

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Begriffsbestimmung „mechatronische Systeme“ .....	1
1.2 Beispiele mechatronischer Produkte in Werkzeugmaschinen .....	2
1.3 Weiterentwicklungen .....	4
<b>2 Aufbau einer Vorschubachse</b> .....	<b>7</b>
2.1 Motoren in Vorschubachsen .....	8
2.1.1 Anforderungen an die Antriebseinheiten .....	8
2.1.2 Elektrische Antriebseinheiten .....	9
2.1.2.1 Gleichstrommotoren .....	10
2.1.2.2 Synchronmotoren .....	15
2.1.2.3 Asynchronmotoren .....	19
2.1.2.4 Vergleich Gleichstrom- / Drehstromservoantriebe .....	23
2.1.2.5 Schrittmotoren .....	25
2.1.2.6 Linearmotoren .....	29
2.2 Positionsmesssysteme für NC-Maschinen .....	37
2.2.1 Grundlagen der Weg- und Winkelmessung .....	37
2.2.1.1 Grundbegriffe .....	38
2.2.1.2 Messprinzipien und Messverfahren .....	38
2.2.1.2.1 Direkte und indirekte Messwerterfassung .....	38
2.2.1.2.2 Analoge und digitale Messwerterfassung .....	40
2.2.1.2.3 Relative und absolute Messwerterfassung .....	41
2.2.2 Messsysteme .....	43
2.2.2.1 Photoelektrische Messverfahren .....	43
2.2.2.1.1 Digital-inkrementale Messsysteme ..	43
2.2.2.1.2 Digital-absolute Messsysteme .....	48
2.2.2.1.3 Inkremental-absolute Messsysteme ..	52
2.2.2.1.4 Interferenzielle Wegmesssysteme ...	53
2.2.2.2 Interferometrische Wegmesssysteme .....	58
2.2.2.2.1 Michelson-Interferometer .....	58

	2.2.2.2.2	Zweifrequenzlaser-Interferometer .	59
	2.2.2.3	Elektromagnetische Aufnehmer .....	62
	2.2.2.3.1	Inductosyn .....	63
	2.2.2.3.2	Resolver .....	66
	2.2.2.4	Magnetische Aufnehmer .....	68
2.2.3		Interpolationsverfahren und Richtungserkennung .....	71
	2.2.3.1	Interpolation mit Hilfsphasen .....	71
	2.2.3.2	Digitale Interpolation .....	74
	2.2.3.3	Amplitudenauswertung .....	75
	2.2.3.4	Richtungserkennung .....	75
2.2.4		Messgeräte - Auswahl und Einbau .....	76
	2.2.4.1	Auswahl des Messgeräts .....	77
	2.2.4.2	Anbauort in der Anlage und Maschine .....	78
	2.2.4.3	Montagehinweise .....	79
	2.2.4.4	Elektrischer Anschluss .....	80
2.3		Mechanische Übertragungselemente .....	81
	2.3.1	Komponenten zur Wandlung von Rotationsbewegung in Translationsbewegung .....	82
	2.3.1.1	Gewindespindel-Mutter-Antrieb .....	82
	2.3.1.2	Ritzel-Zahnstange-Antrieb .....	94
	2.3.1.3	Schnecke-Zahnstange-Antrieb .....	95
	2.3.1.4	Zahnriemen-Antriebe .....	96
	2.3.2	Vorschubgetriebe .....	98
	2.3.2.1	Zahnradgetriebe .....	99
	2.3.2.2	Zahnriementriebe .....	100
	2.3.2.3	Sondervorschubgetriebe .....	102
	2.3.3	Kupplungen .....	108
	2.3.3.1	Ausgleichskupplungen .....	108
	2.3.3.2	Sicherheitskupplungen zum Überlastschutz ....	110
2.4		Umrichter für WZM-Vorschubachsen .....	114
	2.4.1	Aufbau von Umrichtersystemen .....	115
	2.4.2	Regelungselektronik in Umrichtern .....	117
	2.4.2.1	Analoge Regelung .....	118
	2.4.2.2	Digitale Regelung .....	119
	2.4.2.3	Zusätzliche Funktionen digitaler Antriebsregler .	119
	2.4.3	Schnittstellen zur Steuerung .....	122
	2.4.3.1	Analoge Schnittstelle .....	124
	2.4.3.2	Digitale Schnittstelle .....	124
2.5		Hydraulische Antriebseinheiten .....	130
	2.5.1	Kolben-Zylinder-Antriebe .....	131
	2.5.2	Hydraulikmotoren .....	133
	2.5.3	Servo-, Proportionalregel- und Piezoventile .....	134
	2.5.4	System Hydraulikmotor - Servoventil .....	139

