

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik und Abgrenzung des Forschungsthemas	2
1.1.1	Modellierung von Kontinuum-Manipulatoren	3
1.1.2	Regelung von Kontinuum-Manipulatoren	5
1.1.3	Trajektorienengineering und Bahnplanung	9
1.2	Ziele der Dissertation	11
1.3	Inhaltliche Gliederung	14
2	Modellbildung	17
2.1	Kinematisches Modell	20
2.1.1	Kinematik des Schwenkantriebs	21
2.1.2	Kinematik des Balgsegments	22
2.2	Pneumatische Grundlagen	23
2.2.1	Druckaufbaudynamik	24
2.2.2	Ventilmodellierung	25
2.3	Modellbildung der Schwenkantriebe	25
2.3.1	Kammervolumen der Schwenkantriebe	26
2.3.2	Reibungs- und Antriebsmoment der Schwenkantriebe	27
2.4	Modellbildung der Balgsegmente	32
2.4.1	Aufbau eines Balgsegments	33
2.4.2	Voruntersuchungen	35
2.4.3	Balgvolumen der Balgsegmente	37
2.4.4	Vorüberlegungen zur Mechanik des Balgsegments	41
2.4.5	Prüfstand und Messroutine	42
2.4.6	Reibmodell und Rückstellmoment	44
2.4.7	Nichtlineares Hyperelastisches Materialmodell	51
2.4.8	Identifikation und Validierung des Balgsegments	62
2.5	Bewegungsgleichung des Manipulators	68
2.5.1	Gesamttransformation	68
2.5.2	Bewegungsgleichungen	70
2.6	Kurzzusammenfassung	74
3	Modellbasierter Steuerungs- und Regelungsentwurf	77
3.1	Nichtlineare Zustandsregelung für die freie Bewegung	79
3.1.1	Zustandsrekonstruktion	81
3.1.2	Mechanikregelung und Reibvorsteuerung	82
3.1.3	Aktorsteifigkeit und Referenzdruckoptimierung	83

3.1.4	Untersuchung der Eingangstransformationen bezüglich Ist- und Sollwerten	85
3.1.5	Druckregelung	87
3.1.6	Druckvorsteuerung	87
3.1.7	Experimentelle Validierung der nichtlinearen Zustandsregelung	88
3.2	Störgrößenbeobachter und Störgrößenkompensation	96
3.2.1	Nichtlinearer Störgrößenbeobachter mit konstanter Störung	97
3.2.2	Nichtlinearer Störgrößenbeobachter mit Stördynamik	98
3.2.3	Experimentelle Validierung der Störgrößenkompensation	99
3.3	Hybride Regelung mit Kraftsensor	102
3.3.1	Aufgabendefinition durch Selektionsmatrizen	110
3.3.2	Anfahroutine und Inverse Kinematik	112
3.3.3	Kraftregelung	113
3.3.4	Erweiterung der Druckvorsteuerung um die Kraftkomponente	114
3.3.5	Experimentelle Validierung	115
3.4	Hybride Regelung ohne Kraftsensor	121
3.4.1	Experimentelle Validierung der Kraftrekonstruktion am Werkzeugpunkt	124
3.4.2	Anpassung der Kraftregelung	127
3.4.3	Experimentelle Validierung der hybriden Regelung ohne Kraftsensor	127
3.5	Kurzzusammenfassung	131
4	Optimierungsbasierte Trajektoriengenerierung	133
4.1	Problemstellung	134
4.2	Herleitung des Optimalsteuerungsproblems	135
4.2.1	Reduktion der Dynamik für die Optimalsteuerung	138
4.2.2	Optimalsteuerung für das Anfahren des Kontaktpunkts	140
4.2.3	Optimalsteuerung für die freie Bewegung	144
4.2.4	Generierung der höheren Ableitungen mittels Filterung	148
4.3	Optimale Lösung und experimentelle Validierung	149
4.3.1	Optimale Lösungen für die freie Bewegung und die Anfahrt	150
4.3.2	Experimentelle Validierung der optimalen Trajektorien am BSA	154
4.4	Kurzzusammenfassung	162
5	Zusammenfassung und Ausblick	165
A	Validierung der Volumensfunktion des Schwenkantriebs	171
B	Massen und Trägheiten für die einzelne Balgsegmente und Schwenkantriebe	175
C	Berechnung der Ableitungen des Liniensegments	179

D Herleitung der Lösung der Referenzdruckoptimierung	181
E Stabilitätsbeweis der Eingangstransformation mit Referenzwerten	183
Abkürzungsverzeichnis	185
Symbolverzeichnis	187
Abbildungsverzeichnis	197
Tabellenverzeichnis	201
Literaturverzeichnis	203