

FAU Studien aus dem Maschinenbau 428

Markus Lieret

Sicheres autonomes
Flugrobotersystem für den Einsatz
im Produktions- und Logistikumfeld

Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im
Produktions- und Logistikumfeld

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 428

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Lieret, Markus. 2023. *Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 428. Erlangen: FAU University Press.

DOI: 10.25593/978-3-96147-669-5.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-668-8 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-669-5 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-669-5

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den
Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Markus Lieret, M.Sc.

aus Fürth

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 23.01.2023

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis,
Leibniz Universität Hannover

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für das in mich gesetzte Vertrauen und die Möglichkeit zur Promotion. Die fortlaufende Unterstützung meiner Forschungstätigkeiten sowie die zahlreichen wertvollen Diskussionen haben meine wissenschaftliche Arbeit sehr bereichert und zu meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen. Weiterhin möchte ich mich für die gewährten Freiheiten bedanken, die es mir im innovativen Umfeld des Lehrstuhls ermöglicht haben, spannende Themenfelder im Bereich autonomer Flugroboter zu erforschen. Des Weiteren geht mein Dank an Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsverfahrens, an Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis für die Übernahme des Korreferats sowie an Prof. Dr.-Ing. Jörn Thielecke als weiteres Mitglied des Prüfungsausschusses.

Ein großer Dank gilt zudem allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl FAPS für den regen fachlichen Austausch und die kollegiale Arbeitsatmosphäre sowie insbesondere der Technik und Verwaltung. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen der Forschungsbereiche Biomechatronik und Robotik für die sehr gute und kollegiale Zusammenarbeit sowie die wertvollen fachlichen Diskussionen und die fortwährende gegenseitige Unterstützung. Weiterhin bedanken möchte ich mich bei allen motivierten und engagierten Studierenden, die mich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl unterstützt haben und zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir meinen Bildungsweg ermöglicht und mich stets unterstützt haben sowie meiner Partnerin Meike für ihren fortwährenden Rückhalt und ihre Unterstützung während der Anfertigung dieser Dissertation.

Erlangen im Januar 2023

Markus Lieret

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	6
2 Technologische Grundlagen zur Realisierung autonomer Flugrobotersysteme	9
2.1 Aufbau, Funktionsweise und industrielle Bedeutung von unbemannten Luftfahrzeugen	9
2.1.1 Begriffsdefinition und Kategorisierung von unbemannten Luftfahrzeugen	10
2.1.2 Funktionsweise und Aufbau von Multikoptern	12
2.1.3 Funktionsweise und struktureller Aufbau von unbemannten Luftfahrzeugsystemen	14
2.1.4 Industrielle Anwendungsbereiche von unbemannten Luftfahrzeugen und Flugrobotersystemen	16
2.2 Navigation von Flugrobotersystemen in Innenbereichen	17
2.2.1 Technologien und Methoden zur Lokalisierung von mobilen Systemen	17
2.2.2 Technologien und Methoden zur zwei- und dreidimensionalen Umgebungsrepräsentation	24
2.2.3 Etablierte dreidimensionale Pfadplanungsverfahren	28
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

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ε	-	Ebene
γ	-	Konfidenzintervall
θ	rad	Nickwinkel
μ	-	Erwartungswert
$\xi(v)$	-	Kostenwert eines Knoten v
$\xi(e)$	-	Kostenwert einer Kante e
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte
σ	-	Varianz
τ	N m	Drehmoment
ϕ	rad	Rollwinkel
ψ	rad	Gierwinkel
ω	rad s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit
$\bar{\omega}$	rad s^{-1}	Mittlere Winkelgeschwindigkeit

Römische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche
a_R	m	Zellgröße einer Rasterkarte
a_{RMS}	ms^{-2}	Effektivwert der Beschleunigung
b	-	Betriebsfähigkeit
C_Q	-	Widerstandskoeffizient
C_T	-	Schubkoeffizient
c	-	Drohnenklasse mit oberem Durchmesser d
d	m	Durchmesser
e	-	Einzelne Kante eines Graphen \mathcal{G}
F_S	N	Schubkraft
f	Hz	Frequenz

Römische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
\bar{f}	Hz	Mittlere Frequenz
f_s	Hz	Abtastfrequenz
g	-	Gültigkeit einer Signalpaarung
K_A, K_B	-	Koordinatensystem A, Koordinatensystem B etc.
l	m	Länge, Distanz, Abstand
L	-	Anzahl überlappender Messwerte
M	-	Fensterbreite
m	-	Metrik
N	-	Anzahl
N_ε	-	Anzahl an Flugebenen
S_{ESC}	-	Stellsignal zur Vorgabe einer Solldrehzahl
r	m	Radius
r_S	m	Radius des strukturierenden Elements zur Berechnung des Sicherheitsabstands
r_L	m	Radius des strukturierenden Elements zur Bestimmung der unzugänglichen Zellen
t	s	Zeitpunkt
u	-	Differenz zweier Metriken m_i und m_j
v	-	Einzelner Knoten eines Graphen \mathcal{G}
\mathbf{a}	ms^{-2}	Beschleunigungsvektor in kartesischen Koordinaten
\mathbf{p}	m	Positionsvektor in kartesischen Koordinaten. Entsprechend gibt ${}^A\mathbf{p}_B$ die Position von K_B in Bezug zu K_A an
\mathbf{p}^x	m	x- Komponente von \mathbf{p}
\mathbf{r}	m	Bezeichnet einen allgemeinen (freien) Vektor. Entsprechend gib ${}^A\mathbf{r}_{PQ}$ den Vektor von einem Punkt P zu einem Punkt Q in K_A an

Römische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$s_{ESC,i}$	-	Stellsignalvektor einer Flugsteuerung i zur Vorgabe der Solldrehzahlen für alle verbundenen Motoren
v	ms^{-1}	Geschwindigkeitsvektor in kartesischen Koordinaten
u	-	Steuervektor eines Systems
x	-	Zustandsvektor eines Systems
\hat{x}	-	geschätzter Zustandsvektor eines Systems
z		Messvektor
A	-	Dynamikmatrix
B	-	Steuermatrix
H	-	Beobachtungsmatrix
I	-	Einheitsmatrix
P	-	Allgemeine Kovarianzmatrix
Q	-	Kovarianzmatrix des Prozessrauschens
R	-	Kovarianzmatrix des Messrauschens
T	-	Transformation
\mathcal{C}	-	Menge der Drohnenklassen
\mathcal{E}	-	Menge an Kanten eines Graphen \mathcal{G}
\mathcal{G}	-	Graph
\mathcal{V}	-	Menge an Knoten eines Graphen \mathcal{G}

Abkürzung

Bezeichnung

AFR	Autonomer Flugroboter
AFRS	Autonomes Flugrobotersystem
AMR	Autonomer Mobiler Roboter
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
CAD	Computer Aided Design

<i>Abkürzung</i>	<i>Bezeichnung</i>
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
ECA	European Cockpit Association
EKF	Erweiterter Kalman-Filter
ERP	Enterprise-Resource-Planning
EU	Europäische Union
FCU	Flight Control Unit
GCS	Ground Control Station
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
HITL	Hardware-in-the-Loop
ID	Identifikator
IMU	Inertial Measurement Unit
IP	Internetprotokoll
KLT	Kleinladungsträger
MES	Manufacturing Execution Systems
OBC	On-Board-Computer
POI	Point-of-Interest
PRM	Probabilistic Roadmap
ROS	Robot Operating System
RRT	Rapidly-exploring Random Tree
SITL	Software-in-the-Loop
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
STFT	Short-term Fourier Transformation
TDoA	Time-Difference-of-Arrival
TMR	Triple Modular Redundant
TWR	Two-Way-Ranging
UA	Unmanned Aircraft
UAS	Unmanned Aircraft System
UWB	Ultrabreitband
WLAN	Wireless Local Area Network

Bildverzeichnis

Bild 1: Aufbau der Arbeit und übergeordnete Einteilung der Hauptkapitel	7
Bild 2: Darstellung eines Quadropters (links), eines Hexakopters (Mitte) sowie eines Octokopters (rechts) als Beispiele für gängige Bauformen von Multikoptern.....	10
Bild 3: Darstellung der an einem Multikopter wirkenden Kräfte und Momente am Beispiel eines Quadropters	13
Bild 4: Aufbau eines unbemannten Luftfahrzeugsystems und Darstellung der für den Flug eines Multikopters erforderlichen Module und möglicher Erweiterungen	14
Bild 5: Schematische Darstellung der Laufzeitermittlung beim TDOA-Verfahren (links) und dem TWR-Protokoll (rechts)	18
Bild 6: Grundprinzip Poseschätzung mittels visueller Odometrie am Beispiel einer Stereokamera (in Anlehnung an [51])	20
Bild 7: Schematische Darstellung der gleichzeitigen Kartierung einer unbekanntem Umgebung und Lokalisierung innerhalb dieser Karte (in Anlehnung an [58])	22
Bild 8: Darstellung einer aus syntaktischen Merkmalen (Linien) bestehenden metrisch kontinuierlichen Karte (links) sowie der abgeleiteten metrisch diskreten Karte (rechts).....	25
Bild 9: Strukturelle Darstellung eines Octrees zur Repräsentation von Raumsegmenten (links) sowie metrische diskrete dreidimensionale Karte (rechts)	26
Bild 10: Topologische Abbildung der Beziehung und Erreichbarkeit mehrerer Räume	27
Bild 11: Aufbau einer Hybridkarte durch Verknüpfung von einer topologischen Karte, einer metrischen Karte sowie mit semantischen Merkmalen	27
Bild 12: Klassifizierung der zur dreidimensionalen Pfadplanung etablierten Algorithmen (in Anlehnung an [75])	28
Bild 13: Vorgehen bei der Pfadplanung mit dem RRT-Algorithmus. Ausgehend von der bestehenden Baumstruktur (a) wird ein	

neuer Knoten an einer zufälligen Position eingefügt (b). Der Vorgang wird wiederholt, bis der eingefügte Knoten die gegebenen Kriterien erfüllt (c) und mit dem Baum verbunden werden kann (d). (Darstellung in Anlehnung an [75])	29
Bild 14: Darstellung einer metrisch diskreten Kostenkarte mit Start- und Zielposition (links) sowie des zugehörigen Graphen und des Vorgehens zur Pfadplanung.....	31
Bild 15: Vergleich der relevanten Arbeiten aus dem Stand der Forschung und Technik mit den definierten Anforderungen und ergänzenden Kriterien	44
Bild 16: Identifizierte und im Rahmen der Arbeit adressierte Handlungsbedarfe	46
Bild 17: Darstellung der einzelnen Hard- und Softwaremodule sowie des strukturellen Systemaufbaus des entworfenen AFRS.....	52
Bild 18: Vorgehen zur Realisierung eines autonomen Fluges und weiterer autonomer Prozesse im AFR-Agent. Hierfür stellt der AFR-Agent autonom durchführbare Aufgaben bereit, die wiederum aus definierten Fähigkeiten umgesetzt sind. Über die Abstraktionsebene mit integrierten Elementarfunktionen wird die Kommunikation mit der FCU sowie dem On-Board-Sensor- bzw. Aktorsystem realisiert.....	54
Bild 19: Darstellung der Funktionsweise der modellierten Aufträge sowie des Aufbaus und des Zusammenspiels von Auftrags- und Flottenmanagement	58
Bild 20: Aufbau des Infrastrukturmanagements und Modellierung der virtuellen Abbilder der verfügbaren Infrastruktursysteme.....	61
Bild 21: Strukturelle Darstellung des Kommunikationsnetzwerks des AFRS und der zwischen den einzelnen Funktionselementen vorgesehenen Nachrichtenkanäle.....	63
Bild 22: Skizze eines AFR mit angebrachten UWB-Sensoren und zugehörigen Koordinatensystemen (links) und genutzte geometrische Zusammenhänge zur Berechnung der Orientierung des AFR (rechts).....	68
Bild 23: Lokalisierungsframework zur Fusion von Pose- und Geschwindigkeitsdaten aus mehreren Quellen bzw. Sensorsystemen.....	71

Bild 24: Darstellung der zur objektbezogenen Lokalisierung des AFR definierten Koordinatensysteme und der zugehörigen Transformationen, in Anlehnung an [P5].....	72
Bild 25: Konzept der ebenenbasierten Routenplanung und des Luftraummanagements für den Einsatz von AFRS innerhalb von Werks- und Logistikhallen.	81
Bild 26: Darstellung des Aufbaus der Routenplanung und des Luftraummanagements sowie die Integration der beiden Komponenten in die Gesamtsystemarchitektur.....	83
Bild 27: Darstellung des Aufbaus des hybriden Weltmodells aus der ebenenbasierten Arbeitsraumrepräsentation, den Sonderzonen, topologischen Informationen, den Flugpfaden der AFR sowie den aktuellen Positionen der registrierten AFR ..	85
Bild 28: Ausgehend von CAD-Modellen der Einsatzumgebung (a) oder von aus Vermessungsprozessen gewonnenen Punktwolken (c) können die statischen Hindernisse im Arbeitsraum der AFR als Voxelkarte (b) modelliert werden.	87
Bild 29: Der als Octree dargestellte Arbeitsraum wird zunächst in übereinander gestapelte Raumsegmente unterteilt (links). Zur Generierung der statischen Hinderniskarten werden die in den Segmenten enthaltenen Voxel in die Grundebenen projiziert (rechts).....	88
Bild 30: Darstellung des Vorgehens zur Dilatation von Hindernissen in Rasterkarten (links) und des Ergebnisses der Dilatation bei Anwendung auf die in Bild 29 dargestellten Hinderniskarten	90
Bild 31: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Rasterkarten und Planungsgraph am Beispiel der 18 rot umrandeten Zellen. Innerhalb des Graphen können die einzelnen Knoten dabei über einen eindeutigen Index zugeordnet werden.	93
Bild 32: Integration der zulässigen Kanten und erlaubten Flugrichtungen in den Planungsgraph. Zusätzlich sind die Kostenwerte der Kanten sowie die Parameter und Eigenschaften der Knoten exemplarisch dargestellt. Je stärker die Intensität des Grautons bei der Visualisierung der Knoten ist, desto höher fallen die statischen Zellkosten der Knoten aus.....	96

Bild 33: Integration des geplanten Pfades in den Planungsgraphen (visualisiert am Beispiel des Weltmodells aus Bild 29) (links) und Darstellung der fortlaufenden Pfadfreigabe, wenn der AFR einen Streckenabschnitt passiert hat (rechts). Zur besseren Erkennbarkeit ist der Graph nicht über eine Gitterstruktur, sondern mittels Rasterkarten visualisiert.	100
Bild 34: Darstellung der im Sicherheitsframework vorgesehenen Erfassungs- und Diagnosemodule und deren Einbindung in die Gesamtarchitektur	109
Bild 35: Schematische Darstellung des Analyseprozesses zur Bewertung der gemessenen Beschleunigungssignale und Ableitung eventueller Fehler und Defekte	112
Bild 36: Darstellung des entwickelten Systemaufbaus zur Fehlerdetektion und Bewertung der Funktionsfähigkeit von FCU innerhalb einer TMR-Architektur	117
Bild 37: Darstellung des Signalverlaufs zwei zeitlich verschobener Sinussignale (links) und des grafischen Verlaufs sowie des Wertebereichs von vier Bewertungsfunktionen unterschiedlicher Ordnung (rechts)	119
Bild 38: Exemplarischer Verlauf von zwei Motorstellsignalen und Darstellung der zur Bewertung der Übereinstimmung der Stellsignale genutzten Kenngrößen	123
Bild 39: Darstellung des Vorgehens und der Softwarearchitektur zur Personen- und Gestenerkennung und der darauf basierenden Anpassung des Flugverhaltens	125
Bild 40: Darstellung der zur Gestenerkennung genutzten geometrischen Zusammenhänge des Skelettmodells (links, in Anlehnung an [173]) und Visualisierung des Skelettmodells einer erkannten Person (rechts)	127
Bild 41: Auswahl der zur Evaluation der erforschten Methoden entwickelten und eingesetzten AFR. Dargestellt sind auf den Warentransport und die Objektinteraktion spezialisierte AFR sowie AFR zur optischen Informationserfassung [P5, P11, S6, S47]	132
Bild 42: Darstellung der Webanwendung zum Flottenmanagement sowie zur Statusvisualisierung (in Anlehnung an [S39])	137

Bild 43: Darstellung der virtuellen Umgebungsrepräsentation in Unity mit integrierter Schnittstelle zum Flottenmanagement sowie zur Auftragsverwaltung	138
Bild 44: Während der Forschungsarbeit am Lehrstuhl FAPS aufgebautes Flugfeld mit Docking-Stationen, Bin-Picking-Station im Vordergrund und Palettenlager	139
Bild 45: Darstellung der in Gazebo modellierten Fabrikumgebung zur Evaluation des erforschten AFRS. Hierfür ist die Voxelkarte, welche die Grundlage der Pfadplanung bildet, visualisiert.	141
Bild 46: Aufstellung der durchgeführten Aufträge, der dabei aufgetretenen Wartevorgänge und der fehlgeschlagenen Aufträge in Abhängigkeit von der Flottengröße	143
Bild 47: Statistische Verteilung der Gesamtflugzeit und –strecke (links, Mitte) sowie der anfallenden Wartezeit (rechts) in Abhängigkeit von der Flottengröße.....	144
Bild 48: Anteil der nicht mit kürzester Flugstrecke geplanten Pfade (links) und statische Verteilung der Pfaddifferenz (rechts) in Abhängigkeit von der Flottengröße.....	145
Bild 49: Vergleich der Positionsschätzung anhand der UWB-Lokalisierung (grau), mit der Positionsschätzung des Lokalisierungsframeworks bei Fusion der UWB- und Odometriedaten (blau), zusätzlicher Fusion der Position des KLT (rot) und der Messung eines Motion-Capturing-Systems (gelb)	147
Bild 50: Verlauf der im Leerlauf gemessenen RMS-Werte (blaue Kurve) im fehlerfreien Zustand (a) sowie mit einem beschädigten Propellerblatt (b). Verlauf des im Flug gemessenen RMS-Werts im fehlerfreien Zustand (c) sowie mit einem gelösten Spannungswandler (d).....	150
Bild 51: Zeitlicher Verlauf des Frequenzspektrums während des Abhebens und Vergleich der geschätzten mit der erwarteten Motordrehzahl für verschiedene Gewichtslastungen eines Quadropters. Die Auswertung ist für folgenden Abfluggewichte dargestellt: a) 1113 g, b) 1151 g, c) 1252 g, d) 1352 g, e) 1552 g, f) 1751 g	152
Bild 52: Oben: Verlauf der x-Position dreier FCU, wobei die Werte von <i>FCU0</i> zu den durch vertikale Linien gekennzeichneten	

Zeitpunkten mit einem Offset von jeweils 1 cm beaufschlagt werden. Unten: Zeitverlauf der Gültigkeit der von <i>FCU0</i> berechneten x-Position.....	154
Bild 53: Erfolgsquote der Gestenerkennung bei Bilddaten aus einer simulierten Umgebung; dargestellt als Wahrheitsmatrix und in Abhängigkeit von der Entfernung	156
Bild 54: Erfolgsquote der Gestenerkennung bei Bilddaten aus realen Flugversuchen; dargestellt als Wahrheitsmatrix und in Abhängigkeit von der Entfernung.....	156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inhalt der Datenpakete, die zur Übertragung der Positionsmesswerte der UWB-Sensoren an den AFR gesendet werden.	64
Tabelle 2: Inhalt der Datenpakete, die zur Statusübermittlung periodisch vom AFR an den Auftrag gesendet werden.	65
Tabelle 3: Inhalt der Datenpakete, die zur Statusübermittlung periodisch vom AFR an das zugehörige, virtuelle Abbild im Flottenmanagement gesendet werden.....	65
Tabelle 4: Inhalt der Datenpakete, die bei der Ad-hoc Kommunikation zwischen den einzelnen AFR ausgetauscht werden.....	67
Tabelle 5: Auflistung der bei der Routenplanung berücksichtigten Größenklassen von AFR und den jeweiligen Klassen zugeordnete Baugrößen von AFR	82
Tabelle 6: Aufstellung der mit dem definierten Flugkommandos verknüpften Gesten sowie der zugehörigen Gelenkwinkel.....	128
Tabelle 7: Statistische Gütekriterien der Gestenerkennung und – klassifikation, unterteilt nach Umgebung und Distanz zwischen AFR und Person	157

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das übergeordnete Ziel der Erforschung eines sicheren autonomen Flugrobotersystems für das industrielle Umfeld. Ein Forschungsschwerpunkt liegt dabei auf der Gesamtsystemarchitektur, die den robusten und vollautomatisierten Einsatz einer heterogenen Flotte von autonomen Flugrobotern in Produktions- und Logistikumgebungen ermöglicht. Besonderer Fokus liegt zusätzlich auf der Erforschung eines geeigneten Routenplanungs- und Luftraummanagementsystems, das auf die im betreffenden Umfeld vorherrschenden Gegebenheiten zugeschnitten ist. Durch die Spezifikation und Integration eines umfassenden Sicherheitsframeworks wird weiterhin sichergestellt, dass das von Flugrobotern ausgehende Gefährdungspotential für Personen reduziert wird.

1.1 Motivation und Hintergrund

Die Ursprünge moderner unbemannter Luftfahrzeuge (engl. Unmanned Aircraft (UA)), im allgemeinen Sprachgebrauch auch als Drohnen bezeichnet, gehen auf das erste, durch einen Kreiselkompass stabilisierte UA aus dem Jahr 1916 [1] und die ersten, in größerer Stückzahl produzierten, funkferngesteuerten UA ab dem Jahr 1933 zurück [2, 3].

Als Konsequenz des Hurrikans Katrina im Jahr 2005 wurde der amerikanische Luftraum für die zivile Nutzung von UA freigegeben, mit der Intention, durch den Einsatz von UA die Suche nach Überlebenden dieser und kommender Naturkatastrophen zu erleichtern. Dies führte zu einer stetig wachsenden Zahl an Unternehmen, die UA für den privaten und kommerziellen Einsatz entwickeln, wodurch sich UA mittlerweile in zahlreichen Anwendungsbereichen etabliert haben. [4]

Die kommerzielle Anwendung umfasst dabei insbesondere die Vermessung und Inspektion, den Film- und Fotografiebereich aber auch die Landwirtschaft sowie erste Transportprozesse im medizinischen Umfeld [5, 6]. Die aufgeführten Bereiche profitieren vom dreidimensionalen Bewegungsraum der UA, wodurch die Informationserfassung und Datenaufnahme aus der Luft sowie der direkte und schnelle Transport von eiligen Gütern ermöglicht wird. Aufgrund dieser Vorteile und Eigenschaften halten UA seit einigen Jahren auch verstärkt Einzug in industrielle Produktions- und Logistikumgebungen. Hier ermöglichen sie zum einen die Automatisierung von bislang manuell durchgeführten Inventur-, Inspektions-, Vermes-

sungs- und Instandhaltungsprozessen und können weiterhin innerbetriebliche sowie werksübergreifende Transportprozesse flexibilisieren sowie eilige Transportaufträge übernehmen. Neben der Automatisierung und der damit verbundenen Kostenreduktion und Zeitersparnis ermöglichen UA im industriellen Kontext weiterhin die Verbesserung der Arbeitssicherheit sowie eine Reduktion von Verletzungsrisiken. Dies gilt beispielsweise für Inspektion und Inventurprozesse, da durch den Drohneneinsatz hoch gelegene Stellen nicht mehr durch Personen begutachtet oder erfasst werden müssen. [7]

Von besonderer Bedeutung ist der Einsatz von UA dabei innerhalb von ausgedehnten Produktions- und Logistikhallen, beispielsweise aus dem Bereich Luftfahrt oder Automobilproduktion sowie in Schiffswerften. In diesen Bereichen weisen die zugehörigen Standorte und Hallen oftmals weitläufige Ausdehnungen auf, sodass die Vorteile von UA optimal ausgenutzt werden können.