2.5.5	Elektrohydraulischer Antrieb als Stellglied im Lageregelkreis .....	142
2.5.6	Vergleich von Elektro-, Schritt- und Hydraulikmotoren ...	145
<b>3</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Vorschubachsen .....</b>	<b>151</b>
3.1	Regelungstechnische Grundlagen .....	152
3.1.1	Lineare zeitkontinuierliche Übertragungssysteme .....	155
3.1.1.1	Zeitverhalten von Regelkreisgliedern .....	155
3.1.1.2	Grundsysteme von Regelkreisgliedern und ihre Darstellung .....	159
3.1.1.3	Aufbau eines Regelkreises .....	162
3.1.1.4	Wirkungsplan (Blockschaltbild) .....	163
3.1.1.5	Stabilität von Regelkreisen .....	165
3.1.1.6	Einstellregeln für analog arbeitende Regler .....	169
3.1.2	Lineare zeitdiskrete Übertragungssysteme .....	171
3.1.2.1	Darstellung zeitdiskreter Systeme .....	171
3.1.2.2	z-Transformation .....	173
3.1.2.3	Lineare Differenzgleichungen .....	175
3.1.2.4	Einstellregeln für zeitdiskret arbeitende Regler ..	176
3.1.2.5	z-Übertragungsfunktion .....	177
3.1.3	Feedforward-Controller zur Schleppfehlerkorrektur .....	179
3.1.4	Zustandsregelung .....	183
3.1.4.1	Darstellung im Zustandsraum .....	184
3.1.4.2	Entwurf des Zustandsreglers .....	187
3.1.4.3	Zustandsbeobachter .....	190
3.2	Regelung von Vorschubantrieben .....	191
3.2.1	Vorschubantrieb als Regelkreis .....	191
3.2.2	Berechnung von zeitkontinuierlichen Lageregelkreisen ...	195
3.2.3	Übertragungsverhalten des linearen Lageregelkreises ....	196
3.2.4	Simulation von Vorschubantrieben .....	201
3.3	Übertragungsverhalten der Mechanik .....	202
3.3.1	Physikalische Grenzen des mechanischen und elektrischen Systems .....	203
3.3.2	Übertragungsverhalten elektromechanischer Antriebssysteme .....	205
3.3.2.1	Kinematisches Übertragungsverhalten .....	205
3.3.2.2	Statisches Übertragungsverhalten .....	206
3.3.2.3	Dynamisches Übertragungsverhalten .....	208
3.3.3	Übertragungsverhalten linearer Direktantriebe .....	211
3.4	Einflüsse des Messsystems auf die Vorschubregelung .....	214
3.4.1	Verhalten von elektromechanischen Achsen bei Regelung über indirektes und direktes Messsystem .....	214
3.4.2	Einfluss des Messsystems bei linearen Direktantrieben ...	216
3.4.3	Verbesserung der Vorschubregelung durch Verwendung eines Ferraris-Sensors .....	217

3.4.4	Kleinste verfahrbare Schrittweite .....	221
3.5	Statische und dynamische Steifigkeit von Vorschubachsen .....	223
3.5.1	Statische Steifigkeit .....	224
3.5.1.1	Statische Steifigkeit elektromechanischer Antriebe (Gewindespindelantrieb) .....	224
3.5.1.2	Statische Steifigkeit beim elektrischen Lineardirektantrieb .....	225
3.5.2	Dynamische Steifigkeit .....	226
3.5.2.1	Dynamische Steifigkeit elektromechanischer Vorschubachsen (Gewindespindeltrieb) .....	228
3.5.2.2	Elektrischer Lineardirektantrieb .....	229
4	Vorschubantriebe zur Bahnerzeugung .....	235
4.1	Aufbau von Bahnsteuerungen .....	235
4.2	Bahnfehler an Werkzeugmaschinen .....	236
4.2.1	Bahnfehler im Interpolator .....	236
4.2.2	Typische Bahnfehler der Lageregelung .....	237
4.2.3	Auswirkungen der mechanischen Übertragungselemente .....	237
4.2.4	Bestimmung der dynamischen Bahnabweichungen .....	239
4.2.4.1	Eckenverrundung .....	240
4.2.4.2	Kreisform- und Durchmesserabweichung .....	240
4.2.5	Einfluss des $K_V$ -Faktors auf die Bahnabweichungen .....	243
4.3	Maßnahmen zur Verringerung der Bahnabweichungen .....	246
5	Auslegung von Vorschubantrieben .....	249
5.1	Auswahl des Motors und der mechanischen Komponenten .....	249
5.1.1	Bestimmung der Anforderungen und Wahl des Antriebsprinzips .....	249
5.1.2	Wahl und Auslegung der mechanischen Komponenten .....	251
5.1.3	Auswahl und Auslegung des Antriebsmotors .....	253
5.1.3.1	Statische Auslegung .....	254
5.1.3.2	Dynamische Auslegung .....	256
5.1.3.3	Optimales Übersetzungsverhältnis .....	258
5.2	Auslegung des Messsystems .....	260
5.3	Inbetriebnahme der Regelung .....	260
5.3.1	Manuelle Inbetriebnahme .....	260
5.3.1.1	Einstellung des Drehzahlreglers .....	262
5.3.1.2	Einstellung des Lagereglers .....	265
5.3.2	Automatische Inbetriebnahme .....	266
6	Prozessüberwachung .....	267
6.1	Einführung .....	267
6.1.1	Hintergrund, Begriffe und Ziele .....	267

