

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Das mechatronische System Werkzeugmaschine	4
1.2	Engineering	5
1.3	Aktuelle Entwicklungen	6
	Abkürzungsverzeichnis	7
	Literaturverzeichnis	7
2	Vorschubachsen in Werkzeugmaschinen.....	9
2.1	Umrichter für WZM-Vorschubachsen.....	13
2.1.1	Aufbau von Umrichtersystemen	13
2.1.2	Regelungselemente in Umrichtern.....	14
2.1.2.1	Analoge Regelung	16
2.1.2.2	Digitale Regelung.....	16
2.1.2.3	Zusätzliche Funktionen digitaler Antriebsregler	17
2.1.3	Schnittstellen zur Steuerung	18
2.1.3.1	Analoge Schnittstelle	19
2.1.3.2	Digitale Schnittstelle	19
2.2	Motoren in Vorschubachsen	24
2.2.1	Anforderungen an die Antriebseinheiten.....	24
2.2.2	Gleichstrommotoren	27
2.2.3	Synchronmotoren	32
2.2.4	Asynchronmotoren.....	37
2.2.5	Auslegung und Berechnung elektrischer Antriebe	44
2.2.5.1	Hochlauf ohne Strombegrenzung.....	45
2.2.5.2	Hochlauf mit Strombegrenzung	46
2.2.5.3	Numerische Ermittlung des Hochlaufs bei nichtlinearen und unstetigen Kennlinien.....	48
2.2.5.4	Auswahl von Motoren nach statischen Gesichtspunkten	49
2.2.6	Bauarten basierend auf Gleichstrom- und Drehstromservoantriebe	50
2.2.6.1	Schrittmotoren	51
2.2.6.2	Linearmotoren.....	53
2.2.7	Strom- und Leistungsmessung an Elektromotoren.....	57
2.3	Positionsmesssysteme für NC-Maschinen	59
2.3.1	Grundlagen der Weg- und Winkelmessung.....	59
2.3.1.1	Grundbegriffe	59
2.3.1.2	Messprinzipien und Messverfahren	59
2.3.2	Messsysteme	62
2.3.2.1	Photoelektrische Messverfahren	62
2.3.2.2	Interferometer	72

2.3.2.3	Elektromagnetische Aufnehmer	72
2.3.2.4	Magnetische Aufnehmer	75
2.3.3	Interpolationsverfahren und Richtungserkennung	79
2.3.3.1	Interpolation mit Hilfsphasen	80
2.3.3.2	Digitale Interpolation	81
2.3.3.3	Amplitudenauswertung	82
2.3.3.4	Richtungserkennung	82
2.3.4	Messgeräte – Auswahl und Einbau	82
2.3.4.1	Auswahl des Messgeräts	83
2.3.4.2	Anbauort in der Anlage und Maschine	84
2.3.4.3	Montagehinweise	84
2.3.4.4	Elektrischer Anschluss	86
2.4	Mechanische Übertragungselemente	86
2.4.1	Komponenten zur Wandlung von Rotationsbewegung in Translationsbewegung	86
2.4.1.1	Gewindespindel-Mutter-Antrieb	87
2.4.1.2	Ritzel-Zahnstange-Antrieb	92
2.4.1.3	Schnecke-Zahnstange-Antrieb	94
2.4.1.4	Zahnriemen-Antriebe	94
2.4.1.5	Kettenantrieb	95
2.4.2	Vorschubgetriebe	97
2.4.2.1	Zahnradgetriebe	97
2.4.2.2	Zahnriementriebe	98
2.4.2.3	Sondervorschubgetriebe	99
2.4.3	Kupplungen	105
2.4.3.1	Ausgleichskupplungen	105
	Abkürzungsverzeichnis	109
	Formelzeichenverzeichnis	109
	Literaturverzeichnis	112
3	Dynamisches Verhalten von Vorschubachsen	113
3.1	Regelungstechnische Grundlagen	116
3.1.1	Lineare zeitkontinuierliche Übertragungssysteme	118
3.1.1.1	Zeitverhalten von Regelkreisgliedern	118
3.1.1.2	Grundsysteme von Regelkreisgliedern und ihre Darstellung	121
3.1.1.3	Aufbau eines Regelkreises	122
3.1.1.4	Wirkungsplan (Blockschaltbild)	123
3.1.1.5	Stabilität von Regelkreisen	123
