufgrund von Luftreibung am Rotor
T_{RLS}	Verlustmomente aufgrund von Luftreibung an der Rotorscheibe
T_{RLW}	Verlustmomente aufgrund von Luftreibung an der Rotorwelle
T_t	Gesamt-Totzeit im Regelkreis
$T_{t,h}$	Totzeit eines Haltegliedres
$T_{t,r}$	Totzeit aufgrund von Rechenzeit
$\mathbf{T}_U$	Orhtogruppe
T_V	Vollastbeharrungsmoment
T_W, T_Z	Zeitkonstanten des PZT Leistungsverstärkers
U_0	PZT Offsetspannung
U	PZT Betriebsspannung
U	Unwucht
$U_{1,Rest}^{elast}$	Restunwucht bei Drehzahl n_1^{elast} für ausgewuchteten Rotor

$U_{1,zul}^{elast}$	Zulässige Restunwucht bei Drehzahl n_1^{elast} für ausgewuchteten Rotor
U_G	Restunwucht
U_{ges}	Gesamtunwucht am Rotor
U_{max}	maximal zu applizierende Unwucht am Rotor
$\mathbf{V}$	Eingangsmatrix der Anregung
V	Volumen
V_i	Vergößerungsfunktion
$\mathbf{V}_{N+2}$	Modalmatrix

Kleine lateinische Buchstaben

a_R	konstante Rotorbeschleunigung
c_U	Skalierungsfaktor zur Baureihenentwicklung
d_{31}	Piezomodul orthogonal zum Polarisationsvektor der Keramik
d_{33}	Piezomodul parallel zum Polarisationsvektor der Keramik
$\mathbf{d}, d_{ij}$	piezoelektrische Konstanten, Moduln
d_F	Fugendurchmesser
d_{PK}	Wanddicke einer Piezokeramik
d_S	Scheibendurchmesser
d_W	Wellendurchmesser
$\mathbf{e}$	Schätzfehler
e	Exzentrizität
$f_{2,2}$	2. Gleichlauf-Resonanzfrequenz
$\mathbf{f}_{23}$	Kraftanregung Rotoraufhängung
f	Ausgangsgröße des Preisach-Hystereseseoperators
$\Delta f_A, \Delta f_R$	Betriebsfrequenzbereich
$f_{fil,eck}$	Eckfrequenz des Anti-Aliasing-Filters
f_m	Beiwert
f_{mess}	Abtastfrequenz der Messkarte
f_{PZT}	Resonanzfrequenz PZT
$\mathbf{f}_R$	Kraftanregung Rotor
$\mathbf{f}_U$	Unwuchtkraft

h_0	Lichthöhe Tellerfeder
i	komplexe Zahl
i_P	Strombedarf einer Piezokeramik
k_β	Drehsteifigkeit des Lagergehäuses 2/3
k_A	Variable Steifigkeit der Aufhängung
k_{AK}	radiale Steifigkeit der Antriebswelle am Angriffspunkt der Kupplung
$k_g^{23,i}$	generalisierte Steifigkeit der Aufhängung
k_G	Steifigkeit Axial-Linear-Gelenk-Lager
k_{ij}	Element aus $\mathbf{K}$
k_K	radiale Kupplungssteifigkeit
$k_{K,res}$	Steifigkeit der Antrieb-Kupplung-Paarung
k_{L1}	Steifigkeit Hybrid-Rillenkugellager (radial)
k_L	Steifigkeit Hochgenauigkeits-Schräggugellager (radial)
k_{LE1}	Steifigkeit Aufhängung an Lagerebene 1
k_P	Piezosteifigkeit
k_R	Trägheitsradius des Rotors
k_{RK}	radiale Rotorsteifigkeit am Angriffspunkt der Kupplung
k_V	Steifigkeit Vorpsann-Tellerfeder
Δl	aus dynamischen Kräften resultierende Dehnung eines PZT
l_F	Fugenlänge
l_S	Scheibenlänge einer Keramik
l_W	Wellenlänge
m	Masse
$m_g^{23,i}$	generalisierte Masse der Aufhängung
m_k	lokales Minimum
m_{LG}	Masse Lagergehäuse 2/3
m_R	Rotormasse
n_Λ	Schwingungszyklen
n_1^{dyn}	kritische Drehzahl für 1. Biegeeigenform
n_1^{elast}	Drehzahl dicht unterhalb der 1. Rotorresonanz
$n_{1,1}$	1. biegekritische Gegenlauf-Drehzahl
$n_{1,2}$	1. biegekritische Gleichlauf-Drehzahl
$n_{2,1}$	2. biegekritische Gegenlauf-Drehzahl
$n_{2,2}$	2. biegekritische Gleichlauf-Drehzahl

