

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Stand der Technik	3
1.1.1 Ebene Systeme mit Punktmasse	4
1.1.2 Brückenkranne mit Punktmasse	9
1.1.3 Weitere starre Krane mit Punktmasse	13
1.1.4 Ebene Systeme mit Doppelpendel	16
1.1.5 Räumliche Bewegung der Kranlast	19
1.1.6 Seil- und Strukturdynamik	23
1.2 Ziele und Struktur der Arbeit	24
2 Das PAMS-System	27
2.1 Systemüberblick	27
2.1.1 Mechanisches System und Bewegungen	27
2.2 Aufbau des PAMS-Systems	29
2.2.1 Kran	29
2.2.2 Gondel	31
2.3 Sensoren	32
2.3.1 Drehzahlen der Kranantriebe	32
2.3.2 Position von Brücke und Katze	33
2.3.3 Drehung der Gondelachsen	33
2.3.4 Position der Gondel relativ zum Kran	34
2.3.5 Orientierung der Gondel	34
2.3.6 Referenzmessung	35
2.4 Antriebe	36
2.4.1 Kranantriebe	36
2.4.2 Gondelantriebe	37
3 Mechanische Modellierung	39
3.1 Kranbewegung	39
3.1.1 Geometrische Beschreibung	39
3.1.2 Dynamische Beschreibung	40
3.2 Lastbewegung	41
3.2.1 Mathematisches Pendel im Raum	42
3.2.2 Ebene Bewegung bei Zwei-Seil-Aufhängung	43
3.2.3 Modell mit expliziter Berücksichtigung der Bewegung über Rollen	49

3.2.4	Gondeldrehung um die vertikale Achse	51
3.2.5	Gesamtmodell	59
4	Automatisierungskonzept	63
4.1	Trajektoriengenerierung	63
4.1.1	Bahnplanung und Trajektoriengenerierung	63
4.1.2	Trajektoriengenerierung für PAMS	65
4.1.2.1	Orientierung	71
4.1.2.2	Referenztrajektorien	74
4.2	Beobachter	75
4.2.1	Messgrößen	75
4.2.2	Erweitertes Kalman-Filter	77
4.3	Modellbasierte Regelung	80
4.3.1	Drehung um die vertikale Achse	80
4.3.1.1	Flachheitsbasierte Herangehensweise	81
4.3.1.2	Zustandsregler mit Vorfilter	85
4.3.1.3	Kombination der beiden Konzepte	89
4.3.2	Kranbewegung	96
4.3.3	Ausrichtung des Elevationsarms	103
5	Ergebnisse	105
5.1	Implementierung und Hardware	105
5.2	Messungen	107
5.2.1	Einzelne Bewegungen	107
5.2.2	Gesamtsystem	111
6	Zusammenfassung	119
A	Koordinatensysteme und Drehungen	123
A.1	Drehungen	123
A.2	Winkelgeschwindigkeiten	125
A.2.1	Drehungen allgemein	126
B	Trilateration einer Position aus drei Seilzugmessungen	129
B.1	Geometrie der Seilzugmessung	129
C	Modellierung mechanischer Systeme	133
C.1	Lagrange'sche Gleichungen zweiter Art	133
C.2	Newton-Euler-Gleichungen	134
C.3	Newton-Euler-Gleichungen mit Haftreibung/Bremsen	137

D Herleitung der Kranmodelle	141
D.1 Krane mit Punktmasse	141
D.1.1 Kran in der Ebene	141
D.1.1.1 Kranbewegung ohne Rückwirkung	141
D.1.1.2 Kranbewegung mit Rückwirkung	142
D.1.2 Kran im Raum	143
D.2 Ebene Modelle mit ausgedehnter Last	144
D.2.1 Exakte Bestimmung der Länge des Seils	144
D.2.2 Modellierung des Systems	146
D.2.3 Erweitertes Modell mit Reibung in den Rollen	147
E Flachheit für nichtlineare Systeme	151
Symbole und Formelzeichen	155
Abbildungsverzeichnis	161
Tabellenverzeichnis	165
Literaturverzeichnis	167