Die wirtschaftliche Bedeutung von UA zeigt sich ebenfalls deutlich im Volumen des zugehörigen Drohnenmarkts. Liegt das Volumen in Deutschland im Jahr 2020 noch bei 738 Millionen Euro, wird es sich bis zum Jahr 2025 bereits auf über 1,5 Milliarden Euro verdoppeln [5]. Gleiches gilt für den internationalen Drohnenmarkt. Auch hier wird eine Verdopplung des Marktvolumens von 22 Milliarden US-Dollar im Jahr 2020 auf 43 Milliarden US-Dollar im Jahr 2025 erwartet [8]. Auffällig ist dabei, dass im gleichen Zeitraum das Marktvolumen für private UA in Deutschland um ca. 1.4 % schrumpfen soll. Gleichzeitig wird erwartet, dass die Anzahl der privat genutzten Drohnen zwischen 2020 und 2025 um 16 % zurückgeht. Es zeigt sich somit im Bereich der Drohnentechnologie ein Trend von der Hobbyanwendung hin zur professionellen und kommerziellen Nutzung. [5]

Trotz ihrer Vorteile, der breiten Anwendungsmöglichkeit und des damit verbundenen wirtschaftlichen Potentials, sind UA im industriellen Kontext derzeit noch von untergeordneter Bedeutung. Dies ist zum einen dadurch begründet, dass es sich bei UA noch um eine sehr junge Technologie handelt und viele Unternehmen zunächst geeignete Einsatzbereiche von UA identifizieren müssen. Zum anderen werden zahlreiche Vorteile und wirtschaftliche Potentiale in ihrem vollen Umfang erst nutzbar, wenn UA Prozesse vollautomatisiert bzw. autonom durchführen können. Dies umfasst insbesondere die kontinuierliche Bestandserfassung, die Überwachung von Produktionsanlagen oder Fabrikgeländen sowie den zyklischen Materialtransport. [9, 10]

Vor einem wirtschaftlichen Einsatz autonomer UA im industriellen Umfeld müssen zum heutigen Zeitpunkt jedoch sowohl technologische als auch regulative Fragestellungen gelöst werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass durch die Substitution von Tätigkeiten durch UA einerseits die Gefahr von Arbeitsunfällen reduziert werden kann, andererseits UA jedoch aufgrund rotierender Propeller und der bestehenden Absturz- und Kollisionsgefahr selbst ein erhöhtes Gefährdungspotential aufweisen. Dieses Gefährdungsrisiko und bestehende Vorbehalte gegenüber Drohnenapplikationen müssen ebenfalls adressiert werden. [11]

Ursächlich für die fehlende Automatisierung sind zum einen der technologische Handlungsbedarf, der zur Realisierung autonomer UA notwendig ist. Hierzu zählen etwa die präzise und robuste dreidimensionale Lokalisierung der UA. Da in Innenräumen die Daten globaler Navigationssysteme sowie Informationen wie die Ausrichtung des Erdmagnetfelds und der Betrag des aktuellen Luftdrucks zur Posebestimmung nicht zuverlässig herangezogen werden können, müssen alternative Ortungstechnologien eingesetzt werden. Zum anderen erfordert der dreidimensionale Bewegungsraum der UA neue Lösungen aus den Bereichen Umfelderkennung und Pfadplanung, da etablierte, beispielsweise für fahrerlose Transportsysteme genutzte Ansätze nur auf die zweidimensionale Bewegung am Boden ausgelegt sind.

Weiterhin sind auch durch regulative Aspekte sowie sicherheitstechnische Anforderungen weitere technologische Innovationen für einen vollautomatisierten Einsatz von UA erforderlich. Während für stationäre oder flurgebundene Robotersysteme im Falle eines Fehlers oder Defekts ein Not-Halt mit klar definierten Vorgaben durchgeführt werden kann, ist dies bei UA nicht möglich. Die Unterbrechung der Energiezufuhr führt hierbei in der Regel zu einem direkten Absturz, welcher eine signifikante Gefährdung von Personen und Anlagen hervorruft. Daher müssen alternative technische Lösungen gefunden werden, um das Sicherheitsniveau von UA in Übereinstimmung mit den gegebenen industriellen Normen und Richtlinien zu bringen.

Neben den technologischen und sicherheitstechnischen Limitierungen spielt auch die öffentliche Akzeptanz eine entscheidende Rolle bei der industriellen Nutzung von UA. Nur wenn UA akzeptiert und von den Mitarbeitern als positive Unterstützung angesehen werden, kann ein dauerhafter und wirtschaftlicher Einsatz realisiert werden. Studien zur Akzeptanz von UA in der Bevölkerung und zu möglichen Gründen für Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von UA zeigen, dass knapp 40 % der Bevölkerung in

Deutschland UA eher negativ gegenüberstehen. Die Ablehnungsgründe umfassen dabei insbesondere Bedenken vor Missbrauch und Eingriffen in die Privatsphäre, das Risiko von Abstürzen und damit verbundenen Verletzungen. Auffallend ist, dass die Lärmbelastung dabei der am seltensten genannte Grund für die Ablehnung ist. Auch besteht für als positiv angesehene Drohneneinsätze, beispielsweise in der Katastrophenhilfe sowie beim Transport von medizinischen Gütern, eine grundlegende Akzeptanz für den Überflug durch UA [12]. Es zeigt sich weiterhin, dass von erfahrenen Drohnenanwendern das Absturz- und Verletzungsrisiko als primäre Herausforderung angesehen wird, von der breiten Bevölkerung hingegen ungewollte Eingriffe in die Privatsphäre der wichtigste Ablehnungsgrund von UA sind. Weiterhin wird kommerziellen UA ein höherer Grad an Autonomie zugestanden als privaten Flugmodellen, jedoch wird nach einer deutlich stärkeren Beschränkung und Reglementierung der erlaubten Flugrouten für kommerziell genutzte UA verlangt. [13]

Bedingt durch die vorab genannten Limitierungen des aktuellen Stands der Technik werden drohnenbasierte Lösungen derzeit primär als Dienstleistungen angeboten [5]. Bei den meisten umgesetzten Anwendungen erfolgt die Steuerung der UA noch manuell oder teilautomatisiert mit kontinuierlicher Überwachung durch einen Piloten. Dies ermöglicht bereits die Nutzung der Vorteile von UA, bedingt jedoch gleichzeitig einen hohen Personaleinsatz. Zusätzlich kann der Einsatz der UA nur mit starker zeitlicher Begrenzung erfolgen und das Anwendungsspektrum ist aufgrund fehlender Infrastruktursysteme und der nicht vorhandenen Integration in bestehende Produktions- und Logistikabläufe stark limitiert.

Deutlich vielfältiger wird das Einsatzspektrum von UA, wenn diese als vollautomatisierte Systeme und ohne menschlichen Piloten verwendet werden können. Dies ermöglicht neue Anwendungsfelder wie beispielsweise den schnellen und flexiblen Materialtransport in der Luft, die kontinuierliche Erfassung von Bestandsdaten, die fortlaufende Überwachung und Inspektion von Anlagen oder die Durchführung von Wartungsprozessen.

1.2 Zielsetzung

Ausgehend von den beschriebenen Potentialen des industriellen Drohneneinsatzes sowie den bestehenden Herausforderungen ist die übergeordnete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, die Erforschung von Methoden und Lösungen für den vollautomatisierten, industriellen Einsatz einer heterogenen Flotte autonomer UA. Um dabei die innerhalb des Systems erreich-

bare Autonomie von anderen Lösungsansätzen abzugrenzen, wird der Begriff des autonomen Flugroboters (engl. Autonomous Flying Robot (AFR)) und des autonomen Flugrobotersystems (engl. Autonomous Flying Robot System (AFRS)) eingeführt und von vergleichbaren Systemen abgegrenzt.

Ein Kernaspekt ist hierfür die Erforschung einer Gesamtsystemarchitektur, welche den aus dem industriellen Anwendungsfeld entstehenden Anforderungen gerecht wird und die zur Realisierung eines vollautomatisierten Flugbetriebs notwendigen Systemkomponenten, Fähigkeiten und Schnittstellen bietet. Die Gesamtsystemarchitektur soll dabei mit AFR von unterschiedlichen Herstellern und mit unterschiedlicher Spezifikation einsetzbar sein und dies über eine geeignete, fähigkeitsbasierte Abstraktion und agentenbasierte Modellierung erreichen. Zusätzlich sollen Methoden zur präzisen, aufgabenangepassten Lokalisierung der AFR erforscht und Redundanzanforderungen berücksichtigt werden.

Als potentielle Einsatzumgebung des AFRS werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit ausgedehnte Werks- und Logistikhallen, beispielsweise aus dem Automobil- oder Luftfahrtbereich, betrachtet. Dementsprechend ist ein weiterer Forschungsgegenstand der Arbeit die Entwicklung eines auf das innerhalb einer Werk- oder Logistikhalle vorherrschende Umfeld zugeschnittenen Luftraummanagement- und Routenplanungssystems. Unter Berücksichtigung des dreidimensionalen Arbeitsraums und der vorherrschenden Platzverhältnisse sollen dabei unter vorgegebenen Bedingungen optimale Flugpfade für die AFR bestimmt werden und gleichzeitig Kollisionen während des fehlerfreien Flugs zuverlässig ausgeschlossen werden.

Von zentraler Bedeutung für den Einsatz von AFR im industriellen Umfeld ist zudem ein geeignetes Sicherheitsframework, um die Wahrscheinlichkeit von Gefährdungssituationen, bedingt durch Fehlfunktionen oder Abstürze der AFR, zu reduzieren. Daher stellt die durchgängige Berücksichtigung von Redundanz- und Sicherheitsanforderungen und die Erforschung und Umsetzung einer umfassenden Sicherheitsarchitektur für den Einsatz von AFR den dritten Forschungsgegenstand der Arbeit dar. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung einer Methode zur Prädiktion, Erkennung und Maskierung von Systemfehlern. Weiterhin wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, während des Flugs Personen im Umfeld der AFR zu erkennen und das Flugverhalten der AFR in geeigneter Weise anzupassen. Die Sicherheitsarchitektur wird ebenfalls in das AFRS integriert, um im Zusammenspiel mit den beiden weiteren Forschungsschwerpunkten den zuverlässigen, aufgabenorientierten und vollautomatisierten Einsatz von AFR innerhalb von Produktions- und Logistikumgebungen zu ermöglichen.

Das aus der Forschungsarbeit entstandene Gesamtsystem soll zudem einen Beitrag zur schnelleren Entwicklung von AFRS leisten und die Forschung in diesem Bereich vorantreiben. Gleichzeitig soll es Anwendern von Drohnentechnologien einen vereinfachten Einstieg in den Themenkomplex bieten und sie durch die bereits umgesetzten Applikationsbeispiele bei eigenen Entwicklungen unterstützen.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Ausgehend von einer Begriffsdefinition und Einführung in die Grundlagen und technische Funktionsweise der für den Einsatz in Werks- und Logistikhallen geeigneten UA erfolgt eine Darstellung bestehender Ansätze zum industriellen Einsatz von Flugrobotersystemen. Weiterhin wird in Kapitel 2 der Stand der Technik und Forschung zur dreidimensionalen Lokalisierung, Umgebungsdarstellung und Pfadplanung betrachtet.

In Kapitel 3 werden zu Beginn die Anforderungen an ein AFRS sowie die aus Sicht der Industrie bestehenden Bedarfe in diesem Bereich aufgeführt. Anschließend erfolgt eine fundierte Analyse des Stands der Wissenschaft im Bereich der AFRS, um darauf aufbauend den Handlungsbedarf abzuleiten und die zentralen Forschungslücken zu spezifizieren.

Entscheidend für den künftigen industriellen Einsatz von AFRS ist eine auf die zugrundeliegenden Anforderungen zugeschnittene Gesamtsystemarchitektur. In Kapitel 4 wird daher ausgehend vom Stand der Technik dieser Forschungsbedarf adressiert und es wird eine Lösung zur Integration von AFR in Produktions- und Logistikumgebungen erarbeitet. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf der Realisierung der erforderlichen Autonomie der AFR, der Kommunikationsarchitektur, dem Flotten- und Infrastrukturmanagement sowie der aufgabenangepassten Lokalisierung durch Fusion von globalen Positionsmessdaten und Sensordaten des Flugroboters.

Zentraler Bestandteil eines Frameworks für AFR im industriellen Einsatz ist ein geeignetes Luftraummanagement sowie eine optimierte Routenplanung. In Kapitel 5 wird in diesem Zuge eine neuartige Methodik zur ebenenbasierten Routenplanung in Innenräumen sowie ein Vorgehen zum dynamischen Luftraummanagement erforscht. Ziel ist die kollisionsfreie und zuverlässige Pfadplanung für eine skalierbare, heterogene Flotte von AFR. Die integrierte Modellierung von Sperrzonen und Landekorridoren sowie von Landeplätzen, Warenübergabe-, Service- und Ladestationen ermöglicht dabei eine optimierte Ausnutzung des verfügbaren Raumbereiches sowie ein effizientes Luftraummanagement.

Um neben den technologischen Herausforderungen auch die mit dem Einsatz von AFRS einhergehenden sicherheitstechnischen Handlungsbedarfe zu adressieren, wird in Kapitel 6 ein Sicherheitsframework zur Reduktion der von AFR ausgehenden Gefährdung vorgestellt. Besonderer Fokus liegt hierbei auf der automatisierten Detektion und Behandlung von Systemfehlern sowie der automatisierten Erkennung von Personen und einer geeigneten Anpassung des Flugverhaltens.

Anschließend werden die erforschten Methoden in Kapitel 7 anhand konkreter Anwendungsfälle evaluiert. Hierfür erfolgt eine Implementierung der erarbeiteten Methoden in einem Gesamtframework und dessen systematische Analyse unter Einsatz einer heterogenen Flotte von AFR mit unterschiedlichen Fähigkeiten und Eigenschaften.

Kapitel 8 liefert eine Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte an die Arbeit. Die übergeordnete Kapitelstruktur sowie die Zuordnung der einzelnen Kapitel zu Stand der Technik und Forschung sowie zu den erarbeiteten wissenschaftlichen Methoden sind in Bild 1 zusammenfassend dargestellt.

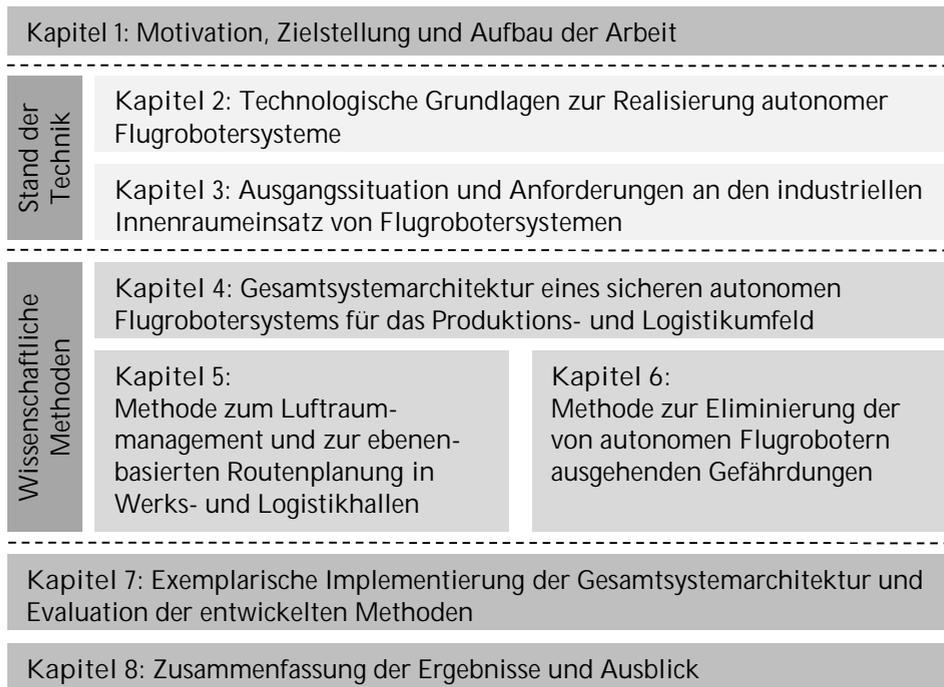


Bild 1: Aufbau der Arbeit und übergeordnete Einteilung der Hauptkapitel

2 Technologische Grundlagen zur Realisierung autonomer Flugrobotersysteme

Insbesondere ihr dreidimensionaler Bewegungsraum, ihre Flexibilität und Schnelligkeit sowie ihre kostengünstige Verfügbarkeit haben dazu beigetragen, dass sich UA für zahlreiche Anwendungsbereiche etabliert haben. So lassen sich mit UA weitläufige Areale schnell aus der Luft erfassen, Strecken schnell und auf direktem Weg zurücklegen und es können Bereiche erfasst werden, die andernfalls nur mit Hebebühnen oder anderweitigen Hilfsmitteln erreichbar sind.

Weiterhin hat die technologische Entwicklung der vergangenen Jahre zahlreiche neue Anwendungsfelder für UA ermöglicht. Innovationen im Bereich der Lokalisierung und Navigation, die Miniaturisierung von leistungsstarker Hardware sowie die breite Verfügbarkeit von präziser Sensorik ermöglichen zahlreiche Applikationen und erlauben den Einsatz von UA in unterschiedlichen Bereichen. [7, 14]

Der aktuelle Stand der Forschung und Technik der zugrundeliegenden Befähigertechnologien wird in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt. Ausgehend von einer grundlegenden Betrachtung des Aufbaus von Flugrobotersystemen folgt eine Einordnung der aktuellen und zukünftigen Anwendungsfelder für Flugroboter. Anschließend erfolgt eine fundierte Betrachtung der bestehenden Navigationslösungen für Flugroboter in Innenbereichen, sodass sich im Anschluss daran der notwendige Forschungsbedarf ableiten lässt.

2.1 Aufbau, Funktionsweise und industrielle Bedeutung von unbemannten Luftfahrzeugen

Um den Rahmen der Arbeit sowie die Gültigkeit der erforschten Methoden abzugrenzen, werden im Folgenden zunächst die im Kontext von Luftfahrzeugen und Flugrobotersystemen relevanten Begrifflichkeiten und Ausführungsformen spezifiziert und voneinander abgegrenzt. Ausgehend von einer isolierten Betrachtung gängiger Luftfahrzeuge erfolgt der Übertrag zu autonomen Flugrobotersystemen und die Betrachtung derzeitiger Anwendungsgebiete solcher Systeme.

2.1.1 Begriffsdefinition und Kategorisierung von unbemannten Luftfahrzeugen

Zunächst ist es erforderlich, die relevanten Begrifflichkeiten zu definieren und voneinander abzugrenzen, wofür in der vorliegenden Arbeit auf die Terminologie der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation zurückgegriffen wird. Definiert ist darin ein unbemanntes Luftfahrzeug (engl. Unmanned Aircraft (UA)) als ein Luftfahrzeug, das für den Einsatz ohne Pilot an Bord gedacht ist. Wird neben dem Luftfahrzeug auch die zugehörige Peripherie am Boden betrachtet, wird dies als ein unbemanntes Luftfahrzeugsystem (engl. Unmanned Aircraft System (UAS)) bezeichnet. [15]

Im Kontext der industriellen Nutzung sind insbesondere Multikopter von Bedeutung, die eine Untergruppe der Drehflügler darstellen. Hierbei handelt es sich um Systeme mit mehreren horizontal rotierenden Propellern, die sich durch die Fähigkeit zum vertikalen Starten und Landen, die Möglichkeit des stationären Schwebens in der Luft sowie eine hohe Wendigkeit auszeichnen. [16]

Der grundlegende Aufbau eines Multikopters und gängige Ausführungen von Multikoptern sind in Bild 2 dargestellt. Die für die industrielle Praxis relevanten Bauformen von Multikoptern weisen in der Regel vier oder mehr Rotoren auf, die in einer oder mehreren Ebenen angeordnet sein können. Sind wie in Bild 2 (rechts) zwei Rotoren koinzident angeordnet und rotieren um eine gemeinsame Achse, sind deren Rotationsrichtungen zueinander gegenläufig. Dabei wird jeder Rotor von einem separaten Motor angetrieben. Eine höhere Zahl an Rotoren ermöglicht zudem die Gewährleistung der Flugstabilität auch im Falle des Ausfalls eines oder mehrerer Motoren. [17]

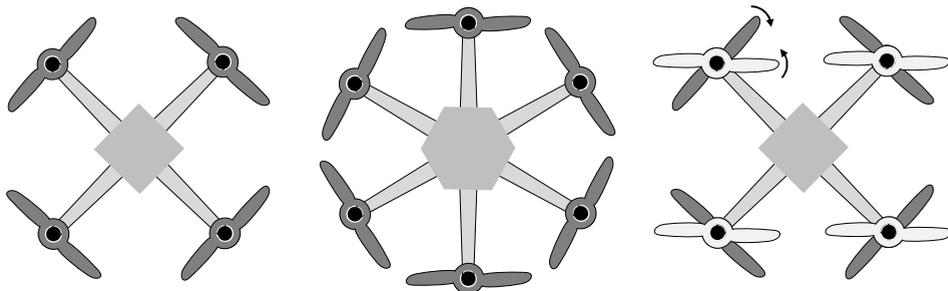


Bild 2: Darstellung eines Quadropters (links), eines Hexakopters (Mitte) sowie eines Oktokopters (rechts) als Beispiele für gängige Bauformen von Multikoptern

Multikopter erzeugen ihren Auftrieb ausschließlich mittels der horizontal rotierenden Propeller und besitzen somit im Gegensatz zu Starrflüglern die Möglichkeit, an einer Position zu schweben. Diese Eigenschaft eröffnet breite industrielle Einsatzfelder und hat neben ihrem robusten und einfachen Aufbau dazu geführt, dass Multikopter für zahlreiche Applikationen eingesetzt werden können.

Sollen während des Fluges weite Strecken zurückgelegt werden, können auch Starrflügler sowie Kombinationen aus Starr- und Drehflügler zum Einsatz kommen. Für den Einsatz im innerbetrieblichen Umfeld oder in Innenräumen spielen die beiden Bauformen jedoch nur eine stark untergeordnete Rolle, da die notwendigen Flugstrecken zu gering sind und die Fähigkeit des Schwebeflugs für viele Applikationen eine entscheidende Voraussetzung darstellt. Ballone und Zeppeline sind aufgrund ihrer limitierten Traglast bzw. der zum Transport von Nutzlasten mit einem Gewicht von einigen hundert Gramm und mehr benötigten Hüllenvolumen für den Einsatz in Innenräumen derzeit nicht von Bedeutung. Daher beziehen sich die im Kontext der Arbeit erforschten Methoden und Lösungen stets auf den Einsatz von Multikoptern.

Für die Bezeichnung der für den industriellen Einsatz vorgesehenen Multikopter wird im Kontext der Arbeit der Begriff des Flugroboters definiert. In Anlehnung an die Definition eines Roboters nach ISO 8373:2012 wird hierdurch ein ortsflexibles, flugfähiges System beschrieben, das über einen gewissen Grad an Autonomie verfügt und vorgesehene Aufgaben ohne manuellen Eingriff durchführen kann [18]. Ein Flugroboter beschreibt somit ein UA, das durch autonome Funktionen erweitert ist und auf den professionellen, industriellen Einsatz ausgelegt ist. Durch die Integration von Sensoren, Lastaufnahmemitteln oder Effektoren sowie weiteren einsatzspezifischen Komponenten kann ein Flugroboter verschiedene Aufgaben übernehmen.

In Analogie zur Definition des autonomen mobilen Roboters (AMR), der sich von fahrerlosen Transportsystemen durch einen erhöhten Grad an Autonomie und gesteigerte Flexibilität unterscheidet [19, 20], werden die im Rahmen der Arbeit betrachteten Systeme auch als autonome Flugroboter (AFR) bezeichnet. Zusätzlich wird die von der European Cockpit Association (ECA) veröffentlichte Klassifizierung von Autonomie und Automatisierung von UAS [21] bei der Begriffsdefinition berücksichtigt. Die Klassifizierung der ECA folgt dabei der Norm SAE J3016 [22], in der die Ausführungsstufen des automatisierten Fahrens spezifiziert sind. Ein als AFR bezeichnetes System soll in die Stufe 5 (vollautomatisierter Betrieb)

zählen, bei dem das System die Steuerung, Umgebungserfassung, Fehlerdetektion und –behandlung sowie die Auftragsbearbeitung eigenständig durchführt. Weiterhin soll das System in der Lage sein, seine Batterien selbstständig nachzuladen, sodass ein dauerhafter Betrieb ermöglicht wird.

Im Folgenden bezieht sich der Begriff des Multikopters auf die Bauform und das physikalische Funktionsprinzip, ohne eine Bewertung der Autonomie vorzunehmen. Der Begriff UA bezeichnet ein unbemanntes Luftfahrzeug, das sowohl manuell als auch automatisiert geflogen werden kann. Als Flugroboter bzw. AFR werden nachfolgend UA bezeichnet, die über die spezifizierte Autonomie verfügen und auf den industriellen Einsatz ausgelegt sind. Somit stellt ein AFR eine spezialisierte Untergruppe der UA dar.