3.1.1.6	Einstellregeln für analog arbeitende Regler	125
3.1.2	Lineare zeitdiskrete Übertragungssysteme	126
3.1.2.1	Darstellung zeitdiskreter Systeme	127
3.1.2.2	z-Transformation	127
3.1.2.3	Lineare Differenzengleichungen	128
3.1.2.4	Einstellregeln für zeitdiskret arbeitende Regler	129
3.1.2.5	z-Übertragungsfunktion	130

3.1.3	Feedforward-Controller zur Schleppfehlerkorrektur	131
3.1.4	Zustandsregelung	132
3.1.4.1	Darstellung im Zustandsraum	133
3.1.4.2	Entwurf des Zustandsreglers	134
3.2	Regelung von Vorschubantrieben	136
3.2.1	Vorschubantrieb als Regelkreis	136
3.2.1.1	Aufbau und Wirkungsweise der Lageregelung	136
3.2.2	Berechnung von zeitkontinuierlichen Lageregelkreisen	137
3.2.3	Übertragungsverhalten des linearen Lageregelkreises	137
3.2.4	Simulation von Vorschubantrieben	140
3.3.	Übertragungsverhalten der Mechanik	142
3.3.1	Physikalische Grenzen des mechanischen und elektrischen Systems	143
3.3.2	Übertragungsverhalten elektromechanischer Antriebssysteme	144
3.3.2.1	Kinematisches Übertragungsverhalten	144
3.3.2.2	Statisches Übertragungsverhalten	144
3.3.2.3	Dynamisches Übertragungsverhalten	145
3.3.3	Übertragungsverhalten linearer Direktantriebe	147
3.4	Einflüsse des Messsystems auf die Vorschubregelung	149
3.4.1	Verhalten von elektromechanischen Achsen bei Regelung über indirektes und direktes Messsystem	149
3.4.2	Einfluss des Messsystems bei linearen Direktantrieben	151
3.4.3	Verbesserung der Vorschubregelung durch Verwendung eines Ferraris-Sensors	151
3.4.4	Kleinste verfahrbare Schrittweite	153
3.5	Statische und dynamische Steifigkeit von Vorschubachsen	154
3.5.1	Statische Steifigkeit	155
3.5.1.1	Statische Steifigkeit elektromechanischer Antriebe (Gewindespindelantrieb)	155
3.5.1.2	Statische Steifigkeit beim elektrischen Lineardirektantrieb	156
3.5.2	Dynamische Steifigkeit	156
3.5.2.1	Dynamische Steifigkeit elektromechanischer Vorschubachsen	157
3.5.2.2	Elektrischer Lineardirektantrieb	158
	Abkürzungsverzeichnis	161
	Formelzeichenverzeichnis	161
	Literaturverzeichnis	163
4	Vorschubantriebe zur Bahnerzeugung	165
4.1	Aufbau von Bahnsteuerungen	168
4.2	Bahnfehler an Werkzeugmaschinen	168
4.2.1	Bahnfehler im Interpolator	168
4.2.2	Typische Bahnfehler der Lageregelung	169
4.2.3	Auswirkungen der mechanischen Übertragungselemente	170

- 4.2.4 Bestimmung der dynamischen Bahnabweichungen 171
 - 4.2.4.1 Eckenverrundung..... 171
 - 4.2.4.2 Kreisform- und Durchmesserabweichung 172
 - 4.2.5 Einfluss des K_V -Faktors auf die Bahnabweichungen 173
 - 4.3 Maßnahmen zur Verringerung der Bahnabweichungen 175
 - Abkürzungsverzeichnis..... 176
 - Formelzeichenverzeichnis..... 176
 - Literaturverzeichnis..... 176
- 5 Auslegung von Vorschubantrieben 177
 - 5.1 Auslegung des Motors und der mechanischen Komponenten 180
 - 5.1.1 Bestimmung der Anforderungen und Wahl des Antriebsprinzips 181
 - 5.2.2 Wahl und Auslegung der mechanischen Komponenten 181
