

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Stand der Technik . . . . .	3
1.1.1	Ebene Systeme mit Punktmasse . . . . .	4
1.1.2	Brückenkrane 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
<b>2</b>	<b>Das PAMS-System</b>	<b>27</b>
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
<b>3</b>	<b>Mechanische Modellierung</b>	<b>39</b>
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
<b>4</b>	<b>Automatisierungskonzept</b>	<b>63</b>
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
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>105</b>
5.1	Implementierung und Hardware . . . . .	105
5.2	Messungen . . . . .	107
5.2.1	Einzelne Bewegungen . . . . .	107
5.2.2	Gesamtsystem . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>119</b>
<b>A</b>	<b>Koordinatensysteme und Drehungen</b>	<b>123</b>
A.1	Drehungen . . . . .	123
A.2	Winkelgeschwindigkeiten . . . . .	125
A.2.1	Drehungen allgemein . . . . .	126
<b>B</b>	<b>Trilateration einer Position aus drei Seilzugmessungen</b>	<b>129</b>
B.1	Geometrie der Seilzugmessung . . . . .	129
<b>C</b>	<b>Modellierung mechanischer Systeme</b>	<b>133</b>
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**