

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Abstract	vii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xv
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Grundlagen der Industrierobotik	3
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise	3
2.1.2 Dynamische Bahngenaugkeit	7
2.2 Ansätze zur Verbesserung der dynamischen Bahngenaugkeit	10
2.2.1 Steuerungstechnische Maßnahmen	11
2.2.2 Regelungstechnische Maßnahmen	15
2.2.3 Konstruktive Maßnahmen	17
2.3 Zusammenfassende Bewertung	19
2.3.1 Bewertung der Lösungsansatzklassen	20
2.3.2 Defizit und Handlungsbedarf	22
2.4 Dynamisches Verhalten von Roboterantrieben	23
2.4.1 Abtriebsseitige Last und Getriebe	24
2.4.2 Servomotor und Frequenzumrichter	25
2.4.3 Drehzahl- und Lageregelung	27
2.4.4 Vorsteuerung	30
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	31

ix

4 Systemanalyse	37
4.1 Versuchsumfeld und Messaufbau	37
4.1.1 Bewertungsmetriken im Zeitbereich und Notation	39
4.2 Führungsverhalten im kartesischen Raum	40
4.3 Störverhalten im kartesischen Raum	43
4.4 Mechanisches Übertragungsverhalten der Hauptachsen	45
4.5 Dominante Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von Achse 1	47
4.6 Nichtidealitäten im Antriebsstrang	48
4.7 Praxisrelevante Randbedingungen	51
4.8 Fazit	51
5 Semiaktives Regelgesetz	53
5.1 Regelgesetzentwurf	53
5.2 Wirkungsweise	58
5.3 Gegenüberstellung der Regelgesetze	61
5.4 Einfluss des dynamikbegrenzten Dämpfungsaktuators	63
5.5 Steuerungstechnische Integration	67
6 Dämpfungsaktuator	69
6.1 Elektromagnetischer Dämpfungsaktuator	71
6.1.1 Elektromagnetisches Teilsystem	72
6.1.2 Mechanisches Teilsystem	78
6.1.3 Integration	81
6.2 Elektromotorischer Dämpfungsaktuator	83
7 Parametrierung	87
7.1 Analyse des Verstärkungsfaktors K_d	87
7.1.1 Einfluss auf die Mechanik	87
7.1.2 Einfluss auf Drehzahl- und Lageregelung	89
7.1.3 Wechselseitige Abhängigkeiten der Einstellparameter	90
7.2 Mixed-Sensitivity Loop Shaping	92
7.2.1 Parametrische Unsicherheiten	94
7.2.2 Parametererhaltende Linearisierung der SAD	94
7.2.3 Bandbreitenbeschränkendes Vorfilter	96
7.2.4 Spezifikation der Optimierungsziele	98

7.3	Diskussion der (optimierten) Parametersätze	102
7.4	Inbetriebnahmегe gerechte Einstellregeln	105
8	Experimentelle Validierung am Industrieroboter	107
8.1	Signalaufbereitung	107
8.2	Mechanisches Streckenverhalten	111
8.3	Robuste Stabilität	112
8.4	Regelungsperformanz	113
8.5	Dynamische Bahngenaugkeit	115
8.5.1	Trajektorienfolgeverhalten	115
8.5.2	Fräsbearbeitung	117
8.6	Diskussion der Ergebnisse	120
9	Potenziale und Grenzen	121
9.1	Einsetzbarkeit	121
9.2	Anwendungen	123
10	Zusammenfassung und Ausblick	127
Literatur	131
Abbildungsverzeichnis	153
Tabellenverzeichnis	157
Anhang	159
A	Geregeltes Zweimassenschwingermodell	159
A.1	Parameterwerte	159
B	Industrieroboter	160
B.1	Technische Daten	160
B.2	Offene Steuerungsarchitektur	161
B.3	Betrachtete Posen und zugehörige Gelenkwinkel	162
B.4	Parameterwerte für die Antriebsregelung	163
C	Dämpfungsaktuator	164
C.1	Technische Daten	164
C.2	Explosionszeichnung	165

Inhaltsverzeichnis

D	Direktantrieb	166
D.1	Technische Daten	166
E	Einfluss der Regelparameter des Drehzahlreglers	167
E.1	Einfluss von K_p	167
E.2	Einfluss von T_n	168
F	SAD mit antriebsseitiger Lageregelung	169