



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

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

Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische
Drucktascheneinheit**
Funktionserweiterung hydrostatischer
Führungssysteme in Werkzeugmaschinen

Band 142



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825

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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7478-8

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 hydrostatische Drucktascheneinheit

Funktionserweiterung hydrostatischer Führungssysteme
in Werkzeugmaschinen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Andreas Knödel
aus Heidenheim a.d. Brenz

Tag der mündlichen Prüfung:
Hauptreferent:
Korreferent:

23. Juni 2008
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers



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 Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik der Universität Karlsruhe (TH).

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, gilt mein ganz besonderer Dank, für die Übernahme des Hauptreferats und damit verbunden die fachliche und persönliche Begleitung während der Entstehung dieser Arbeit. Durch die eigenverantwortliche Arbeit am Institut und das entgegengebrachte Vertrauen habe ich viel gelernt, bin an den Aufgaben gereift und diese haben mich nachhaltig geprägt.

Für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer bedanken. Der gute fachliche Austausch und die Unterstützung von beiden Seiten auf dem Weg zur Promotion haben mich sehr motiviert.

Damit die Arbeit zu dem werden konnte was sie ist, haben viele mitgewirkt und unterstützt, deshalb möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für die offene und angenehme Zusammenarbeit bedanken. Besonders erwähnen möchte ich hierbei meine Kollegen der Gruppe WHT. Die gute Gemeinschaft und der fachliche aber auch persönliche Austausch haben zu einer freundschaftlichen und aufbauenden Atmosphäre beigetragen. Besonderer Dank gilt auch den vielen Studenten, die sich mit Engagement und großem Interesse eingesetzt und damit einen großen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet haben.

Bei meinen Eltern möchte ich mich ganz besonders für die Unterstützung und den Rückhalt auf meinem bisherigen und auch weiteren Lebensweg bedanken. Ohne ihre Ermutigung zu dem Schritt an das Institut wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Ein ganz großer und herzlicher Dank gilt meiner Frau Birte. Mit viel Geduld und Verständnis, einem festen Rückhalt und ihrer Unterstützung wirkt sie immer wieder aufbauend und motivierend. Meine Frau hat damit einen ganz besonders wertvollen Beitrag zum Gelingen geleistet. Ihr ist diese Arbeit gewidmet.

Heidenheim a. d. Brenz, im Juli 2008

Andreas Knödel



Abstract

The modern machine tool has to fulfil more and more requirements concerning its productivity and capability. The major influence hereby lies with the central components of the power chain. Guidings in peculiar are part of this power chain. Whenever specific standards of accuracy, stiffness and damping, also wear behaviour are required, hydrostatic guidings are preferably used. But two major disadvantages are found with hydrostatic guidings. The features of conventional systems in use can not be influenced by external factors. Also the complexities of systems that occur in practise are demanding.

To meet the high standards of accuracy and dynamic on modern machine tools, hydrostatic guidings must allow for flexible adjustment to guidance requirements. The request for an active system that permits intelligent levelling, the elimination of process- and disturbance forces and the compensation of guideway errors, is the ambition of this work.

Within this paper a concept for a hydrostatic guidance is introduced which shows the possibility of free variation of gap height during operation. The concept bases on an adaptronic approach. The basic feature of the unit is the adaptronic sensor-actuator integration with piezo electric transducers and also the development of a suitable control concept. As a result an adaptronic hydrostatic pressure pocket is realised that, as a compact and self contained functional unit, can be integrated into a machine slide. This work also shows how alongside an extension of function, also an increase in system integration is achieved. With the implementation of an adaptronic hydrostatic pressure pocket prototype and its experimental characterisation function and efficiency will be confirmed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	III
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik und Forschung	4
2.1 Führungssysteme in Werkzeugmaschinen	4
2.2 Hydrostatische Führungssysteme	9
2.2.1 Grundlagen und Funktionsprinzip	10
2.2.2 Ölversorgungssysteme	13
2.2.3 Energiebedarf und Verlustleistung	15
2.3 Selbstgeregelter und –gesteuerte hydrostatische Führungen	17
2.4 Aktive hydrostatische Führungen	22
2.5 Funktionswerkstoffe für die Sensor/Aktor-Integration	29
2.6 Zusammenfassung zum Stand der Technik und Forschung	38
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	40
3.1 Zielsetzung	40
3.2 Vorgehensweise	41
4 Konzeptfindung, Auslegung und Konstruktion	43
4.1 Ableitung der Randbedingungen	43
4.2 Konzeption der adaptronischen hydrostatischen Drucktascheneinheit	51
4.2.1 Entwicklung des Aufbaus der adaptronischen Drucktascheneinheit	51
4.2.2 Funktionsprinzip und Ableitung des adaptronischen Regelungskonzeptes	66
4.2.3 Herausforderungen für die weitere konstruktive Ausarbeitung	72
4.3 Auslegung und konstruktive Ausgestaltung	74
4.3.1 Staudruckmesssystem zur Spalthöhenerfassung	75
4.3.2 Ventilblock zur Volumenstromsteuerung	88
4.3.3 Auslegung des elektrisch-mechanischen Teilsystems	104
4.4 Konstruktive Umsetzung	112
5 Ausarbeitung der Regelungstechnik	115
5.1 Konzeption der Regelungstechnik	115
5.1.1 Amplitudenmodulation	116

