

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnisix

Bildverzeichnisxiii

Tabellenverzeichnisxix

1 Einleitung 1

 1.1 Motivation und Hintergrund1

 1.2 Zielsetzung 4

 1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit 6

**2 Technologische Grundlagen zur Realisierung autonomer
 Flugrobotersysteme9**

 2.1 Aufbau, Funktionsweise und industrielle Bedeutung von
 unbemannten Luftfahrzeugen 9

 2.1.1 Begriffsdefinition und Kategorisierung von unbemannten
 Luftfahrzeugen10

 2.1.2 Funktionsweise und Aufbau von Multikoptern12

 2.1.3 Funktionsweise und struktureller Aufbau von unbemannten
 Luftfahrzeugsystemen14

 2.1.4 Industrielle Anwendungsbereiche von unbemannten
 Luftfahrzeugen und Flugrobotersystemen16

 2.2 Navigation von Flugrobotersystemen in Innenbereichen17

 2.2.1 Technologien und Methoden zur Lokalisierung von mobilen
 Systemen17

 2.2.2 Technologien und Methoden zur zwei- und
 dreidimensionalen Umgebungsrepräsentation 24

 2.2.3 Etablierte dreidimensionale Pfadplanungsverfahren28

 2.3 Zusammenfassung und Bewertung 32

**3 Ausgangssituation und Anforderungen an den industriellen
 Innenraumeinsatz von Flugrobotersystemen 35**

 3.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen für den industriellen
 Innenraumeinsatz von AFRS 35

 3.2 Identifizierung bestehender industrieller Bedarfe im Hinblick auf
 den Flugrobotereinsatz 38

3.3	Aktuelle Entwicklungen und Forschungsansätze zur Realisierung autonomer Flugrobotersysteme	39
3.3.1	Kommerziell verfügbare Systeme	40
3.3.2	Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.....	41
3.3.3	Zusammenfassung und Bewertung.....	43
3.4	Ableitung zentraler Forschungsbedarfe zur Realisierung sicherer, autonomer Flugrobotersysteme	45
4	Gesamtsystemarchitektur eines sicheren autonomen Flugrobotersystems für das Produktions- und Logistikumfeld.....	49
4.1	Aufbau und Bestandteile der Gesamtsystemarchitektur	50
4.1.1	Spezifikation der Systemgrenzen und des berücksichtigten Funktionsumfangs	50
4.1.2	Beschreibung des Aufbaus und der logischen Systemgliederung	51
4.1.3	Modellierung und Funktionsweise der Abstraktionsschicht und des AFR-Agenten	54
4.1.4	Flottenmanagement, Auftragsmanagement und Infrastrukturmanagement	57
4.2	Schnittstellenbeschreibung und anforderungsspezifische Kommunikation innerhalb des AFRS	62
4.2.1	Grundstruktur der Kommunikationsarchitektur	62
4.2.2	Übertragung der zentralen Positionsinformationen.....	63
4.2.3	Technische Ausführung und Protokoll der Kommunikation zwischen AFR und GCS.....	64
4.2.4	Technische Ausführung und Protokoll der Kommunikation zwischen den AFR	66
4.3	Kombinierte Lokalisierung mittels globaler Positionsbestimmung und On-Board-Sensorik	67
4.3.1	Methode zur globalen Lokalisierung der AFR.....	68
4.3.2	Optimierung der globalen Position mittels On-Board-Sensorik	70
4.4	Zusammenfassung und Bewertung.....	76

5	Methode zum Luftraummanagement und zur ebenenbasierten Routenplanung in Werks- und Logistikhallen.....	79
5.1	Architektur und Funktionsweise des Luftraummanagements und der Routenplanung	80
5.1.1	Anforderungsdefinition.....	80
5.1.2	Methode und Lösungsansatz.....	81
5.1.3	Struktureller Aufbau und Integration in das Gesamtframework.....	83
5.2	Hybrides Weltmodell als Grundlage der Routenplanung.....	84
5.2.1	Modellierung des dreidimensionalen, statischen Arbeitsraums	85
5.2.2	Modellierung des Arbeits- und Konfigurationsraums in Form diskreter Flugebenen	87
5.2.3	Modellierung von Sperrzonen und Landekorridoren	91
5.3	Methode zur Ableitung der Planungsgraphen und der darauf basierenden Routenplanung	92
5.3.1	Modellierung der Planungsgraphen und Bestimmung der Knoten- und Kantengewichte.....	93
5.3.2	Berechnung der Flugrouten mittels heuristischer Suchalgorithmen.....	97
5.3.3	Flugpfadüberwachung und Rückführung von geplanten Pfaden in das Modell	99
5.4	Zusammenfassung und Bewertung	101
6	Methode zur Eliminierung der von autonomen Flugrobotern ausgehenden Gefährdungen	105
6.1	Grundlagen und Aufbau des Sicherheitsframeworks	107
6.1.1	Regulative Vorgaben und Richtlinien zum Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen.....	107
6.1.2	Lösungsansatz und Integration des Sicherheitsframeworks in die Gesamtsystemarchitektur	109
6.2	Detektion von Verschleiß, Strukturschäden und unzulässiger Systembelastung.....	110
6.2.1	Lösungsansatz und Systemarchitektur	111
6.2.2	Systemanalyse mittels Kurzzeit-Fourier-Transformation	113

6.2.3	Vorgehen zur Detektion von Systemfehlern während des Startprozesses	114
6.3	Bewertung der Funktionsfähigkeit von Flugsteuerungen	116
6.3.1	Aufbau und Einbindung in die Systemarchitektur	116
6.3.2	Beschreibung der Diagnosemodule und der Methodik zur Bewertung der Funktionsfähigkeit einer FCU	118
6.3.3	Vorgehen zur Bestimmung der erforderlichen Grenzen	122
6.3.4	Analyse der Motorstellsignale	123
6.4	Erkennung von Personen und gestengesteuerte Anpassung des Flugverhaltens	124
6.4.1	Architektur zur Reaktion auf Personen	125
6.4.2	Methode zur robusten Gestenerkennung	127
6.5	Zusammenfassung und Bewertung	129
7	Exemplarische Implementierung der Gesamtsystemarchitektur und Evaluation der entwickelten Methoden	131
7.1	Beschreibung der prototypischen Umsetzung der erforschten Methoden und des Gesamtsystems	131
7.1.1	Entworfen und umgesetzte AFR	132
7.1.2	Implementierung und Realisierung der Gesamtsystemarchitektur	133
7.1.3	Gewählte Anwendungsszenarien zur Evaluation	139
7.1.4	Vergleich von Simulation und Realität	140
7.2	Bewertung der vorgestellten Methoden im Kontext der umgesetzten Beispielanwendungen	141
7.2.1	Evaluierung der Robustheit und Funktionserfüllung der Gesamtarchitektur	142
7.2.2	Analyse und Bewertung der Fehlerdetektion und der Gestenerkennung	149
7.3	Zusammenfassung und Bewertung	157
8	Zusammenfassung und Ausblick	159
9	Summary and outlook	165
	Literaturverzeichnis	169