2.1.2 Funktionsweise und Aufbau von Multikoptern

Bevor am Ende des Abschnittes auf die funktionalen Elemente eines Multikopters eingegangen wird, erfolgt zunächst die Beschreibung des grundlegenden physikalischen Funktionsprinzips eines Multikopters, welches in Bild 3 dargestellt ist. Die nachfolgende Nomenklatur und Darstellung orientiert sich dabei an der einschlägigen Fachliteratur. [23–25]

Um die Pose und Bewegung eines Multikopters im Raum zu beschreiben, werden ein ortsfestes Koordinatensystem K_W sowie ein körperfestes Koordinatensystem K_B definiert. Im System K_W zeigt die x-Achse nach Norden, y nach Osten und z in Richtung des Erdmittelpunkts. Das System K_B hat seinen Ursprung im Zentrum der Flugsteuerung des UA, die x-Achse verläuft in Längsrichtung, die y-Achse in Querrichtung. Die z-Achse zeigt aus der Perspektive des UA orthogonal zur x- und y-Achse nach unten. Eine Rotation um die körperfeste Längsachse (\mathbf{x}_B) wird als Rollen, eine Rotation um die Querachse (\mathbf{y}_B) als Nicken und eine Rotation um die Hochachse (\mathbf{z}_B) als Gieren bezeichnet. Die drei genannten Drehbewegungen kommen dabei durch Unterschiede in der Schubkraft der vier Rotoren zustande.

Jeder Rotor i erzeugt eine Schubkraft $F_{s,i}$, die in K_B in negative z-Richtung zeigt, sowie eine der Drehbewegung des Rotors entgegenwirkende Widerstandskraft, welche ein aerodynamisches Moment $\tau_{z,i}$ hervorruft. Beide Größen sind neben der Rotordrehzahl von den Kenngrößen des Propellers abhängig und können über die Zusammenhänge

$$F_{s,i} = C_T \rho A r^2 \omega_i^2, \quad (2.1)$$

$$\tau_{z,i} = C_Q \rho A r^3 \omega_i^2 \quad (2.2)$$

beschrieben werden. Dabei bezeichnet C_T den Schubkoeffizienten des Propellers, C_Q den Widerstandskoeffizienten, ρ die Luftdichte, A die durch den Propeller abgedeckte Fläche, r den Propellerradius und ω die Winkelgeschwindigkeit. Somit kann durch geeignete Regelung der Drehzahl des jeweiligen Antriebs, die Schubkraft $F_{s,i}$ für jeden Rotor individuell eingestellt werden. Um im Gleichgewichtszustand ein auf den Multikopter wirkendes Giermoment τ_z zu verhindern, drehen sich die Rotoren paarweise gegenläufig.

Aus der rechtsstehenden Darstellung in Bild 3 wird ersichtlich, dass durch die Vorgabe entsprechender Schubkräfte eine Rotation des Multikopters um die drei vorab bezeichneten Achsen hervorgerufen werden kann. Weiterhin ist erkennbar, dass bei einer Verkippung des Multikopters die Schubkraft nicht mehr ausschließlich in vertikale Richtung wirkt, sondern sich ein zusätzlicher horizontaler Anteil einstellt. Entsprechend des Aufbaus eines Multikopters führt hierdurch ein positiver (negativer) Nickwinkel zu einer translatorischen Bewegung in positive (negative) x-Richtung in K_B . Dies gilt analog für den Rollwinkel und die translatorische Bewegung in y-Richtung.

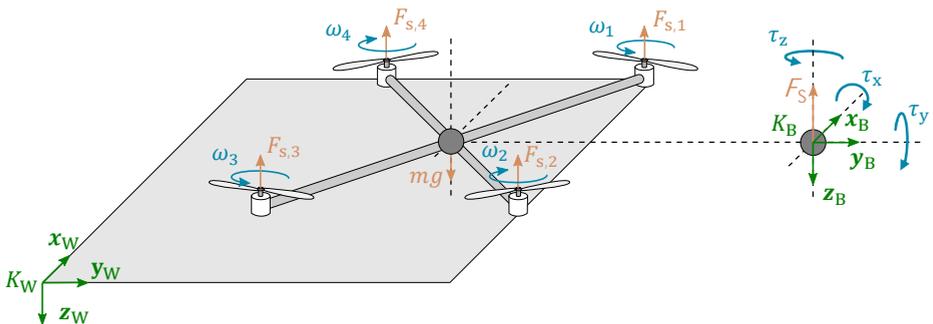


Bild 3: Darstellung der an einem Multikopter wirkenden Kräfte und Momente am Beispiel eines Quadropters

Da es sich bei Multikoptern um dynamische, instabile Systeme handelt, ist eine Lageregelung erforderlich, um stabil in der Luft schweben zu können. Durch eine ggf. ungleiche Masseverteilung und nicht deterministische Störungen wie Luftströmungen treten kontinuierlich Verkippungen auf, welche den schwebenden Multikopter aus der aktuellen Lage auslenken. Daher ist es erforderlich, diese Verkippung durch den Einsatz geeigneter Sensoren zu erfassen und durch die Anpassung der Motordrehzahlen auszugleichen. Zu diesem Zweck kommt eine Flugsteuerung (engl. flight control unit (FCU)) zum Einsatz, welche eine zentrale Funktionskompo-

nente jedes Multikopters darstellt. Die Funktionsweise der FCU, die weiteren Funktionskomponenten eines UA sowie der strukturelle Aufbau von UAS werden im Folgenden erläutert.

2.1.3 Funktionsweise und struktureller Aufbau von unbemannten Luftfahrzeugsystemen

Bild 4 zeigt den allgemeinen Aufbau eines UAS und stellt die einzelnen Systemkomponenten sowie den grundlegenden Datenfluss zwischen den Teilsystemen dar. Zusätzlich sind die auf einem UA erforderlichen Funktionselemente sowie die elementaren Module einer FCU abgebildet.

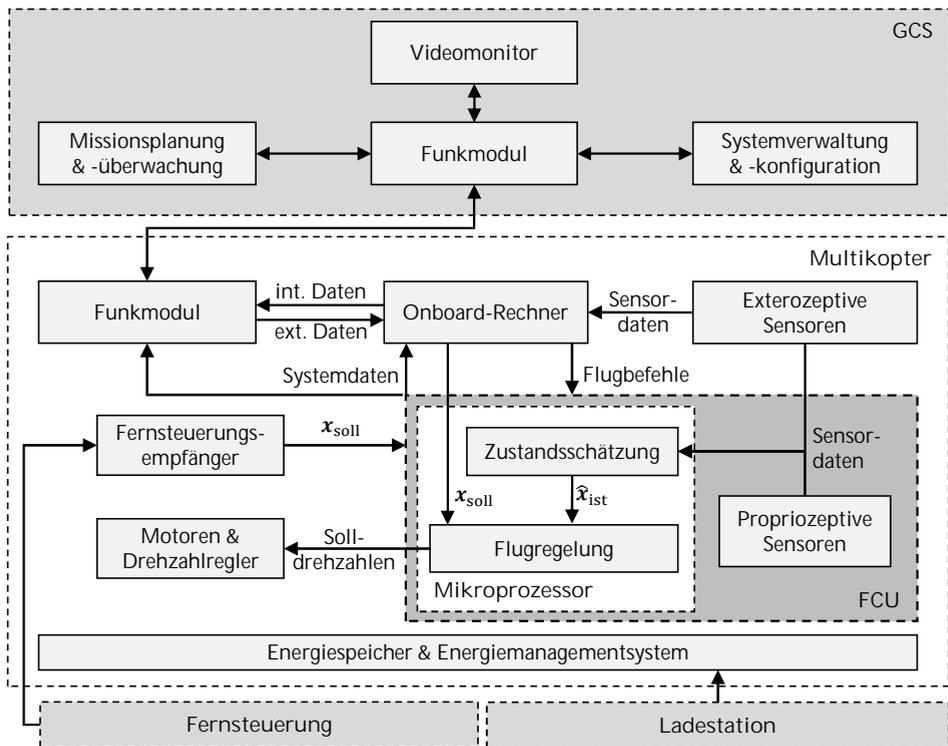


Bild 4: Aufbau eines unbemannten Luftfahrzeugsystems und Darstellung der für den Flug eines Multikopters erforderlichen Module und möglicher Erweiterungen

Bei der FCU handelt es sich im allgemeinsten Fall um eine elektronische Recheneinheit, auf der ein Lageregler basierend auf dreidimensionalen Beschleunigungs- und Drehratendaten einer inertialen Messeinheit (engl. inertial measurement unit (IMU)) die erforderlichen Stellsignale für die Drehzahlregler der einzelnen Motoren berechnet. Ziel ist es, den Multikopter horizontal und in einer stabilen Orientierung um die Hochachse in der

Luft zu halten. Weiterhin kann eine translatorische Bewegung des Multikopters durch Vorgabe entsprechender Soll-Winkel an den Lageregler erfolgen. [23, 26]

Soll weiterhin die Flugposition geregelt werden, sind neben einer zusätzlichen Positions- und Geschwindigkeitsregelung noch geeignete Verfahren zur Bestimmung der aktuellen Position erforderlich. Sowohl die Pose als auch die Geschwindigkeit des UA können dabei mittels Trägheitsnavigation aus den Daten der IMU berechnet werden. Alternativ bzw. ergänzend können Messwerte eines globalen Navigations satellitensystems (GNSS) und eines Magnetometers sowie Messdaten anderer geeigneter Ortungssysteme zur Bestimmung der Flugposition und Ausrichtung des UA herangezogen werden [17, 23].

Weitere Hauptbestandteile eines Multikopters sind neben einem möglichst steifen und leichten Rahmen das Antriebssystem sowie notwendige Peripheriesysteme. Das Antriebssystem umfasst neben den Motoren und den zugehörigen Drehzahlreglern auch einen geeigneten Energiespeicher. In professionellen Multikoptern werden derzeit aufgrund ihres hohen Leistungsgewichts primär bürstenlose Gleichstrommotoren in Verbindung mit zweiblättrigen Propellern sowie Lithium-Polymer-Akkumulatoren mit hoher Energiedichte eingesetzt. [27]

Während beim manuellen Flug die Sollwerte für Pose und Geschwindigkeit durch den Piloten über ein geeignetes Fernsteuerungssystem an den Multikopter weitergegeben werden, sind für den autonomen Betrieb zusätzliche Komponenten auf dem Multikoptern erforderlich. Diese zusätzliche Peripherie umfasst dabei verschiedene Sensoren wie Kameras oder Abstandssensoren, einen On-Board-Computer (OBC) zur Sensordatenauswertung sowie geeignete Schnittstellen zur Funkkommunikation. [17]

Entsprechend der eingangs aufgeführten Definition eines UAS beinhaltet dieses neben dem eigentlichen UA auch weitere Elemente, die zur Realisierung eines funktionsfähigen Gesamtsystems erforderlich sind. Die Spannweite dieser Elemente reicht von einer manuellen Funkfernsteuerung bis zu komplexen Hard- und Softwaresystemen zur Navigation, Steuerung und Überwachung einer Flotte von UA. [28]

Die hierbei typischerweise im Betrachtungshorizont eines UAS liegenden Systeme sind im oberen Teil von Bild 4 dargestellt. Für die Kontrolle und Steuerung eines oder mehrerer UA wird zunächst eine Bodenstation (engl. Ground Control Station (GCS)) benötigt. Diese gibt die durchzuführende Flugmission vor und überwacht den Missionsfortschritt. Zusätzlich besteht

die Möglichkeit zum manuellen Eingriff in den Flugablauf und es können die erfassten Umgebungs- und Sensorinformationen wie Kamerabilder dargestellt und gespeichert werden. Für die notwendige Kommunikation zwischen UA und Bodenstation kommen in der Regel ein Direktfunksystem im Mega- und Gigahertzbereich oder Mobilfunksysteme zum Einsatz. Neben der Flugsteuerung kann auf dem AFR ein On-Board-Computer (OBC) vorgesehen sein, um Sensordaten zu fusionieren, auszuwerten und erweiterte Autonomiefunktionen wie Kollisionsvermeidung oder Objekterkennung zu ermöglichen. Um den Automatisierungsgrad des Gesamtsystems zu erhöhen, kann eine zusätzliche Ladestation vorgesehen werden, in die das UA bei entsprechendem Akkustand selbstständig zurückkehrt und automatisiert geladen wird.

Analog zur Definition eines UAS wird erweiternd der Begriff des autonomen Flugrobotersystems (AFRS) eingeführt. Dieser umfasst wie vorab beschrieben einen oder mehrere AFR sowie die zur Koordination, Steuerung und Überwachung notwendigen Systemkomponenten. Zusätzlich beinhaltet ein AFRS die notwendige automatisierte Ladeinfrastruktur sowie weitere, zum Beispiel zur Warenübergabe oder automatisierten Wartung, eingesetzte Infrastruktursysteme.

2.1.4 Industrielle Anwendungsbereiche von unbemannten Luftfahrzeugen und Flugrobotersystemen

Im Kontext der zivilen Nutzung haben sich UA bereits in zahlreichen Branchen und Einsatzgebieten etabliert. Dies ist neben ihrer ortsflexiblen Einsetzbarkeit, ihres dreidimensionalen Arbeits- und Bewegungsraumes auch auf die Möglichkeit eines automatisierten Einsatzes zurückzuführen. Im gewerblichen bzw. professionellen Umfeld haben sich UA insbesondere im Bereich der Film- und Fotoproduktion, für die photogrammetrische Vermessung und Kartierung [29], für die Inspektion von Infrastruktur und Fabrikanlagen [30], in der Landwirtschaft zur Umweltanalyse und Applikation von Fluiden [31] sowie im Katastrophenschutz etabliert [32].

Allen vorab genannten Anwendungsfällen ist dabei gemein, dass die eingesetzten UA in der Regel durch menschliche Operatoren ferngesteuert werden. Dabei können teilautonome Funktionalitäten wie das automatisierte Abfliegen von Wegpunkten oder die automatisierte Aufnahme von Bildern unterstützend eingesetzt werden, die übergeordnete Kontrolle und Überwachung des Systems obliegt jedoch einem Piloten. Entsprechend der Klassifikation der ECA liegt in diesen Anwendungsszenarien somit eine bedingte Automatisierung (Stufe 3) vor. [21]

Während die manuelle Steuerung eines UA bei den zuvor genannten Prozessen sinnvoll und wirtschaftlich sein kann, erfordern Applikationen, die den dauerhaften Einsatz von UA erfordern, einen weiterführenden Grad an Autonomie. Ein etablierter Anwendungsbereich sind Überwachungsaufgaben, beispielsweise von Fabrikgeländen oder kritischer Infrastruktur [33]. Hierbei ist neben dem Abflug einer vorgegebenen Trajektorie auch der Start- und Landevorgang automatisiert. Um die Flugzeit zu verlängern, verfügen einige Systeme über eine kabelgebundene Verbindung zwischen einer Bodenstation und dem UA, die neben der Energieübertragung auch die Kommunikation ermöglicht [34]. Weiterhin befinden sich Flugroboter mittlerweile für Lichtshows sowie zur Durchführung von Inventurprozessen im Einsatz [35–37]. Allen genannten Anwendungen ist dabei gemein, dass der Flug im Normalbetrieb ohne manuellen Eingriff erfolgt. In diesen Fällen handelt es sich um Systeme die sich gemäß ECA als hochautomatisiert (Stufe 4) bzw. vollautomatisiert (Stufe 5) einstufen lassen.

Neben den beschriebenen Anwendungsfällen wird intensiv am Einsatz von UA für den Materialtransport gearbeitet. Der Fokus liegt dabei primär auf der Zustellung von Paketen im Versandhandel sowie dem Transport von eiligen medizinischen und industriellen Gütern. Neben dem Transport in urbanen und ländlichen Umgebungen steht dabei auch der innerbetriebliche Warentransport im Fokus. [7]

2.2 Navigation von Flugrobotersystemen in Innenbereichen

Entscheidende Voraussetzung für den Einsatz von AFRS ist eine robuste und autonome Navigation der einzelnen AFR. Entsprechend ihrer Begriffsdefinition untergliedert sich die Navigation dabei in die Aspekte der Lokalisierung, Umfelderkassung und Pfadplanung [38]. Die drei Aspekte müssen dabei aufeinander abgestimmt sein, um eine robuste Navigation zu ermöglichen. Nachfolgend wird der relevante Stand der Technik für die Bereiche Lokalisierung, Umgebungsraumdarstellung und Pfadplanung aufgezeigt.

2.2.1 Technologien und Methoden zur Lokalisierung von mobilen Systemen

Zur Lokalisierung von Flugrobotern in Bereichen ohne GNSS-Empfang stehen alternative Technologien zur Verfügung. Die einschlägige Fachliteratur beschreibt hierfür eine Vielzahl möglicher Lokalisierungsverfahren, die auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhen [39, 40]. Basierend auf den

Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten der Technologien werden im Folgenden primär Verfahren betrachtet, die sich für den robusten, industriellen Einsatz eignen und sich entweder auf große Areale skalieren lassen oder ausschließlich mit Sensorik auf dem Flugroboter arbeiten.

Ultrabreitband-Lokalisierung

Ultrabreitband-(engl. ultra-wideband (UWB))-Lokalisierungssysteme bestehen aus in der Regel fest in der Umgebung installierten Ankern sowie an den zu lokalisierenden Objekten befestigten Sensoren. UWB-Systeme ermöglichen eine echtzeitfähige, präzise Lokalisierung mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich.

Als UWB-Signale werden Signale aufgefasst, die eine absolute Bandbreite größer 500 MHz oder eine relative Bandbreite größer 0,2 aufweisen. Aufgrund dieser hohen Bandbreite sind UWB-Signale keinem bestimmten Frequenzbereich zugeordnet, sondern überlagern die Frequenzspektren anderer Funktechnologien. Damit hierdurch keine Interferenz mit anderen Signalen entsteht, ist die erlaubte Abstrahlleistung limitiert, wodurch zur Abdeckung großer Areale eine ausreichende Anzahl an Sendern installiert werden muss. Das grundlegende Vorgehen der UWB-Lokalisierung besteht in der Bestimmung der Signallaufzeit zwischen den Sensoren und den Ankern gefolgt von einer Multilateration. Die beiden gängigsten Verfahren zur Laufzeitbestimmung sind dabei das Time-Difference-of-Arrival (TDOA)-Verfahren sowie ein auf einem Two-Way-Ranging (TWR)-Protokoll basierender Ansatz. [41] Die Funktionsweise beider Verfahren ist in Bild 5 gegenübergestellt.

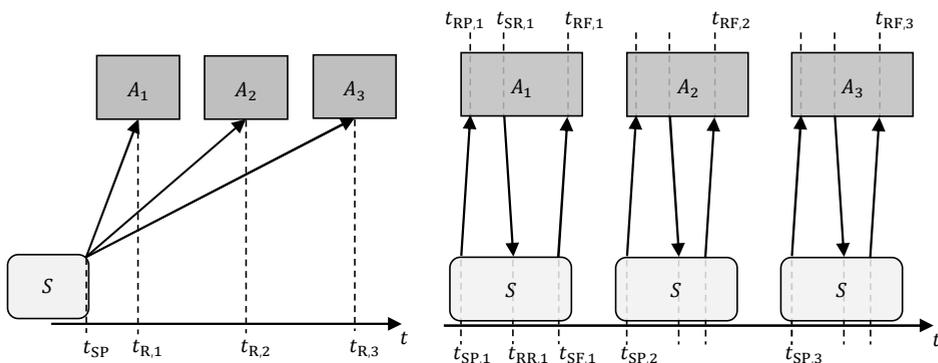


Bild 5: Schematische Darstellung der Laufzeitermittlung beim TDOA-Verfahren (links) und dem TWR-Protokoll (rechts)

Bei der TDoA-Lokalisierung sendet der Sensor S in zyklischen Intervallen eine Statusnachricht, welche von allen Ankern A_i in Reichweite empfangen

wird. Die Anker senden anschließend den Zeitpunkt $t_{R,i}$, zu dem das Datenpaket empfangen wurde, an einen zentralen Lokalisierungsserver, welcher auf Basis der bekannten Ankerpositionen und der Empfangszeitpunkte die Position des Sensors berechnet. [42]

Während beim TDoA-Verfahren alle Anker eine exakte Zeitsynchronisation aufweisen müssen, lässt sich diese Anforderung durch den Einsatz eines TWR-Verfahrens auflösen. Bei der TWR-Lokalisierung sendet der Sensor zum Zeitpunkt $t_{SP,i}$ ein Datenpaket an den Anker i , welches der Anker mit einem Paket beantwortet. Dieses enthält den Zeitpunkt $t_{RP,i}$ des Datenempfangs auf dem Anker sowie den Sendezeitpunkt $t_{SR,i}$ des Antwortpakets. Nach Eingang der Antwort beim Sensor wird ein Paket mit dem zugehörigen Empfangszeitpunkt $t_{RR,i}$ und den vorab ermittelten Zeitpunkten zum Zeitpunkt $t_{SF,i}$ an den Anker zurückgeschickt, von diesem zum Zeitpunkt $t_{RF,i}$ empfangen und an eine zentrale Auswerteeinheit weitergeleitet. Aus den einzelnen Zeitstempeln wird anschließend die tatsächliche Signallaufzeit zwischen dem Sensor und den einzelnen Ankern und daraus die Sensorposition bestimmt. [43]

Während das TDoA-Verfahren für eine deutlich größere Anzahl an Sensoren geeignet ist und sich weiterhin durch einen geringeren Energiebedarf und eine bessere Skalierbarkeit auszeichnet, bietet das TWR-Verfahren Vorteile im Bereich Robustheit und Genauigkeit [44]. Gängige UWB-Systeme ermöglichen derzeit unter optimalen Bedingungen eine Lokalisierungsgenauigkeit im Bereich von unter 10 Zentimeter [45]. Abhängig von Signalreflexion und -absorption in der Umgebung kann sich die Genauigkeit der Lokalisierung jedoch signifikant verschlechtern. [41, 42]

Optische Referenzmarken

Bei optischen Referenzmarken handelt es sich um eindeutig identifizierbare, sich von der Umgebung abhebende Muster, die zur Bestimmung der Relativposition zwischen Marke und Kamera eingesetzt werden [46]. Dabei werden häufig quadratische, schwarz-weiße Marken eingesetzt, die in ihrem Inneren eine eindeutige Matrix aus schwarzen und weißen Quadranten besitzen. Die innere Matrix ermöglicht dabei die Identifikation der Marke, während die vier Eckpunkte der Marke eine präzise Posebestimmung ermöglichen. [47]

Um eine Marke zu identifizieren und anschließend ihre Pose zu bestimmen, muss im ersten Schritt deren Außenkontur erkannt werden. Hierfür kommen oftmals Schwellwertverfahren mit nachfolgender Konturextrak-

tion zum Einsatz, um die Erkennung robuster gegenüber Beleuchtungseinflüssen zu gestalten und die erforderlichen Rechenzeiten zu minimieren. Anschließend werden zu nahe beieinanderliegende Konturen sowie nicht viereckigen Polygone aussortiert, woraus ein Set von Polygonen resultiert, welches mögliche Markenkonturen enthält. Nach der Elimination möglicher räumlicher Verzerrungen mittels Homographie wird der innere Bereich der verbleibenden Konturen ausgewertet, um den darin enthaltenen Binärcode auszulesen. Je nach Typ des eingesetzten Markers kommen hier verschiedene Verfahren zum Einsatz, die auf den jeweils verwendeten Codierungstyp ausgelegt sind. [48]

Wurde ein Marker eindeutig identifiziert, kann abschließend basierend auf den bekannten intrinsischen Kameraparametern sowie der vorab spezifizierten Kantenlänge des Markers dessen räumliche Position in Relation zum Ursprung des Kamerakoordinatensystems berechnet werden [47, 49].

Visuelle Odometrie

Die visuelle Odometrie beschreibt eine Klasse von Verfahren, bei denen die relative Poseänderung eines Systems auf Basis von Kameradaten bestimmt wird. Hierbei wird aus der Verschiebung, die zwei zeitlich aufeinanderfolgende Kamerabilder zueinander aufweisen, die in diesem Zeitschritt aufgetretene Poseänderung der Kamera berechnet. Das grundlegende Vorgehen zur Ermittlung von Roboterbewegungen auf Basis der visuellen Odometrie ist in Bild 6 am Beispiel eines Stereokamerasystems dargestellt. Vorgestellt wurde das Verfahren erstmals von Nistér et al. [50].

