

Erhöhung der Prozessstabilität durch aktive Dämpfung von Frässpindeln mittels elektromagnetischer Aktoren

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Simon Kern

aus Ravensburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Nordmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Tag der Einreichung:	28. Oktober 2008
Tag der mündlichen Prüfung:	16. Dezember 2008

Darmstadt 2008

D17

Forschungsberichte Mechatronik & Maschinenakustik

Simon Kern

**Erhöhung der Prozessstabilität
durch aktive Dämpfung von Frässpindeln
mittels elektromagnetischer Aktoren**

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., 2008

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 978-3-8322-8132-8

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

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mechatronik im Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann für seine Unterstützung. Insbesondere möchte ich ihm Danken für die Freiräume und das Vertrauen bei der Erstellung dieser Arbeit und bei der Bearbeitung anderer Projekte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Abele, Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft bedanke ich mich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1156 „Adaptronik für Werkzeugmaschinen“.

Ich möchte Andreas Schiffler für die gute Zusammenarbeit und die ergiebigen fachlichen Diskussionen danken. Mit viel Geschicklichkeit und Geduld hat er es erst möglich gemacht, dass Späne flogen.

Schließlich danke ich Andreas Schwung, Behzad Jalizi, Britta Späh, Fei Sun und Kun Quian, die durch ihre Studien- oder Diplomarbeiten einen wertvollen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Mein herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet, die die Jahre in Darmstadt für mich zu einer unvergesslichen und kurzweiligen Zeit gemacht haben. Besonders möchte ich Kai Adler für seine immer ehrliche Meinung danken, Alexander Spieß für die geduldige Unterstützung in Linux und Latex-Fragen und meinen beiden Zimmerkolleginnen und Korrekturleserinnen Marlene Helfert und Britta Späh für die vielen Diskussionen. Christian Ehmann danke ich für seine Ratschläge und Rüdiger Bovensiepen für die Korrektur des Manuskripts.

Meinen Eltern danke ich von ganzem Herzen für ihre stetige Hilfe und Unterstützung und dass sie es mir ermöglicht haben, diesen Weg zu gehen. Nadine, danke, dass du mir in den letzten, turbulenten Monaten den Rücken freigehalten hast!

Ludwigsburg, Oktober 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hochgeschwindigkeits- und Hochleistungsbearbeitung	1
1.2	Ansätze zur Erhöhung der Prozessstabilität	2
1.3	Motorspindel mit zusätzlichem elektromagnetischem Aktor	6
1.4	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	6
2	Ratterschwingungen bei der Fräsbearbeitung	9
2.1	Schwingungen in Werkzeugmaschinen	9
2.2	Ratterschwingungen aufgrund des Regenerativeffekts	10
2.3	Modellierung des Zerspanprozesses	12
2.3.1	Stand der Technik	13
2.3.2	Mathematische Modellierung des Regenerativeffekts	15
2.4	Diskussion	21
2.4.1	Einfluss von Dämpfung und Steifigkeit auf die Stabilität	21
2.4.2	Einfluss des Prozesses auf die Systemdynamik	22
3	Motorspindel mit elektromagnetischem Aktor	25
3.1	Motorspindeln	25
3.2	Dynamisches Verhalten von Motorspindeln	26
3.2.1	Finite-Elemente-Modellierung	26
3.2.2	Drehzahlabhängigkeit der Systemdynamik	28
3.3	Elektromagnetischer Aktor	30
3.3.1	Wirkprinzip	32
3.3.2	Dynamisches Verhalten	34
3.4	Integration des Aktors	35
3.4.1	Axiale Position des Aktors	36
3.4.2	Einfluss auf die Spindeldynamik und die Stabilität	37
3.5	Experimentelle Modellbildung mit Hilfe des Aktors	41
3.5.1	Nichtparametrische Identifikation	43
3.5.2	Parametrische Identifikation	44
3.5.3	Theoretische oder experimentelle Modellbildung?	46

