

# I Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
<b>II</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>	<b>v</b>
<b>III</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>xv</b>
<b>IV</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation.....</b>	<b>1</b>
1.1	Herausforderungen für eine automatisierte Kollisionsvermeidung .....	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2</b>	<b>Anwendungshintergrund: Detect-and-Avoid für unbemannte Luftfahrtsysteme.....</b>	<b>7</b>
2.1	Ausgangslage: Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen innerhalb der Luftraumstruktur Deutschlands.....	7
2.2	Rahmenbedingungen für die Kollisionsvermeidung .....	11
2.3	Anforderungsprofil an das Kollisionsvermeidungssystem .....	15
<b>3</b>	<b>Kippflügel-Referenzkonfiguration.....</b>	<b>17</b>
3.1	Grundlegende Merkmale einer Kippflügel-Konfiguration .....	17
3.2	Technische Daten des Kippflügel-Referenzkonfiguration .....	19
3.3	Flugmechanische Eigenschaften der Kippflügel-Konfiguration .....	22
3.3.1	Horizontalflug: Starrflüglerverhalten .....	23
3.3.2	Vertikalflug: Drehflüglerverhalten.....	24
3.3.3	Transitionsflug: Hybridverhalten .....	24
3.4	Bestehendes Flugführungssystem des Erprobungsträgers .....	25
3.4.1	B-Splines basierter Navigationsregler mit integrierter Bahnregelung .....	26
3.4.2	Flugzustandsregelung .....	30
<b>4</b>	<b>Auswahl einer Sensorik zur Detektion anderer Luftraumteilnehmer.....</b>	<b>33</b>
4.1	Bewertung existierender nicht-kooperativer Sensortechnologien.....	33
4.1.1	Maschinelles Sehen zur Umweltwahrnehmung .....	33
4.1.2	Akustische Umweltwahrnehmung.....	34
4.1.3	Radarbasierte Umweltwahrnehmung .....	35
4.2	Grundlegendes Funktionsprinzip der ausgewählten Radartechnologie .....	37
4.3	Eigenschaften des verwendeten Dauerstrich-Radarsystems .....	41
4.4	Evaluierung des verwendeten Dauerstrich-Radarsystems.....	51

<b>5</b>	<b>Auslegung einer radarbasierten Umgebungsüberwachung .....</b>	<b>57</b>
5.1	Stochastische Fundamentalgrößen .....	57
5.2	Mathematische Beschreibung der Normalverteilung .....	59
5.3	Prozessbeschreibung der Objektdetektion .....	60
5.4	Rauschcharakterisierung des genutzten Dauerstrich-Radarsystems .....	62
5.5	Konzeption und Umsetzung einer adaptiven Schwellenwertvorgabe .....	64
5.6	Implementierung eines Trackingverfahrens zur Positions- und Geschwindigkeitsschätzung detektierter Luftraumteilnehmer .....	71
5.6.1	Mathematische Beschreibung des Kalman-Filters .....	72
5.6.2	Struktur des Kalman-Filters zur Objektverfolgung .....	76
5.6.3	Kontrollinstanz zur Objektverfolgung .....	82
5.7	Aufbau der mitführbaren radarbasierten Luftraumüberwachung an Bord des Erprobungsträgers .....	84
<b>6</b>	<b>Entwicklung eines automatisierten Kollisionsvermeidungssystems .....</b>	<b>89</b>
6.1	Auswahl eines geeigneten Bahnvorgabeansatzes zur Kollisionsvermeidung .....	89
6.2	Entwicklung des PN-Regelgesetzes der Bahnvorgabe zur dreidimensionalen Kollisionsvermeidung .....	92
6.2.1	Definition einer Sicherheitssphäre .....	92
6.2.2	Kinematische Analyse des Kollisionsszenarios .....	93
6.2.3	Definition der notwendigen Randbedingungen zur Kollisionsvermeidung .....	96
6.3	Modellierungsansatz des Sicherheitssphärenradius .....	97
6.4	Erweiterung der Flugführungssystemstruktur um die automatisierte Kollisionsvermeidungsfunktionalität .....	100
6.5	Bestimmung der notwendigen Eintrittsbedingungen zur Aktivierung der Bahnvorgabe .....	101
6.5.1	Einführung eines Zeitwertes zur Evaluierung und Priorisierung der potentiellen Kollisionspartner .....	101
6.5.2	Berücksichtigung der Annäherungskinematik zwischen SAR-UAS und priorisierten Kollisionspartner .....	102
6.6	Struktur der horizontalen Bahnvorgabe zur Kollisionsvermeidung .....	103
6.6.1	Änderungsrate des horizontalen Kollisionsvermeidungswinkels .....	105
6.6.2	Bestimmung der Relativgeschwindigkeit und des Kollisionswinkels in der horizontalen Ausweichebene .....	106

