

7960829

ISW 18

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

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. G. Stute

F.-R. Götz

Regelsystem mit Modell- rückkopplung für variable Streckenverstärkung – Anwendung bei Grenz- regelungen an spanenden Werkzeugmaschinen



Springer-Verlag
Berlin · Heidelberg · New York

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

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. G. Stute

- ISW 1:** D. Schmid, Numerische Bahnsteuerung, 89 S., 1972, DM 24,—
- ISW 2:** H. Schwegler, Fräsbearbeitung gekrümmter Flächen, 111 S., 1972, DM 24,—
- ISW 3:** J. Eisinger, Numerisch gesteuerte Mehrachsenfräsmaschinen, 90 S., 1972, DM 24,—
- ISW 4:** R. Nann, Rechnersteuerung von Fertigungseinrichtungen, 125 S., 1972, DM 36,—
- ISW 5:** G. Augsten, Zweiachsige Nachformeinrichtungen, 140 S., 1972, DM 36,—
- ISW 6:** B. Karl, Die Automatisierung der Fertigungsvorbereitung durch NC-Programmierung, 121 S., 1972, DM 30,—
- ISW 7:** H. Eitel, NC-Programmiersystem, 117 S., 1973, DM 30,—
- ISW 8:** E. Knorr, Numerische Bahnsteuerung zur Erzeugung von Raumkurven auf rotations-symmetrischen Körpern, 130 S., 1973, DM 36,—
- ISW 9:** S. Bumiller, Viskohydraulischer Vorschubantrieb, 123 S., 1974, DM 36,—
- ISW 10:** K. Maier, Grenzregelung an Werkzeugmaschinen, 140 S., 1974, DM 40,—
- ISW 11:** J. Waelkens, NC-Programmierung, 160 S., 1974, DM 44,—
- ISW 12:** E. Bauer, Rechnerdirektsteuerung von Fertigungseinrichtungen, 138 S., 1975, DM 40,—
- ISW 13:** H. König, Entwurf und Strukturtheorie von Steuerungen für Fertigungseinrichtungen, 206 S., 1976, DM 58,—
- ISW 14:** H. Damsohn, Fünfachsiges NC-Fräsen, 143 S., 1976, DM 38,—
- ISW 15:** H. Jetter, Programmierbare Steuerungen, 141 S., 1976, DM 40,—
- ISW 16:** H. Henning, Fünfachsiges NC-Fräsen gekrümmter Flächen, 180 S., 1976, DM 48,—
- ISW 17:** K. Boelke, Analyse und Beurteilung von Lagesteuerungen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, 105 S., 1977, DM 28,—
- ISW 18:** F.-R. Götz, Regelsystem mit Modellrückkopplung für variable Streckenverstärkung, 116 S., 1977, DM 32,—
- ISW 19:** H. Tränkle, Auswirkungen der Fehler in den Positionen der Maschinenachsen beim fünfachsigem Fräsen, 103 S., 1977, DM 28,—

In Vorbereitung:

- ISW 20:** P. Stof, Untersuchungen über die Reduzierung dynamischer Bahnabweichungen bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, 120 S., 1977
- ISW 21:** R. Wilhelm, Planung und Auslegung des Materialflusses flexibler Fertigungssysteme, 142 S., 1977
- ISW 22:** N. Kappen, Entwicklung und Einsatz einer direkten digitalen Grenzregelung für eine Fräsmaschine mit CNC, 112 S., 1977

71
7960829

TP271
G 68)
(2)

ISW 18

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

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. G. Stute



E7960829

F.-R. Götz

Regelsystem mit Modell- rückkopplung für variable Streckenverstärkung – Anwendung bei Grenz- regelungen an spanenden Werkzeugmaschinen



Springer-Verlag
Berlin · Heidelberg · New York 1977

D 93

Mit 69 Abbildungen

ISBN 3-540-08428-2 Springer Verlag Berlin · Heidelberg · New York
ISBN 0-387-08428-2 Springer Verlag New York · Heidelberg · Berlin

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 Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1977.

Printed in Germany.

2060/3020—543210

Vorwort des Herausgebers

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart befaßt sich mit den neuen Entwicklungen der Werkzeugmaschine und anderen Fertigungseinrichtungen, die insbesondere durch den erhöhten Anteil der Steuerungstechnik an den Gesamtanlagen gekennzeichnet sind. Dabei stehen die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine in Programmierung, Steuerung, Konstruktion und Arbeitseinsatz sowie die vermehrte Verwendung des Digitalrechners in Konstruktion und Fertigung im Vordergrund des Interesses.

