



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Universität Karlsruhe (TH)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur
Steifigkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen**

Band 135

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.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-5871-9

ISSN 0724-4967

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

Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Munzinger
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 06.02.2006

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH).

Allen voran möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, da sie einerseits die notwendige theoretische Ausbildung und andererseits das Erlernen aller praktischen Fähigkeiten ermöglicht und stets gefördert haben, die für das Gelingen der vorliegenden Arbeit erforderlich waren.

Der aktuellen wie auch ehemaligen Leitung des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmidt, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Weule möchte ich für die fachliche wie auch persönliche Unterstützung während der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter meinen Dank aussprechen. Mein ganz besonderer Dank gilt dabei Herrn Prof. Jürgen Fleischer für die Tatsache, dass er mir den Spaß am wissenschaftlichen Arbeiten wieder gegeben hat, der mir eine Zeit lang abhanden kam. Darüber hinaus möchte ich mich bei ihm natürlich für die Übernahme des Hauptreferats und insbesondere für die Möglichkeit zur weiteren wissenschaftlichen Arbeit am Institut bedanken. Zusätzlich zu den bereits genannten Personen möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena für das meiner Arbeit entgegen gebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferats danken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern der Insitutsbereiche Werkstatt/Technik, EDV, Controlling/Finanzen und Sekretariate für die Unterstützung und Entlastung im Projekt- bzw. Alltagsgeschäft. Den Kollegen aus dem wissenschaftlichen Bereich, wie auch meinen ehemaligen Studien- und Diplomarbeitern sowie meinen Hiwis möchte ich für die Unterstützung, Diskussionen und Anregungen während der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter danken.

Summary

The mechanical stiffness and geometrical accuracy of machine components have significant influence on machine tool precision. This is due to the fact that process loads and errors in machine components lead to a displacement of the Tool Center Point. This suggests thinking about the compensation of displacement by means of intelligent machine components. The technical potential of active components is often obvious, but in conventional, mechatronic approaches, costs are often not commensurate with technical benefit.

In this context this doctoral thesis describes a cost-effective technology for the smart or adaptronical compensation of component errors and the increase of stiffness, developed on the basis of a vibrating string and the multifunctional use of a piezoelectric transducer acting as sensor and actuator. Based on the example of a strut for parallel kinematics machine tools, the concept, the realization, and first accomplished measurements with the adaptronical sensor-actuator integration are introduced in the thesis. The measured positioning accuracy and the repeatability of the prototypical strut of $\pm 0.5 \mu\text{m}$ are sufficient for the use in machine tool manufacturing already in present state. As for dynamics, the measurements with the prototype show a compensation time of approximately 60 ms. Due to the limited dynamics, the advanced research concerning the adaptronical strut must focus on mechanical optimization and further development of the control system. Although the discussed adaptronical approach has been developed and implemented for an exemplary strut structure for parallel kinematics, it can be applied to all other structures in machine tool manufacturing in principle. This suggests a wide range of application for the mentioned technology.

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung und Technik	3
2.1	Ursachen für Verlagerungen an Werkzeugmaschinen	3
2.2	Qualitative und quantitative Einordnung des Vergleichsverhaltens	4
2.3	Ansätze zur Kompensation von Verlagerungen	8
2.4	Kompensation mit zusätzlichen Freiheitsgraden	15
2.4.1	Wandler für die direkte Kompensation	16
2.4.2	Mechatronische Ansätze	22
2.4.3	Adaptronische Ansätze	24
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	27
3.1	Zielsetzung	27
3.2	Vorgehensweise.....	28
4	Eigener Ansatz	29
4.1	Ableitung der Beispielkomponente	29
4.2	Konzeption einer adaptronische Strebe	36
4.3	Detaillierung des Konzepts.....	41

4.4 Herausforderungen für die Umsetzung	45
5 Auslegung und konstruktive Ausgestaltung	48
5.1 Grundstruktur und Hebelmechanismus	49
5.2 Maßverkörperung	52
5.3 Piezoelektrischer Wandler.....	57
5.3.1 Auswahl des Wandlerwerkstoffes.....	59
5.3.1.1 Sensorwerkstoffe.....	59
5.3.1.2 Aktorwerkstoffe	61
5.3.2 Dimensionierung des Wandlers	64
5.4 Schwingungsanregung	70
5.5 Zusammenstellung der dimensionierten Parameter	76
5.6 Konstruktive Ausgestaltung und Umsetzung	77
5.7 FEM-Berechnung der mechanischen Struktur.....	83
6 Regelungstechnik.....	84
6.1 Konzeption der Regelungstechnik	84
6.1.1 Anregung der Resonanzschwingung.....	86
6.1.2 Frequenzbestimmung	89

