

# **ISW Forschung und Praxis**

Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen  
der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. G. Pritschow

Band 74



**Manfred Egner**

**Hochdynamische  
Lageregelung mit  
elektrohydraulischen  
Antrieben**

**Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo 1988**

D 93

Mit 65 Abbildungen

ISBN-13: 978-3-540-19160-5      e-ISBN-13: 978-3-642-83451-6  
DOI: 10.1007/978-3-642-83451-6

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die „Verwertungsgesellschaft Wort“, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg · 1988

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Gesamtherstellung: Druckerei Kuhnle, Esslingen

2362/3020-543210

## **Geleitwort des Herausgebers**

In der Reihe „ISW Forschung und Praxis“ wird fortlaufend über Forschungsergebnisse des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart (ISW) berichtet, das sich in vielfältiger Form mit der Weiterentwicklung des Systems Werkzeugmaschine und anderer Fertigungseinrichtungen beschäftigt. Die Arbeiten dieses Instituts konzentrieren sich im besonderen auf die Bereiche Numerische Steuerungen, Prozeßrechnereinsatz in der Fertigung, Industrierobotertechnik sowie Meß-, Regel- und Antriebssysteme, also auf die aktuellsten Bereiche der Fertigungstechnik. Dabei stehen Grundlagenforschung und anwenderorientierte Entwicklung in einem stetigen Austausch, wodurch ein ständiger Technologietransfer zur Praxis sichergestellt wird.

Die Buchreihe erscheint in zwangloser Folge und stützt sich auf Berichte über abgeschlossene Forschungsarbeiten und Dissertationen. Sie soll dem Ingenieur bei der Weiterbildung dienen und ihm Hilfestellungen zur Lösung spezifischer Probleme geben. Für den Studierenden bietet sie eine Möglichkeit zur Wissensvertiefung. Sie bleibt damit unter erweitertem Namen und neuer Herausgeberschaft unverändert in der bewährten Konzeption, die ihr der Gründer des ISW, der leider allzu früh verstorbene Prof. Dr.-Ing. G. Stute, im Jahre 1972 gegeben hat.

Der Herausgeber dankt der Druckerei für die drucktechnische Betreuung und dem Springer Verlag für Aufnahme der Reihe in sein Lieferprogramm.

G. Pritschow

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart.

Dem Direktor des Institutes, Herrn Professor Dr.-Ing. G. Pritschow gilt mein besonderer Dank für seine wohlwollende Unterstützung und seine wertvollen Anregungen, die zum Gelingen der Arbeit wesentlich beigetragen haben. Herrn Professor Dr.-Ing. A. Storr danke ich für die eingehende Durchsicht der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Professor Dr.-Ing. G. Duehlen von der Technischen Universität Berlin für die Erstellung des Mitberichtes.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes, die durch kritische Bemerkungen und wertvolle Diskussionen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, insbesondere den Herren Dipl.-Ing. R. Hagl, Dipl.-Ing. G. Keuper, Dr.-Ing. W. Swoboda und Frau Zimmerle.

**Manfred Egner**

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abkürzungen, Formelzeichen	11
<b>1</b>	
<b><u>Einleitung</u></b>	14
1.1 Vergleich und Anforderungen an Vorschubantriebe	14
1.2 Aufgabenstellung	17
<b>2</b>	
<b><u>Klassifizierung der Regelsysteme für elektrohydraulische Vorschubantriebe</u></b>	19
2.1 Stand der Entwicklung bei elektrohydraulischen Antrieben	19
2.2 Einteilung der Regelsysteme	21
2.3 Konzepte zur Realisierung diskreter Regelungen an elektrohydraulischen Vorschubantrieben	25
<b>3</b>	
<b><u>Analyse und Modellbildung der elektrohydraulischen Regelstrecken</u></b>	29
3.1 Elektrohydraulische Stellglieder	29
3.2 Servozylinder	30
3.2.1 Das nichtlineare Verhalten des Servozylinders	30
3.2.2 Servozylinder als nichtlineares Modell 3. Ordnung	31
3.2.3 Experimentelle Analyse des Servozylinders	35
3.2.3.1 Dynamisches Verhalten	35
3.2.3.2 Statische Analyse	36
<b>4</b>	
<b><u>Auslegung diskreter linearer Zustandsregelungen</u></b>	37
4.1 Allgemeine Betrachtungen	37
4.2 Auslegung über die Matrix-Riccati-Differenzgleichung	38
4.2.1 Auslegung linearer Zustandsregelungen 3. Ordnung	39
4.2.2 Auslegung linearer Zustandsregelungen 5. Ordnung	43
4.3 Robuste Auslegung linearer Zustandsregelungen	46
4.3.1 Allgemeine Betrachtungen	46
4.3.2 Auslegung eines im Sinne eines Gütekriteriums optimalen Beobachters	48