Im Rahmen dieser Buchreihe sollen in zwangloser Folge drei bis fünf Berichte pro Jahr erscheinen, in welchen über einzelne Forschungsarbeiten berichtet wird. Vorzugsweise kommen hierbei Forschungsergebnisse, Dissertationen, Vorlesungsmanuskripte und Seminararbeiten zur Veröffentlichung.

Diese Berichte sollen dem in der Praxis stehenden Ingenieur zur Weiterbildung dienen und helfen, Aufgaben auf diesem Gebiet der Steuerungstechnik zu lösen. Der Studierende kann mit diesen Berichten sein Wissen vertiefen.

Unter dem Gesichtspunkt einer schnellen und kostengünstigen Drucklegung wird auf besondere Ausstattung verzichtet und die Buchreihe im Fotodruck hergestellt.

Der Herausgeber dankt dem Springer-Verlag für Hinweise zur äußeren Gestaltung und Übernahme des Buchvertriebs.

Stuttgart, im Februar 1972

Gottfried Stute

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	3
Schrifttum	7
Formelzeichen und Abkürzungen	10
1 <u>Einführung und Aufgabenstellung</u>	15
2 <u>Regelsystem mit Modellrückkopplung für variable Streckenverstärkung</u>	20
2.1 Adaptive Systeme	20
2.2 Elementares Beispiel einer adaptiven Regelung	21
2.3 Identifikation mit parallelem Modell	23
2.4 Regelsystem mit Modellrückkopplung	24
2.5 Modelladaptive Systeme	26
2.6 Regelsystem mit Modellrückkopplung für variable Streckenverstärkung	29
2.6.1 Beschreibung des Systems im Zeitbereich mit nichtlinearen Operatoren	31
2.6.2 Umwandlung des Systems mit Modellrückkopplung in eine Steuerkette. Struktur des Reglers	33
2.6.3 Angriffspunkt der Störung nicht am Ende der Strecke	35
2.6.4 Linearisierung für kleine Auslenkungen um den Arbeitspunkt	36
2.6.5 Bestimmung des Steuerglieds für das linearisierte System	41
2.6.6 Regelkreis mit Regelquotient und nichtlinearem Regler	44
2.6.7 Unabhängigkeit des dynamischen Eigenverhaltens von der Streckenverstärkung	47
2.7 Untersuchung des dynamischen Verhaltens und der Stabilität	51
2.7.1 Untersuchung des Verhaltens im Kleinen	51
2.7.2 Untersuchung des dynamischen Verhaltens in der Zustandsebene	54

2.7.2.1	Die Zustandsgrößen x_S und \dot{x}_S	54
2.7.2.2	Die Zustandsgrößen x_S und x_M	66
2.7.2.3	Das Verhalten bei additiven Störungen	72
2.7.2.4	Begrenzte Stellgröße	76
2.7.2.5	System mit nach unten begrenzter Rückkopplung der Zustandsgrößen x_S und x_M	81
2.7.2.6	System mit Betragsrückkopplung der Zustandsgrößen x_S und x_M	85
2.7.2.7	System mit nach unten begrenzter Betragsrückkopplung der Zustandsgrößen x_S und x_M	86
2.7.3	Untersuchung der Stabilität mit Hilfe der direkten Methode von Ljapunow	91
3	<u>Anwendung bei einer Grenzregelung für Drehmaschinen</u>	101
3.1	Schnittleistungsregelung	101
3.2	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke	102
3.3	Die Regeleinrichtung	105
3.3.1	Die Sollwertbildung	107
3.3.2	Die Schnitterkennung	107
3.3.3	Das Dividier-/Multiplizier-Element	107
3.3.4	Das Modell	108
3.3.5	Das Steuerglied	111
3.3.6	Einschwingverhalten	112
4	<u>Zusammenfassung</u>	115

Schrifttum

- [1] Maier, K. Beitrag zur Auslegung und Bewertung von Grenzregelungen an spanenden Werkzeugmaschinen.
Stuttgart, Universität (TH), Dr.-Ing.-Diss., 1974
- [2] Weber, W. Adaptive Regelungssysteme I. Allgemeine Struktur und Erkennungsmethoden.
München - Wien: R. Oldenbourg Verlag 1971
- [3] Frank, P.M. Entwurf von Regelkreisen mit vorgeschriebenem Verhalten.
Karlsruhe: G. Braun 1974
- [4] Schaufelberger, W. Modelladaptive Systeme.
Zürich, ETH, Diss. Nr. 4208, 1969
- [5] Pontrjagin, L.S. Gewöhnliche Differentialgleichungen.
Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1965
- [6] Emeljanov, S.V. Automatische Regelsysteme mit veränderlicher Struktur.
München - Wien: R. Oldenbourg Verlag 1969
- [7] Knobloch, H.W. Kappel, F. Gewöhnliche Differentialgleichungen.
Stuttgart: B.G. Teubner 1974

