

Dipl.-Ing. Harry Nolzen, Eriskirch-Mariabrunn

# **Parameteradaptive Regelung von Fräsprozessen**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Nr. **623**

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	6
2.1 Konventionelle NC-Werkzeugmaschinen	6
2.2 Adaptive Regelungen in der Forschung	8
2.3 Sensoren zur Prozeßregelung	12
2.3.1 Prinzip der Kraft- und Drehmomentmessung	12
2.3.2 Sensoren zur Kraftmessung	13
2.3.3 Sensoren zur Drehmomentmessung	14
2.3.4 Sensoren zur Leistungsmessung	15
2.3.5 Spezielle Sensoren für die Prozeßregelung	15
2.4 Prozeßgeregelte Werkzeugmaschinen in der Industrie	15
2.5 Zusammenfassung	16
3 Analyse und Modellierung des Fräsprozesses	17
3.1 Beschreibung der Fräserbewegung	17
3.2 Einfluß der Werkstückmaße	23
3.3 Geometrische Beziehungen des Fräswerkzeugs	24
3.4 Zerspanungskräfte, -momente	25
3.5 Zerspanleistung	26
3.6 Beschreibungsmodelle für den Fräsprozeß	26
3.7 Regelungstechnisches Modell des Fräsprozesses	29
3.8 Betrachtung der Standzeit	31
3.9 Zusammenfassung	32
4 Modellbildung der Werkzeugmaschine	33
4.1 Beschreibung der Systemteile	34
4.1.1 Regelungstechnische Systemteile	35
a) Summenglied	35
b) P-Glied	35
c) I-Glied	36
e) Verzögerungsglied	36
f) PID-Glied mit Verzögerung	36
4.1.2 Elektrische Antriebsmotoren	38
a) Synchronmotor	38
b) Gleichstrommotor	40
4.1.3 Zweimassenschwinger	43

a) Welle . . . . .	43
b) Zahnradgetriebe . . . . .	44
c) Riementrieb . . . . .	45
d) Spindelgetriebe . . . . .	46
e) Maschinentisch . . . . .	48
f) Zustandsraumdarstellung von Zweimassenschwingern . . . . .	48
4.2 Reibungseffekte . . . . .	49
4.3 Gesamtmodelle . . . . .	52
4.4 Parameterschätzung . . . . .	54
4.5 Zusammenfassung . . . . .	56
5 Prozeßregelung für die Fräsoperation . . . . .	58
5.1 Gründe für eine Prozeßregelung . . . . .	58
5.2 Prozeßausgänge als Regelgrößen . . . . .	59
5.3 Prozeßeingänge als Stellgrößen . . . . .	62
5.4 Adaptiver Regelkreis . . . . .	63
5.5 Aktivierung der Prozeßregelung . . . . .	65
5.6 Bewertung der Regelgüte . . . . .	65
5.7 Sensorische Maschinenausstattung . . . . .	67
5.8 Einbindung in die Maschinensteuerung . . . . .	68
5.9 Zusammenfassung . . . . .	69
6 Regelungskonzept zur Prozeßregelung mit Kraftsignalen . . . . .	70
6.1 Regelgröße Kraft . . . . .	70
6.2 Informationsextraktion . . . . .	71
6.3 Informationsverarbeitung . . . . .	74
6.4 Regelalgorithmus bei stationärem Prozeß . . . . .	77
6.5 Zustandsabhängige Reglerumschaltung . . . . .	79
6.6 Regelalgorithmus bei Prozeßstörung . . . . .	80
6.7 Stabilitätsbetrachtung . . . . .	82
6.8 Zusammenfassung . . . . .	86
7 Prozeßregelung mit Leistungsmessung . . . . .	88
7.1 Regelgröße Antriebsleistung . . . . .	88
7.2 Informationsextraktion . . . . .	89
7.3 Schätzen des Prozeßmodells . . . . .	91
7.4 Leistungsregelung . . . . .	92
7.5 Stabilitätsbetrachtung . . . . .	94
7.6 Zusammenfassung . . . . .	95
8 Prozeßregelung mit rekonstruierter Kraft . . . . .	96

---

8.1 Problematik der sensorarmen Regelung . . . . .	96
8.2 Modell zur Momentenrekonstruktion am Hauptantrieb . . . . .	97
8.3 Zwei-Massen-Modell des Vorschubantriebes . . . . .	99
8.4 Drei-Massen-Modell des Vorschubantriebes . . . . .	101
8.5 Nichtlineare Effekte der Vorschubeinheit . . . . .	104
8.6 Bestimmung der Modellkoeffizienten . . . . .	107
8.7 Regelungskonzept . . . . .	108
8.8 Stabilitätsbetrachtung . . . . .	108
8.9 Zusammenfassung . . . . .	108
9 Koordinationsebene . . . . .	110
9.1 Anschnitterkennung . . . . .	110
9.1.1 Anschnitterkennung mit Kraftsignalen . . . . .	110
9.1.2 Anschnitterkennung mit Leistungssignalen . . . . .	111
9.2 Regleraktivierung . . . . .	111
9.3 Identifikation . . . . .	113
9.4 Regleradaption . . . . .	114
9.5 Prozeßüberwachung . . . . .	115
9.6 Zusammenfassung . . . . .	115
10 Experimentelle Ergebnisse . . . . .	117
10.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus . . . . .	117
10.2 Versuchsbeschreibung . . . . .	118
10.3 Ergebnisse der Kraftregelung . . . . .	119
10.3.1 Vergleichsmessung mit konventionellem Fräsen durch Steuerung . . . . .	120
10.3.2 Regelung der Vorschubkraft in x-Richtung . . . . .	121
10.3.3 Regelung der Vorschubkraft in y-Richtung . . . . .	123
10.4 Ergebnisse der Leistungsregelung . . . . .	127
10.4.1 Versuch mit konventionellem Fräsen durch Steuerung . . . . .	128
10.4.2 Leistungsregelung . . . . .	129
10.5 Ergebnisse mit rekonstruierter Kraft . . . . .	132
10.6 Zusammenfassung . . . . .	134
11 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	135
Anhang . . . . .	138
Literatur . . . . .	146