

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Automatisierung von Turmdrehkränen	1
1.2	Merkmale von Kranen	3
1.3	Anforderungen an die Regelung von Turmdrehkränen	5
1.4	Drehkranregelungen in Wissenschaft und Technik	6
1.4.1	Steuerung und Regelung starrer Drehkrane	6
1.4.2	Steuerung und Regelung flexibler Drehkrane	13
1.4.3	Pendelwinkelermittlung	18
1.5	Zielsetzung und Aufbau dieser Arbeit	20
2	Systembeschreibung untendrehender Turmdrehkrane	25
2.1	Aufbau und Geometrie	25
2.2	Antriebe	28
2.3	Sensorik	30
2.4	Steuerungsarchitektur	32
2.5	Lasttransport	33
3	Modellierung und Systemanalyse	35
3.1	Antriebsdynamik	35
3.2	Grundlagen zur Modellierung mechanischer Systeme	39
3.2.1	Herleitung der Bewegungsgleichungen	39
3.2.2	Modellierung torsionselastischer Balken in FMKS	42
3.2.3	Formfunktionen für torsionselastische Euler-Bernoulli-Balken	47
3.3	Pendeldynamik	49
3.3.1	Räumliche Pendeldynamik	50
3.3.2	Analyse der planaren Doppelpendeldynamik	54
3.4	Minimalmodell für Untendreherkrane	57
3.4.1	Kinematik und Energien	58
3.4.2	Ersatzsteifigkeiten für die Abspannung	65

3.4.3	Punktmassen an Ausleger und Turm	69
3.4.4	Eigendynamik und experimentelle Validierung	70
3.5	Kurzzusammenfassung	80
4	Aktive Pendeldämpfung	83
4.1	Zustandsregelung	84
4.1.1	Linear-quadratische Zustandsregelung	84
4.1.2	Inversion der Antriebsdynamik	88
4.2	Zustandsrekonstruktion	89
4.2.1	Konzept zur Pendelwinkelrekonstruktion	90
4.2.2	Orientierungsschätzung	91
4.2.3	Zustandsschätzung	94
4.2.4	Beobachtbarkeitsanalyse	98
4.3	Robustheitsanalyse	106
4.3.1	Analyse der Beschleunigungsbeschränkungen	107
4.3.2	Einfluss der Lastparameter und Robustheitsreserve	111
4.4	Erweiterung der aktiven Pendeldämpfung	116
4.4.1	Zusätzliche Filterung der Pendelzustände	117
4.4.2	Zustandsschätzung in modalen Koordinaten	119
4.4.3	Messergebnisse zur Einfachpendelwinkelschätzung	123
4.5	Experimentelle Ergebnisse zur Pendeldämpfung	124
4.5.1	Pendeldämpfung mit Doppelpendelmodell	125
4.5.2	Erweiterte Pendeldämpfung	129
4.6	Kurzzusammenfassung	135
5	Vorsteuerung und Geschwindigkeitsfolgeregelung	137
5.1	Anforderungen an die Trajektoriengenerierung	137
5.2	Analytische Vorsteuerung und Trajektoriengenerierung	139
5.2.1	Flache Parametrierung	139
5.2.2	Berechnung algebraischer Lasttrajektorien	144
5.3	Optimierungsbasierte Vorsteuerung und Trajektoriengenerierung	150
5.3.1	Kranmodell mit reduzierter Strukturodynamik	150
5.3.2	Optimalsteuerung	153
5.4	Simulationsergebnisse zu beiden Konzepten	156
5.5	Geschwindigkeitsfolgeregelung	163
5.5.1	Umsetzung der Folgeregelung	163
5.5.2	Experimentelle Validierung	166
5.6	Seillängenschätzung mittels Unscented Kalman-Filter	177
5.7	Kurzzusammenfassung	182
6	Zusammenfassung	185

A	Aufbaukonfigurationen der Versuchskrane	191
B	Ergänzungen zur Modellierung	193
	B.1 Modal-Transformation für diskrete mechanische Systeme . . .	193
	B.2 Körperdaten torsionselastischer Euler-Bernoulli-Balken . . .	195
	B.3 Drehmatrizen und Kardan-Winkel	197
	B.4 Bewegungsgleichungen für das planare Doppelpendel	197
	B.5 Analyse der planaren Pendeldynamik	199
C	Ergänzungen zur aktiven Pendeldämpfung	203
	C.1 Interpretation der Gram'schen Beobachtbarkeitsmatrix	203
	C.2 Kovarianzmatrizen in physikalischen und modalen Koordinaten	204
D	Ergänzungen zur Vorsteuerung und Geschwindigkeitsfolge-	
	regelung	205
	D.1 Gleichungen der Trajektorie in Abbildung 5.5	205
	D.2 Abschätzung kinematischer Beschränkungen für die Last . . .	206
	D.3 Parameteradaption für das reduzierte Kranmodell	210
	D.4 Weitere Abbildungen zum Geschwindigkeitsfolgeverhalten . .	212
	D.5 Algorithmus des Unscented Kalman-Filters	215
	D.6 Lastmassenglättung	217
E	Notation	221
	Abkürzungen	223
	Symbolverzeichnis	225
	Literaturverzeichnis	237