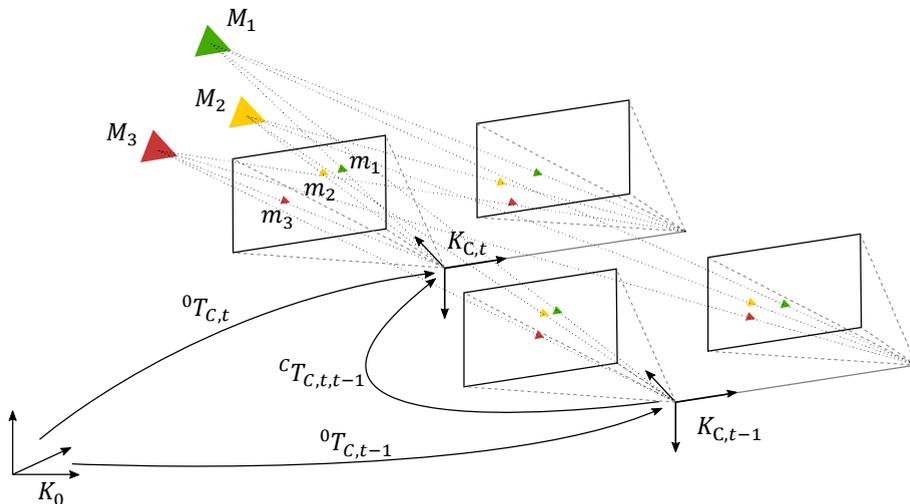


Bild 6: Grundprinzip Poseschätzung mittels visueller Odometrie am Beispiel einer Stereokamera (in Anlehnung an [51])

Als Eingangsdaten kommen in der Regel Bilder einer Mono- oder Stereokamera zum Einsatz. Zusätzlich werden die Bilder noch unter Verwendung eines geeigneten Kameramodells und der resultierenden Kameraparameter entzerrt, um die Genauigkeit der Bewegungsabschätzung zu erhöhen. Um die zwischen zwei aufeinander folgenden, zu den Zeitpunkten $t - 1$ und t aufgenommenen, Bildern erfolgte Transformation ${}^C\mathbf{T}_{C,t,t-1}$ der Kamera bestimmen zu können, werden zunächst in den einzelnen Bildern individuelle, lokal eindeutige Bildmerkmale m_i berechnet. Hierfür kommen Deskriptoren zum Einsatz, welche die zugehörigen, in der Umgebung erkannten Merkmale M_i eindeutig beschreiben.

Anschließend werden die den Bildern erkannten Merkmale einander zugeordnet, um darauf aufbauend deren Relativbewegung im Bildraum abzuleiten. Das einfachste Verfahren zur Merkmalszuordnung stellt der Vergleich aller Merkmale untereinander sowie deren paarweise Zuordnung auf Basis der besten Übereinstimmung dar. Hierbei steigt die erforderliche Rechenzeit jedoch quadratisch mit der Anzahl an zu vergleichenden Merkmalen, sodass Echtzeitanforderungen bei hohen Merkmalszahlen nicht mehr erfüllt werden können. Alternative Ansätze umfassen die Merkmalszuordnung auf Basis von geometrischen Grundbedingungen oder Epipolarlinien sowie der Einsatz von Merkmalstrackern, wie dem Kanade–Lucas–Tomasi-Verfahren [52, 53].

Im nachfolgenden Schritt, der Bewegungsschätzung, muss aus der Transformation der beiden Bilder zueinander die Poseänderung ${}^C\mathbf{T}_{C,t,t-1}$ der Kamera abgeleitet werden. Hierfür wird, unter der Voraussetzung einer statischen Umgebung, anhand der einander zugeordneten Merkmale eine relative Transformation der Kamera berechnet, welche die Merkmale der beiden Bilder ineinander überführt. Anhand der berechneten Relativbewegung lässt sich anschließend fortlaufend die Transformation ${}^0\mathbf{T}_{C,t}$ der Kamera in Bezug zu einem initialen Koordinatensystem, das bei $t = 0$ festgelegt wurde, bestimmen. Werden die geschätzten Kameraposen sowie deren geschätzte Transformation zueinander als Knoten bzw. Kanten in einen Suchbaum eingetragen, kann eine zusätzliche, parallele Optimierung durchgeführt werden, um die Güte der Poseschätzung zu verbessern. [54]

Aufbauend auf dem ursprünglichen Ansatz existieren mittlerweile zahlreiche weitere Abwandlungen und Erweiterungen. Viel beachtete und häufig eingesetzte Verfahren umfassen die Fusion von visueller mit initialer Odometrie [55] sowie den Einsatz von Methoden zur Schätzung von Struktur und Bewegung direkt aus Intensitätswerten ohne Notwendigkeit zur Merkmalsextraktion [56, 57].

Simultaneous Localization and Mapping

Beim Problem der simultanen Positionsbestimmung und Kartenerstellung (engl. simultaneous localization and mapping (SLAM)) befindet sich ein Roboter zu einem Initialisierungszeitpunkt in einer ihm unbekanntem Umgebung und erfasst während der darauffolgenden Bewegung seine Umgebung sensorisch. Basierend auf den gewonnenen Sensorinformationen wird eine Umgebungskarte erstellt, in der sich der Roboter gleichzeitig lokalisiert. Dabei sind sowohl die Sensordaten als auch die gemessene Bewegung des Roboters mit Unsicherheiten behaftet, welche in der mathematischen Modellierung des SLAM-Problems berücksichtigt werden müssen. [58, 59]

Das grundlegende Vorgehen der SLAM ist in Bild 7 dargestellt. Zum Betrachtungszeitpunkt $t - 1$ wird die Pose des Roboters durch den Zustandsvektor x_{t-1} beschrieben. Weiterhin werden die Merkmale M_1 und M_2 erfasst und deren Position wird über die zugehörigen Messung z_{t-1,m_1} und z_{t-1,m_2} bestimmt. Nach der Ausführung einer Bewegung, welche durch den Steuervektor u_t beschrieben wird, besitzt der Roboter zum Zeitpunkt t den Zustandsvektor x_t und kann die Position der Merkmale M_1 , M_3 und M_4 bestimmen.

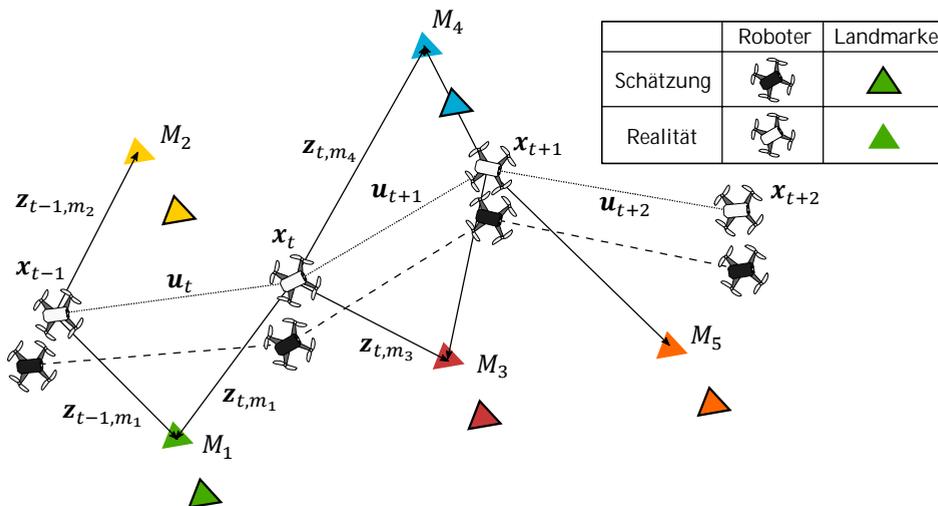


Bild 7: Schematische Darstellung der gleichzeitigen Kartierung einer unbekanntem Umgebung und Lokalisierung innerhalb dieser Karte (in Anlehnung an [58])

Dieser Prozess wiederholt sich in gleicher Weise für alle nachfolgenden Zeitschritte. Zu jedem Zeitpunkt steht somit zum einen die erfolgte Relativbewegung des Roboters gegenüber dem vorangegangenen Zeitpunkt zur

Verfügung, welche über mit Hilfe der visuellen Odometrie (oder alternativer Odometrieverfahren) ermittelt wird. Zum anderen ist jeweils eine Messung der Umgebung verfügbar, welche anhand von identifizierten Merkmalen in Relation zu vorangegangenen und nachfolgenden Umgebungsmessungen gesetzt werden kann. Somit kann anhand der gemessenen Relativbewegung und der sich in den Messungen verändernden Position der erfassten Merkmale neben der Roboterpose auch die räumliche Beziehung der Umgebungsmessungen zueinander geschätzt werden, um hierüber eine Umgebungskarte zu generieren. Dabei wird die reale Position des Roboters nie direkt gemessen, sondern stets geschätzt, während die Beobachtung der Merkmale auf der realen Pose von Roboter und Merkmalen erfolgt. Hierfür haben sich der Einsatz von erweiterten Kalmanfiltern (EKF), die Verwendung von Partikelfiltern (auch als FastSLAM bezeichnet) sowie graphenbasierte Ansätze in Verbindung mit nichtlinearen Optimierungsalgorithmen etabliert. [60]

Die ursprüngliche Lösungsvariante des SLAM-Problems basiert auf dem Einsatz eines EKF [61]. Hierfür wird der Zustandsvektor des Filters durch die aktuelle Roboterpose sowie die Positionen der erfassten Landmarken gebildet. Da hierdurch nur die aktuelle Roboterpose geschätzt wird, gilt die Methode als inkrementelles SLAM-Verfahren. Neben der Pose des Roboters wird auch die aktuelle Umgebungskarte geschätzt, was durch die Kovarianzmatrix des Filters erfolgt. In einer Teilmatrix dieser Kovarianzmatrix werden die Positionen der einzelnen Landmarken zueinander in Relation gesetzt. Ausgehend von einer festen, initialen Landmarke, die in der Regel der ersten erfassten Landmarke entspricht, entsteht somit eine relative Karte der Umgebung. [62]

Wie auch der EKF-SLAM ist der FastSLAM ebenfalls ein inkrementelles Verfahren, das jedoch durch den Einsatz eines Partikelfilters die Möglichkeit besitzt, nicht-normalverteilte Poseverteilungen sowie nichtlineare Prozesse darzustellen. Jedes Partikel repräsentiert hierbei eine konkrete Schätzung der realen Roboterpose sowie aller Landmarken. Sind ausreichend Schätzwerte bzw. Partikel verfügbar, kann hieraus die reale Roboterpose hinreichend genau geschätzt werden. [62, 60]

Im Gegensatz zu den inkrementellen Varianten werden bei den graphenbasierten Verfahren nicht nur die aktuelle Roboterpose, sondern auch alle vorherigen Posen geschätzt. Hierfür werden die Roboterposen und die erfassten Landmarken in Form von Knoten abgelegt. Die Kanten zwischen den Knoten beschreiben die räumliche Transformation zwischen den Knoten. Um das resultierende SLAM-Problem zu lösen, muss für den erstellten

Graphen die optimale Konfiguration gefunden werden, wodurch der Gesamtfehler über alle geschätzten Elemente minimal wird. Es entsteht somit ein Minimierungsproblem, das nach der Methode der kleinsten Quadrate gelöst wird. [62]

2.2.2 Technologien und Methoden zur zwei- und dreidimensionalen Umgebungsrepräsentation

Um einem Robotersystem die kollisionsfreie Navigation zu ermöglichen, sind neben dessen Pose zusätzliche Informationen über den Arbeitsraum und die darin befindlichen Hindernisse erforderlich. Diese Information wird in Form von Karten dargestellt. In ihrer allgemeinen Form repräsentiert eine Karte eine Menge von Objekten, die jeweils über eine Funktion einem Teilbereich des von der Karte abgebildeten Raums zugeordnet werden. [63]

Zur effizienten Modellierung und Darstellung der Umgebung eines Roboters haben sich verschiedene Kartentypen etabliert. Die genaue Ausprägung der Objekte, die Art der Zuordnungsfunktion und die Form des Raumbereichs, auf den die Objekte abgebildet werden, sind dabei vom jeweiligen Kartentyp abhängig. Unterschieden werden dabei zum einen der Kartentyp sowie zum anderen die Art der in der Karte dargestellten Merkmale. Die nachfolgende Unterteilung der Karten und darin enthaltenen Merkmale folgt der Darstellung von Hertzberg et al [62].

Sensorische Merkmale

Die einfachste Form, um Merkmale in Karten abzubilden, ist die direkte Verwendung der erfassten Sensordaten (z.B. Abstandsmesswerte, Farbinformationen etc.). Die verfügbaren Daten werden ohne zusätzliche Nachbereitung und Interpretation in der Karte eingetragen.[62]

Syntaktische Merkmale

Bei syntaktischen Merkmalen handelt es sich um aufbereitete Sensordaten, aus denen die zum Aufbau der Karte erforderlichen Informationen extrahiert wurden. Im Kontext der Roboternavigation handelt es sich bei diesen Merkmalen oftmals um geometrische Strukturen wie Linien oder Flächen. Jedoch sind syntaktische Merkmale nicht auf geometrische Strukturen limitiert.[62]

Semantische Merkmale

Die Grundlagen der Kartierung anhand semantischer Merkmale gehen auf Kuipers zurück, der mit seinen Arbeiten die Basis für moderne semantische Karten geschaffen hat [64, 65]. In Karten mit semantischen Merkmalen sind einige oder alle Objekte definierten Klassen zugeordnet, sodass neben der geometrischen Information auch bekannt ist, welches Objekt sich an einer bestimmten Position im Raum befindet. Diese Objekte können weiterhin mit Attributen beschrieben sein, sodass ein höherwertiges Wissen der Umgebung verfügbar wird, das eine direkte Interpretation der Umgebung ermöglicht. Karten mit semantischen Merkmalen ermöglichen somit die Darstellung der Umgebung in einer Form, wie sie auch von Menschen interpretiert werden würde. [66, 67]

Metrische Karten

Metrische Karten beschreiben eine Umgebung auf Basis geometrischer Beziehungen zwischen einzelnen Merkmalen. Hierfür wird die räumliche Pose der Merkmale in einem gemeinsamen Bezugssystem angegeben. Die in den Karten enthaltenen Merkmale können dabei einzelne Punkte im Raum (beispielsweise die Messdaten einer 3D-Kamera) oder auch abstrahierte geometrische Merkmale wie Linien, Flächen oder Würfel sein. Die Grundvarianten der metrischen Karten sind in Bild 8 dargestellt. Bei metrisch kontinuierlichen Karten werden die Merkmale mit ihren jeweiligen Koordinaten verknüpft und in einer kontinuierlichen Form abgebildet. Werden die erfassten Merkmale hingegen diskretisiert, um in einer vorab festgelegten Gitterstruktur die von ihnen ausgefüllten Zellen zu beschreiben, spricht man hingegen von metrisch diskreten Karten. [62, 68]

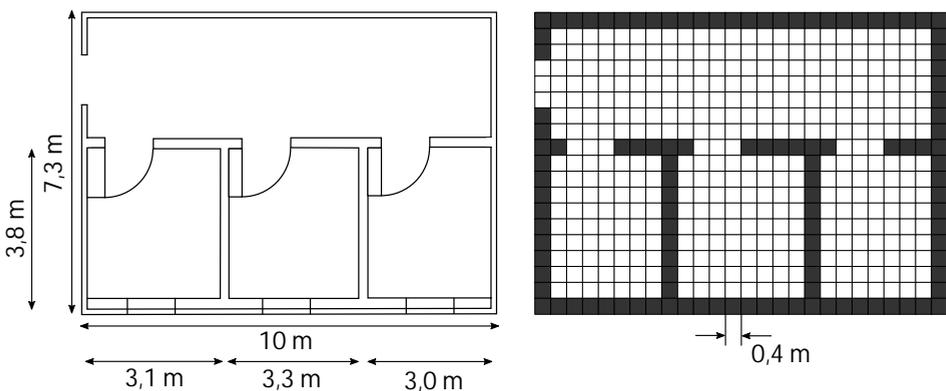


Bild 8: Darstellung einer aus syntaktischen Merkmalen (Linien) bestehenden metrisch kontinuierlichen Karte (links) sowie der abgeleiteten metrisch diskreten Karte (rechts)

Um den betrachteten Raum in geeigneter Weise zu untergliedern, kommen insbesondere Gitter- und Würfelstrukturen zum Einsatz. Zur Darstellung von zweidimensionalen Umgebungen werden häufig Rasterkarten eingesetzt, bei denen für jede Zelle eines gleichmäßigen Rasters die Wahrscheinlichkeit, dass sich in einer Zelle ein Hindernis befindet, in einem Wertebereich von 0 bis 1 angegeben wird. [69]

Analog kommen für den dreidimensionalen Raum oftmals sogenannte Octrees zum Einsatz, welche den Raum in diskrete Würfel unterteilen. Ein Octree stellt basierend auf der Graphentheorie einen gewurzelten Baum dar, bei dem alle Knoten genau acht oder keine Nachfolger besitzen. Entsprechend Bild 9 repräsentiert dabei jeder Knoten ein würfelförmiges Raumsegment mit definierter Kantenlänge. Mit jedem Set von Nachfolgern erhöht sich dabei die Auflösung und somit die Detailtreue der räumlichen Darstellung [70].

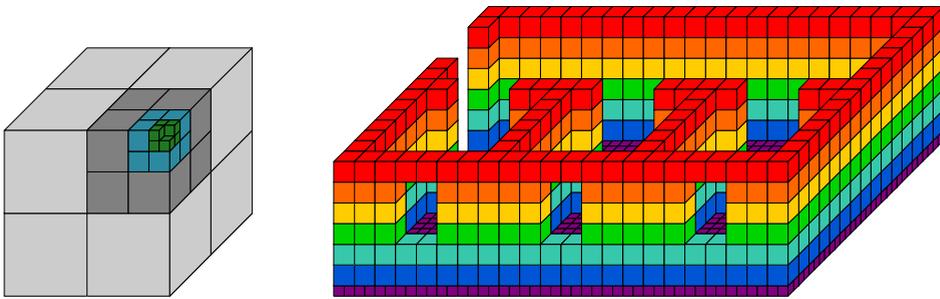


Bild 9: Strukturelle Darstellung eines Octrees zur Repräsentation von Raumsegmenten (links) sowie metrische diskrete dreidimensionale Karte (rechts)

Auf Octrees basierende Umgebungskarten ermöglichen es, dreidimensionale Umgebungen in Form von diskreten Oktanten zu modellieren, wobei in jedem Oktanten hinterlegt ist, ob es sich um ein belegtes oder freies Raumsegment handelt oder keine Informationen über das Segment verfügbar sind. Hierdurch wird es weiterhin möglich, Karten auf Basis von Sensorinformationen oder neuen Vermessungsdaten schnell zu aktualisieren, verschiedene Auflösungen abzubilden sowie den Belegungszustand der individuellen Oktanten mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen abzubilden. [71, 72]

Topologische Karten

Im Gegensatz zu metrischen Karten werden bei topologischen Karten nicht die geometrischen Relationen der Merkmale zueinander abgebildet, sondern die Beziehungen der Merkmale untereinander. Topologische Karten bestehen daher aus einem Graphen, in dem Merkmale wie Landmarken,

Orte oder Sensormesswerte in Form von Knoten gespeichert werden. Die Kanten zwischen den einzelnen Knoten enthalten Informationen darüber, in welcher Beziehung die einzelnen Knoten zueinanderstehen. Die Kanten können dabei z.B. metrische Entfernungswerte, aber auch Informationen zur Erreichbarkeit eines Ortes von einem anderen sein. Eine mögliche Ausführung einer topologischen Karte ist in Bild 10 dargestellt. [62]

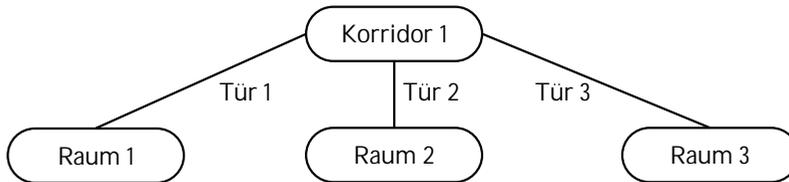


Bild 10: Topologische Abbildung der Beziehung und Erreichbarkeit mehrerer Räume

Hybridkarten

Da die vorab beschriebenen Kartentypen jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben, existiert eine Vielzahl von Ansätzen, um mehrere Kartentypen in Form von Hybridkarten zu fusionieren. Ziel dabei ist, eine möglichst optimale Umgebungsdarstellung zu erreichen, die auf das jeweilige Einsatzszenario zugeschnitten ist und die entscheidenden Nachteile einzelner Kartentypen aufhebt [63]. Wie im nachfolgenden Bild 11 dargestellt, können hybride Karten beispielsweise topologische und metrische Karten sowie unterschiedliche semantische Merkmale umfassen.

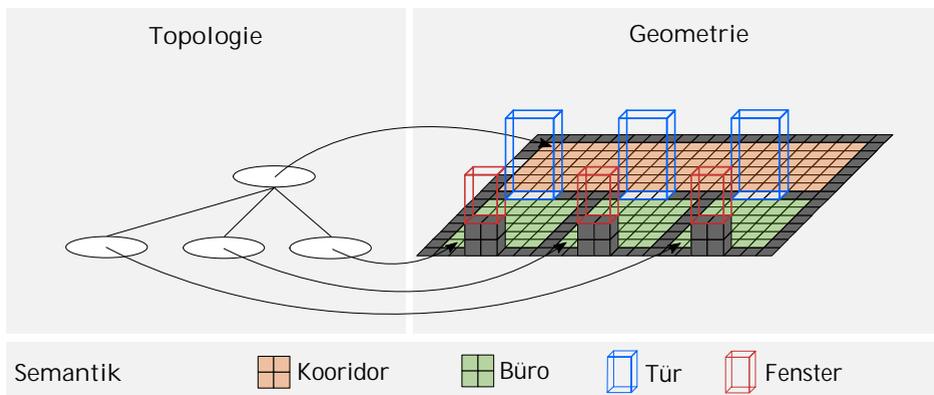


Bild 11: Aufbau einer Hybridkarte durch Verknüpfung von einer topologischen Karte, einer metrischen Karte sowie mit semantischen Merkmalen

Wie in [73] und [74] gezeigt, können hybride Karten die präzise Navigation in komplexen, dynamisch veränderlichen Umgebungen ermöglichen und die Schwächen einzelner Kartentypen kompensieren.

2.2.3 Etablierte dreidimensionale Pfadplanungsverfahren

Sobald Position und Umgebung eines Systems bekannt sind, stellt der letzte Schritt der Navigation die Berechnung eines kollisionsfreien und unter vorgegebenen Anforderungen optimalen Pfades zwischen aktueller Position und Zielpunkt dar. Auf Grund ihres dreidimensionalen Bewegungsfreiraums kommen zur Bewegungsplanung von AFR oftmals 3D-Pfadplanungsalgorithmen zum Einsatz. Nach Yang et al. [75] lassen sich 3D-Pfadplanungsverfahren in die vier in Bild 12 dargestellten elementaren Kategorien unterteilen, die im Folgenden näher erläutert werden.