6.1.2	Wirtschaftliche Bedeutung von Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Instandhaltungsmaßnahmen .....	272
6.1.3	Einflussgrößen auf die Funktion der Fertigungsmittel und die Qualität der Produkte .....	273
6.1.4	Strategien und Struktur von Überwachungssystemen ....	275
6.1.4.1	Strategien für Überwachungssysteme .....	275
6.1.4.2	Die Struktur von Überwachungssystemen .....	277
6.1.4.3	Zusammenhang und Abgrenzung zwischen Prozessüberwachung und Maschinendiagnose ..	278
6.1.5	Prinzipien der Prozessregelung .....	280
6.2	Sensoren .....	282
6.2.1	Dehnungsmessung .....	282
6.2.2	Piezoelektrische Kraftmesselemente .....	286
6.2.3	Körperschall- und Beschleunigungssensoren .....	290
6.2.4	Strom- und Leistungsmessung .....	293
6.2.5	Steuerunginterne Informationen .....	295
6.2.6	Temperatursensoren .....	297
6.2.7	Mechanische und optische Sensoren .....	299
6.3	Signalverarbeitung und Mustererkennung .....	299
6.3.1	Analoge Signalaufbereitung .....	301
6.3.2	Digitale Vorverarbeitung .....	305
6.3.3	Merkmalsextraktion .....	306
6.3.4	Klassifikation .....	308
6.3.4.1	Feste Grenzen .....	308
6.3.4.2	Mitlaufende Schwellen .....	309
6.3.4.3	Mehrdimensionale Klassifikation .....	310
6.4	Technologische Prozessüberwachung und Prozessregelung .....	314
6.4.1	Drehbearbeitung .....	314
6.4.1.1	Sensorsysteme zur Drehmoment- und Zerspankraftmessung .....	314
6.4.1.2	Kraft-, Drehmoment- und Leistungsregelung bei der Drehbearbeitung .....	317
6.4.1.3	Automatische Schnittaufteilung für das Drehen ..	322
6.4.1.4	Prozessüberwachung beim Drehen .....	325
6.4.2	Fräsbearbeitung .....	329
6.4.2.1	Sensorsysteme und Verfahren zur Prozessüberwachung beim Fräsen .....	329
6.4.2.2	Prozessüberwachung für die Fräsbearbeitung ...	334
6.4.2.3	Prozessregelung für die Fräsbearbeitung .....	339
6.4.2.4	Prozessregelung beim Gussputzen .....	345
6.4.2.5	Automatische Ratterbeseitigung .....	347
6.4.3	Bohren .....	355

---

6.4.3.1	Prozessüberwachung beim Bohren und Tiefbohren .....	355
6.4.3.2	Prozessregelung für das Tiefbohren .....	361
6.4.4	Schleifen .....	364
6.4.4.1	Prozessregelung .....	364
6.4.4.2	Abrichtüberwachung .....	366
6.4.5	Funkerosive Bearbeitung .....	367
6.4.6	Kollisionsüberwachung .....	373
6.5	Statistische Prozessregelung .....	377
6.6	Instandhaltung und Maschinenzustandsüberwachung .....	380
6.6.1	Verfahren der Instandhaltung und Wartung .....	380
6.6.2	Maschinenzustandsüberwachung .....	383
6.6.3	Diagnosemöglichkeiten .....	390
6.6.4	Teleservice .....	399
	<b>Literatur</b> .....	<b>405</b>
	<b>Index</b> .....	<b>415</b>