n_{ab}	Abhebedrehzahl
n_{max}	maximale Rotordrehzahl
n_{PK}	Anzahl der Keramikschichten eines PZT
n_R	Rotordrehzahl
p_F	Fugendruck
$p_{Last,max}$	maximal zulässige Druckbelastung am PZT
$\mathbf{q}_{23}$	Verschiebungsvektor Rotoraufhängung
$q_{dyn,i}$	radiale dynamische Rotorbiegung
$\mathbf{q}_R$	Verschiebungsvektor Rotor
$q_{stat,i}$	radiale statische Rotorbiegung
$r_0, r_1, \bar{r}_0, \bar{r}_1$	Amplitude der radialen Rotorauslenkung für 0-Lauf, 1-Lauf
r_W	Wellenradius
s	Laplace-Operator
Δs	Federweg Tellerfeder
s_E, s_E	Elastizitätskonstanten
$\mathbf{t}_1$	1. Orthogruppe
t	Zeit
t	Dicke einer Tellerfeder
t_S	Zeit zwischen zwei digitalen Abtastungen (sample time)
$\bar{u}_{10}$	generalisierte Urunwucht
$\bar{u}_{1A}$	generalisierte Ausgleichsunwucht
u	Eingangsgröße des Preisach-Hystereseeoperators
$\mathbf{u}_K$	Stellsignal des Reglers
u_P	Spannungsbedarf einer Piezokeramik
u_S	Umfangsgeschwindigkeit der Scheibe
u_W	Umfangsgeschwindigkeit der Welle
$\mathbf{x}_0, \tilde{\mathbf{x}}_0$	Anfangszustand, geschätzter $\sim$
$\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}}$	Zustandsvektor, geschätzter $\sim$
y_Λ	Abklingkurve
$\mathbf{y}_{SE}, \tilde{\mathbf{y}}$	Ausgangsvektor, geschätzter $\sim$
y_{SEx}, y_{SEy}	Wegsignal an SE in x -, y -Richtung
x, y, z	Koordinaten
z_m	Lage Massenschwerpunkt des Rotors

Abbildungsverzeichnis

1.1	Typischer Flugzyklus eines Verkehrsflugzeugs [70]	2
2.1	Indizierung des Piezomoduls [49]	5
2.2	Mechanischer Aufbau eines Stapelaktors [49]	8
2.3	Prinzip eines Piezorohrs [49]	9
2.4	Bimorphelement in Streifenbauform [50]	10
2.5	Bimorphelement in Scheibenbauform [50]	10
2.6	Biegeaktoren: Seriellbimorph und Parallelbimorph [50]	11
2.7	Materialdeformation in einem Scheraktor [49]	11
2.8	Gemessene Hysteresekurven am Piezoaktor P-025.80P	12
3.1	Schnittansicht der Dummy Niederdruckturbine (Referenzrotor) [40]	16
3.2	CAD-Zeichnung des Prüfstandrotors mit Schlagamplituden in μm	18
3.3	Ergebnis-Plot aus Berechnung mit MATLAB-Tool	19
3.4	Rotor nach dem Fügevorgang	20
3.5	Querkraftverlauf am Prüfstandsrotor infolge einer Unwuchtbelastung	22
3.6	CAD-Schnitt des Rotorprüfstands	24
3.7	Aktive Lagerabstützung	29
3.8	Montagehinweise für Piezostapelaktoren [49]	31
3.9	Axial-Linear-Gelenk-Lager (ALGL)	31
3.10	Rotorpositioniervorrichtung mit Tellerfeder	33
3.11	Wuchtvorbereitung: Eigenformen, Wuchtebenen (WE) und Sensorebene (SE)	43
3.12	Zeigerdiagramm: Grafische Bestimmung der Ausgleichssetzung	45
3.13	Weg- und Kraftamplitude über der Rotordrehzahl: vor und nach dem Wuchten	46
3.14	Signalflussdiagramm des Rotorprüfstands	48
4.1	FE-Modell des ungefesselten Prüfstandrotors	52
4.2	Gyroskopischer Effekt: Eigenfrequenzen sind drehzahlabhängig	53
4.3	Modell der aktiven Lagerabstützung	55
4.4	Übertragungsfunktion der Verstärkereigendynamik des HV-Verstärkers E-481K005	60
4.5	Schaltplan des Analogfilters	61
4.6	Elementarer Hystereseeoperator [37]	62
4.7	Blockschaltbild mit gewichteten Preisach-Operatoren [37]	63
4.8	Fiktiver zeitlicher Verlauf der Eingangsspannung [7]	64