 - 5.1.3 Auswahl und Auslegung des Antriebsmotors 183
 - 5.1.3.1 Auslegung nach stationären Größen 184
 - 5.1.3.2 Dynamische Auslegung 184
 - 5.1.3.3 Optimales Übersetzungsverhältnis..... 185
 - 5.2 Auslegung des Messsystems 186
 - 5.3 Inbetriebnahme der Regelung 186
 - 5.3.1 Manuelle Inbetriebnahme..... 187
 - 5.3.1.1 Einstellung des Drehzahlreglers 187
 - 5.3.1.2 Einstellung des Lagereglers 189
 - 5.3.2 Automatische Inbetriebnahme..... 190
 - Abkürzungsverzeichnis..... 190
 - Formelzeichenverzeichnis..... 190
 - Literaturverzeichnis..... 191
- 6 Prozessüberwachung..... 193
 - 6.1 Einführung 196
 - 6.1.1 Hintergrund, Begriffe und Ziele..... 196
 - 6.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung von Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Instandhaltungsmaßnahmen 199
 - 6.1.3 Einflussgrößen auf die Funktion der Fertigungsmittel und die Qualität der Produkte..... 199
 - 6.1.4 Strategien und Struktur von Überwachungssystemen..... 200
 - 6.1.4.1 Strategien für Überwachungssysteme..... 200
 - 6.1.4.2 Die Struktur von Überwachungssystemen..... 201
 - 6.1.4.3 Zusammenhang und Abgrenzung zwischen Prozessüberwachung und Maschinendiagnose..... 202
 - 6.1.4.4 Mechanische und optische Sensoren..... 203
 - 6.1.4.5 Steuerungsinterne Informationen 203
 - 6.1.5 Prinzipien der Prozessregelung 205

6.2	Signalverarbeitung und Mustererkennung	206
6.2.1	Analoge Signalaufbereitung	208
6.2.2	Digitale Vorverarbeitung	211
6.2.3	Merkmalsextraktion	211
6.2.4	Klassifikation	212
6.2.4.1	Feste Grenzen	213
6.2.4.2	Mitlaufende Schwellen	213
6.2.4.3	Mehrdimensionale Klassifikation	213
6.3	Technologische Prozessüberwachung und Prozessregelung bei verschiedenen Fertigungsverfahren	216
6.3.1	Drehbearbeitung	216
6.3.1.1	Sensorsysteme zur Drehmoment- und Zerspankraftmessung	216
6.3.1.2	Kraft-, Drehmoment- und Leistungsregelung bei der Drehbearbeitung	218
6.3.1.3	Automatische Schnittaufteilung für das Drehen	221
6.3.1.4	Prozessüberwachung beim Drehen	223
6.3.2	Fräsbearbeitung	226
6.3.2.1	Sensorsysteme und Verfahren zur Prozessüberwachung beim Fräsen	226
6.3.2.2	Prozessüberwachung für die Fräsbearbeitung	229
6.3.2.3	Prozessregelung für die Fräsbearbeitung	233
6.3.2.4	Prozessregelung beim Gussputzen	237
6.3.2.5	Automatische Ratterbeseitigung	238
6.3.3	Bohren	244
6.3.3.1	Prozessüberwachung beim Bohren und Tiefbohren	244
6.3.3.2	Prozessregelung für das Tiefbohren	248
6.3.4	Schleifen	249
6.3.4.1	Prozessregelung	249
6.3.4.2	Abrichtüberwachung	251
6.3.5	Funkenerosive Bearbeitung	252
6.3.6	Kollisionsüberwachung	256
6.4	Statistische Prozessregelung	259
6.5	Maschinenzustandsüberwachung	260
6.5.1	Verfahren der Instandhaltung und Wartung	260
6.5.1.1	Reaktive Instandhaltung	261
6.5.1.2	Zeitabhängige (präventive) Instandhaltung	261
6.5.1.3	Zustandsorientierte Instandhaltung	263
6.5.2	Maschinenzustandsüberwachung	264