4	Reglerentwurf zur Vermeidung von Ratterschwingungen	49
4.1	Manueller Reglerentwurf im Frequenzbereich	52
4.2	Optimale Zustandsregelung	52
4.3	Aktive Dämpfung mittels robuster Regelung	55
4.3.1	Modellierung von Unsicherheiten	57
4.3.2	μ -Synthese	61
4.3.3	Spezifikation der Regelgüte	63
4.3.4	Reduktion der Reglerordnung	64
4.4	Fazit	65
5	Aktive Dämpfung bei drehzahlabhängiger Spindeldynamik	67
5.1	Problemstellung	67
5.2	Überblick über adaptive Regelungen	70
5.3	Umschalten zwischen linearen zeitinvarianten Reglern	74
5.3.1	Einfaches Umschalten	76
5.3.2	Reglerumschaltung mittels Folgeregelung	79
5.3.3	Reglerumschaltung mittels Zustandsschätzung	82
5.3.4	Wahl der Schaltpunkte	83
5.4	Kontinuierliche Adaption auf Basis linearer zeitinvarianter Regler	85
5.4.1	Überlagerung von Reglern	86
5.4.2	Adaption der Reglerparameter	88
5.5	Vergleich der Verfahren	91
6	Unterdrückung harmonischer Störungen	95
6.1	Bandsperfilter	96
6.2	Adaptive Filter	98
6.2.1	Adaption mittels LMS	99
6.2.2	Adaption mittels RLS	100
6.2.3	FIR-Filter	100
6.2.4	Linearkombination orthogonaler Referenzsignale	101
6.3	Vergleich der Verfahren	102
7	Experimentelle Untersuchung	107
7.1	Beschreibung der Versuchsstände	107
7.1.1	Motorspindel mit externem Aktor	108
7.1.2	Motorspindel mit integriertem Aktor	109
7.2	Aktive Dämpfung bei konstanter Drehzahl	110
7.2.1	Optimale Zustandsregelung	110
7.2.2	μ -Synthese	114
7.3	Drehzahladaptive Regelung	120
7.3.1	Bewertungskriterium für die Regelgüte	120
7.3.2	Regler für die Ränder des Drehzahlbereichs	122
7.3.3	Modellbasierter Vergleich der Leistungsfähigkeit	125
7.3.4	Experimentelle Überprüfung	125

8 Zusammenfassung	129
Literaturverzeichnis	133
A Anhang	145
A.1 Zusammenhang zwischen Dämpfung und kritischer Spanbreite	145
A.2 Begrenzungsfunktionen	146

Abkürzungsverzeichnis

Notation

x	Bezeichnung
x	Skalar oder komplexe Zahl
$\underline{x}$	Vektor
$\mathbf{X}$	Matrix

Abkürzungen

AML	Aktives Magnetlager
FEM	Finite Elemente Methode
FIR	Finit Impulse Response, Filter mit endlicher Impulsantwort
HPC	Hochleistungszerspanung (High-Performance Cutting)
HSC	Hochgeschwindigkeitszerspanung (High-Speed Cutting)
HSK	Hohlschaftkegel
IMC	Internal-Model-Control
LFT	Linear Fractional Transformation
LkoR	Linearkombination orthogonaler Referenzsignale
LMS	Least Mean Square
LQR	Linear Quadratic Regulator
PID	Proportional-Integral-Differential
PT ₂	Verzögerungsglied zweiter Ordnung
RLS	Recursive Least Square, rekursive Methode kleinster Fehlerquadrate

Griechische Buchstaben

α	halber Winkel zwischen zwei Polen
δ, δ_s	Unsicherheit, strukturierte Unsicherheit
Δ	Perturbation
$\bar{\Delta}$	erweiterte Perturbation zur Überprüfung robuster Regelgüte
Δ_s	Menge aller möglichen Unsicherheiten einer bestimmten Struktur
φ	Phasenverschiebung, Winkelposition der Schneide
λ	Eigenwert, Vergessensfaktor

μ	strukturiierter Singulärwert, Adaptionsschrittweite
μ_0	magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$
$\mu_{r,l}, \mu_{r,fe}$	Permeabilitätszahl von Luft, $\sim$ von Eisen
$\mathcal{O}$	Ordnung
Ω	Drehkreisfrequenz, Kreisfrequenz des Störsingals, normierte Eigenfrequenz
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Kennkreisfrequenz
ω_c	Ratterkreisfrequenz
$\bar{\sigma}$	größter Singulärwert
τ	Inverse der Zahneingriffsfrequenz, Zeitkonstante
Θ	Systemmatrix des linearisierten Systems (Semidiskretisierung)