6.1.3	Adaptronische Ansteuerung	92
6.1.4	Einsatz im dynamischen Lastbereich	99
6.2	Umsetzung der Regelungstechnik	103
7	Test und Validierung	107
7.1	Versuchstandstechnik.....	107
7.2	Messtechnische Untersuchung	113
7.2.1	Kalibrierung der adaptronischen Strebe.....	114
7.2.2	Aktorisches Betriebsverhalten des Wandlers.....	115
7.2.3	Resonanzschwingung und Sensorsignal	117
7.2.4	Hysterese, Wiederholbarkeit und Linearität.....	120
7.2.5	Thermisches Verhalten	122
7.2.6	Versagensverhalten der Vorspannung.....	127
7.2.7	Weg-Zeit-Verhalten	130
7.2.8	Kraft-Zeit-Verhalten	134
8	Anwendungsmöglichkeiten	140
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
9.1	Zusammenfassung.....	147

9.2 Ausblick.....	150
10 Literaturverzeichnis.....	151

I. Bezeichnungen

A	[m ²]	Querschnittsfläche
B	[T]	Magnetische Flussdichte
C	[F]	Elektrische Kapazität
D	[-]	Dämpfungskonstante
D _{el}	[As/m ²]	Elektrische Verschiebungsdichte
E	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
E _{el}	[V/m]	Elektrische Feldstärke
F	[N]	Kraft
F _{Klemm}	[N]	Klemmkraft des Wandlers
I	[A]	Elektrischer Strom
I _{ax}	[m ⁴]	Axiales Flächenträgheitsmoment
I _{pol}	[m ⁴]	polares Flächenträgheitsmoment
L	[H]	Induktivität
Q	[C]	Elektrische Ladung
R	[Ω]	Elektrischer Widerstand
S _{mech}	[-]	Mechanische Dehnung
U	[V]	Elektrische Spannung
U _{max}	[V]	Maximale Betriebsspannung des Wandlers
V	[-]	Vergrößerungsfunktion
X _L	[Ω]	Induktiver Blindwiderstand
Z	[Ω]	Scheinwiderstand
a	[m]	Hebelarm
b	[m]	Hebelarm
c	[N/m]	Steifigkeit
d	[m]	Durchmesser
d _{xx}	[C/N]	Piezoelektrische Ladungskonstante
f	[Hz]	Frequenz
f ₀	[Hz]	Eigenfrequenz
Δf	[Hz]	Frequenzänderung
f _m	[Hz]	Mittelfrequenz bei σ _m
g _{xx}	[Vm/N]	Piezoelektrische Spannungskonstante
h	[m]	Plattenstärke der Wandlerkeramik bzw. des Wandlerkristalls
i	[m]	Amplitude der Saitenschwingung
k _{xx}	[-]	Kopplungsfaktor des piezoelektrischen Wandlers
l	[m]	Saiten- bzw. Vorspannungslänge
l ₀	[m]	Ausgangslänge
Δl	[m]	Hub der Saite bzw. Vorspannung
M	[-]	Grundschwingungszahl
n	[-]	Plattenzahl des Wandlers
r	[-]	Teilerverhältnis
s	[m]	Strebenlänge
s ₀	[m]	Ausgangslänge der Strebe
Δs	[m]	Strebenhub
s ^E	[m ² /N]	Elastizitätskonstante bei konstantem elektrischen Feld
s ^D	[m ² /N]	Elastizitätskonstante bei konstanter elektrischer Verschiebung
t	[s]	Zeit
w	[-]	Windungszahl
x	[m]	Länge, allgemein
x ₀	[m]	Ausgangslänge, allgemein
Δx	[m]	Hub, allgemein

x_{Luft}	[m]	Luftspalt zwischen Vorspannung und Magnet
x_{Magnet}	[m]	Wirksame Länge des Magneten
z	[m]	Wandlerlänge
z_0	[m]	Ausgangslänge des Wandlers
Δz	[m]	Wandlerhub
Ω	[rad/s]	Erregerkreisfrequenz
ε^T	[-]	Dielektrizitätszahl bei konstanter mechanischer Spannung
ϕ	[Vs]	Magnetischer Fluss
η	[-]	Frequenzverhältnis
φ	[rad]	Phasenverschiebung
μ_0	[Vs/Am]	Magnetische Feldkonstante ($1,2566 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am)
μ_r	[-]	Permeabilität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ_{el}	[Ω/m]	Spezifischer elektrischer Widerstand
σ	[N/m ²]	Mechanische Spannung
σ_m	[N/m ²]	Mechanische Mittelspannung
τ	[s]	Zeitkonstante
ω_0	[rad/s]	Eigenkreisfrequenz
ω	[rad/s]	Kreisfrequenz
ν	[-]	Querkontraktionszahl