

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund und Zielsetzung . . . . .	1
1.2	Stand der Technik . . . . .	6
1.2.1	Modellierung, Regelung und Trajektoriengenerierung des Manipulators . . . . .	6
1.2.2	Automatisierung des Greifprozesses . . . . .	7
1.2.3	Automatisierung der Betonage . . . . .	9
1.3	Struktur und Beitrag der Arbeit . . . . .	12
1.3.1	Automatisierung des Greifprozesses . . . . .	12
1.3.2	Automatisierung der Betonage . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Prozessbeschreibung zur Herstellung von gradierten Beton-</b>	
	<b>elementen</b>	<b>19</b>
2.1	Schema des Gesamtprozesses . . . . .	19
2.2	Zentrifuge zur Hohlkörperherstellung . . . . .	21
2.3	Aufbau des Off-Site-Versuchsstands . . . . .	22
2.3.1	Aufbau des Portalroboters . . . . .	22
2.3.2	Aufbau des Pumpsystems . . . . .	24
2.4	Aufbau des On-Site-Versuchsstands . . . . .	25
2.4.1	Hydraulischer Manipulator . . . . .	26
2.4.2	Endeffektoren des Manipulators . . . . .	27
2.4.3	Pumpsystem . . . . .	30
2.4.4	Steuerungsarchitektur und Kommunikation . . . . .	32
2.4.5	Peripherie . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Automatisierung des Greifprozesses</b>	<b>35</b>
3.1	Modellierung und Regelung des hydraulischen Manipulators . .	37
3.1.1	Herleitung der Kinematik . . . . .	37
3.1.2	Modellierung des dynamischen Verhaltens . . . . .	38
3.1.3	Achspositionsregelung . . . . .	42
3.1.4	Modellierung der statischen Deformation . . . . .	44
3.2	Kollisionsfreie Trajektoriengenerierung und Abgriffsregelung . .	47
3.2.1	Kollisionsfreie Trajektoriengenerierung und Trajektori-	
	enfolgeregelung . . . . .	48

3.2.2	Abgriffsregelung unter Einhaltung von Posenbeschränkungen . . . . .	54
3.3	Lokalisation, Exploration und Greifprozessplanung . . . . .	57
3.3.1	Detektion und Lokalisation der Betonkugeln . . . . .	57
3.3.2	Umgebungsmodellierung und Exploration . . . . .	60
3.3.3	Optimierungsbasierte Greifreihenfolgenplanung . . . . .	69
3.3.4	Gesamtablauf und experimentelle Validierung . . . . .	78
3.4	Kurzzusammenfassung . . . . .	81
<b>4</b>	<b>Automatisierung der Betonage</b>	<b>83</b>
4.1	Planung der Referenzpfade . . . . .	85
4.1.1	Hamiltonsche Pfade und geschichtete Triangulationen . . . . .	86
4.1.2	Ein Algorithmus zur Erstellung geschichteter Triangulationen in gradierten Betonelementen . . . . .	93
4.1.3	Lokale Pfadplanung in geschichteten Triangulationen . . . . .	103
4.1.4	Planung der Gelenkwinkelpfade . . . . .	113
4.1.5	Planung des Volumenbedarfs . . . . .	116
4.2	Pfadbasierte Regelung und Synchronisation . . . . .	117
4.2.1	Die Pfaddynamikgleichung . . . . .	118
4.2.2	Pfadbasierte Regelung . . . . .	123
4.2.3	Pfadlinearisierung und Pfadsynchronisation . . . . .	125
4.2.4	Eingangsskalierung zur beschränkten Pfadfolge . . . . .	126
4.3	Modellierung und Regelung des Off-Site Versuchsstand . . . . .	129
4.3.1	Modellierung der Volumenstromdynamik am OFV . . . . .	129
4.3.2	Beobachterentwurf basierend auf dem Waagensignal . . . . .	135
4.3.3	Füllstandsregelung für den OFV . . . . .	138
4.4	Modellierung und Regelung des On-Site-Versuchsstands . . . . .	141
4.4.1	Die Volumenstromdynamik am ONV . . . . .	141
4.4.2	Modellierung des Hydrauliksystems . . . . .	145
4.4.3	Zylindergeschwindigkeitsregelung der Betonpumpe . . . . .	160
4.4.4	Füllstandsregelung für den ONV . . . . .	163
4.5	Pfadsynchrone Fabrikation von Betonbauteilen . . . . .	170
4.5.1	Herstellung am OFV . . . . .	170
4.5.2	Herstellung am ONV . . . . .	182
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>197</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>201</b>
A.1	Die Kinematik beider Manipulator-Konfigurationen . . . . .	202
A.2	Die Pfaddynamikgleichung . . . . .	204
A.3	Definition einer Pfad-Vektorbasis . . . . .	206

A.4 Parameter von Fluiddynamik und Beobachter . . . . .	207
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>210</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>211</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>225</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>229</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>231</b>