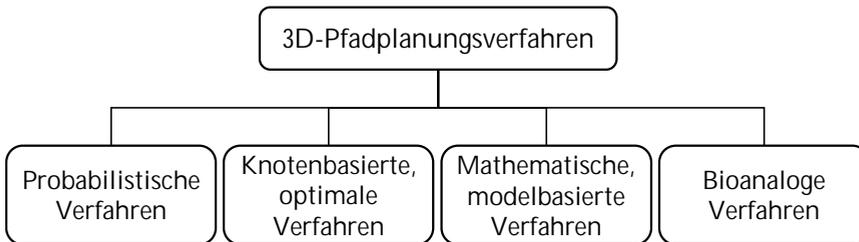


Bild 12: Klassifizierung der zur dreidimensionalen Pfadplanung etablierten Algorithmen (in Anlehnung an [75])

Hierfür werden vorab noch die Begriffe des Arbeits- und Konfigurationsraums definiert. Der Arbeitsraum bezeichnet allgemein die Einsatzumgebung eines Roboters und beschreibt deren Geometrie, beispielsweise in kartesischen Koordinaten. Die Pfadplanung eines Roboters erfolgt innerhalb des Konfigurationsraums, der alle möglichen Konfigurationen des Roboters beschreibt. Der Konfigurationsraum ist für jeden Roboter spezifisch und kann im Fall eines Knickarmroboters beispielsweise die Menge aller zulässigen Gelenkwinkel darstellen. Der zugehörige freie Konfigurationsraum bezeichnet dementsprechend alle Konfigurationen, die ein Roboter einnehmen kann, ohne dabei mit einem physikalischen Hindernis des Arbeitsraums zu kollidieren. [62, 76]

Probabilistische Pfadplanungsalgorithmen

Ausgangsbasis probabilistischer Algorithmen ist eine mathematische Beschreibung der Umgebung, in welcher zufallsbasiert kollisionsfreie Konfigurationen des Roboters platziert werden. Anhand der platzierten Konfigurationen erfolgt anschließend eine Pfadsuche zum Zielpunkt. Weiter untergliedert werden die probabilistischen Pfadplanungsalgorithmen in Algorithmen, die für jede Anfrage einen neuen Suchbaum generieren (Sin-

gle-Query-Verfahren) sowie Varianten, die zunächst eine Landkarte erstellen, die für alle folgenden Suchanfragen verwendet wird (Multi-Query-Verfahren). [76]

Einen in der Robotik häufig eingesetzter Vertreter der Single-Query-Verfahren stellt der Rapidly-exploring Random Tree (RRT) Algorithmus und dessen Abwandlungen dar. Der RRT-Algorithmus eignet sich dabei sowohl für holonome als auch nicht-holonome Robotersysteme und lässt sich auch auf Systeme mit mehreren Freiheitsgraden anwenden [77]. Das grundlegende Vorgehen bei der Pfadplanung mit RRT-Algorithmen ist in Bild 13 dargestellt.

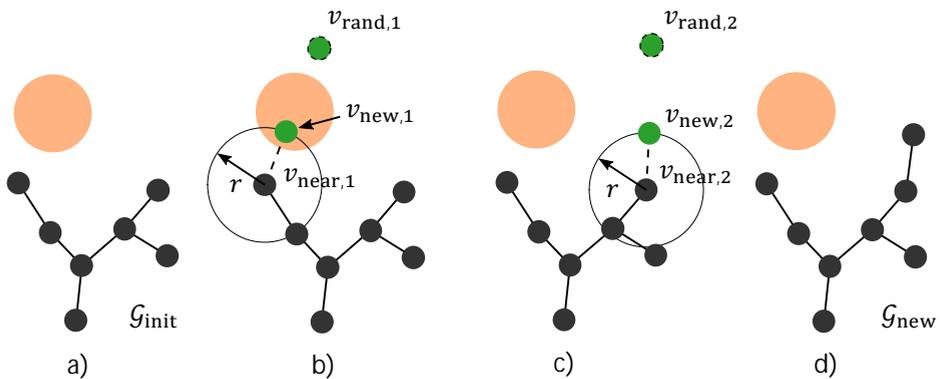


Bild 13: Vorgehen bei der Pfadplanung mit dem RRT-Algorithmus. Ausgehend von der bestehenden Baumstruktur (a) wird ein neuer Knoten an einer zufälligen Position eingefügt (b). Der Vorgang wird wiederholt, bis der eingefügte Knoten die gegebenen Kriterien erfüllt (c) und mit dem Baum verbunden werden kann (d). (Darstellung in Anlehnung an [75])

Ausgehend von einem Startknoten oder bestehenden Baum \mathcal{G}_{init} wird an einer zufälligen Position im Konfigurationsraum ein neuer Knoten $v_{rand,1}$ angelegt. Um $v_{rand,1}$ mit dem bestehenden Baum \mathcal{G}_{init} zu verknüpfen, wird unter Berücksichtigung einer vorab definierten Metrik (z.B. der euklidischen Distanz) der Baumknoten $v_{near,1}$ gesucht, der den kostenminimalsten Übergang zum neu platzierten Knoten aufweist. Überschreitet nach der Suche die Distanz zwischen $v_{rand,1}$ und dessen nächstem Nachbar $v_{near,1}$ einen vorab definierten Grenzwert r , wird $v_{rand,1}$ soweit an $v_{near,1}$ herangerückt, dass die Kosten gerade diesem Grenzwert entsprechen. Hieraus resultiert der Knoten $v_{new,1}$.

Liegt $v_{new,1}$ nach der Verrückung in einem Hindernis oder schneidet die direkte Verbindungslinie zwischen $v_{new,1}$ und $v_{near,1}$ ein Hindernis, wird $v_{new,1}$ verworfen und der Prozess mit einem neuen, zufällig platzierten

Knoten $v_{\text{rand},2}$ wiederholt. Ist in diesem Fall, wie in Bild 13(c) exemplarisch dargestellt, die Position des neuen Knoten $v_{\text{new},2}$ gültig, wird dieser als neuer Nachbar des zugehörigen Knotens $v_{\text{near},2}$ in den Baum aufgenommen (vgl. Bild 13 (d)) und der Prozess wiederholt. Die Pfadsuche ist abgeschlossen, sobald ein gültiger Knoten $v_{\text{new},i}$ der Zielposition entspricht bzw. sich hinreichend nah an dieser befindet. [78]

Neben der ursprünglichen Beschreibung des RRT-Algorithmus existieren verschiedene Varianten und Verbesserungen. Bekannte Vertreter sind dabei der RRT*-Algorithmus [79], der gegen eine optimale Lösung konvergiert, sowie der Dynamic Domain RRT-Algorithmus [80]. Bei dieser Variante wird in Regionen, in die der Baum nicht weiter kollisionsfrei wachsen kann, die Häufigkeit der zufälligen Knotenplatzierung reduziert.

Dem gegenüber stehen die Multi-Query-Verfahren, dessen bekannteste Vertreter der Probabilistic Roadmap (PRM) Algorithmus sowie darauf aufbauende Abwandlungen darstellen. Im Gegensatz zum RRT-Algorithmus werden beim PRM-Verfahren in einer Lernphase eine definierte Anzahl von kollisionsfreien Konfigurationen an zufälligen Positionen im Konfigurationsraum platziert. Dabei wird jede erfolgreich platzierte Konfiguration mit allen Nachbarn verbunden, die sich näher als eine definierte Distanz befinden und kollisionsfrei durch eine geradlinige Verbindung erreicht werden können. In der nachfolgenden Planungsphase wird basierend auf dem entstandenen Suchbaum mit Hilfe eines knotenbasierten Pfadplanungsalgorithmus der optimale Weg vom Start- zum Zielpunkt gesucht. [81]

Knotenbasierte, optimale Pfadplanungsalgorithmen

Zur Anwendung von knotenbasierten, optimalen Pfadplanungsalgorithmen wird ein kantengewichteter Suchgraph benötigt, der die Umgebung in abstrakter Form modelliert. Der Graph muss vorab erstellt werden und die für den Algorithmus erforderlichen Umgebungsinformationen (z.B. Distanz zwischen zwei Knoten) enthalten. Entsprechend ihrer Bezeichnung finden die zugeordneten Algorithmen stets die optimale Lösung des zugrundeliegenden Pfadplanungsproblems. Zu den am weitesten verbreiteten Algorithmen dieser Kategorie zählen neben dem Dijkstra-Algorithmus der A*- bzw. D*-Algorithmus. [75]

Bild 14 zeigt das grundlegende Vorgehen bei der knotenbasierten Pfadplanung sowie den zugehörigen Planungsgraphen. Ausgehend von einer Startposition und einem Graphen, welcher die Umgebung in geeigneter Weise abstrahiert, wird dabei der kostenoptimale Weg zur vorgegebenen Zielpo-

sition gefunden. Erforderlich ist hierbei eine geeignete, diskretisierte Darstellung des Umgebungsraumes als kantengewichteter Graph, in welchem jede diskrete Konfiguration als Knoten abgebildet ist. Die Kanten zwischen benachbarten Knoten geben dabei jeweils die anfallenden Kosten (z.B. Entfernung, Zeit, Energieverbrauch etc.) an, die beim Übergang zwischen den beiden Knoten erfolgen. Dabei können sowohl gerichtete als auch ungerichtete Graphen zur Modellierung zum Einsatz kommen. [82]

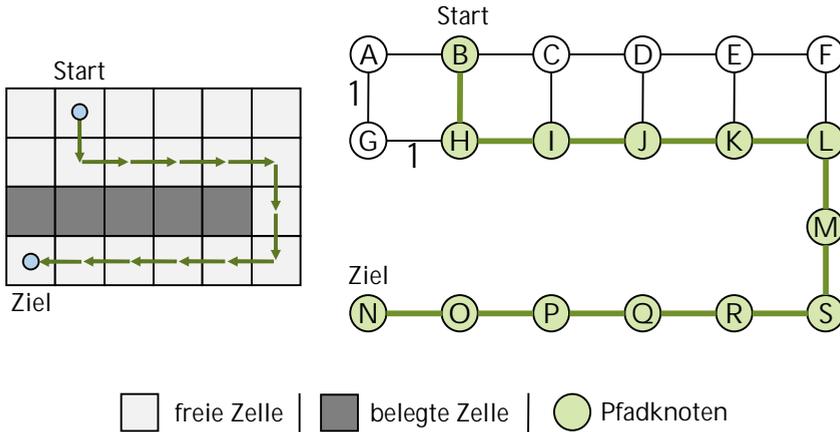


Bild 14: Darstellung einer metrisch diskreten Kostenkarte mit Start- und Zielposition (links) sowie des zugehörigen Graphen und des Vorgehens zur Pfadplanung

Zur Ermittlung des kostenoptimalen Pfads existieren zahlreiche Algorithmen mit spezifischen Eigenschaften. Der Dijkstra-Algorithmus berechnet ausgehend vom Startknoten den kostenminimalen Pfad zu einem oder mehreren Zielknoten. Hierfür wird ausgehend vom Startpunkt der Pfad stets in Richtung desjenigen Knotens v expandiert, der zum Zeitpunkt der Expansion die geringsten Gesamtkosten $g(v)$ erwarten lässt. [82]

Der A*-Algorithmus ist ein vollständiger, optimaler und informierter Suchalgorithmus und stellt hierdurch eine Erweiterung des Dijkstra-Algorithmus dar. Ergänzt wird hierbei eine zusätzliche Heuristikfunktion $h(v)$, welche die geschätzten Kosten vom aktuellen Punkt zum Zielpunkt abbildet. Solange die verwendete Heuristikfunktion $h(v)$ die tatsächlichen Kosten nicht überschätzt, expandiert die Suche zielgerichtet, wodurch das Ziel schneller gefunden werden kann. [83]

Die Gesamtkostenfunktion $f(v)$ ergibt sich somit erweiternd zum Dijkstra-Algorithmus zu

$$f(v) = g(v) + h(v). \quad (2.3)$$

Eine Erweiterung der vorab besprochenen Verfahren stellt der D*-Algorithmus dar. Dieser ist im Gegensatz zu Dijkstra- und A*-Algorithmus ebenfalls in der Lage, auf dynamische Änderungen der Umgebung, und damit auch des Graphen, zu reagieren. Basierend auf eingespeisten Sensorinformationen bzw. Umgebungsänderungen werden die Kantengewichte neu berechnet, um einen zeitlich veränderlichen Graph zu generieren, auf dessen Basis der kürzeste, nicht blockierte Weg zum Zielpunkt bestimmt wird. [84, 85]

Mathematische, modellbasierte Pfadplanungsalgorithmen

Grundlage der mathematischen, modellbasierten Algorithmen ist ein geeignetes Modell, in dem die Umgebung in Form von kinematischen Bedingungen sowie das Robotersystem in Form von dynamischen Bedingungen abgebildet sind. Über die Optimierung einer Kostenfunktion, in der die hinterlegten Bedingungen als (Un-)Gleichungen enthalten sind, wird anschließend der unter diesen Bedingungen optimale Pfad berechnet. Hierdurch können sowohl die Umgebung als auch der Roboter selbst als zeit- und ortsvariantes System modelliert und dynamische Umgebungen in der Pfadplanung direkt berücksichtigt werden. Jedoch müssen hierfür ausreichend Informationen über die Umgebung und den Roboter verfügbar sein, um beide Systeme hinreichend genau mathematisch beschreiben zu können. [86–88]

Bioanaloge Pfadplanungsalgorithmen

Entsprechend ihrer Benennung orientiert sich dieser Typ von Pfadplanungsalgorithmen an biologischen Vorbildern. Dabei werden im Gegensatz zu den vorab beschriebenen Algorithmen keine Karten oder Modelle der Umgebung als Grundlage der Pfadberechnung verwendet. Stattdessen erfolgt die Pfadplanung mittels evolutionärer Algorithmen sowie durch den Einsatz von neuronalen Netzen. [89, 90]

Gegenüber mathematischen, modellbasierten Algorithmen, die in hochkomplexen Umgebungen, deren Modell eine Vielzahl an Variablen oder Zielfunktionen erfordert, oftmals keine Lösung finden, können bioanaloge Algorithmen hier einen Vorteil bieten. [75]

2.3 Zusammenfassung und Bewertung

UA und insbesondere Multikopter haben sich bereits in zahlreichen kommerziellen Anwendungen etabliert. Dies ist neben ihrem dreidimensionalen Bewegungsraum und ihrer Flexibilität auch auf den einfachen Aufbau

und das hohe Automatisierungspotential beim Einsatz von UA zurückzuführen. Entscheidend ist stets, dass durch den Einsatz von UA entweder neue Verfahren und Lösungen ermöglicht werden oder ein entsprechender Zeit- bzw. Kostenvorteil gegenüber den bestehenden Prozessen entsteht.

Insbesondere zur Erzielung von Zeit- und Kostenvorteilen ist eine manuelle Operation des UA oftmals nicht zielführend, weshalb eine Entwicklung der UA hin zu AFR erforderlich ist, welche durch den signifikant erhöhten Grad an Autonomie vorgegebene Aufgaben selbstständig durchführen können. Entscheidend hierfür ist eine robuste Navigation, für deren Teilbereiche Lokalisierung, Umgebungsrepräsentation und Pfadplanung bereits zahlreiche leistungsstarke Verfahren und Algorithmen existieren, welche auch für die Realisierung von AFRS geeignet sind. Die breite Verfügbarkeit von miniaturisierten Sensoren ermöglicht dabei die Ausstattung von AFR mit geeigneten Sensoren zur Umgebungserfassung, ohne dass die verfügbare Nutzlast und Flugzeit hierdurch entscheidend reduziert wird. Weiterhin können durch die zunehmende Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit miniaturisierter Rechnersysteme viele Algorithmen dabei auch mit den notwendigen Echtzeitanforderungen direkt auf dem AFR ausgeführt werden.

Um beurteilen zu können, welche der verfügbaren Lösungen zur Navigation von AFR im Produktions- und Logistikumfeld geeignet sind und welche Weiterentwicklungen in diesem Bereich sowie bei der Multikoptertechnik notwendig sind, werden im nachfolgenden Kapitel die zugehörigen Anforderungen sowie der Stand der Technik und Forschung bei der Realisierung von AFRS herausgearbeitet.

3 Ausgangssituation und Anforderungen an den industriellen Innenraumeinsatz von Flugrobotersystemen

Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, bieten sich für AFRS im industriellen Umfeld zahlreiche Einsatzmöglichkeiten. Jedoch gilt für den aktuellen Stand der Technik und Forschung im Bereich der AFRS, dass dieser im Kontext des industriellen Einsatzes, insbesondere innerhalb von Industriegebäuden, signifikante Defizite aufweist. Diese Defizite stellen die primären Hindernisgründe für den Einsatz von AFRS innerhalb von Werks- und Logistikhallen dar und sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit adressiert werden.

Im Folgenden werden hierfür zunächst die relevanten Anforderungen an ein auf den Innenraumeinsatz ausgelegtes AFRS spezifiziert. Anschließend werden die in diesem Zusammenhang bestehenden Defizite des aktuellen Stands der Technik und Forschung herausgearbeitet und abschließend wird darauf aufbauend der Handlungsbedarf abgeleitet.

3.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen für den industriellen Innenraumeinsatz von AFRS

Bevor die Anforderungen und Rahmenbedingungen für den Einsatz von AFRS im Produktions- und Logistikumfeld abgeleitet werden können, wird ein Blick auf bestehende und zukünftige Einsatzbereiche von AFRS in diesem Kontext geworfen. Das größte Potential für den Einsatz von AFRS innerhalb von Werks- und Logistikhallen besteht dabei für Inventurprozesse in Regal- oder Blocklagern, zur Suche und Lokalisierung von benötigten Bauteilen, zur Inspektion und Überwachung von Produktionsanlagen und Infrastruktur, zur Vermessung von Fabrikhallen sowie zum Transport von Gütern im Bereich der Intralogistik. Alle genannten Bereiche profitieren von der dreidimensionalen Bewegungsmöglichkeit und der flexiblen Einsetzbarkeit von AFR, um Aufgaben zu beschleunigen, die andernfalls von Personen durchgeführt werden. Aufgrund der limitierten Traglast und Flugzeit von AFR kommen sie derzeit ausschließlich für den Transport von leichten und kleinen Teilen in Betracht. Im Bereich der Ersatzteilversorgung in der Automobilproduktion können sie hierbei jedoch eine Reduktion der Transportzeiten von bis zu 75 % ermöglichen. [7]

Auch die Durchführung von Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben mit AFRS ist möglich, beispielsweise im Bereich der Trennmittelapplikation in großen Presswerken, bei der Dichtigkeitsprüfung von Rohrleitungen oder der Überprüfung von Rauchmeldern. Da bei Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten oftmals ein direkter Kontakt zwischen AFR und Umgebung erfolgen muss, sind die Sicherheitsanforderungen in diesem Bereich nochmals verschärft. Um AFRS innerhalb von Werks- und Logistikhallen für die aufgeführten Anwendungen sinnvoll einsetzen zu können, müssen daher mehrere grundlegende Anforderungen berücksichtigt werden.

Die Platzverhältnisse sind im betrachteten Umfeld gegenüber dem Außenbereich deutlich beengter, daher muss sichergestellt sein, dass die AFR kollisionsfrei durch komplexe Umgebungen navigieren können und dabei in der Lage sind, Hindernisse selbstständig zu erfassen. Zudem müssen auch bei der Routenplanung die limitierten Platzverhältnisse berücksichtigt werden, sodass die AFR einerseits auf dem möglichst direkten Weg zum Zielpunkt fliegen und dabei ausreichend Abstand zu Umgebung, weiteren AFR und Personen einhalten. Andererseits soll der verfügbare Raumbereich optimal genutzt werden, um Verzögerungen zu vermeiden.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der Einsatz von AFRS sein volles wirtschaftliches Potential oftmals nur dann entfalten kann, wenn der Betrieb vollautomatisiert und ohne manuelle Eingriffe erfolgen kann [91]. Somit ist es erforderlich, dass das AFRS über einen ausreichend hohen Grad an Autonomie verfügt und alle notwendigen Bestandteile und Prozessschritte in geeigneter Weise automatisiert werden können. Um die geforderte Autonomie zu erreichen, müssen sowohl die AFR mit der notwendigen Hard- und Software ausgestattet sein, als auch Lade- sowie Lastübergabevorgänge automatisiert erfolgen. Dies setzt voraus, dass Lade-, Service- sowie Warenübergabestationen im System mit abgebildet sind und verwaltet werden und gleichzeitig die AFR auch mit entsprechenden Fähigkeiten und Schnittstellen ausgestattet sind, um an diesen Stationen selbstständig anzudocken oder Transportgüter aufzunehmen.

Weiterhin muss beim Einsatz von AFRS innerhalb von Industriehallen berücksichtigt werden, dass der Einsatz der AFR im direkten Umfeld des Werkers erfolgen kann, wodurch umfassende Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen sind, um eine Personengefährdung auszuschließen. Hierzu zählt zum einen die redundante Ausführung der für den Flug essentiellen Systemkomponenten des AFR sowie eine kontinuierliche Fehlerdetektion und Überwachung der Betriebsfähigkeit des AFR. Weiterhin muss der AFR in

der Lage sein, Personen in seinem Umfeld wahrzunehmen und sein Flugverhalten situationsabhängig anzupassen.

Zusammenfassend ergeben sich somit die nachfolgenden zentralen Anforderungen, die bei der Realisierung eines AFRS für den Einsatz innerhalb von Werks- und Logistikhallen berücksichtigt werden sollen:

1. Standardisierte, modulare Systemarchitektur zum vollautomatisierten, wartungsarmen Betrieb einer heterogenen Flotte von Flugrobotern
2. Ausreichend hoher Autonomiegrad der AFR, um eine vollautomatisierte Bearbeitung der übergebenen Aufgaben zu ermöglichen
3. Einbeziehung der notwendigen Infrastruktursysteme, um eine Automatisierung von Lade-, Service- oder Warenübergabevorgängen zu ermöglichen
4. Zuverlässige und robuste Routenplanung unter Berücksichtigung der Anforderungen von Flugrobotern und industriellen Indoor-Umgebungen
5. Gewährleistung der Personensicherheit in allen Betriebsphasen durch redundante Auslegung aller benötigten Systemkomponenten, systematische Fehlerdetektion und Definition von Notfallroutinen
6. Minimierung der durch AFR hervorgerufenen Stressbelastung von Personen mittels sensorischer Umfeldüberwachung und einem an das Verhalten der detektierten Personen angepassten Flugverhalten

Werden diese Aspekte berücksichtigt, lassen sich zukünftig AFRS als fester Bestandteil in Produktions- und Logistikumgebungen integrieren. Die einzelnen AFR können dabei mit verschiedenen Funktionsmodulen wie Sensoren zur Umgebungserfassung, geeigneten Lastaufnahmen oder auch Systemen zur Umgebungsinteraktion ausgestattet sein. Entsprechend ihrer Fähigkeiten sind die einzelnen AFR in der Lage, eintreffende Aufträge selbstständig und vollautomatisiert durchzuführen und dabei autonom und kollisionsfrei zu navigieren.

Neben den genannten, technisch bislang noch nicht ausreichend adressierten Anforderungen, müssen zahlreiche weitere Aspekte wie die Funkgeräterichtlinie oder die Niederspannungsrichtlinie berücksichtigt werden. Hierfür existieren bereits klare Vorgaben, Richtlinien und Normen, die in der Publikation [P1] aufbereitet sind.

3.2 Identifizierung bestehender industrieller Bedarfe im Hinblick auf den Flugrobotereinsatz

Nachdem im vorhergegangenen Abschnitt die für den Einsatz von AFR zu berücksichtigenden Anforderungen und Rahmenbedingungen herausgearbeitet wurden, werden vor der fundierten Darstellung des zugehörigen Stands der Technik und Forschung noch die bestehenden Bedarfe aus dem Bereich der späteren industriellen Anwender von AFRS dargestellt.

Zur Ermittlung der Bedeutung von Drohnentechnologien für die deutsche Industrie und der hier bestehenden Bedarfe und Anforderungen wurde gemeinsam mit dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. eine Umfrage durchgeführt. Für die Studie wurden 125 Unternehmen aus dem deutschsprachigen Raum befragt. Dabei bestand bei einigen Fragen die Möglichkeit, mehrere Antworten zu wählen sowie Fragen zu überspringen, weshalb im Folgenden stets die absoluten Zahlen genannt werden. Die detaillierten Ergebnisse sind in [P2] publiziert, die Kernaussagen der Studie werden im Folgenden vorgestellt. Da in der Studie die Systeme und Anwendungen nicht nach ihrem Autonomiegrad unterschieden wurden, gelten diese sowohl für UAS als auch AFRS.

Basierend auf den Studienergebnissen haben Drohnentechnologien besonderes Potential im Bereich der Inspektion (genannt von 29 der befragten Unternehmen), der Vermessung (22) sowie bei der Durchführung von autonomen Inventurprozessen (21). Auch dem Materialtransport mit UA wird noch von 15 der Befragten zukünftige Bedeutung beigemessen.

Auf die Frage, welche zukünftigen Drohnenapplikationen im Unternehmen geplant sind, gaben 42 der befragten Unternehmen an, derzeit keinen Einsatz von UAS zu planen. Dem gegenüber stehen 34 Unternehmen, welche den Einsatz von UAS zur Inspektion verfolgen, 17 Unternehmen, die autonome Inventurprozesse mit UA umsetzen möchten und 21 Unternehmen, die den Einsatz von UAS für den Materialtransport verfolgen.

Als Effekte, die der Einsatz von UAS bewirkt, werden von den Befragten insbesondere eine Kostenreduktion (50), die Substitution von manuellen Prozessen (43) sowie der damit verbundene Informationsgewinn (41) und Technologievorsprung (37) aufgeführt.