6.5.2.1	Kennwerte	264
6.5.2.2	Sensorische Zustandserfassung	265
6.5.3	Messwertanalyse	268
6.5.3.1	Konventionelle Diagnosefunktionen	268
6.5.3.2	Anwendungsbeispiele	273

	Abkürzungsverzeichnis.....	276
	Formelzeichenverzeichnis.....	277
	Literaturverzeichnis.....	279
7	Automatisierung von Maschinen und Anlagen.....	281
7.1	Begriffsbestimmung.....	284
7.2	Geschichtliche Entwicklung und Gründe für die Automatisierung von Werkzeugmaschinen.....	284
7.3	Steuerungs- und Automatisierungstechnik als Teilaufgabe der Maschinenentwicklung.....	285
7.4	Steuerung von Funktionsabläufen.....	287
7.4.1	Automatisierbare Funktionen der Fertigungseinrichtungen.....	287
7.4.2	Funktionsfolgen.....	288
7.4.3	Elemente der Steuerung, Programmierung und Speicherung.....	289
7.5	Beispiele automatisierter Funktionen.....	290
7.5.1	Weg- und Schaltinformationen.....	290
7.5.1.1	Lineare Wegaufnehmer.....	290
7.5.1.2	Nocken- und Schalterleisten.....	291
7.5.1.3	Absolute und inkrementale Drehgeber zur Erfassung der Istposition einer Maschinenbaugruppe und zur Drehzahlregelung.....	292
7.5.2	Werkstücktransport und -handhabung.....	292
7.5.3	Werkzeughandhabung und -speicherung.....	295
7.5.4	Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Sicherheit.....	298
7.5.5	Leittechnik.....	298
7.5.6	Entsorgung.....	298
	Abkürzungsverzeichnis.....	299
	Literaturverzeichnis.....	299
8	Mechanische Steuerungen.....	301
8.1	Einspindeldrehautomat.....	305
8.2	Mehrspindeldrehautomat.....	312
8.3	Weiterentwicklung des mechanisch gesteuerten Mehrspindlers.....	321
8.4	Elektronische Königswelle.....	322
8.4.1	Funktionsweise.....	323
8.4.2	Anwendung.....	325
	Abkürzungsverzeichnis.....	325
	Formelzeichenverzeichnis.....	325
	Literaturverzeichnis.....	326

9	Grundlagen der Informationsverarbeitung	327
9.1	Grundlagen	330
9.1.1	Zahlensysteme	330
9.1.2	Datencodes	332
9.1.3	Boole'sche Algebra	334
9.1.4	Karnaugh-Veitch-Diagramm	337
9.2	Bausteine	339
9.2.1	Realisierung der Grundfunktionen	339
9.2.2	Erweiterte Funktionen	342
9.2.2.1	Flip-Flop	342
9.2.2.3	Flankengetriggerte Flip-Flops	343
9.2.2.4	Binärzähler	343
9.2.2.5	Halbaddierer	344
9.2.2.6	Volladdierer und Addierwerke	344
9.2.2.7	Vergleicher	347
9.2.2.8	Decodierer	347
9.2.2.9	Parityprüfer	347
9.2.2.10	A/D-Wandler	348
9.2.2.11	D/A-Wandler	351
9.2.3	Integrierte Schaltkreise	352
9.2.4	Bedien- und Anzeigeelemente	354
9.2.5	Rechner	354
9.3	Kommunikation in der Automatisierungstechnik	356
9.3.1	Anforderungen an die Kommunikationstechnik	356
9.3.2	OSI-Referenzmodell	357
9.3.3	Busarchitekturen und -zugriffsverfahren	359
9.3.4	Bus-Systeme	360
9.3.5	Industrial Ethernet	361
9.3.6	Wireless Communication	362
9.3.7	Near Field Communication	363
9.3.8	Middleware-Protokolle	364
	Abkürzungsverzeichnis	365
	Literaturverzeichnis	365
10	Elektrische Steuerung	367
10.1	Aufbau und Einordnung von elektrischen Steuerungen	370
10.1.1	Verknüpfungssteuerungen	372