Lateinische Buchstaben

a_p, a_{pkrit}	Schnitttiefe, kritische Schnitttiefe
A_1	felddurchsetzte Querschnittsfläche des Luftspalts
A, B, C, D	System-, Eingangs-, Ausgangs-, Durchgangsmatrix
b, b_{cr}, b_{crmin}	Spanbreit, kritische Spanbreite, kleinste kritische Spanbreite
B_1	Flussdichte im Luftspalt
B_{CS}, B_{GS}, B_S, B_T	Begrenzungsfunktionen
$C, \mathbf{C}$	Regler
$\mathbf{CS}(s)$	Stellübertragungsfunktion
$d, \underline{d}$	Störgröße
$\underline{d}_m$	Störung des Messsignals
D	Lehrsches Dämpfungsmaß
D	Dämpfungsmatrix, Durchgangsmatrix, Skalierungsmatrix
$e, \underline{e}$	Regeldifferenz, Fehlersignal
$\hat{e}$	Prädiktionsfehler
$E\{ \}$	Erwartungswert
f_0	Kennfrequenz
f_c	Ratterfrequenz
f_p	Zahneingriffsfrequenz
f_z	Zahnvorschub
$\tilde{f}$	normierte Änderung der Frequenz
$\mathcal{F}_L, \mathcal{F}_U$	lower LFT, upper LFT
$F, \underline{F}$	Kraft
$F(s)$	Filter-Übertragungsfunktion
F_r, F_t	radiale und tangential Schnittkraft
g	Gütekriterium, normierte maximale Überhöhung

$G, \mathbf{G}$	Modell der Regelstrecke, Gyroskopische Matrix
$G_{\text{mech}}(s)$	Übertragungsfunktion des mechanischen Systems
G_V	Modell des Verstärkers
$G_o(s)$	Übertragungsfunktion des offenen Kreises
$G_{D1}(s)$	Modell vierter Ordnung (modale Dämpfung: 3%)
$G_{D2}(s)$	Modell vierter Ordnung (modale Dämpfung: 10%)
$\mathbf{GS}(s)$	Störübertragungsfunktion
h	Spandicke, Gewichtungsfaktor, Gewichtungsfunktion
H_1	magnetische Feldstärke im Luftspalt
i, i_x, i_0, i_s	Strom, Steuerstrom, Vormagnetisierungsstrom, Sollstrom
$\mathbf{I}$	Einheitsmatrix
j	imaginäre Einheit
j	Zählvariable zur Bezeichnung der Schneiden
J	Gütefunktional
k	Proportionalitätskonstante, Index zur Bezeichnung eines Abtastschrittes
k_{cb}	Schnittkraftkoeffizient
K, K_r, K_t	Schnittkraftkoeffizient, $\sim$ radial, $\sim$ tangential
K_p	Verstärkung
$\mathbf{K}$	Steifigkeitsmatrix, Rückführmatrix
l	Länge
L	Induktivität
m	Masse
$\mathbf{M}$	Massenmatrix, Datenmatrix, dynamisches System
n	Drehzahl
N	Windungszahl, Anzahl zu schätzender Parameter
$\hat{p}$	Parameterschätzvektor, Filterkoeffizienten
$\mathbf{P}$	erweiterte Regelstrecke
$\underline{q}$	Verstärkungsvektor, Auslenkungen
Q	minimale Verstärkung der Bandsperre
$\mathbf{Q}, \mathbf{Q}_y$	Gewichtungsmatrizen
r	Referenzsignal
R	Widerstand
$\mathbf{R}$	Gewichtungsmatrix
s, s_0	Länge des Luftspalts, nomineller Luftspalt
$\mathbf{S}(s)$	Empfindlichkeitsfunktion
t	Zeit
T	Zeitkonstante, Abtastdauer
T_n	Nachstellzeit

T_t	Totzeit
$\mathbf{T}, \mathbf{T}_i, \mathbf{T}_o$	Führungsübertragungsfunktion, Transformationsmatrix
u	Spannung
$u, \underline{u}$	Stellgröße
V_1	Volumen des felddurchsetzten Luftspalts
$w, \underline{w}$	Sollgröße
W_1	im magnetischen Feld des Luftspalts gespeicherten Energie
$\mathbf{W}_a, \mathbf{W}_m$	additive und multiplikative Unsicherheit
$\mathbf{W}_d, \mathbf{W}_w, \mathbf{W}_u, \mathbf{W}_e$	Gewichtungsfunktionen
x	Auslenkung der Spindel in x-Richtung, Messsignal
$\hat{x}$	gefiltertes Signal, geschätztes Nutzsignal
$\hat{x}_\Omega$	geschätztes Störsignal
$\underline{x}$	Zustandsvektor
$y, \underline{y}$	Regelgröße, Ausgangsvektor, Auslenkung der Spindel in y-Richtung
z	Zähnezahl, axiale Koordinate