Obwohl aus der Umfrage erkennbar ist, welche Rolle UA für die Industrie spielen und viele Unternehmen bereits den Einsatz von UA in Betracht ziehen, ist der Fortschritt bei der konkreten Umsetzung von Drohnenanwendungen bislang nur sehr gering. Lediglich sechs Unternehmen geben an, bereits UAS im Realbetrieb zu verwenden, drei weitere betrieben UAS im

Pilotbetrieb und zehn Unternehmen arbeiten an einer ersten, prototypischen Umsetzung einer Drohnenanwendung.

Die starke Diskrepanz zwischen dem geplanten Einsatz von UAS und den tatsächlich erfolgten Umsetzungen wird dabei mit dem derzeit noch fehlenden wirtschaftlichen Vorteil beim Einsatz von UAS (38), fehlenden etablierten Anwendungsbereichen und Best-Practice-Beispielen (38) sowie der unklaren rechtlichen Lage (31) und Arbeitsschutzgründen (14) begründet. Auch fehlende Informationen über die Technologie von UAS (29) sowie fehlende oder unausgereifte Technologien (17) werden als Hindernisgründe angeführt.

Die durchgeführte Umfrage legt somit dar, dass ein signifikanter Anteil der Befragten im Einsatz von UAS bereits entscheidende Vorteile für das eigene Unternehmen sieht und auch den zukünftigen Einsatz von UAS plant. Es zeigt sich jedoch auch, dass neben wirtschaftlichen und rechtlichen Aspekten insbesondere fehlende technologische Lösungen sowie fehlendes technologischen Wissen die primären Hindernisgründe für den industriellen Einsatz von UAS sind. Zudem verdeutlicht das Stimmungsbild unter den Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, dass die bestehenden Flugrobotersysteme den umfassenden Anforderungen, die für einen Einsatz von UAS notwendig sind, nur teilweise gerecht werden. Im Folgenden wird daher zunächst der zugehörige Stand der Technik und Forschung aus dem Bereich der AFRS analysiert, um anschließend gezielt den zur Adressierung der bestehenden Defizite notwendigen Handlungsbedarf abzuleiten.

3.3 Aktuelle Entwicklungen und Forschungsansätze zur Realisierung autonomer Flugrobotersysteme

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, sind bereits verschiedene UAS für den kommerziellen und industriellen Einsatz verfügbar. In der Regel kommen neben dem UA auch geeignete Fernsteuerungen, eine Bodenstation zur Überwachung des Flugstatus sowie verschiedene Peripheriegeräte zur Realisierung der benötigten Funktionalitäten zum Einsatz.

Weiterhin bestehen verschiedene Lösungsansätze, um UAS sowie heterogene Flotten von UA zu realisieren. Die aktuell verfügbaren Lösungen zur Realisierung von industriellen UAS sowie AFRS lassen sich dabei in bereits kommerziell verfügbare Systeme sowie Forschungsarbeiten unterteilen und werden im Folgenden dargestellt und anschließend in Bezug auf die vorab spezifizierten Anforderungen bewertet.

3.3.1 Kommerziell verfügbare Systeme

Kommerzielle Systeme zur Realisierung eines AFRS gemäß der Anforderungen in Abschnitt 3.1 sind derzeit nicht verfügbar. Aktuelle Systeme fokussieren sich primär auf die Verwaltung einer heterogenen Flotte von UA, die statische Missions- und Routenplanung, die Überwachung der einzelnen UA sowie die Auswertung von rückgemeldeten Statusinformationen.

Lösungen wie der FlightHub von DJI [92], das Leitsystem der HHLA Sky GmbH [93] oder die Softwareangebote von DroneDeploy, Inc [94] bzw. Kittyhawk.io, Inc. [95] zielen darauf ab, die Verwaltung sowie den Betrieb einer homogenen oder heterogenen Flotte von UA ohne direkten Sichtkontakt zwischen UA und Fernpilot (engl. Beyond Visual Line Of Sight (BVLOS)) zu ermöglichen. Die Systeme stellen dabei eine Middleware bereit, die in der Regel in Form eines separaten Hardwaremoduls oder einer Software auf einem bereits auf dem UA vorhandenen On-Board-Rechner eingesetzt wird. Über die spezifischen Kommunikationsschnittstellen und -protokolle der jeweils unterstützten Flugsteuerungen wird eine Kommunikation mit diesen hergestellt, um eine Fernsteuerung der UA sowie die Auswertung der abgefragten Systemdaten zu ermöglichen. Ermöglicht werden hierdurch insbesondere Funktionen wie die Missionsplanung, die Fernsteuerung über das Mobilfunknetz, der Echtzeitzugriff auf Kamerabilder und Fluginformationen oder die Auswertung und Visualisierung von Flugprotokollen und Prozessinformationen.

Hervorzuheben ist die Lösung der Firma FlytBase, Inc. [96], die ebenfalls eine Middleware zur Realisierung von Drohnenapplikationen sowie zur Bildung von heterogenen Flotten anbietet. Über verschiedene Schnittstellen können Peripheriegeräte angesteuert, Sensoren angebunden sowie Algorithmen zur Datenauswertung integriert werden. Standardisierte Applikationen sollen die schnelle Realisierung von Einsatzszenarien ermöglichen und erfasste Daten können an übergeordnete Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme weitergegeben werden. Wie die zuvor beschriebenen Systeme ermöglicht auch diese Lösung den BVLOS-Betrieb und bietet integrierte Lösungen zur Objekterkennung und Kollisionsvermeidung an.

Gemein ist allen kommerziell erhältlichen Lösungen dabei, dass sie keinen autonomen Betrieb der UA ermöglichen, sondern stets auf die automatisierte Durchführung definierter Aufgaben zugeschnitten sind. Die Überwachung und Wartung der UA, die Definition der Aufträge etc. obliegt weiterhin dem Operator an einer Bodenstation. Infrastruktursysteme sowie Lösungen zum Luftraummanagement, die für einen autonomen Betrieb ebenfalls erforderlich sind, werden nicht berücksichtigt.

3.3.2 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Die publizierten Forschungsarbeiten erweitern die kommerziell verfügbaren Systeme insbesondere um Ansätze zur Realisierung der geforderten Autonomie sowie Methoden zur automatisierten Missionszuweisung und Routenplanung. Um eine Einordnung sowie eine systematische Gegenüberstellung der bestehenden Lösungsansätze zu ermöglichen, werden nachfolgend die im Kontext der Arbeit relevantesten Ansätze vorgestellt.

Das von Meyer et al. vorgestellte Framework „hector_quadrotor“ fokussiert sich auf die Simulation einer Flotte von Quadroptern und stellt hierfür neben der unterlagerten Regelung und Zustandsschätzung auch grundlegende Algorithmen zur Lokalisierung und Fernsteuerung der UA bereit [97]. Auch die von van de Loosdrecht et al. beschriebene Architektur „Twirre“ umfasst die für einen rudimentären, autonomen Flug notwendige Hard- und Software, bietet jedoch keine eigene GCS oder Simulation [98].

Bei der von Brisset et al. beschriebenen Lösung „Paparazzi“ handelt es sich um ein System bestehend aus einem UA inklusive der erforderlichen Hard- und Software. Die Hardware umfasst dabei die Flugsteuerung, die zur Lokalisierung erforderliche Sensorik sowie geeignete Funkkommunikationssysteme. Die Software besteht neben dem Autopiloten für den selbstständigen Flug aus einer Steuerungssoftware zum Flottenmanagement und zur Datenvisualisierung sowie einem Framework zur Simulation der Flugsoftware. [99]

In diesem Kontext sind weiterhin die Autopilotsysteme PX4 und Ardupilot zu nennen. Hierbei handelt es sich in beiden Fällen um eine Flugsteuerungssoftware, die von zahlreichen Hardwareplattformen unterstützt wird. Beide Architekturen ermöglichen durch ihren Aufbau die Integration verschiedenster Sensorik und Aktorik und eignen sich für den Einsatz mit zahlreichen Bauformen von UA. In ihrer aktuellen Ausführung sind weiterhin leistungsstarke Softwarelösungen zur Umgebungserfassung und Kollisionsvermeidung sowie zur Verwaltung und automatisierten Durchführung von Flugmissionen enthalten. [100, 101]

Ein grundlegendes Framework zur Zuweisung von Missionen an eine Flotte von UA sowie zur Visualisierung von Zustandsinformationen wird weiterhin von Lamping et al. beschrieben. Der Fokus der Forschungsarbeit liegt dabei auf der universellen Einsetzbarkeit für UA verschiedener Hersteller, die durch den Einsatz eines standardisierten und im Bereich der UA etablierten Nachrichtenprotokolls erreicht wird. [102]

Grabe et al. beschreiben mit „TeleKyp“ ein modulares, auf dem Robot Operating System (ROS) basierendes Framework, das sich primär auf die Teleoperation einer Flotte von UA mittels geeigneter Mensch-Maschine-Schnittstellen wie Gamepads fokussiert. Dabei enthalten sind neben einer Zustandsschätzung und Trajektorienplanung auch Schnittstellen für verschiedene Eingabegeräte und Sensoren sowie zur Fernsteuerung verschiedener UA. Das System ist dabei als Zustandsautomat ausgeführt, sodass die einzelnen UA mittels konfigurierbarer Verhalten gesteuert werden können. [103]

Millan-Romera et al. beschreiben in [104] ein grundlegendes Framework zur Definition und Verwaltung von Missionen für mehrere UA, das neben der Integration von realen UA auch die Integration von Software-in-the-Loop (SITL) und Hardware-in-the-Loop (HITL) Simulationen ermöglicht. Die Implementierung erfolgt dabei in Form von drohnenspezifischen Zustandsautomaten, die einzelnen UA kommunizieren dabei nicht untereinander, sondern ausschließlich mit der zugehörigen Bodenstation, welche für die Missionsverwaltung verantwortlich ist.

Dabei ist den vorab genannten Forschungsarbeiten gemein, dass übergeordnete Funktionselemente wie Auftrags- und Flottenmanagement nicht berücksichtigt werden. Weiterhin wird bei der Routenplanung stets von einem einzelnen UA statt einer Flotte von UA ausgegangen. Ebenso sind zur Realisierung eines vollautonomen Systems notwendige Infrastruktursysteme wie Lade- oder Warenübergabestation nicht enthalten und Anforderungen an die Personensicherheit bleiben unberücksichtigt.

Weiterführend beschreiben Maza et al. eine verteilte Systemarchitektur, die den kooperativen Einsatz von AFR für den Lasttransport oder die Umgebungsüberwachung ermöglicht. Hierfür wird neben einem Framework zum Flottenmanagement und zur Beschreibung von einfachen Missionen und Fluganweisungen auch ein System zur Off- und Online-Pfadplanung sowie eine Methodik zur Wahrnehmung und Modellierung der Umgebung vorgestellt. [105]

Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang weiterhin die Arbeiten von Sanchez-Lopez et al., welche ein Framework zur Realisierung autonomer UAS beschreiben. Hierbei werden die einzelnen AFR als individuelle Agenten modelliert, die einen identischen, in funktionale Ebenen untergliederten Softwareaufbau besitzen. In der untersten Ebene der Architektur befinden sich Komponenten mit hohen Echtzeitanforderungen wie die Flugregelung und die Sensordatenverarbeitung. Darüber liegend erfolgt die Lokalisierung, die Verwaltung der Aufträge und Fähigkeiten des AFR sowie

die lokale Trajektorien- und Flugplanung. In der darüber liegenden Ebene erfolgt die Überwachung des ordnungsgemäßen Missionsablaufs und als Schnittstelle zum Operator dient abschließend die soziale Ebene, die ein Benutzerinterface bereitstellt sowie die Kommunikation zwischen Robotern übernimmt. [106–108]

Zur Koordination einer auf diese Weise ausgeführten Flotte von AFR kommt ein Missionsplaner zum Einsatz, der neben der Generierung von Aufträgen auch die Zuweisung auf die individuellen AFR sowie die Berechnung der Flugtrajektorien übernimmt [109, 110]. Weiterhin zu nennen ist das von Pinto et al. [111] vorgestellte AFRS, das besonderen Fokus auf die Realisierung von kognitiven Fähigkeiten legt. Hierdurch wird es den AFR ermöglicht, während des Flugs situations- und umgebungsabhängige Entscheidungen zu treffen und Missionen autonom durchzuführen.

Neben den vorgestellten Ansätzen und Frameworks existieren noch weitere Lösungen, wie sie in [112–118] beschrieben werden, die jedoch in ihrem Funktionsumfang hinter den im Detail beschriebenen Ansätzen zurückbleiben. Im Fokus stehen dabei neben cloudbasierten Ansätzen der Einsatz von Multi-Agenten-Systemen sowie die methodische Beschreibung von Architekturen zum Flottenmanagement und zur Missionsverwaltung.

Während die zuvor vorgestellten Arbeiten sich auf den Außeneinsatz von UAS fokussieren bzw. die Einsatzumgebung nicht in die Architektur mit einbeziehen, wird von Khosiawan et al. [119] explizit auf den Inneneinsatz eingegangen. Berücksichtigt werden dabei insbesondere ein geeignetes Lokalisierungssystem sowie die begrenzten Platzverhältnisse beim Flug unterhalb einer Hallendecke. Perez-Grau et al. [120] stellen ein erweitertes AFRS für den Einsatz im Produktionsumfeld vor. Hierfür werden ein geeigneter AFR entwickelt, eine Navigationslösung implementiert und anschließend der Materialtransport und die Suche nach Werkzeugen in der Praxis evaluiert.

3.3.3 Zusammenfassung und Bewertung

Abschließend erfolgt eine Diskussion der vorab vorgestellten Forschungsarbeiten anhand der in Abschnitt 3.1 spezifizierten Anforderungen, um den aus dem aktuellen Stand der Technik resultierenden Forschungsbedarf abzuleiten. Im nachfolgenden Bild 15 werden dazu die leistungsfähigsten Vertreter der bestehenden Lösungen hinsichtlich der erarbeiteten Anforderungen an AFRS verglichen.

3 Ausgangssituation und Anforderungen an den industriellen Innenraumeinsatz von Flugrobotersystemen

Dabei zeigt sich, dass alle bestehenden Lösungen bereits eine grundlegende Architektur zur Realisierung von AFRS zur Verfügung stellen. Der Funktionsumfang variiert dabei jedoch stark und deckt eine Spanne zwischen dem autonomen Flug eines einzelnen AFR ohne zusätzliche Funktionen bis hin zur Realisierung einer Flotte autonomer Flugroboter, die auch in Innenbereichen selbstständig Aufgaben durchführen kann, ab. Die AFRS sind dabei in der Regel modular aufgebaut, sodass Softwarekomponenten ausgetauscht oder erweitert werden können. Oftmals ermöglichen die Architekturen auch eine geeignete Abstraktion, um AFR mit unterschiedlichen Hardwarekomponenten und von unterschiedlichen Herstellern integrieren zu können.

	Lanping et al.	Pinto et al.	Milan-Romera et al.	Maza et al.	Grabe et al.	FlyBase, Inc.	Sanchez-Lopez et al.	Khosravi et al.	Perez-Grau et al.
Modularisierung und einfache Erweiterbarkeit	●	◐	●	◐	●	●	●	◐	◐
Eignung für UA verschiedener Hersteller	●	●	●	◐	●	●	●	◐	◐
Eignung für den Einsatz in Innenräumen	○	○	◐	○	◐	◐	◐	●	●
Präzise, aufgabenangepasste Lokalisierung	○	○	○	◐	◐	○	◐	◐	◐
Einbezug der systemrelevanten Infrastruktur	◐	○	○	◐	○	◐	◐	◐	◐
Routenplanung und Luftraummanagement	○	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Berücksichtigung von Redundanzanforderungen	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Berücksichtigung der Personensicherheit	○	○	○	○	○	◐	○	○	◐
Praktische Umsetzung und fundierte Evaluation	●	●	●	●	●	●	●	◐	●

● ≙ Anforderung wird vollständig erfüllt

○ ≙ Anforderung wird nicht erfüllt bzw. nicht berücksichtigt

Bild 15: Vergleich der relevanten Arbeiten aus dem Stand der Forschung und Technik mit den definierten Anforderungen und ergänzenden Kriterien

Der Großteil der bestehenden Systeme ist primär für den Außeneinsatz von AFR konzipiert und wird daher den Anforderungen des innerbetrieblichen bzw. industriellen Innenraumeinsatzes nicht gerecht. Dies wird daran erkennbar, dass zur Lokalisierung oftmals GNSS oder Motion-Capturing-Systeme eingesetzt werden. Diese stehen jedoch in Innenräumen nicht zur Verfügung und bzw. lassen sich nicht zielführend auf Arbeitsräume von der Größe einer Produktionshalle skalieren. Auch die zur Durchführung von Transport- oder Inspektionsaufgaben notwendige hochpräzise Positionierung des AFR vor oder über Objekten wird nicht berücksichtigt.

Weiterhin zeigt sich, dass bestehende Forschungsansätze notwendige Infrastruktursysteme wie Ladestationen oder Warenübergabepunkte vernachlässigen. Da diese Systeme zur Realisierung vollautonomer Flugrobotersysteme von entscheidender Bedeutung sind, müssen auch diese über geeignete Schnittstellen in die Gesamtsystemarchitektur integriert werden.

Gleiches gilt für die Routenplanung und insbesondere das Luftraummanagement. Hier zeigen die bestehenden Forschungsarbeiten keine ausreichende Lösung auf, die es ermöglicht, eine skalierbare Flotte von AFR in einer weitläufigen Produktionsumgebung zu koordinieren und effiziente, an das Produktionsumfeld angepasste Flugpfade zu berechnen.

Zudem weisen bestehende AFRS ebenfalls signifikante Defizite bei der Gewährleistung der Sicherheit von im Arbeitsraum des AFR befindlichen Personen sowie bei der Berücksichtigung von Redundanzanforderungen und der Ausfallsicherheit auf. Beides sind grundlegende Voraussetzungen, um ein AFRS mit den bestehenden Sicherheitsanforderungen und den für das industrielle Umfeld geltenden Richtlinien in Einklang zu bringen.

3.4 *Ableitung zentraler Forschungsbedarfe zur Realisierung sicherer, autonomer Flugrobotersysteme*

Ausgehend von der Betrachtung des Stands der Forschung und den Bedarfen des industriellen Umfelds lässt sich zusammenfassen, dass bereits zahlreiche Einsatzbereiche für AFR identifiziert und zugehörige Lösungen umgesetzt wurden. Dabei kommen oftmals proprietäre Systeme zum Einsatz, die nur einen Flugroboter umfassen, der für eine spezifische Aufgabe ausgelegt ist.

Die bestehenden Ansätze zur Realisierung von AFRS fokussieren primär den Außeneinsatz und vernachlässigen zentrale, für den vollautonomen Einsatz innerhalb von Werks- und Logistikhallen relevante Aspekte. Dies umfasst zum einen eine einheitliche Routenplanung, die auf den Einsatz

einer heterogenen Flotte autonomer Flugroboter ausgelegt ist und dabei den dreidimensionalen Bewegungsraum von Flugrobotern sowie deren spezifische Parameter und Eigenschaften berücksichtigt. Zum anderen muss der Aspekt der Gefährdungsreduktion bei allen Teilsystemen im Fokus stehen, um die Sicherheit von Personen sicherzustellen. Dies erfordert neben einer redundanten Ausführung aller sicherheitskritischen Systemkomponenten auch die Erkennung von Personen im Arbeitsumfeld des Flugroboters sowie die Umsetzung von Maßnahmen zur Minimierung des Gefährdungspotentials. Die genannten Punkte müssen dabei in eine geeignete Gesamtsystemarchitektur integriert werden, um einen vollautonomen Betrieb sowie eine schnelle Erweiterbarkeit des Systems zu ermöglichen. Auch sind die regulativen Vorschriften und zu berücksichtigenden Arbeitsschutzvorgaben noch nicht ausreichend entwickelt, sodass noch kein ausreichend spezifizierter rechtlicher Rahmen für den innerbetrieblichen Einsatz von AFRS besteht.

Um die dargestellten Limitierungen aktueller AFRS auszugleichen und hierdurch zur Beschleunigung des industriellen Einsatzes von AFRS beizutragen, werden im Rahmen der Arbeit Lösungen für die ermittelten und in Bild 16 dargestellten Handlungsbedarfe erforscht.

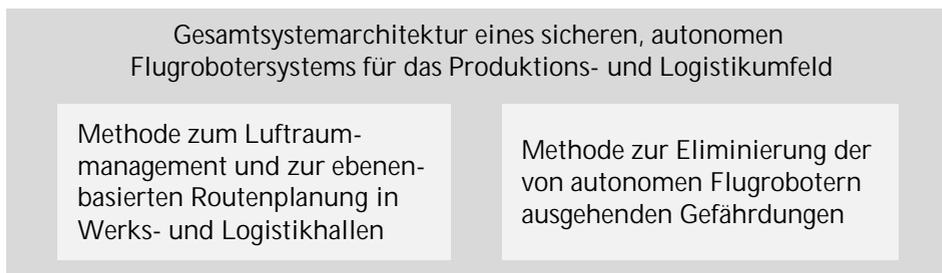


Bild 16: Identifizierte und im Rahmen der Arbeit adressierte Handlungsbedarfe

Als übergeordnete Methode wird in Kapitel 4 eine Gesamtsystemarchitektur für den industriellen Innenraumeinsatz von AFR vorgestellt. Die Architektur beinhaltet dabei die zentralen Aspekte des Flotten- und Auftragsmanagements, spezifiziert die zum Einsatz einer heterogenen Flotte von AFR erforderlichen Schnittstellen und bietet integrierte Lösungen für die präzise und aufgabenangepasste Lokalisierung der AFR. Erweiternd zum Stand der Forschung wird dabei in die Systemarchitektur nicht nur eine Flotte von heterogenen AFR einbezogen, sondern auch die erforderliche Infrastruktur wie Lade- und Servicestation wird dabei mit abgebildet und modelliert. Erweiternd zu bestehenden Ansätzen wird zudem die Anlagen-

und Personensicherheit fest in die Architektur verankert und in allen Komponenten berücksichtigt. Ziel ist es dabei, ein AFRS zu schaffen, das den spezifizierten Anforderungen gerecht wird.

Hierfür ist es ergänzend zum Stand der Technik erforderlich, dass die Systemarchitektur auch Lösungen zur Gewährleistung eines zuverlässigen und kollisionsfreien Flugbetriebes in Innenräumen fokussiert und die Gefährdung von Personen im Arbeitsraum der AFR aktiv verhindert. Zentrale Bedeutung kommt daher der Integration eines auf den Einsatz von AFRS zugeschnittenen Modells zur Repräsentation des Arbeitsraums und der darauf basierenden Routenplanung und Kollisionsvermeidung zu, welches in Kapitel 5 beschrieben ist. Das Modell muss dabei in der Lage sein, alle für den Betrieb einer Flotte von AFR notwendigen Informationen in geeigneter Form sowie effizient abzubilden.

Zu den erforderlichen Informationen gehören dabei neben den statischen Hindernissen der Umgebung auch benutzerdefinierte Sperrzonen und Landekorridore. Auf diese Weise können die räumlichen Bedingungen innerhalb einer Produktion- oder Logistikhalle berücksichtigt werden und es kann ein effizientes Luftraummanagement bei gleichzeitig optimaler Routenplanung erfolgen. Weiterhin wird ein neuartiger Pfadplanungsansatz für den Betrieb einer heterogenen Flotte von AFRS vorgestellt. Hierfür werden basierend auf dem Weltmodell individuelle Flugebenen berechnet und mit den zur kollisionsfreien Routenplanung erforderlichen Informationen angereichert. Mittels eines geeigneten Pfadplanungsalgorithmus erfolgt die Berechnung optimaler Routen innerhalb der Flugebenen. Um direkt bei der Routenplanung sich kreuzende oder überlappende Flugpfade auszuschließen, werden bereits geplante Flugtrajektorien in das Weltmodell zurückgeführt und dort in geeigneter Form abgebildet. Hierdurch kann bei der Berechnung der Flugrouten von nachfolgenden AFR auf diese Trajektorien Rücksicht genommen werden.

Um der geforderten Personensicherheit gerecht zu werden und Flugrobotersysteme in Einklang mit den bestehenden Arbeitsschutzrichtlinien zu bringen, ohne dabei die Flexibilität und den Arbeitsraum von AFRS durch räumliche Trennungselemente zu reduzieren, sind über den Stand der Technik hinausgehende Lösungen erforderlich. Als dritter Kernaspekt der Arbeit wird daher in Kapitel 6 ein neuartiger Ansatz zur Minimierung der von AFR ausgehenden Gefährdung vorgestellt.