10.1.2	Ablaufsteuerungen	372
10.2	Verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS)	374
10.2.1	Anwendungsgebiete und Aufgaben	374
10.2.2	Anwendungsbeispiele	374
10.3	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	376
10.3.1	Anwendungsgebiete und Aufgaben	376

10.3.2	Aufbau und Funktionsweise.....	379
10.3.2.1	Aufbau.....	379
10.3.2.2	Funktionsweise.....	381
10.3.3	SPS-Programmierung.....	383
10.3.3.1	Kontaktplan-Programmierung.....	384
10.3.3.2	Funktionsplan-Programmierung.....	385
10.3.3.3	Programmierung mit Anweisungsliste.....	386
10.3.3.4	Beispiele für komplexere Programmanweisungen.....	386
10.3.3.5	Strukturierter Text (Hochsprachen-Programmierung).....	390
10.3.3.6	Ablaufsprache.....	391
10.3.4	Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung von komplexen SPS-Programmen.....	392
10.3.4.1	Spezifikation der Steuerungsaufgabe.....	392
10.3.4.2	Programmentwurf und Programmierung.....	393
10.3.4.3	Programmtest.....	394
10.4	Sicherheitssteuerungen.....	396
10.4.1	Maschinenrichtlinie.....	397
10.4.2	Performance Levels.....	398
10.4.3	Zweikanalige, fehlererkennende Steuerungsstruktur.....	398
10.4.4	Dreikanalige, fehlertolerante Steuerungsstruktur.....	399
10.4.5	Konventionelle Sicherheitsschaltung in Relaistechnik.....	399
10.4.6	Fehlersichere Prozessankopplung.....	401
10.4.6.1	Sichere Auswertung von Prozesseingängen.....	401
10.4.6.2	Fehlersichere und fehlertolerante Prozessausgänge.....	403
10.5	Motion Control.....	404
10.5.1	Grundlagen und Anwendung.....	404
10.5.2	Aufbau und Funktionsweise von MC-Systemen.....	405
10.5.2.1	Systemarchitektur von MC-Systemen.....	405
10.5.2.2	Feldbussysteme für Motion Control.....	405
10.5.3	Programmierung.....	407
10.5.3.1	Projektierung von Motion-Control-Systemen.....	408
	Abkürzungsverzeichnis.....	408
	Literaturverzeichnis.....	409
11	Numerische Steuerung.....	411
11.1	Geschichtliche Entwicklung numerischer Steuerungen.....	414
11.2	Aufbau und Funktionsbeschreibung numerischer Steuerungen.....	415
11.2.1	Allgemeine Funktionsbeschreibung.....	415
11.2.2	Hardware und Schnittstellen einer NC-Steuerung.....	417
11.2.2.1	Interner Aufbau.....	419
11.2.2.2	Externe Schnittstellen.....	421
11.2.3	Software einer NC-Steuerung.....	422

11.2.4 Funktionsweise einer NC-Steuerung	423
11.2.4.1 NC-Interpreter	423
11.2.4.2 Geometriedatenverarbeitung	424
11.2.4.3 Interpolation	425
11.2.4.4 Achsregelung	425
11.2.5 Funktionsumfang moderner NC-Steuerungen	425
11.2.5.1 Standard-Funktionen	425
11.2.5.2 Funktionen zur Steuerung automatisierter Produktionszellen	430
11.2.6 Offenheit von Steuerungssystemen	431
11.2.6.1 Motivation und Ziele offener Steuerungssysteme	433
11.2.6.2 Ausprägungen offener Steuerungssysteme	433
11.2.6.3 Realisierung offener Steuerungen	433
11.2.6.4 Herstellerübergreifende Standards für offene Steuerungen	438
11.3 Werkstückprogrammierung in der NC-Fertigung	438