6.6.3	Konzeption einer adaptiven Navigationsfunktion.....	106
6.6.4	Implementierung einer Distanzkorrektur.....	107
6.6.5	Modellierung einer Reaktionsentfernung zur Kollisionsvermeidung.....	108
6.6.6	Struktur des zur Handhabung unterschiedlicher Kollisionsszenarien notwendigen Zustandsautomaten.....	112
6.7	Struktur der vertikalen Bahnvorgabe zur Kollisionsvermeidung.....	115
6.7.1	Einfluss der Änderungsrate des vertikalen Kollisionsvermeidungswinkels...	116
6.7.2	Bestimmung der vertikalen Navigationskonstanten.....	117
6.7.3	Architektur des Zustandsautomaten zur vertikalen Bahnvorgabe.....	118
6.8	Struktur der Geschwindigkeitsvorgabe zur Kollisionsvermeidung.....	120
6.9	Definition der notwendigen Deaktivierungskriterien für die automatische Kollisionsvermeidung.....	125
6.9.1	Terminierungskriterium für frontal eingeleitete Kollisionsszenarien.....	125
6.9.2	Bestimmung eines Terminierungskriteriums im Schwebemodus.....	126
6.9.3	Terminierungskriterien für heckseitig eingeleitete Kollisionsszenarien.....	127
<b>7</b>	<b>Validierung des erweiterten Flugführungssystems in der Simulation.....</b>	<b>129</b>
7.1	Architektur der Simulationsumgebung.....	129
7.1.1	Regelstrecke des Erprobungsträgers.....	130
7.1.2	Umweltmodell.....	130
7.1.3	Bordsensorik.....	130
7.1.4	Modellierung der radarbasierten Umgebungsüberwachung.....	131
7.2	Exemplarisch simulierte Kollisionsszenarien.....	132
7.2.1	Frontales Kollisionsszenario im Horizontalflug des Erprobungsträgers.....	133
7.2.2	Kritischer Auslegungsfall des frontalen Kollisionsszenarios im Horizontalflug des Erprobungsträgers.....	144
7.2.3	Heckseitig eingeleitetes Kollisionsszenario im Flugzustand der Transition des Erprobungsträgers.....	152
7.2.4	Frontales Kollisionsszenario im Vertikalflug des Erprobungsträgers.....	161
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	166
<b>8</b>	<b>Validierung des Systementwurfs in exemplarischen Flugversuchen.....</b>	<b>167</b>
8.1	Versuchsaufbau der Flugversuche.....	167
8.2	Validierung der radarbasierten Umgebungsüberwachung.....	168

8.3 Validierung des Kollisionsvermeidungssystems anhand eines simulierten Kollisionspartners .....	176
<b>9 Zusammenfassung.....</b>	<b>185</b>
<b>10 Ausblick.....</b>	<b>189</b>
<b>V Literaturverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
<b>VI Anhang .....</b>	<b>xii</b>