4.9	Preisach-Ebene zum fiktiven Eingangsspannungs-Verlauf [7]	65
4.10	Hystereseverlauf durch fiktive Eingangsspannung [7]	66
4.11	Preisach-Ebene: Geometrische Interpretation	67
4.12	Preisach-Ebene: Aufteilung in Trapeze [7]	68
5.1	Blockschaltbild des geschlossenen Regelkreises mit LQ-Regelung .	76
5.2	Blockschaltbild des geschlossenen Regelkreises mit Kalman-Filter	77
6.1	Sprungantwort zur Ermittlung des Dämpfungsgrades	80
6.2	1. Eigenform des ungefesselten Rotors	82
6.3	2. Eigenform des ungefesselten Rotors	82
6.4	1. Eigenform des gefesselten Rotors	83
6.5	2. Eigenform des gefesselten Rotors	83
6.6	Vergleich PZT Hystereseverlauf	84
6.7	Störübertragungsfunktion des Rotorprüfstands ($U_2 \rightarrow y_{SE}$)	86
6.8	Instationäre Resonanzdurchfahrten für verschiedene Beschleunigungen	87
6.9	Messung der Wegamplituden, passiv versus aktiv mit 4 PZT . . .	88
6.10	Messung der Kraftamplituden, passiv versus aktiv mit 4 PZT . .	89
6.11	Wegamplituden, passiv versus aktiv, oben: Simulation, unten: Mes- sung	90
6.12	Messung der Wegamplituden, passiv versus aktiv mit 2 PZT . . .	91
A.1	Eingabemaske Reduktionsverfahren	101
A.2	Eingabemaske Festigkeitsnachweis	102
B.1	Experimentelle Modalanalyse: 1. Eigenform des gefesselten Rotors	104
B.2	Experimentelle Modalanalyse: 2. Eigenform des gefesselten Rotors	104
B.3	Statisch unbestimmte Rotorlagerung: LE1 Fest-Lager, LE2/3 Los- Lagerung in Kombination mit Axial-Linear-Gelenk-Lager	105
C.1	Subsystem Incremental Geber	106
C.2	SIMULINK-Blockschaltbild der LQG-Regelung	107

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Piezobauformen	13
3.1	Wichtige Daten zum Prüfstandsrotor	18
3.2	Zukaufteile des Rotorprüfstands	30
3.3	Kennwerte des eingesetzten Piezostapelaktors P-025.80P	38
3.4	Spezifikationen des ausgewählten Leistungsverstärkers	41
4.1	Identifizierte Parameter für das Modell der Verstärkereigendynamik	59
4.2	Wichtige Kennwerte zum Anti-Aliasing-Filter	61
6.1	Gegenüberstellung von Eigenfrequenzen für den gefesselten und un- gefesselten Rotor	81
B.1	Massenverteilung zur Modellbildung der Aufhängung	103
B.2	Steifigkeiten zur Modellbildung der Aufhängung	103