11.3.1 Aufbau eines satzbasierten NC-Programms	439
11.3.2 Aufbau eines objektorientierten NC-Programms	441
11.3.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte	442
11.3.3.1 Maschinen-Nullpunkt M	444
11.3.3.2 Referenzpunkt R	444
11.3.3.3 Werkstücknullpunkt	444
11.3.3.4 Werkzeugbezugspunkt E	444
11.3.3.5 Werkzeugaufnahme-N und Schlittenbezugspunkt	444
11.3.3.6 Startpunkt	444
11.3.3.7 Werkzeuggeometrie	444
11.4 NC-Programmierverfahren	445
11.4.1 Manuelle NC-Programmierverfahren	446
11.4.1.1 Grundlagen und Vorgehensweise	446
11.4.1.2 Programmierbeispiel (DIN 66025)	449
11.4.1.3 Zusätzliche Befehle zur Programmeingabe	450
11.4.2 Maschinelle NC-Programmierverfahren	455
11.4.2.1 CAD/CAP/CAM-Kopplung	458
11.4.2.2 Programmierbeispiel anhand des EXAPT-Systems	471
11.4.2.3 Programmierbeispiel für ein objektorientiertes NC-Programm (STEP-NC)	477
11.4.2.4 Werkstattorientierte NC-Programmierung	477
11.4.2.5 Werkstattnahe Programmierung mit manueller Prozessführung	480
11.4.2.6 Kostenvergleich der Programmierverfahren	482
11.4.3 Digitalisierung von Werkstückgeometrien zur NC-Datengenerierung	484
11.4.3.1 Messgeräte zur Digitalisierung von Werkstücken	485
11.4.3.2 Abtaststrategien	487
11.4.3.3 Tastsysteme	488
11.4.3.4 Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Messdaten	493

- 11.5 Benutzerschnittstellen an Werkzeugmaschinen..... 497**
 - 11.5.1 Bedienfelder an Werkzeugmaschinen..... 497
 - 11.5.2 Manuelle Prozessführung..... 499
 - 11.5.2.1 Allgemeine Übersicht 499
 - 11.5.2.2 Bedienelemente zur Prozessführung 499
 - 11.5.2.3 Möglichkeiten für die Realisierung einer
benutzerorientierten Prozessführung 500
 - 11.5.2.4 Entwicklungstendenzen..... 503
 - 11.5.3 Benutzerorientierte Darstellung prozess-
und systembezogener Kenngrößen 504
 - 11.5.3.1 Ausgangssituation..... 504
 - 11.5.3.2 Benutzergerechte Vermittlung der Kenngrößen 504
 - 11.5.3.3 Technische Realisierung und Anwendungsbeispiele 506
- Abkürzungsverzeichnis..... 508**
- Formelzeichenverzeichnis..... 508**
- Literaturverzeichnis..... 509**
- 12 Führungsgrößenerzeugung und Interpolation 511**
 - 12.1 Interpolation 515**
 - 12.1.1 Funktionen zur satzorientierten Geschwindigkeits-
und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen..... 516
 - 12.1.1.1 Beschleunigungs- und Verzögerungsphase..... 518
 - 12.1.1.2 Konstantgeschwindigkeitsphase..... 521
 - 12.1.1.3 Bremsesatzpunkterkennung..... 521
 - 12.1.2 Funktionen zur satzübergreifenden Geschwindigkeits-
und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen..... 522
 - 12.1.2.1 Satzübergänge 522
 - 12.1.2.2 Vorausschauende Geschwindigkeitsführung 524
 - 12.1.3 Interpolation einfacher Bahnen..... 526
 - 12.1.3.1 Geradeninterpolation..... 526
 - 12.1.3.2 Kreisinterpolation..... 527
 - 12.1.4 Spline-Interpolation..... 528
 - 12.1.4.1 Polynomsplines..... 529
 - 12.1.4.2 B-Splines 533
