

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Struktur und Vorgehen in der Arbeit	4
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>6</b>
2.1 Mensch-Roboter-Kollaboration	6
2.1.1 Grundbegriffe, Definitionen und Eingrenzungen	7
2.1.2 Klassifizierungen und Betriebsarten der MRK	9
2.2 Bewegungsplanung und -steuerung zur Kollisionsvermeidung	10
2.2.1 Varianten der Pfadplanung	11
2.2.2 Klassische Potenzialfeldmethode (PFM)	14
2.2.3 Varianten der Potenzialfeldmethode	16
2.3 Kollisionsvermeidung mit Greifern in der MRK	16
2.3.1 Gliederung nach Sensorprinzipien	17
2.3.2 Kapazitive Sensorsysteme	18
2.3.3 RADAR-Systeme	21
2.3.4 LiDAR-Systeme	23
2.3.5 Ultraschall-Systeme (SODAR)	26
2.3.6 Sonstige Verfahren zur Umgebungserfassung	28
2.4 Zusammenfassung und Forschungsdefizit	29
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>32</b>
3.1 Zielsetzung	32
3.1.1 Risikofall A: Zusammenstoß	33
3.1.2 Risikofall B: Quetschung	34
3.1.3 Resultierende Fragestellungen	36
3.2 Vorgehensweise nach V-Modell	36
3.2.1 Vorgehensweise - Wahrnehmen der Umgebung	37

3.2.2	Vorgehensweise - Gefahrenabschätzung	38
3.2.3	Vorgehensweise - Kollisionsvermeidung	38
3.3	Systemspezifikation	39
3.3.1	Systemgrenze und allgemeiner Systemaufbau	39
3.3.2	Funktionale Systemaufteilung	41
<b>4</b>	<b>Erfassen der Umgebung</b>	<b>43</b>
4.1	Problemeingrenzung	43
4.2	Auswahl eines geeigneten Sensorprinzips	45
4.2.1	Kapazitive Umgebungserfassung	46
4.2.2	RADAR-basierte Umgebungserfassung	47
4.2.3	LiDAR: Laserscanner	49
4.2.4	LiDAR: IR Time-of-Flight-Sensoren	50
4.2.5	Bewertung und Auswahl Sensorprinzip	52
4.3	Charakterisierung des Sensorprinzips	53
4.3.1	Sensorspezifische Einflussanalyse nach Ishikawa	53
4.3.2	Validierung des Sensorprinzips	56
4.4	Eigener Ansatz zur Umgebungserfassung	63
4.4.1	Mitbewegter Sicherheitsraum	63
4.4.2	Sensoranordnung im Greifer	64
4.4.3	Konstruktiver Aufbau des funktionalen Prototypen	67
4.4.4	Systemarchitektur des funktionalen Prototypen	68
4.5	Zusammenfassung	69
<b>5</b>	<b>Methode zur Gefahrenbeurteilung</b>	<b>71</b>
5.1	Problemeingrenzung	71
5.2	Eigener Ansatz zur Veränderungserkennung	75
5.3	Modell und Berechnung der Referenzkarte	77
5.3.1	Modellierung des Arbeitsraums	77
5.3.2	Datenerfassung für die Referenzkarte	78
5.3.3	Berechnungsmethode für die Referenzkarte	79

---

5.3.4	ToF-Sensormodell	81
5.3.5	Aggregation zur Karte	87
5.4	Gefahrenabschätzung	88
5.4.1	Probabilistische Modellierung der Veränderung	88
5.4.2	Aggregation der Karteninformationen	89
5.4.3	Vergleich der Belegungswahrscheinlichkeiten	91
5.5	Umsetzungsvarianten des Verfahrens	91
5.5.1	Online-Berechnungsverfahren	92
5.5.2	Schwellwert-Karte	94
5.6	Zusammenfassung	96
<b>6</b>	<b>Kollisionsvermeidung für intelligente Greifer</b>	<b>98</b>
6.1	Problemeingrenzung	98
6.1.1	Annahmen und Randbedingungen	98
6.1.2	Anforderungen aus den Risikofällen	99
6.2	Eigener Ansatz zur Kollisionsvermeidung	100
6.3	Abstandsüberwachung	102
6.3.1	Modellierung des Menschen	103
6.3.2	Bremsweg des Roboters	104
6.3.3	Kritischer Mindestsicherheitsabstand	105
6.4	Geschwindigkeitsregelung	108
6.4.1	Geschwindigkeit-Abstands-Profile	109
6.5	Online Hindernisumfahrung	112
6.5.1	Vorgehen der Hindernisumfahrung	112
6.5.2	Adaption der klassischen Potenzialfeldmethode	114
6.5.3	Adaptierte generalisierte Potenzialfeldmethode	118
6.5.4	Zielerreichung nach Hindernisumfahrung	119
6.6	Systemarchitektur	120
6.7	Zusammenfassung	122

<b>7</b>	<b>Validierung des Gesamtsystems</b>	<b>124</b>
7.1	Software-in-the-Loop-Validierung	125
7.1.1	Simulationsumgebung	125
7.1.2	Simulationsmodell	125
7.2	Validierung Modul Gefahrenabschätzung	127
7.2.1	Gefahrenabschätzung – Szenario 1	127
7.2.2	Gefahrenabschätzung – Szenario 2	132
7.3	Validierung Modul Kollisionsvermeidung	134
7.3.1	Hindernisumfahrung – Szenario 1	135
7.3.2	Hindernisumfahrung – Szenario 2	137
7.4	Validierung Gesamtsystem	139
7.4.1	Risikofall A: Stoßen	139
7.4.2	Risikofall B: Quetschung	150
7.5	Bewertung der Ergebnisse	153
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Ausblick	158
<b>9</b>	<b>Liste eigener Publikationen</b>	<b>160</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIV</b>