Zentraler Aspekt ist dabei ein neuartiger Ansatz zur Reduktion der Fehler- und Absturzwahrscheinlichkeit mittels struktureller Redundanz und Feh-

lermaskierung. Hierfür wird während der gesamten Einsatzzeit die Betriebsfähigkeit des AFR über eine geeignete Analyse der internen Zustände und Ausgangssignale der verbauten FCU bestimmt. Um auch Fehler, die nicht durch strukturelle Redundanz detektiert und maskiert werden können, zu erfassen, werden ausgewählte Zustandsgrößen zusätzlich mit den aus dem mathematischen Modell des betreffenden AFR abgeleiteten Erwartungswerten verglichen. Auf diese Weise wird es ermöglicht, strukturelle Schäden des AFR sowie Montage- und Wartungsfehler noch während des Startvorgangs zu detektieren und diesen abzubrechen.

Weiterhin integriert der Ansatz eine Lösung, die es AFR während des Flugs ermöglicht, Personen in ihrer Umgebung zu lokalisieren und basierend auf deren Verhalten und Intention das Flugverhalten situationsabhängig anzupassen. Auf diese Weise werden stets vorgegebene Mindestabstände zu Personen eingehalten und bei Bedarf Notlandungen oder weitere Aktionen ausgelöst

4 Gesamtsystemarchitektur eines sicheren autonomen Flugrobotersystems für das Produktions- und Logistikumfeld

Wie die im vorangegangenen Kapitel durchgeführte Analyse gezeigt hat, bestehen im industriellen Umfeld vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für AFRS. Die Einsatzbereiche können dabei Areale von der Größe einiger Regalgänge bis hin zu mehreren Produktions- oder Lagerhallen umfassen. Insbesondere bei periodisch wiederkehrenden Aufgaben wie Inspektion, Inventur, Anlagenüberwachung oder Materialtransport kann der Einsatz von AFR dabei oftmals nur zielführend erfolgen, wenn das gesamte System vollständig automatisiert ist.

Dass dies jedoch bei bestehenden Systemen in der Regel nicht der Fall ist, zeigen die durchgeführte Betrachtung des Stands der Technik sowie die Ergebnisse der Umfrage zur industriellen Bedeutung von Drohnentechnologien. Um AFRS zukünftig auch im innerbetrieblichen Umfeld sicher und zuverlässig einsetzen zu können, wird unter Berücksichtigung der im vorangegangenen Kapitel spezifizierten Anforderungen eine Gesamtsystemarchitektur für ein AFRS für den innerbetrieblichen Einsatz erarbeitet.

In Abschnitt 4.1 werden dafür zunächst der erforderliche Funktionsumfang und die gewählten Systemgrenzen spezifiziert. Anschließend erfolgt die Vorstellung der erforschten Systemarchitektur. Weiterhin wird auf die Modellierung und den Aufbau eines generischen AFR-Agenten zur Realisierung der erforderlichen autonomen Fähigkeiten, die Verwaltung und Integration der zum AFRS gehörigen Infrastruktur sowie das Flotten- und Auftragsmanagement eingegangen. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 4.2 und 4.3 die vorgesehene Kommunikationsarchitektur sowie das zur präzisen Lokalisierung entwickelte Framework vorgestellt. Abschließend erfolgt in Abschnitt 4.4 eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.

Einzelne Aspekte der folgenden Abschnitte 4.1 bis 4.3 sowie der in Abschnitt 7.1.2 beschriebenen zugehörigen Implementierung und der in Abschnitt 7.2.1 durchgeführten Validierung sind an mehrere am Lehrstuhl FAPS entstandene, vom Autor initiierte studentische Arbeiten angelehnt [S1–S13]. Weiterhin wurden Vorarbeiten, einzelne Aspekte der Systemarchitektur sowie darauf aufbauende Applikationen vorab vom Autor publiziert, um sie der internationalen Fachwelt zugänglich zu machen [P3–P5].

4.1 Aufbau und Bestandteile der Gesamtsystemarchitektur

Eine skalierbare, modulare und flexibel erweiterbare Gesamtsystemarchitektur ist von zentraler Bedeutung für den Einsatz von AFRS im industriellen Kontext. Die Gesamtsystemarchitektur muss dabei alle für den autonomen Einsatz einer heterogenen Flotte von AFR notwendigen Komponenten umfassen und diese in geeigneter Form vernetzen. Hierdurch können AFRS schnell in industrielle Produktions- oder Logistikumgebungen integriert werden und für zahlreiche Anwendungsbereiche eingesetzt werden.

4.1.1 Spezifikation der Systemgrenzen und des berücksichtigten Funktionsumfangs

Bevor auf die Spezifikation der erforschten Gesamtsystemarchitektur für AFRS eingegangen wird, werden die zugrundeliegenden Rahmenbedingungen spezifiziert und die gesetzten Systemgrenzen dargelegt. Dies erfolgt auf Basis der derzeit von Industrie und Forschung als zielführend angesehenen Anwendungsfälle für AFRS im industriellen Umfeld. Entsprechend der durchzuführenden Aufgaben wird eine heterogene Flotte von AFR mit der erforderlichen Bauform und den entsprechenden Fähigkeiten eingesetzt. Je nach Aufgabe kann der Arbeitsraum eines AFR vorab bekannt und begrenzt sein (z.B. bei der Inventur oder Vermessung) oder aber auch weite Teile des Fabrikgeländes umfassen (z.B. beim Materialtransport).

Sollen mittels AFR Waren transportiert werden, besteht die Option, dass diese an frei wählbaren Positionen abgelegt werden, oder es können auch definierte Ablageplätze vorgesehen sein, an denen eine ausschließliche Ablage möglich ist. Weiterhin stehen für die AFR Landeplätze oder Dockingstationen mit optionaler Integration von Lade- und Servicefunktionen zur Verfügung, die sie automatisiert anfliegen können. Entsprechend der Bauart und Größe der eingesetzten AFR können dabei unterschiedliche Ausführungen dieser Station zum Einsatz kommen.

Zur Positionsbestimmung der einzelnen AFR kommt ein zentrales Lokalisierungssystem zum Einsatz, über das die aktuelle Position aller AFR in einem gemeinsamen, globalen Bezugskordinatensystem bestimmt werden kann. Weiterhin wird eine situationsabhängige Lokalisierung durch On-Board-Sensoren der AFR vorgesehen, über welche die zur Objektinteraktion notwendige Flugpräzision erreicht werden kann. Über ein zentrales Flotten- und Auftragsmanagement erfolgt die Koordination der AFR sowie die Zuweisung der durchzuführenden Aufträge an jeweils geeignete AFR.

Zentraler Bestandteil ist dabei das Luftraummanagement inklusive dreidimensionaler Routenplanung, welches einen kollisionsfreien Flugverkehr unter den gegebenen Bedingungen sicherstellt. Ein Sicherheitsframework, das sowohl auf den einzelnen AFR als auch einer zentralen Recheneinheit ausgeführt wird, stellt sicher, dass die AFR Personen in ihrem Flugbereich erkennen und auf deren Anweisungen reagieren. Zusätzlich überwacht das Sicherheitsframework fortlaufend die fehlerfreie Betriebsfähigkeit der AFR und erkennt und behandelt Fehler und Störungen der Systeme.

Zielstellung des AFRS ist es, eine vollständige Automatisierung der Aufgaben zu ermöglichen, sodass die AFR die ihnen zugewiesenen Aufträge autonom durchführen. Die hierzu erforschte und umgesetzte Gesamtsystemarchitektur und deren Aufbau sowie Funktionsweise werden im Folgenden detailliert beschrieben.

4.1.2 Beschreibung des Aufbaus und der logischen Systemgliederung

Zentrale Anforderung an das Gesamtsystem ist die herstellerunabhängige Integrierbarkeit unterschiedlicher AFR. Weiterhin sollen die AFR den erforderlichen Grad an Autonomie aufweisen, um ihnen zugewiesene Aufträge selbstständig durchzuführen und dabei auf unvorhergesehene Situationen und Fehler reagieren können. Ebenfalls erforderlich sind ein zentrales Luftraummanagement sowie ein umfassendes Sicherheitsframework, um die Gefahr von Abstürzen und Kollisionen zu minimieren.

Um die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Anforderungen und den spezifizierten Funktionsumfang zu erfüllen, wird eine Gesamtarchitektur entsprechend Bild 17 entworfen. Die Abbildung zeigt hierbei neben den zentralen Bestandteilen der Architektur außerdem die jeweiligen Abschnitte und Kapitel, in denen diese im Detail beschrieben werden.

Kernelemente der Architektur sind die einzelnen AFR, die als zentrale Recheneinheiten eine FCU sowie einen OBC umfassen. Zusätzlich kann je nach Funktionsumfang des AFR ein zusätzliches Sensorsystem zur Umgebungserfassung integriert sein. Über eine Abstraktionsschicht wird sichergestellt, dass sich die Architektur modell- und herstellerunabhängig einsetzen lässt und mit gängigen FCU, OBC und Sensoren kompatibel ist. Zur Realisierung der erforderlichen Autonomie jedes AFR wird auf dem OBC ein zugehöriger AFR-Agent ausgeführt. Dabei handelt es sich um einen Softwareagenten, welcher die Steuerung des AFR übernimmt. Hierfür sind im AFR-Agenten Aufgaben und Fähigkeiten implementiert, welche über

die Abstraktionsschicht die entsprechenden Befehle an die FCU übertragen und den übergeordneten Komponenten Rückmeldungen in einheitlicher Form zur Verfügung stellen.

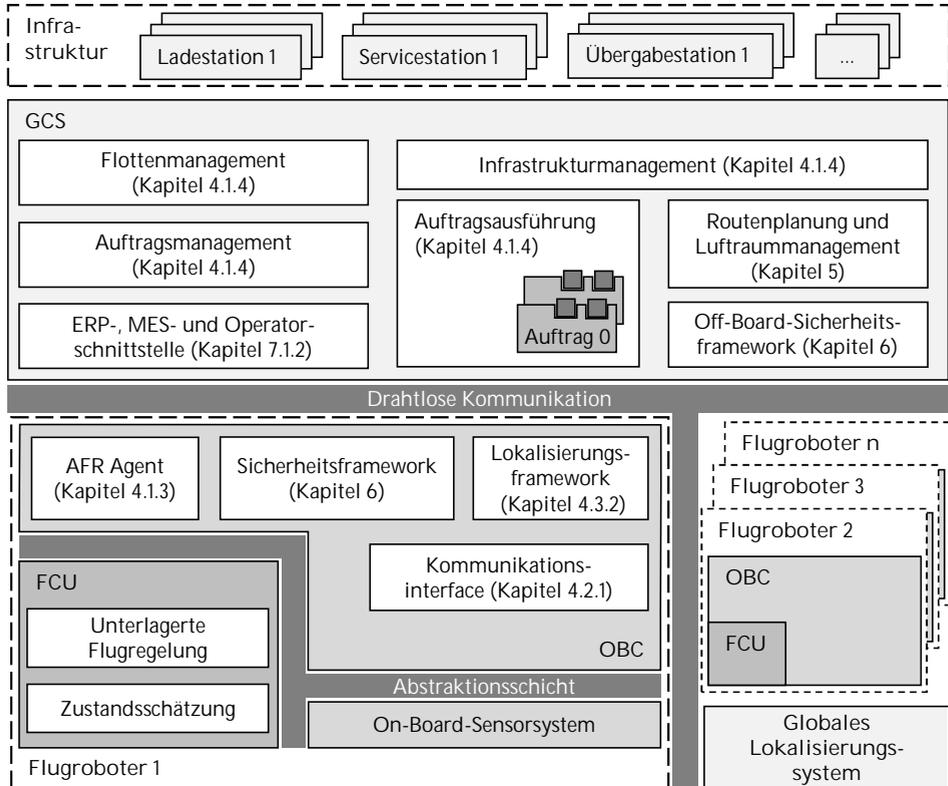


Bild 17: Darstellung der einzelnen Hard- und Softwaremodule sowie des strukturellen Systemaufbaus des entworfenen AFRS

Entscheidend für die zuverlässige Durchführung der Aufträge ist die präzise Lokalisierung des AFR. Hierfür stehen Informationen eines zentralen Lokalisierungssystems zur Verfügung, das die globale Position aller registrierten AFR erfasst und bereitstellt. Da zur Durchführung von automatisierten Transport-, Inspektions- oder Inventuraufträgen oftmals eine präzise Lokalisierung relativ zu Transportgütern oder Inspektionsobjekten erforderlich ist, ist ein geeignetes Framework zur erweiterten Lokalisierung auf dem OBC vorgesehen. Darin werden die globalen Positionsdaten und verfügbaren Daten der On-Board-Sensoren situationsabhängig fusioniert, um stets die optimale Flug- und Positioniergenauigkeit zu erzielen.

Neben dem AFR-Agenten und der Lokalisierung läuft ein getrenntes Sicherheitsframework auf dem OBC, welches die korrekte und fehlerfreie

Funktion der FCU überwacht. Zusätzlich übernimmt das Sicherheitsframework die Erkennung von Personen im Umfeld des AFR und leitet situationsabhängige Notfallmaßnahmen ein. Zur erweiterten Auswertung der erfassten Sensorinformationen steht ein zentrales Sicherheitsframework zur Verfügung, das die übertragenen Bilddaten aller registrierten AFR auswertet und ggf. notwendige Maßnahmen an diese zurücksendet. Um eine zuverlässige und redundant ausgelegte Übertragung aller notwendigen Informationen zwischen den AFR und der GCS bzw. dem zentralen Lokalisierungssystem zu gewährleisten, verfügt der OBC jedes AFR über mehrere Kommunikationsschnittstellen. Diese ermöglichen es, Datenpakete auf Basis unterschiedlicher Funktechnologien und Protokolle zu übertragen.

Zur Koordination der AFR kommt eine GCS zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein stationäres Rechensystem bzw. ein Cloud-System zur Ausführung der übergeordneten Softwarekomponenten. Nach der Inbetriebnahme registriert sich jeder AFR-Agent selbstständig beim Flottenmanagement. Hier werden die aktuellen Informationen und Zustände der AFR zusammengeführt und stehen für Visualisierungszwecke und die Auftragszuweisung zur Verfügung. Über die Operatorschnittstelle werden durchzuführende Aufträge entweder durch einen Bediener oder ein übergeordnetes Manufacturing Execution Systems (MES) oder ERP-System im System registriert. Basierend auf den übertragenen Informationen wird in der Auftragsverwaltung ein entsprechender Auftrag angelegt und anschließend einem verfügbaren und geeigneten AFR zugewiesen.

Für jeden zugewiesenen Auftrag wird ein eigenständiger Zustandsautomat generiert, welcher entsprechend den Grundgedanken der intelligenten und vernetzten Produktion die Koordination und Steuerung der erforderlichen Prozesse überwacht. Der Auftrag fragt beim Luftraummanagement die notwendigen Flugrouten und Freigaben an und stellt diese mit weiteren auftragspezifischen Informationen dem AFR-Agenten zur Verfügung. Rückmeldungen des AFR-Agenten werden über den Auftrag an übergeordnete Stellen wie das ERP-System, das MES oder das Lagerverwaltungssystem weitergegeben. Weiterhin liefert jeder Auftrag Informationen zur Visualisierung und Überwachung des aktuellen Bearbeitungsfortschritts und registriert den ihm zugeordneten AFR bei den erforderlichen Infrastruktursystemen. Bei diesen Infrastruktursystemen handelt es sich in der Regel um Ladestationen, Landeplätze oder Warenübergabestationen, deren Belegung von einer zentralen Instanz koordiniert wird. In den nachfolgenden Abschnitten und Kapiteln werden zentrale Aspekte des Gesamtsystems im Detail dargestellt und die Funktionsweise sowie das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten erläutert.

4.1.3 Modellierung und Funktionsweise der Abstraktionsschicht und des AFR-Agenten

Entscheidende Anforderung, um AFR mit unterschiedlicher Hard- und Softwarearchitektur in die Architektur integrieren zu können, ist die Abstraktion der Systeme, sodass alle AFR für überordnete Komponenten identische Schnittstellen anbieten. Bild 18 zeigt die umgesetzte Abstraktion in Form von Fähigkeiten sowie sich daraus zusammensetzenden, übergeordneten Aufgaben, die ein AFR durchführen kann. Die Nomenklatur und Klassifizierung in Elementarfunktionen, Fähigkeiten und Aufgaben orientiert sich dabei an der Beschreibung von Pedersen et al. [121].

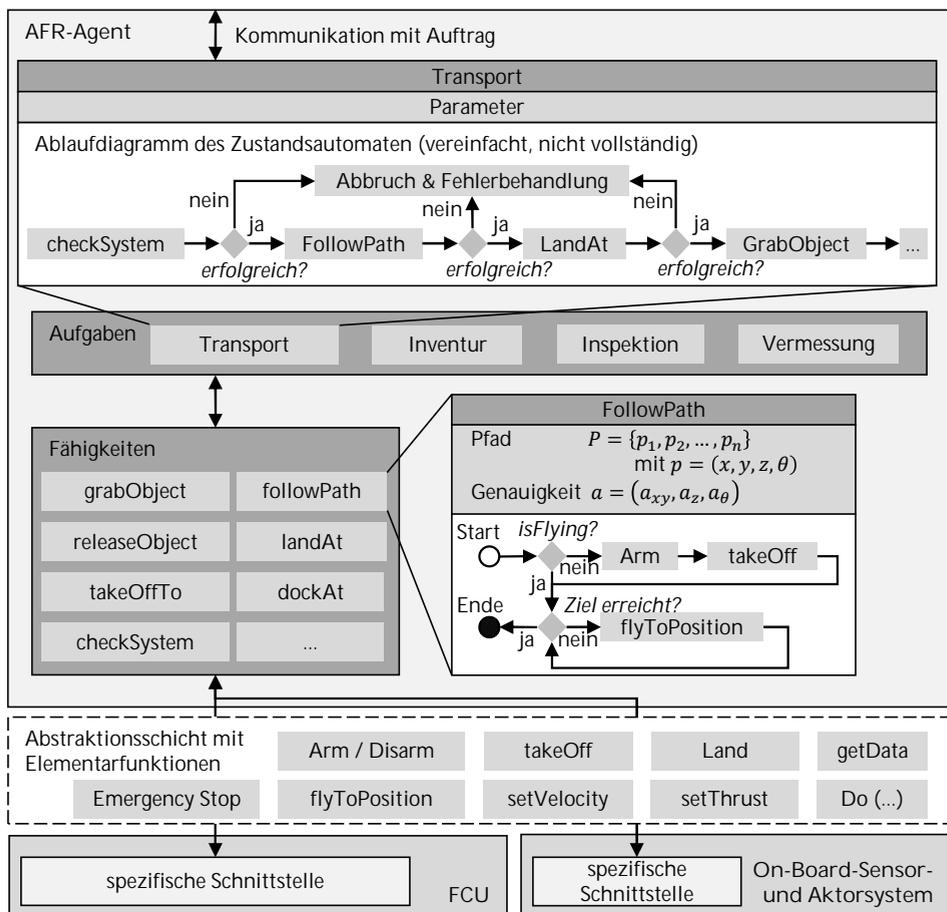


Bild 18: Vorgehen zur Realisierung eines autonomen Fluges und weiterer autonomer Prozesse im AFR-Agent. Hierfür stellt der AFR-Agent autonom durchführbare Aufgaben bereit, die wiederum aus definierten Fähigkeiten umgesetzt sind. Über die Abstraktionsebene mit integrierten Elementarfunktionen wird die Kommunikation mit der FCU sowie dem On-Board-Sensor- bzw. Aktorsystem realisiert.

In der untersten Hardwareebene befinden sich die herstellereigenspezifische FCU sowie, je nach Ausstattung des AFR, ein auf die durchzuführenden Aufgaben angepasstes Sensorsystem. Für diese Komponenten werden nach oben hin einheitliche Schnittstellen benötigt, was über eine Abstraktionsschicht realisiert wird. Kernelement der Abstraktionsschicht sind Elementarfunktionen, die ebenfalls über eine nach oben hin standardisierte Schnittstelle verfügen und nach unten hin über die jeweils plattformspezifischen Schnittstellen und Protokolle angebunden sind. Die Elementarfunktionen ermöglichen dabei sowohl dem AFR-Agenten als auch allen weiteren auf dem OBC ausgeführten Modulen eine unabhängige Kommunikation mit der FCU sowie dem On-Board-Sensor- und Aktorsystem.

Dabei sind Elementarfunktionen vorgesehen, um die Grundfunktionen einer Flugsteuerung aufzurufen. Hierzu zählen beispielsweise das Ein- oder Ausschalten der Motoren (*Arm/Disarm*), Abheben und Landen oder die Vorgabe eines Sollwertes für den Positions- oder Geschwindigkeitsregler. Weiterhin können Elementarfunktionen auch die Ansteuerung eines Sensor- oder Aktorsystems übernehmen und hierdurch beispielsweise die Aufnahme eines Bildes oder das Öffnen bzw. Schließen einer Lastaufnahme veranlassen. Analog wird über die Abstraktionsschicht auch die Übertragung der Status- und Zustandsinformationen der FCU sowie der verfügbaren Sensordaten vereinheitlicht. Unabhängig vom angeschlossenen System stehen die Daten der übergeordneten Instanz somit in einheitlicher Form zur Verfügung.

Bei der genannten übergeordneten Instanz handelt es sich um Fähigkeiten, die ein AFR besitzt und die zur Erfüllung einer vorgegebenen Aufgabe eingesetzt werden können. Eine Fähigkeit stellt dabei eine Verkettung von Elementarfunktionen dar und ist in Form eines Zustandsautomaten umgesetzt, welcher den ereignisgesteuerten Aufruf der Elementarfunktionen übernimmt. Dabei werden ebenfalls Sensor- und Zustandsinformationen mit einbezogen, um situationsabhängige Entscheidungen zu treffen und auf Veränderungen im System bzw. in der Umgebung reagieren zu können. Eine Fähigkeit kann bei ihrem Aufruf zusätzlich einen vorgegebenen Parametersatz benötigen, welcher die zur Durchführung notwendigen Informationen enthält. Diese Parameter können dabei situationsabhängig sein und aus dem Aufruf einer anderen Fähigkeit zur Verfügung stehen oder statisch und in einem zentralen Konfigurationsspeicher des AFR hinterlegt sein.

Die spezifische Beschreibung jeder Fähigkeit umfasst somit die erforderlichen Parameter in mathematischer Darstellung sowie die zur Durchführung notwendige Logik in Form eines Zustandsautomaten. Durch die vorab

konsequent verfolgte Abstraktion über Elementarfunktionen ist die Beschreibung einer Fähigkeit unabhängig von der Ausführung der FCU bzw. dem Sensor- und Aktorsystem. Die hierdurch erzielte Abstraktion ermöglicht es, AFR und Sensorsystem unterschiedlicher Hersteller und Ausführungsart in das AFRS zu integrieren. Hierfür müssen lediglich die notwendigen Elementarfunktionen als Schnittstelle zwischen herstellerspezifischer Hardware und dem AFR-Agenten ergänzt werden.

Bei der in Bild 18 exemplarisch dargestellten Fähigkeit *FollowPath* folgt der AFR einem vorgegebenen Flugpfad. Bei der Ausführung der Fähigkeit wird zunächst geprüft, ob der AFR bereits fliegt. Ist dies nicht der Fall, werden zunächst die Elementarfunktionen *Arm* und *takeOff* aufgerufen. Anschließend wird die Fähigkeit durch einen wiederholten Aufruf der Elementarfunktion *flyToPosition* und einer Prüfung, ob der vorgegebene Zielpunkt bereits erreicht wurde, weitergeführt. Als Parameter wird der Fähigkeit beim Aufruf der Flugpfad in Form von Stützpunkten übergeben. Zusätzlich wird definiert, mit welcher Genauigkeit die einzelnen Stützpunkte bzw. der Zielpunkt erreicht werden müssen, bevor der nächste Zielpunkt an die Positionsregelung der FCU übertragen wird. Die Vorgabe einer notwendigen Fluggenauigkeit ermöglicht es, Pfade entweder sehr exakt abzufliegen oder bei der Ausführung zu glätten.

Den Fähigkeiten übergeordnet bilden Aufgaben die höchste Abstraktionsebene innerhalb des AFR-Agenten. Eine Aufgabe bildet dabei einen vollständigen, in sich geschlossenen Prozess wie den Transport eines Ladungsträgers oder die Durchführung einer Inventur ab und kann von einem AFR automatisiert durchgeführt werden. Analog zur Modellierung der Fähigkeiten setzt sich dabei auch eine Aufgabe aus einem erforderlichen Parametersatz sowie einem Zustandsautomaten zusammen. Der Zustandsautomat bildet die zur Durchführung der Aufgabe notwendigen Schritte durch eine Verknüpfung der auf dem AFR verfügbaren Fähigkeiten ab. Basierend auf den Rückmeldungen und Resultaten der Fähigkeiten sowie Umgebungs- und Zustandsinformationen können dabei ebenfalls situationsabhängige Entscheidungen getroffen werden.