 - 12.1.4.3 NURBS 536
 - 12.1.4.4 Auswertung von Splines 536
 - 12.1.5 Sonstige Verfahren 538
 - 12.2 Geometrische Transformationen..... 538**
 - 12.2.1 Nullpunktverschiebungen..... 538
 - 12.2.2 Werkzeugkorrekturen..... 539
 - 12.2.3 Kinematische Transformation
für die Fünf-Achs-Fräsbearbeitung 540
 - 12.2.3.1 Serielle Kinematiken 542
 - 12.2.3.2 Parallele Kinematiken 542

12.3 Externe Lage- und Geschwindigkeitsbeeinflussung	545
12.3.1 Kompensation geometrischer Fehler	545
12.3.1.1 Kompensation geometrischer Fehler von Vorschubantrieben	545
12.3.1.2 Kompensation thermischer Verlagerungen	546
12.3.1.3 Kompensation statischer Prozesslasten	550
12.3.1.4 Messregelung für Schleifprozesse	553
12.3.2 Vorschub-Override und externe Geschwindigkeitsbeeinflussung	554
12.3.2.1 Override	554
12.3.2.2 Externe Geschwindigkeitsbeeinflussung	555
12.3.2.3 Look-Ahead-Funktion	555
12.3.3 Referenzpunktfahrt	555
Abkürzungsverzeichnis	556
Formelzeichenverzeichnis	556
Literaturverzeichnis	558
13 Roboter und Robotersteuerung	559
13.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung	563
13.2 Roboterkinematiken und Einlegegeräte	564
13.2.1 Vertikaler Knickarmroboter	567
13.2.2 Horizontaler Knickarmroboter	570
13.2.3 Kartesische Linienportal-Roboter	571
13.2.4 Kartesisches Flächenportal und Linienportal mit Querausleger	572
13.2.5 Parallelkinematiken	573
13.2.5.1 Kombinierte Kinematiken	573
13.2.5.2 Vollparallele Kinematiken	573
13.2.6 Sonderbauformen	574
13.2.6.1 Zylinder- und Kugelkoordinatenroboter	574
13.2.6.2 Hybridkinematiken	575
13.2.6.3 Kollaborative Roboterbauformen	575
13.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte	577
13.4 Koordinatentransformation und Bahngenerierung	579
13.5 Bedienung und Programmierung von Robotern	589
13.5.1 Online-Programmierverfahren	590
13.5.2 Offline-Programmiersysteme	596
13.5.3 Industrial Robot Language (IRL) als Beispiel einer Roboter-Programmiersprache	601
13.6 Kommunikationsschnittstellen für Robotersteuerungen	610
13.7 Sensordatengewinnung und -verarbeitung	610

13.8 Greiftechnik in der Robotik	613
13.8.1 Prozessdefinitionen	614
13.8.2 Greifprinzipien	614
13.8.3 Greifertypen	615
13.8.3.1 Mechanische Greifer	615
13.8.3.2 Pneumatische Greifer	619
13.8.3.3 Sonderformen	621
13.8.4 Greifsysteme	623
13.9 Entwicklungstendenzen	626
Abkürzungsverzeichnis	630
Formelzeichenverzeichnis	630
Literaturverzeichnis	631
14 Fertigungsleittechnik	633
14.1 Die Unternehmensstruktur im CIM-Verbund	636
14.1.1 CIM-Komponenten	637
14.1.1.1 PPS	638
14.1.1.2 CAD	638
14.1.1.3 CAP und CAM	639
14.1.1.4 CAQ	639
14.1.2 Automatisierte Produktion	639
14.1.3 Ebenenmodell eines Unternehmens der Fertigungsindustrie	640
14.2 Unternehmensebene	641
14.2.1 ERP-Systeme	642
14.2.1.1 Funktionalitäten eines ERP-Systems	642
14.2.1.2 Modularität von ERP-Systemen	642
14.2.1.3 Einführung eines ERP-Systems	644
14.2.1.4 Aktuelle Entwicklungen von ERP-Systemen	644