5.1.2	Signalauswertung	121
5.2	Umsetzung des Regelungskonzepts	126
6	Experimentelle Charakterisierung	131
6.1	Versuchsstandaufbau	131
6.2	Messtechnische Untersuchung	135
6.2.1	Mechanisches Verhalten der Drucktascheneinheit	135
6.2.2	Untersuchung des Weg-Zeitverhaltens	138
6.2.3	Untersuchung des Kraft-Zeitverhaltens	145
7	Anwendungsmöglichkeiten	155
8	Zusammenfassung und Ausblick	161
	Literaturverzeichnis	166
	Abbildungsverzeichnis	179
	Tabellenverzeichnis	183

Abkürzungen

Formelzeichen

A	m^2	Fläche
A_{eff}	m^2	effektive Taschenfläche
A_R	m^2	Reibfläche
A_W	m^2	Querschnittsfläche des Wandlers
B_T	mm	Taschenbreite
b	mm	Spaltbreite / Abströmbreite
C	F	elektrische Kapazität
c	$N/\mu\text{m}$	Steifigkeit
$C_{\text{Flüssigkeit}}$	m/s	Ausbreitungsgeschwindigkeit
c_W	$N/\mu\text{m}$	mechanische Wandlersteifigkeit
D_{el}	As/m^2	elektrische Verschiebungsdichte
d	m^2	Durchmesser
d_g	mm	Vordrosseldurchmesser
d_M	mm	Messdüsendurchmesser
d_{xx}	C/N	piezoelektrische Ladungskonstante
E_{el}	V/m	elektrische Feldstärke
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
F_B	N	äußere Belastung
F_G	N	Gewichtskraft
F_L	N	Lastkraft
F_{VS}	N	Vorspannkraft
F_W	N	Klemmkraft piezoelektrischer Wandler
f	Hz	Frequenz
f_0	Hz	Resonanz- / Eigenfrequenz
f_g	Hz	Grenzfrequenz
g	Vm/N	piezoelektrische Spannungskonstante
h	μm	Spalthöhe
h_D	μm	Drosselspalthöhe
h_T	μm	Spalthöhe am Drucktaschenelement
h_0	μm	Ausgangsspalthöhe
h_W	μm	Plattenstärke des Wandlerwerkstoffes
k		geometrischer Faktor
k_{xx}		Kopplungsfaktor des piezoelektrischen Wandlers
L_T	mm	Taschenlänge
L	mm	Leitungslänge
l	mm	Stegbreite / Abströmlänge
l_M	mm	Wandstärke Messdüse
n		Plattenzahl des piezoelektrischen Wandlers

P	W	Leistung
P_R	W	Reibleistung
P_V	W	Verlustleistung
p	bar	Druck
p_P	bar	Pumpendruck / Systemdruck
p_S	bar	Staudruck
P_T	bar	Taschendruck
p_{VR}	bar	Druckverlust
Q	l/min	hydraulischer Volumenstrom
Q	C	elektrische Ladung
R	Ω	elektrischer Widerstand
R	sbar/m ³	hydraulischer Widerstand
Re		Reynoldszahl
r	mm	Radius
S_{mech}		mechanische Dehnung
$S_{Membran}$	mm	Verlagerung der Membran
s_{xx}^E	m ² /N	Elastizitätskonstante bei konstantem elektrischem Feld
s_{xx}^D	m ² /N	Elastizitätskonstante bei konstanter elektrischer Verschiebung
T	N/m ²	mechanische Spannung
$T_{öl}$	°C	Öltemperatur
t	s	Zeit
U	V	Spannung
U_A	V	Aktorspannung
U_{ind}	V	induzierte Spannung / Sensorspannung
v	m/s	Geschwindigkeit
x	μ m	Hub / Auslenkung
x_W	μ m	Längenausdehnung piezoelektrischer Wandler
y	μ m	Stellweg des Ventil- / Steuerkolbens
α		Durchflusskoeffizient einer Blende
Δ		Differenz, Änderung
ε		Wirkungsgrad
ε_{xx}^T		Dielektrizitätszahl bei konstanter mechanischer Spannung
η	Ns/m ²	dynamische Viskosität
φ		Flächenverhältnis
κ	1/bar	Kompressibilität
λ		Spaltverhältnis
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
ρ	kg/dm ³	Dichte
ρ_{el}	Ω /m	spezifischer elektrischer Widerstand

τ	s	Zeitkonstante
ξ		Drosselverhältnis

Indizes

0	Ruhezustand
1	Tragbahn
2	Umgriff
A	Aktor
Anr	Anregung
a	außen
B	Drossel mit Blendenströmung
BP	Bandpass
D	Drossel mit Spaltströmung
DBV	Druckbegrenzungsventil
i	innen
M	Messdüse
P	Pumpe
S	Sensor
Stau	Staudruck
T	Drucktasche
U	Umgebung
VS	Vorspannung
W	piezoelektrischer Wandler