4.3.3	Vergleich diskreter vollständiger und reduzierter Beobachter	49
4.3.4	Bewertung der Beobachter	52
4.4	Aufbau der elektrohydraulischen Vorschubeinheit für die experimentellen Untersuchungen	52
4.5	Experimentelle Ergebnisse beim Einsatz linearer Zustandsregler	54
4.5.1	Kaskadenstruktur der Zustandsregelung Servoventil - Servozylinder	54
4.5.2	Vollständige Zustandsregelung 5. Ordnung	55
4.5.3	Bewertung und Vergleich	57
5	<b><u>Robuste Auslegung linearer Zustandsregelungen</u></b>	59
5.1	Allgemeine Betrachtungen	59
5.2	Robuste Zustandsregelungen für Verzögerungsglieder 2. Ordnung	60
5.3	Vergleich der Auslegungsverfahren auf Robustheit	60
5.4	Robuste Zustandsregelung 3. Ordnung	62
5.5	Robuste Zustandsregelung des Gesamtsystems 5. Ordnung	64
5.6	Bewertung und Vergleich	65
6	<b><u>Nichtlineare Zustandsregelungen für Regelstrecken mit Parameterunsicherheiten</u></b>	66
6.1	Theorie zum parameterunempfindlichen Reglerentwurf nach Leitmann	67
6.1.1	Kontinuierlicher Zeitbereich	67
6.1.2	Diskreter Zeitbereich	72
6.2	Diskrete Regelung elektrohydraulischer Stellglieder	73
6.2.1	Servoventil	73
6.2.2	Proportionalventil	77
6.3	Diskrete Regelung elektrohydraulischer Vorschubantriebe	78
6.3.1	Diskrete Zustandsregelung 3. Ordnung	78
6.3.2	Diskrete Zustandsregelung 5. Ordnung	82

6.3.3	Experimentelle Erprobung des parameterunempfindlichen Zustandsreglers	82
6.3.4	Vergleich der robusten mit der parameterunempfindlichen Zustandsregelung	84
7	<b><u>Regelungen für elektrohydraulische Vorschubantriebe unter Berücksichtigung der nichtlinearen Veränderungen der dynamischen Kenngrößen durch gesteuerte Adaption</u></b>	86
7.1	Allgemeine Betrachtungen	86
7.2	Bestimmung unbekannter Systemparameter aus Meßdaten	87
7.2.1	Bestimmung der unbekannt Systemparameter aus Meßwerten für $\omega_{0H}, D_H$	88
7.2.2	Bestimmung der unbekannt Systemparameter aus Meßwerten für $\omega_{0H}$	89
7.3	Diskrete nichtlineare Systementkopplung	91
7.3.1	Nichtlineares Streckenmodell zur diskreten Entkopplung	91
7.3.2	Nichtlineare Entkopplungsalgorithmen	92
7.3.3	Vergleich der Entkopplungsnetzwerke	95
7.3.4	Einfluß der Ventildynamik auf die Entkopplungsgüte	95
7.3.5	Einfluß der Abtastzeit auf die Entkopplungsgüte	97
7.3.6	Bewertung	97
7.4	Zustandsregelung mit Adaptionskennlinien	99
7.4.1	Lineare Parameteradaption in Abhängigkeit des Kolbenhubes	100
7.4.1.1	Wahl der Stützpunkte	100
7.4.1.2	Adaption der Zustandsregelung 3. Ordnung	102
7.4.1.3	Adaption der kaskadierten Zustandsregelung 5. Ordnung	103
7.4.1.4	Einfluß der Abtastzeit	103
7.4.1.5	Einfluß der Rechengenauigkeit	106
7.4.2	Parameteradaption mit Hilfe von Polynomen	106
7.4.3	Lineare Anpassung der Kreisverstärkung in Abhängigkeit des Ventilaussteuerungsgrades	107
7.4.4	Richtungsabhängige Anpassung der Kreisverstärkung	108
7.4.5	Bewertung und Vergleich	109