14.3 Betriebsleitebene	645
14.3.1 Manufacturing Execution Systems	645
14.3.1.1 Aufgaben eines MES	645
14.3.1.2 Ausprägungen und Systemtypen	645
14.3.2 Fertigungsleitsysteme	646
14.3.2.1 Technische Systemkonzepte	647
14.3.2.2 DNC (Distributed Numerical Control)	647
14.3.2.3 Materialflussteuerung	649
14.3.2.4 Fertigungshilfsmittelorganisation	650
14.3.3 Kommunikation in der Leittechnik	656
14.3.3.1 Kommunikationssegmente des Fertigungsbereichs	657

- 14.4 Prozessleitebene 659
 - 14.4.1 Elektronischer Leitstand 659
 - 14.4.1.1 Aufgaben von Werkstattsteuerungssystemen..... 659
 - 14.4.1.2 Funktionsumfang elektronischer Leitstände 659
 - 14.4.2 Fertigungsleitrechner..... 661
 - 14.4.2.1 Funktionsumfang von Fertigungsleitrechnern 661
 - 14.4.3 SCADA-Systeme 662
 - 14.4.3.1 Aufgaben 662
 - 14.4.3.2 Konzepte..... 662
- 14.5 Smart Automation Lab: Industrie 4.0-Forschungslabor 663
 - 14.5.1 Produktzentrierte Steuerung..... 663
 - 14.5.2 Plug & Produce..... 664
 - 14.5.3 Kognitive Montage 665
- Abkürzungsverzeichnis..... 666
- Literaturverzeichnis 667
- 15 Engineering 669
 - 15.1 Softwareentwicklung..... 672
 - 15.1.1 Entwicklungsmodelle 672
 - 15.1.1.1 Wasserfall-Modell..... 673
 - 15.1.1.2 V-Modell 673
 - 15.1.1.3 Agile Softwareentwicklung..... 674
 - 15.1.2 Entwicklungsphasen 675
 - 15.1.2.1 Planungsphase 675
 - 15.1.2.2 Definitionsphase..... 675
 - 15.1.2.3 Entwurfsphase..... 675
 - 15.1.2.4 Implementierungsphase 676
 - 15.1.2.5 Abnahme- und Einführungsphase 679
 - 15.1.2.6 Wartungs- und Pflegephase 679
 - 15.1.3 Modellgetriebene Softwareentwicklung 679
 - 15.2 Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen..... 680
 - 15.2.1 Einführung 680
 - 15.2.2 Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen..... 681
 - 15.2.2.1 Energiebereitstellung 681
 - 15.2.2.2 Realisierung von Steuerungsfunktionen..... 681
 - 15.2.2.3 Schutzfunktionen für Personal und Anlage 682
 - 15.2.3 Zusammenwirken zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion..... 684
 - 15.2.3.1 Schnittstelle zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion 684
 - 15.2.3.2 Verständigungshilfsmittel zur Funktionsfestlegung in einer Werkzeugmaschine 685

15.2.4	Komponenten und Verfahren der Elektrokonstruktion.....	686
15.2.4.1	Normen und Vorschriften zur Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen	686
15.2.4.2	Kriterien zur Auswahl von Komponenten.....	688
15.2.4.3	Schaltungsunterlagen.....	688
15.2.4.4	Schaltungsunterlagen am Beispiel einer Drehmaschine	690
15.2.4.5	Verfahren der Elektrokonstruktion	694
15.2.5	Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen	696
15.2.5.1	Energieversorgung	696
15.2.5.2	Elektrische Komponenten in Werkzeugmaschinen	696
15.2.5.3	Bedienerschnittstelle	699
15.2.5.4	Sicherheitseinrichtungen.....	702
15.2.5.5	Schaltschrankbau.....	703
	Literaturverzeichnis	708
16	Serviceteil	711