

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Symbolverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Beschreibung der Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung	2
1.4 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	7
2.1 Ableitung von Anforderungen an ein industrietaugliches System	7
2.1.1 Spezifikation der Anforderungen	7
2.1.2 Beschreibung der Anforderungen	10
2.2 Erkennung von mobilen Robotern über Kameras	12
2.2.1 Kamera an Decke	12
2.2.2 Omnidirektionale Kamera an mobilem Roboter	16
2.2.3 Kamera an mobilem Roboter	19
2.2.4 Kamera an Flugdrohne	23
2.3 Erkennung von mobilen Robotern über Motion Capture Systeme	26
2.4 Erkennung von mobilen Robotern über Laserscanner	29
2.5 Darlegung der wissenschaftlichen Lücke	32
3 Systementwurf	35
3.1 Lokalisierung und Steuerung der FTF	35
3.1.1 Gesamtkonzept zur Lokalisierung und Steuerung	35
3.1.2 Lokalisierung der FTF	36
3.1.3 Steuerung der FTF	38
3.2 Erkennung von Stäben durch einen Laserscanner	40
3.2.1 Technische Details eines Laserscanners	40
3.2.2 Auslegung der Breite der Stäbe (Stabdurchmesser)	44
3.2.3 Auslegung der Höhe der Stäbe (Stablänge)	48

3.3	Sicherheitskritische Absicherung der FTF	51
3.3.1	Einsatz von FTF in Bereichen mit Personen	52
3.3.2	Einsatz von FTF in Bereichen ohne Personen	54
3.3.3	Höhe der Erkennungsebene	56
3.4	Methoden zur Reichweitenerhöhung	57
3.4.1	Sensornetzwerk aus stationären Laserscannern	57
3.4.2	Anbringung von Laserscannern an mobilen Robotern	61
3.5	Absicherung des Systems gegen nicht auffindbare, vertauschte oder verdreh- te FTF	63
3.5.1	Nicht auffindbar - Großräumiges Orten der FTF (ohne Sichtkontakt zwischen Laserscanner und FTF)	63
3.5.2	Eindeutiges Erkennen der ID eines FTF und eindeutiges Erkennen der Ausrichtung der FTF (mit Sichtkontakt zwischen Laserscanner und FTF)	63
3.6	Wartung und Instandhaltung	69
4	Layoutentscheidung und Konfiguration des Gesamtsystems	71
4.1	Layout der Stäbe und Anordnung der FTF	71
4.1.1	Beschreibung der verwendeten Simulationsumgebung	71
4.1.2	Layout der Stäbe auf einem FTF zur optimalen Erkennung	72
4.1.3	Optimierung des Systems zur Verwendung mehrerer Laserscanner	88
4.2	Dynamische Betrachtung des Systems	93
4.2.1	Beschreibung der verwendeten Simulationsumgebung	93
4.2.2	Auswertung	95
5	Prototypische Implementierung	97
5.1	Hardwarekomponenten des Systems	97
5.1.1	Komponenten zur externen Lokalisierung und Steuerung	97
5.1.2	Aufbau der Fahrerlosen Transportfahrzeuge	99
5.1.3	Aufbau des Systems und Netzwerkstruktur	102
5.2	Softwarekomponenten des Systems	103
5.2.1	Programmaufbau	103
5.2.2	Beschreibung der GUI	105
5.3	Vorverarbeitung	106
5.3.1	Medianfilter	106
5.3.2	Koordinatentransformation	107

5.4	Segmentierung	108
5.4.1	Distanz-Segmentierung	108
5.4.2	Mixed-Pixels-Kompensator	110
5.5	Datenfusion	111
5.5.1	Transformation in globales Koordinatensystem	111
5.5.2	Fusionsmethode	112
5.6	Objekterkennung	114
5.6.1	Erkennung von Linien	114
5.6.2	Erkennung von Kandidaten	115
5.7	Tracking	120
5.7.1	Kalman-Vorhersage	120
5.7.2	Maximum Likelihood	121
5.7.3	Kalman-Korrektur und -Schätzung	122
5.8	Sicherheitsüberprüfung	124
5.8.1	Überprüfung von Sicherheitskriterien	124
5.8.2	Überprüfung des Zählers	126
5.9	Steuerung	127
6	Evaluierung	131
6.1	Erkennung von Stäben	131
6.1.1	Bestimmung des Nutzens von Reflektorstäben	131
6.1.2	Maximale Reichweite, der Stäberkennung	133
6.2	Überprüfung der Simulationsergebnisse	137
6.2.1	Anpassung der Simulation an die Realität	137
6.2.2	Validierung der Simulationsergebnisse bei statischer Betrachtung . .	140
6.2.3	Validierung der Simulationsergebnisse bei dynamischer Betrachtung	143
6.3	Absolutgenauigkeit	144
6.4	Sicherheit	146
6.4.1	Erkennung von Objekten unterschiedlicher Oberfläche und Größe . .	146
6.4.2	Kollisionstest mit einem Laserscanner	147
6.4.3	Kollisionstest mit zwei Laserscannern	149
6.4.4	Zusammenfassung zum Kapitel Sicherheit	151
6.5	Analyse der Wirtschaftlichkeit des Systems	152
6.5.1	Investitionskosten	152
6.5.2	Laufende Kosten	155

6.6	Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse	156
6.6.1	Einsatzmöglichkeiten des Systems	156
6.6.2	Bewertung gegen den Stand der Technik	158
7	Zusammenfassung und Ausblick	161
7.1	Zusammenfassung	161
7.2	Ausblick	162
	Literatur	165
	Anhang	181
A	Bewertungskriterien für den Stand der Technik	181
B	Simulationsergebnisse	187
C	Messungen	192