

# Inhaltsverzeichnis

<b>Bezeichnungen und Symbole</b>	<b>VIII</b>
<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>Einführung in die Problemstellung</b>	<b>4</b>
1.1. Einleitung und Motivation.....	4
1.2. Problemstellung.....	7
1.2.1. Regelung von Roboterarmen.....	8
1.2.1.1. Multisensor basierte Regelung.....	8
1.2.1.2. Objektverspannungen bei Zweiarm-Robotern.....	9
1.2.2. Bewegungsausführung enggekoppelter Zweiarm-Roboter.....	10
1.2.2.1. Koordination zweier Roboterarme.....	10
1.2.2.2. Problematische Armkonfigurationen.....	11
1.2.2.3. Lastverteilung.....	12
1.3. Zusammenfassung.....	14
1.4. Zielsetzung und Inhalt der Arbeit.....	15
1.5. Gliederung der Arbeit.....	17
<b>Stand der Forschung</b>	<b>18</b>
2.1. Einführung in die Robotik.....	18
2.2. Regelungskonzepte für Manipulatoren.....	20
2.2.1. Klassifikation.....	20
2.2.2. Exakte Systemmodellierung.....	21
2.2.3. Kraft-/Positionsregelung.....	23
2.2.3.1. Impedanz-Regelung.....	23
2.2.3.2. Hybride Kraft-/Positionsregelung.....	25
2.3. Zweiarm-Koordination.....	26
2.3.1. Exakte Systemmodellierung.....	27
2.3.2. Master-/Slave-Methode.....	28
2.3.3. Gleichberechtigte Koordinationsverfahren.....	30
2.4. Lastverteilung.....	31
2.5. Zusammenfassung und Bewertung.....	33
<b>Steuerungskonzept für Zweiarm-Robotersysteme</b>	<b>35</b>
3.1. Hierarchische Steuerungsarchitektur.....	36

3.2.	Einarm-Regelung.....	37
3.2.1.	Gelenkwinkel-Positionsregelung.....	42
3.2.2.	Kartesische Kraftregelung.....	46
3.2.3.	Verallgemeinerte hybride Sensorregelung .....	47
3.3.	Koordination von zwei Einarm-Systemen .....	48
3.3.1.	Gleichberechtigtes Koordinationsverfahren.....	49
3.3.2.	Objektorientierte Selektion.....	51
3.3.3.	Integration zum Zweiarm-System .....	53
3.4.	Situationsabhängige Lastverteilung .....	55
3.4.1.	Bestimmung der Überlast von Manipulatoren .....	56
3.4.2.	Situationsabhängige Kompensation von Überlasten .....	59
3.4.3.	Überlastkompensation für n-Arme .....	63
3.5.	Zusammenfassung .....	66
	<b>Regelungsverfahren</b>	<b>67</b>
4.1.	Adaptive Einzelachsregelung .....	67
4.1.1.	Entwurf von Reglerauswahlstrategien.....	68
4.1.1.1.	Auswahl der Betriebszustandskriterien .....	69
4.1.1.2.	Festlegung der Zustandsgrenzen .....	70
4.1.2.	Wissensrepräsentation .....	73
4.1.3.	Ermittlung der Reglerparameter .....	74
4.1.3.1.	Systemidentifikation.....	76
4.1.3.2.	Parameteroptimierung .....	76
4.1.3.3.	Nachoptimierung .....	78
4.1.4.	Zusammenfassung .....	78
4.2.	Gütebasierte Kraftregelung mit Fuzzy-Adaption .....	79
4.2.1.	Unscharfe Logik .....	79
4.2.1.1.	Linguistische Variablen.....	80
4.2.1.2.	Fuzzyfizierung.....	81
4.2.1.3.	Elementare Mengenoperationen.....	81
4.2.1.4.	Unscharfe Produktionsregeln .....	83
4.2.1.5.	Zusammenfügen unscharfer Regeln .....	84
4.2.1.6.	Defuzzyfizierung .....	84
4.2.2.	Einflußgrößen der gütebasierten Fuzzy-Adaption .....	85
4.2.2.1.	Regelabweichung .....	86
4.2.2.2.	Gradient der Regelabweichung .....	87
4.2.2.3.	Gradient der Führungsgröße.....	88
4.2.2.4.	Standardabweichung .....	88
4.2.2.5.	Kontaktsituationen.....	90
4.2.3.	Regelbasierte Parameteradaption .....	92

4.2.4. Zusammenfassung .....	95
4.3. Einstellen der Lastausgleichskraft .....	95
4.3.1. Qualitative Systembeschreibung .....	96
4.3.1.1. Zunehmende Objektverspannung .....	97
4.3.1.2. Reduzieren interner Verspannungen .....	97
4.3.2. Regelung mit Hilfe variabler Strukturen .....	98
4.3.3. Zusammenfassung .....	100
<b>Verteilte Steuerungsarchitektur</b> .....	<b>102</b>
5.1. Multiprozessor-Systeme .....	102
5.1.1. Einführung .....	103
5.1.2. VMEbus-Systeme .....	105
5.1.2.1. Synchronisation .....	105
5.1.2.2. Nutzung gemeinsamer Speicherbereiche .....	106
5.2. Echtzeitfähiges Zweiarm-Testbett .....	107
5.2.1. Gelenkebene .....	107
5.2.2. Manipulatorebene .....	111
5.2.3. Objektebene .....	112
5.3. Zusammenfassung .....	116
<b>Experimentelle Validierung</b> .....	<b>117</b>
6.1. Versuchsumgebung .....	117
6.2. Experimente .....	120
6.2.1. Adaptive Einzelachsregelung .....	120
6.2.2. Gütebasierte Kraftregelung .....	128
6.2.3. Koordination kraft geregelter Manipulatoren .....	135
6.2.4. Situationsabhängige Lastverteilung .....	140
6.2.5. Zusammenfassung .....	143
<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>144</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>148</b>
A1 Grundlagen .....	148
A2 Kinematikmodelle des PUMA 200 .....	154
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>159</b>