<b>8</b>	<b><u>Diskrete nichtlineare Regelungen unter Berücksichtigung nichtlinearer Kennlinien und Störgrößen</u></b>	<b>111</b>
8.1	Störgrößenbeobachtung und -kompensation	111
8.1.1	Einfluß von Störgrößen auf den Zustandsbeobachter	113
8.1.2	Zustands- und Störgrößenbeobachter für den Servozylinder	117
8.1.3	Zustands- und Störgrößenbeobachter für das Servoventil	119
8.2	Kompensation der Störeinflüsse auf das Servoventil	119
8.3	Berücksichtigung der hydraulischen Nullpunktdrift von Ventilen	122
8.3.1	Kompensation der Drift über die Stellgröße	122
8.3.2	Beeinflussung des Lagesollwertes	123
8.3.3	Experimentelle Ergebnisse und Vergleich der Verfahren	124
8.4	Berücksichtigung der Totzone von Ventilen	125
8.4.1	Inverse Totzone im Regelkreis	126
8.4.2	Beeinflussung des Sollwertes für die Ventilschieberposition	126
8.4.3	Betrachtung der Totzone als Störgröße	129
8.4.4	Bewertung und Vergleich	130
8.5	Einfluß der Haftreibung auf das Verhalten im geschlossenen Regelkreis	131
8.6	Diskrete Zustandsregelung unter Berücksichtigung von Begrenzungen	132
8.6.1	Begrenzung der Beschleunigung des Servozylinders	132
8.6.2	Begrenzung der Steuerschiebergeschwindigkeit des Servoventils	133
8.7	Bewertung	134
<b>9</b>	<b><u>Zusammenfassung</u></b>	<b>135</b>
	Schrifttum	138
	Anhang	

**Formelzeichen und Abkürzungen**

Einige Formelzeichen und Abkürzungen, die nur an einer Stelle verwendet werden und dort erklärt sind, wurden nicht in dieses Verzeichnis aufgenommen.

$A_K$	- Stirnfläche des Steuerschiebers	$D_S$	- Dämpfung des Servoventils
$A(i)$	- Koeffizienten der Approximationspolynome $i = 1...3$	$D^*$	- Solldämpfung
$A_1$	- Zylinderfläche	$D_H$	- Dämpfung des Servozylinders
$A$	- kontinuierliche Systemmatrix ( $n \times n$ )	$D_{ges}$	- Mindestdämpfung
$\Delta A$	- Änderung der kontinuierlichen Systemmatrix ( $n \times n$ )	$D_N$	- Nominaldämpfung
$A_D$	- diskrete Systemmatrix ( $n \times n$ )	$d_{st}$	- Kolbenstangendurchmesser
$B_{K2,K3}$	- Konstantanteil der Approximationspolynome	$d_k$	- Kolbendurchmesser
$b$	- kontinuierlicher Steuervektor	$d'$	- viskoser Reibkoeffizient
$b_D$	- diskreter Steuervektor	$E$	- Verträglichkeitsmatrix
$C_B$	- Steifigkeit der Rückführfelder des Düseprallplattensystems	$E'_{\text{öl}}$	- Ersatzkompressibilitätsmodul
$C$	- Meßmatrix	$e(x,t)$	- Gesamtfehler aus Parameterunsicherheiten
$C_{\text{ölges}}$	- Gesamtsteifigkeit der Ölsäule in einem Servozylinder	$F_{+,-}$	- erzeugte Kraft
$D_{A,B,R}$ $PA,PB$	- feste und gesteuerte Drosseln	$F_C$	- coulombsche Reibkraft
$D_{pH}$	- Dämpfung der Vorsteuerstufe des Proportionalventils	$F_N$	- Hafttreibkraft
$D_{pm}$	- Dämpfung der Hauptstufe des Proportionalventils	$F_R$	- Reibkraft
		$G$	- Verträglichkeitsmatrix
		$\underline{H}^T$	- Rückführvektor des Beobachters