- [8] Autorenkollektiv
Die Lageregelung an Werkzeugmaschinen.
Hrsg. G. Stute, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart (TH)
3. Aufl. Stuttgart: ISW Selbstverlag 1975
- [9] Pfaff, G.
Regelung elektrischer Antriebe I. Eigenschaften, Gleichungen und Strukturbilder der Motoren.
München - Wien: R. Oldenbourg Verlag 1971
- [10] Buxbaum, A.
Schierau, K.
Berechnung von Regelkreisen der Antriebstechnik.
AEG - Telefunken - Handbücher Bd. 16
Berlin: Elitera - Verlag 1974
- [11] Ulrich, P.
Adaptive Regeleinrichtungen an spanenden Werkzeugmaschinen aus regelungstechnischer Sicht.
Fert.technik u. Betrieb 21 (1971) Nr. 10, S. 599...603
- [12] Götz, F.-R.
Frequenzgangmessung des Zerspanprozesses einer Drehmaschine mit der Vorschubgeschwindigkeit als Eingangs- und der aufgenommenen Motorleistung als Ausgangsgröße.
Essen: Girardet - Verlag:

- HGF - Kurzberichte (Lose-Blattsammlung) Blatt 74/38
- [13] Klingler, O. Verfahren zur Schnitterkennung an spanenden Werkzeugmaschinen durch Körperschall. Essen: Girardet - Verlag: HGF - Kurzberichte (Lose-Blattsammlung) Blatt 74/89
- [14] Bronstein, I.N. Taschenbuch der Mathematik. Semendjajew, K.A. 6. Aufl. Leipzig: B.G. Teubner Verlagsges. 1963
- [15] Stute, G. Anwendung adaptiver Systeme bei spanenden Werkzeugmaschinen. Götzt, F.-R. VDI/VDE - AFCET Aussprachetag Industrielle Anwendung adaptiver Systeme, Freiburg 1973, S. 263...278
- [16] Stute, G. Adaptive control system for variable gain in ACC systems. Götzt, F.-R. Proceedings of the 16th Int. MTDR Conference, Manchester 1975, p. 103...106

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

a	Schnitttiefe
A	$n \times n$ -Systemmatrix
<u>b</u>	$n \times 1$ -Steuermatrix
B	$n \times n$ -Matrix
B_n	Bernoullische Zahlen
<u>c</u>	$n \times 1$ -Ausgangsmatrix
<u>c</u> ^T	transponierte Ausgangsmatrix
D	$n \times n$ -Matrix
D	Dämpfungsfaktor
D_{HA}	Dämpfungsfaktor des Hauptspindelantriebs
D_{VA}	Dämpfungsfaktor des Vorschubantriebs
E	Einheitsmatrix
F_{Sch}	Schnittkraft
F_{SchG}	Grenzwert der Schnittkraft
$F_s(j\omega)$	Frequenzgang des Vorschubgeschwindigkeit/ Vorschub - Übertragungsglieds
G	offene Menge
G_F bzw. $G_F(s)$	Übertragungsfunktion des vorgeschalteten Filters
$G_F(j\omega)$	Frequenzgang des vorgeschalteten Filters
G_{ges} bzw. $G_{ges}(s)$	Gesamtübertragungsfunktion
G_w bzw. $G_w(s)$	Führungs - Übertragungsfunktion
I	Identitätselement
k_S	spezifische Schnittkraft
K_M	Verstärkungsfaktor des Modells

K_N	Verstärkungsfaktor des Steuerglieds
K_R	Verstärkungsfaktor des Reglers
K_S	Verstärkungsfaktor der Regelstrecke
M bzw. $M(s)$	Übertragungsfunktion des Modells
M_{Sch}	Schnittmoment
M_{SchG}	Grenzwert des Schnittmoments
n_{Sp}	Hauptspindeldrehzahl
N bzw. $N(s)$	Übertragungsfunktion des Steuerglieds
\underline{p}	Vektor der Zustandsgrößen
\underline{p}'	Vektor der Zustandsgrößen
P_{Mot}	Motorleistung
P_{MotG}	Grenzwert der Motorleistung
P_o	Verlustleistung
P_{Sch}	Schnittleistung
P_{SchG}	Grenzwert der Schnittleistung
$P_{Sch,ist}$	Istwert der Schnittleistung
$P_{Sch,soll}$	Sollwert der Schnittleistung
q	Quotientensignal
\underline{q}	Vektor der Zustandsgrößen
r	Drehradius
\underline{r}	Vektor der Zustandsgrößen
R bzw. $R(s)$	Übertragungsfunktion des Reglers
\mathbb{R}^n	Vektorraum aller reellen n-dimensionalen Spaltenvektoren
s	Vorschub
s	komplexe Variable ($s = \sigma + j\omega$)
S	Operator
S bzw. $S(s)$	Übertragungsfunktion der Strecke