H	- Kolbenhub	$P_R$	- Riccati-Matrix
I	- Einheitsmatrix	$Q_i$	- Volumenströme
$I_J$	- Approximationspolynom	$Q_L$	- Lastvolumenstrom
$I_{STAEM2}$	- Summenkriterium	Q	- Bewertungsmatrix (n x n)
$K_i$	- Rückführkoeffizient vom Zustandsregler	R	- Bewertung der Stellgröße (n x 1)
$\Delta K_i$	- Änderung der Rückführkoeffizienten im Zustandsregler	$T_A$	- Abtastzeit
$K_{ip}$	- Rückführkoeffizienten des Proportionalventils (4 x 1)	$T_{el}$	- elektrische Zeitkonstante
$K_{is}$	- Rückführkoeffizienten der Zustandsregelung des Servoventils	$T_{tot}$	- Totzeit
$K_H$	- Streckenverstärkung des Servozyllinders	t	- Zeit
$K_L$	- Lageregelverstärkung	u	- Stellgröße
$K_R$	- Reibkoeffizient	$u_l$	- linearer Stellgrößenanteil
$K_V$	- Geschwindigkeitsverstärkung	$u_n$	- nichtlinearer Stellgrößenanteil
$M_{K2,K3}$	- Steigung der Approximationspolynome	ü	- Überschwingen
$m_{red}$	- bewegte, auf den Zylinder reduzierte Masse	$V_{A0,B0}$	- Totvolumen
MAX	- maximale Abweichung Beobachtergröße reale Größe	v	- Geschwindigkeit
p	- Laplace-Transponierte	$\Delta v$	- Geschwindigkeitsänderung
$p_i$	- Drücke	$W_{1s}$	- Steuerschieber Sollwert des Servoventils
$p_L$	- Lastdruck	$\underline{w}$	- Sollwertvektor
$\Delta p$	- Differenzdruck	$\underline{x}$	- Zustandsvektor
$p_0$	- Systemdruck	$x_K$	- Kolbenposition
$p_L$	- Ljapunov-Matrix	$x_0$	- Arbeitspunkt
		$x_{ip}$	- Zustandsgrößen des Proportionalventils
		$x_{istat}$	- Zustandsgrößen im stationären Zustand

$x_{is}$	- Zustandsgrößen des Servoventils	$y_V$	- Auslenkung des Düseprallplattensystems
$x_{LKi}$	- Störgrößen am Servozylinder	$z_i$	- Eigenwerte
$x_{LSi}$	- Störgrößen am Servoventil	$z_{Bi}$	- Beobachterpole
$\Delta x_0$	- Positionsabweichung durch Drift	$\alpha$	- Flächenverhältnis
$\Delta x_{Tot}$	- Positionsabweichung durch ungenaue Totzone	$\epsilon$	- Entwurfparameter des parameterunempfindlichen Reglers
$\hat{x}$	- beobachteter Zustandsvektor	$\rho$	- Reglergröße im parameterunempfindlichen Regler
$x_{1s,2s}$	- Zustandsgrößen des Servoventils	$\beta$	- Durchflußbeiwert
$\Delta x_{1xL}$	- Lageabweichung durch Störgröße	$\omega_{0H}$	- Eigenfrequenz des Servozylinders
$x_{ip}$	- Zustandsgrößen des Proportionalventils	$\omega_{0s}$	- Eigenfrequenz des Servoventils
$x_L$	- Störgröße	$\omega_{0N}$	- Nominalfrequenz
$x_D$	- Lageabweichung durch Drift	$\Delta\omega$	- Frequenzänderung
$\Delta x$	- Schleppabstand		
$x_{Tot}$	- Lageabweichung durch eine Totzone		
$\underline{y}$	- Meßvektor		
$y_0$	- Überdeckung am Steuerschieber		
$y$	- beobachteter Meßvektor		
$Y_{ENT}$	- entkoppelte Größe der Steuerschieberposition		
$y_{max}$	- maximaler Servoventilhub		
$y_0$	- Überdeckung am Steuerschieber		