t	Zeit
T	Zeitkonstante
T_{HA}	Zeitkonstante des Hauptspindelantriebs
T_I	Integrierzeitkonstante
T_M	Modellzeitkonstante
T_R	Reglerzeitkonstante
T_S	Streckenzeitkonstante
T_{Sp}	Umdrehungszeit der Hauptspindel
T_{VA}	Zeitkonstante des Vorschubantriebs
u	Vorschubgeschwindigkeit, Bahngeschwindigkeit
u	Eingangssignal des nichtlinearen Reglers
u	Zustandsgröße
u_A	Anfangsbedingung: Anfangswert der Vorschubgeschwindigkeit
u_O	Anfahrorschubgeschwindigkeit
v	Schnittgeschwindigkeit
v	Eingangssignal des Steuerglieds
v	Zustandsgröße
V	Ljapunow-Funktion
V_O	Verstärkung des Vorwärtzweigs
w	Führungsgröße, Sollwert
x	Plankoordinate
\dot{x}	Geschwindigkeit in x-Richtung
x	Regelgröße
x_M	Ausgangsgröße des Modells
x_S	Ausgangsgröße der Strecke
X	Regelgröße im Bildbereich

y	Stellgröße
z	Längskoordinate
\dot{z}	Geschwindigkeit in z-Richtung
z	Störgröße (additiv wirkend)
Z	Störgröße im Bildbereich
$\underline{\zeta}$	Vektor zur Kennzeichnung schwankender Streckeneigenschaften
φ	Phasenwinkel
ω	Kreisfrequenz

Mehrfach benutzte Indizes

ist	Istwert
l	linearisierte, auf den Arbeitspunkt bezogene Abweichungen
max	obere Grenze
min	untere Grenze
M	Modell
S	Regelstrecke
soll	Sollwert
Δ	auf den Arbeitspunkt bezogene Abweichungen

Vorgestelltes Zeichen

Δ	Abweichung vom Arbeitspunkt
----------	-----------------------------

Abkürzungen

ACC	Grenzregelung
ENT	Entscheidungsprozeß

HA	Hauptspindeltrieb
ID	Identifikation
INT	Interpolator
LR	Lageregler
M	Modell
MOD	Modifikationsstufe
N	Steuerglied
NC	Numerische Steuerung
R	Regler
S	Regelstrecke
VA	Vorschubantrieb

1 Einführung und Aufgabenstellung

Durch spanende Bearbeitung werden mit dem Stückprozeß "spanende Fertigung auf Werkzeugmaschinen" Teile bestimmter Gestalt aus Rohteilen hergestellt. Die Erzeugung der Geometrie der Teile ist durch Werkzeugmaschinen mit Nocken-, Nachform- oder NC-Steuerungen schon weitgehend automatisiert. Für die Zerspanung stellt sich die entsprechende Automatisierungsaufgabe.

Der Stückprozeß "spanende Fertigung auf Werkzeugmaschinen" ist dadurch gekennzeichnet, daß der Werkstückgestalt angepaßte Werkzeugmaschinen und Werkzeuge verwendet werden: Drehmaschinen mit Drehmeißel für rotationssymmetrische Teile, Bohrmaschinen mit Bohrern für Teile mit Bohrungen, Fräsmaschinen mit Messerkopf-Fräsern zur Herstellung von ebenen Flächen am Werkstück und mit Schaftfräsern zum Ausräumen von Taschen im Werkstück, usw. Damit zerfällt der Stückprozeß "spanende Fertigung" in eine Anzahl von Einzelprozessen, die wohl verwandt sind (Geometrieerzeugung, Spanbildung), aus Gründen der Vereinfachung aber besser als Einzelprozesse betrachtet werden.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Automatisierung der spanenden Fertigung durch eine Zerspanungs-Steuerung am Beispiel der Drehbearbeitung (Bild 1-1).

Bei der Drehbearbeitung werden rotationssymmetrische Teile (mit der Erzeugenden $f(x,z) = 0$ - die z -Achse sei die Rotationsachse -) durch Spanabnahme mit dem Drehmeißel aus einem (meist näherungsweise) rotationssymmetrischen Rohteil (mit der Erzeugenden $g(x,z) = 0$) dadurch hergestellt, daß das Teil um seine Rotationsachse eine Drehbewegung ausführt und die Erzeugende des Fertigteils durch die ebene Bahn der Meißelspitze $f(x,z) = 0$ festgelegt wird.