In Bild 18 ist in der obersten Ebene der Beginn der Aufgabe *Transport* exemplarisch dargestellt. Nach der Initialisierung wird zunächst die Fähigkeit *CheckSystem* aufgerufen, die überprüft, ob der AFR grundlegend flugbereit ist. Bei positiver Rückmeldung erfolgt der Aufruf der vorab spezifizierten Fähigkeit *FollowPath*, worauf der AFR abhebt und den durch die Routenplanung vorgegebenen Pfad abfliegt. Wird der Zielpunkt erreicht, folgt die Fähigkeit *LandAt*, die das präzise Landen an einer vorgegebenen

Position bzw. auf einem vorgegebenen Transportobjekt umsetzt. Nach dem erfolgreichen Landen auf dem Transportobjekt wird über die Fähigkeit *GrabObject* die Lastaufnahme geschlossen und das Transportobjekt gesichert. Weitergeführt wird die Aufgabe durch den sequenziellen Aufruf der Fähigkeiten *CheckSystem*, *FollowPath*, *LandAt* und *ReleaseObject*, wodurch das Transportobjekt an der vorgegebenen Zielposition abgestellt wird.

Tritt während der Ausführung der Aufgabe oder einer Elementarfunktion ein Fehler auf, wird die Aufgabe abgebrochen und die genaue Fehlerursache an den übergeordneten Auftrag zurückgemeldet. Befindet sich der AFR zum Zeitpunkt des Fehlers in der Luft und handelt es sich um einen unkritischen Fehler, wie beispielsweise ein nicht lokalisierbares Transportgut, wird eine geeignete Flugroute angefragt und der AFR fliegt zur nächstgelegenen, verfügbaren Lade- oder Servicestation. Handelt es sich hingegen um einen kritischen Systemfehler, greift parallel das Sicherheitsframework ein und löst eine Notlandung aus. Befindet sich der AFR im Fehlerfall am Boden (z.B. bei einer defekten Lastaufnahme, Fehler bei der Elementarfunktion *CheckSystem*) wird der Start des AFR verhindert. Bei fehlerfreiem Abschluss einer Aufgabe fliegt der AFR standardmäßig zu einer Ladestation. Hierfür wird der AFR bei einer geeigneten Ladestation angemeldet und ein geeigneter Flugpfad bestimmt.

Aufgerufen werden die im AFR-Agenten implementierten Aufgaben durch die in das System eingelasteten Aufträge. Für die Aufträge sind dabei lediglich die Aufgaben, die ein AFR durchführen kann, sichtbar. Jeder Aufgabentyp weist hierfür eine systemweit eindeutige Schnittstelle auf, sodass einem AFR unabhängig vom genauen Hardwareaufbau diese Aufgabe zugewiesen werden kann. Ein Auftrag repräsentiert somit die oberste Ausführungsebene des Prozessablaufs und stellt den ausführenden AFR die notwendigen Schnittstellen zu allen übergeordneten Modulen wie Auftrags- und Flottenmanagement oder Routenplanung und Luftraummanagement bereit. Der Modellierung und die Funktionsweise der Aufträge sowie der übergeordneten Managementmodule ist im Folgenden aufgeführt.

4.1.4 Flottenmanagement, Auftragsmanagement und Infrastrukturmanagement

Um die im System registrierten AFR, Aufträge und Infrastruktursysteme zu verwalten, steht jeweils ein zugehöriges Managementmodul zur Verfügung. Die Module werden auf der GCS ausgeführt und sind in der Lage, ein System aus einer skalierbaren Anzahl an AFR, Aufträgen und Infrastruktursystemen zu koordinieren.

Flotten- und Auftragsmanagement

Kernelement des vorgestellten AFRS ist die auftragszentrierte Steuerung aller integrierten Komponenten. Hierfür ist sowohl eine enge Verknüpfung von Flotten- und Auftragsmanagement als auch eine geeignete methodische Beschreibung der Aufträge notwendig. Bild 19 zeigt das im AFRS vorgesehene Zusammenspiel von Flotten- und Auftragsmanagement sowie die Umsetzung eines Auftrags als zentrales Element der Architektur.

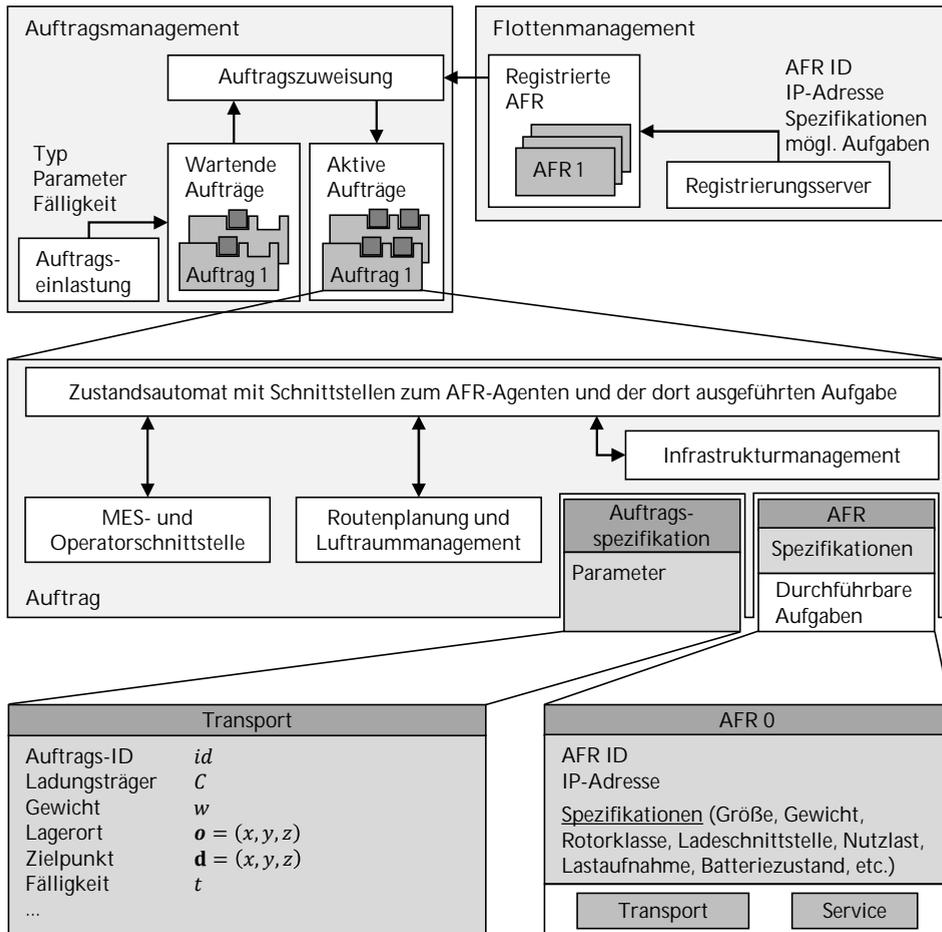


Bild 19: Darstellung der Funktionsweise der modellierten Aufträge sowie des Aufbaus und des Zusammenspiels von Auftrags- und Flottenmanagement

Jeder AFR meldet sich nach der Integration in das System selbstständig beim zentralen Flottenmanagement an. Hierfür ist im AFR-Agent ein entsprechender Client implementiert, der eine Verbindung zum zugehörigen

Server des Flottenmanagements aufbaut und die dargestellten Systeminformationen überträgt. Auf dieser Basis wird ein virtuelles Abbild des AFR angelegt und mit dem AFR-Agenten verknüpft, wodurch dieser kontinuierlich Status- und Zustandsinformationen an das virtuelle Abbild sendet.

Im Auftragsmanagement werden die durch einen Operator oder das übergeordnete System eingehenden Aufträge zunächst zwischengespeichert und zur nachfolgenden Zuweisung nach Typ und Fälligkeit vorsortiert. Im nachfolgenden Schritt werden diese Aufträge den registrierten und verfügbaren AFR kontinuierlich zugewiesen. Die methodische Beschreibung eines geeigneten Verfahrens zur Auftragszuweisung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, hier wird ein Verfahren entsprechend dem Stand der Technik gewählt. Durch den modularen und agentenbasierten Aufbau bietet sich zur Auftragszuweisung auch der Einsatz innovativer Verfahren wie dem von Scholz vorgeschlagenen Modell zur intralogistischen Auftragsallokation an [122].

Die Berücksichtigung der Grundgedanken der intelligenten und vernetzten Produktion, bei der zentrale Informationen zum Produkt sowie zum Ablauf der Produktions- und Logistikprozesse direkt mit dem virtuellen Abbild des Produkts oder des Fertigungsauftrags verknüpft sind [123], bietet sich auch für AFRS an. Entsprechend dieses Paradigmas übernehmen die Aufträge die zentrale Koordination und Datenverwaltung. Jeder Auftrag leitet sich von einer generischen Basisklasse ab, in der die erforderlichen Schnittstellen implementiert sind. Hierbei handelt es sich um die Schnittstellen zum ERP-System, MES oder Lagerverwaltungssystem, zum Benutzerinterface, zum Routenplanungs- und Luftraummanagement sowie zum Infrastrukturmanagement. Hierdurch kann der Auftrag alle zur Durchführung notwendigen Informationen anfragen und Prozessfortschritte und Statusinformationen direkt an übergeordnete Instanzen weitergeben.

Hierfür besteht eine enge Verbindung zwischen einem Auftrag und der zu dessen Erledigung auf dem AFR auszulösenden Aufgabe. Wird ein neuer Auftrag im System angelegt, wird dieser von der generischen Beschreibung abgeleitet und um einen Zustandsautomaten erweitert, der das Gegenstück zur auf dem AFR durchzuführenden Aufgabe darstellt. Das Zusammenspiel der beiden Zustandsautomaten und der grundlegende Ablauf zur Bearbeitung eines Auftrags sind im Folgenden erläutert.

Nach der Anlage und Spezifikation des Auftrags wird diesem ein AFR zur Durchführung zugewiesen. Hierfür wird das im Flottenmanagement hinterlegte virtuelle Abbild des AFR mit dem Auftrag verknüpft. Dabei wird

ein direkter Kommunikationskanal zwischen dem Auftrag und dem auf dem zugeordneten AFR ausgeführten AFR-Agenten aufgebaut. Im Anschluss wird der Zustandsautomat des Auftrags gestartet, wodurch die Auftragsausführung aktiv wird. Falls für den Auftragsstyp notwendig, fragt der Auftrag auf Basis der übergebenen Auftragspezifikation zunächst notwendige Informationen beim Infrastrukturmanagement ab. Dies kann beispielsweise die Position und Systemspezifikation einer verfügbaren Lade- oder Übergabestation sein. Bei positiver Rückmeldung erfolgt weiterhin eine Registrierung des zugeordneten AFR an der jeweiligen Station.

Anschließend werden die relevanten Auftragsdaten an den Zustandsautomaten der Aufgabe übertragen und dieser wird gestartet. Entsprechend der Darstellung im vorherigen Abschnitt erfolgt nun der Aufruf der einzelnen Fähigkeiten. Benötigen die Fähigkeiten dabei eine (aktualisierte) Flugroute, wird die notwendige Anfrage über die übergeordnete Aufgabe an den Auftrag übermittelt, von diesem beim Luftraummanagement eine Flugroute angefordert und anschließend in analoger Weise an die Fähigkeit zurückgeführt. Weiterhin werden Fortschrittsinformationen und Rückmeldungen der Fähigkeiten an den Auftrag übermittelt, sodass dort alle relevanten Daten verfügbar sind und in geeigneter Form visualisiert werden können. Wird die Aufgabe unterbrochen oder nicht erfolgreich beendet, wird der Auftrag abgebrochen und die Fehlerinformationen an das übergeordnete System übertragen.

Durch die beschriebene Umsetzung bilden Aufträge das zentrale Element der Architektur, in denen alle relevanten Informationen zusammengeführt werden. Weiterhin erfolgt eine Abstraktion, um neue Auftragsstypen und Aufgaben schnell in die Architektur zu integrieren und auf dafür geeigneten AFR aufzusetzen. Durch den Aufbau von Auftrag und zugehöriger Aufgabe ist jeder AFR ein unabhängiges System, das ohne übergeordnete Leitsteuerung agieren und Entscheidungen treffen kann. Gleichzeitig werden jedoch für alle AFR relevanten Schnittstellen vereinheitlicht.

Wird die Kommunikation zwischen dem Auftrag und der zugehörigen, auf dem AFR ausgeführten Aufgabe unterbrochen, kann der AFR seine Tätigkeit zunächst selbstständig fortsetzen. Die Fortschrittsinformationen und Ergebnisse werden auf dem OBC zwischengespeichert und bei erfolgreicher Neuverbindung übertragen. Bleibt die Kommunikation dauerhaft unterbrochen, wird die Aufgabe nach der Landung an der vorgegebenen Stelle abgebrochen.

Infrastrukturmanagement

Analog zu den AFR und den durchzuführenden Aufträgen werden auch die verfügbaren Infrastruktursysteme, im Folgenden auch Points-of-Interest (POI) genannt, an zentraler Stelle verwaltet. Für AFRS sind dabei insbesondere Ladestationen, Servicestationen sowie Stationen zur (automatisierten) Warenübergabe von Relevanz. Entsprechend Bild 20 ist im Infrastrukturmanagement ein virtuelles Abbild jedes verfügbaren POI hinterlegt. Neben statischen Informationen wie der Position und den verfügbaren Funktionalitäten sind dabei auch dynamisch veränderliche Zustände vorgesehen. Diese umfassen die Informationen, ob die Station aktuell verfügbar ist bzw. zu welchem Zeitpunkt die Station wieder verfügbar sein wird, sowie die Kennung des aktuell an der Station registrierten AFR.

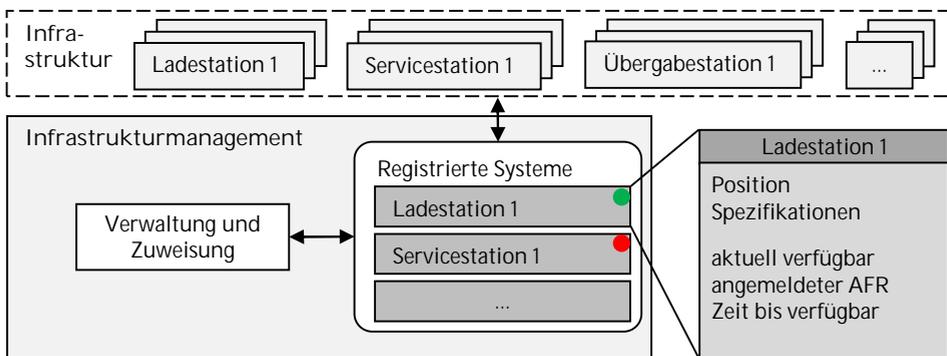


Bild 20: Aufbau des Infrastrukturmanagements und Modellierung der virtuellen Abbilder der verfügbaren Infrastruktursysteme

Die Registrierung der AFR erfolgt über den Auftrag, den sie gerade bearbeiten. Entsprechend der Darstellung im vorangegangenen Abschnitt wird der AFR durch den im Auftrag implementierten Zustandsautomaten bei den jeweiligen Stationen an- und abgemeldet. Die von den Aufträgen eingehenden Anfragen werden durch ein Verteilungsmodul priorisiert und zugeordnet. Auf Basis der aktuellen Position des AFR und der verbleibenden Restflugzeit des AFR erfolgt die Zuweisung einer verfügbaren Lade- oder Servicestation. Für die Warenübergabepunkte erfolgt keine Verteilung, da Güter in der Regel von einem definierten Ort zu einem anderen transportiert werden. Hier wird durch die Verwaltung jedoch sichergestellt, dass nicht zwei AFR zu gleichen Zeit eine Station anfliegen. Ist aktuell keine geeignete Lade- oder Servicestation verfügbar, wird diese Information inkl. der verbleibenden Zeit, bis eine Station frei wird, zurückgegeben. Der AFR wartet in diesem Fall an seiner aktuellen Position, bis die Station verfügbar wird.

4.2 Schnittstellenbeschreibung und anforderungsspezifische Kommunikation innerhalb des AFRS

Entsprechend der vorherigen Ausführung handelt es sich bei dem entworfenen AFRS um ein verteiltes System, bei dem ein oder mehrere AFR untereinander sowie mit ein oder mehreren stationären Systemen drahtlos kommunizieren müssen. Dabei gelten für die zu übertragenden Informationen unterschiedliche Anforderungen an Bandbreite, Latenz und Redundanz.

Im Folgenden wird die vorgesehene Kommunikationsarchitektur inklusive der über die jeweiligen Kanäle übertragenen Informationen vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf der Kommunikation zwischen den AFR sowie zwischen AFR und stationären Systemen. Nicht im Detail betrachtet wird die Kommunikation zwischen einzelnen stationären Systemen wie GCS, zentralem Lokalisierungsserver, Ladestationen etc. Hierfür ist eine standardisierte Kommunikationsarchitektur auf Basis der Ethernet-Technik nach IEEE 802.3 Standard vorgesehen. Die jeweils auf dem OBC oder der GCS ausgeführten Softwaremodule kommunizieren über geeignete, anforderungsspezifische Softwareschnittstellen.

4.2.1 Grundstruktur der Kommunikationsarchitektur

Wie in Bild 21 dargestellt, besitzt jeder AFR drei individuelle Kommunikationsschnittstellen, die sich neben den darüber übertragenen Informationen auch in der eingesetzten Funktechnologie unterscheiden. Auf diese Weise können neben den Anforderungen an Latenz und Bandbreite auch Redundanzanforderungen erfüllt werden.

Die einzelnen Nachrichten werden wie angegeben in Abhängigkeit der erforderlichen Empfänger als Uni- oder Multicast versendet. Um dabei auf allen Systemen die gleiche Zeitreferenz zur Verfügung zu haben, wird über einen lokalen Zeitserver (nicht abgebildet) eine Zeitsynchronisation aller im System angemeldeten Systeme sichergestellt. Die genaue Spezifikation der einzelnen Schnittstellen und Kommunikationskanäle sowie die technologische Ausführung werden in den drei folgenden Abschnitten beschrieben.

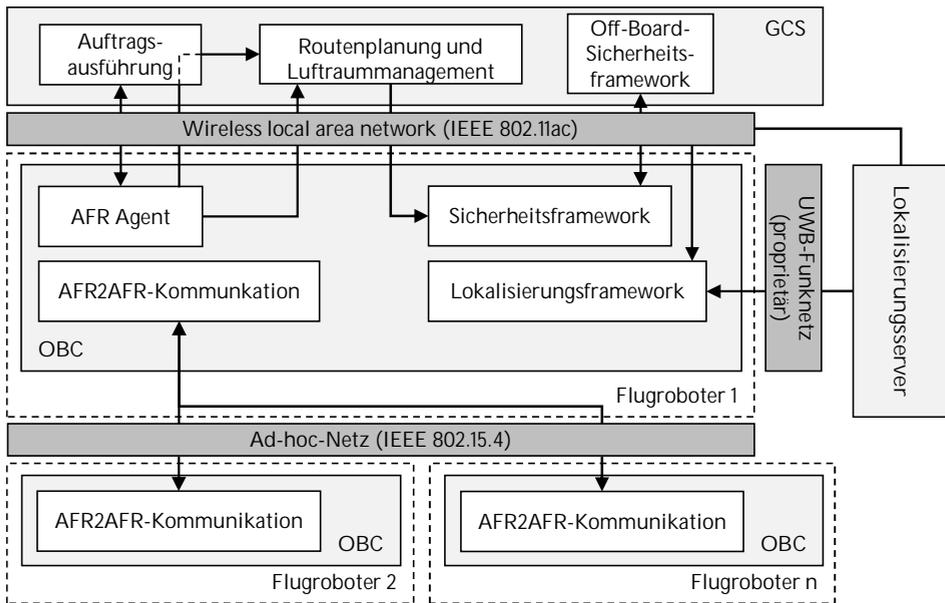


Bild 21: Strukturelle Darstellung des Kommunikationsnetzwerks des AFRS und der zwischen den einzelnen Funktionselementen vorgesehenen Nachrichtenkanäle.

4.2.2 Übertragung der zentralen Positionsinformationen

Da die Positionsinformationen für die Flug- und Kollisionssicherheit von elementarer Bedeutung sind, können diese redundant an die AFR übertragen werden. Hierzu überträgt die Auswerteeinheit des zentralen Lokalisierungssystems die Position jedes im System registrierten UWB-Sensors über ein gemeinsam genutztes drahtloses lokales Netzwerk (engl. wireless local area network (WLAN)) an die einzelnen AFR. Zusätzlich können dieselben Datenpakete nochmals über das UWB-Funknetzwerk direkt an die einzelnen UWB-Sensoren geschickt und von dort über eine entsprechende Schnittstelle an den OBC übertragen werden. Die Datenübertragung erfolgt dabei auf Basis der UWB-Technologie, sodass die benötigte Information redundant und unter Einsatz einer alternativen Funktechnologie übertragen wird. Die zugehörigen technischen Grundlagen, auf denen die Datenübertragung basiert, sind in der Fachliteratur zu finden [41].

UWB-Lokalisierungssysteme bieten bereits geeignete Schnittstellen, um neben den zur Positionierung benötigten Datenpaketen auch anwenderdefinierte Informationen zu übertragen. Unter Ausnutzung dieser Eigenschaft werden die in Tabelle 1 spezifizierten Nachrichten via WLAN-Kommunikation periodisch an alle AFR sowie via UWB-Kommunikation an die

Sensoren mit dem jeweils zugehörigen Identifikator (ID) versendet. Von den UWB-Sensoren werden die Daten anschließend an den AFR übertragen.

Tabelle 1: Inhalt der Datenpakete, die zur Übertragung der Positionsmesswerte der UWB-Sensoren an den AFR gesendet werden.

Attribut	Beschreibung
timestamp	Zeitstempel
checksum	Prüfsumme zur Validierung der Datenintegrität
id	Systemweit eindeutige ID des UWB-Sensors
position	Position des mittels der ID spezifizierten Sensors in kartesischen Koordinaten

4.2.3 Technische Ausführung und Protokoll der Kommunikation zwischen AFR und GCS

Der primäre Kommunikationskanal jedes AFR ist ein funkbasierter, bidirektionaler Unicast zwischen dem AFR und der GCS. Entsprechend Abschnitt 4.1.4 registriert sich ein AFR im Flottenmanagement und ist systemweit durch eine eindeutige Adresse auf Basis des Internetprotokolls (IP) sowie einer eindeutigen System-ID identifizierbar. Somit können Informationen gezielt und direkt zwischen GCS und AFR ausgetauscht werden. Die Informationen sind dabei in mehrere Nachrichtenkanäle unterteilt, über die die nachfolgend dargestellten Nachrichten zyklisch zwischen GCS und AFR versendet werden.

Entsprechend der vorangegangenen Darstellung wird nach der Auftragszuweisung eine direkte Kommunikation zwischen dem Auftrag und dem AFR aufgebaut. Um die Durchführung einer Aufgabe auszulösen, sendet der Auftrag initial neben dem Startbefehl die ggf. notwendigen Parameter sowie die systemweit eindeutige Auftrags-ID an den AFR-Agenten. Anschließend sendet der AFR-Agent während der Durchführung der Aufgabe zyklisch die in Tabelle 2 aufgeführten Statusinformationen. Anhand dieser können der Prozessfortschritt sowie detaillierte Informationen zum Bearbeitungsstatus visualisiert und überwacht werden. Tritt bei der Ausführung ein Fehler auf, werden im entsprechenden Feld Angaben zum Fehlertyp und den getroffenen Maßnahmen übertragen. Auf Basis dieser Informationen kann der Auftrag im Fehlerfall weiterführende Maßnahmen veranlassen und bei Bedarf übergeordnete Systeme informieren.

Tabelle 2: Inhalt der Datenpakete, die zur Statusübermittlung periodisch vom AFR an den Auftrag gesendet werden.

Attribut	Beschreibung
timestamp	Zeitstempel
checksum	Prüfsumme zur Validierung der Datenintegrität
afr_id	Systemweit eindeutige ID des AFR
task_id	Systemweit eindeutige ID des Auftrags
progress	Fortschrittsstatus der ausgeführten Aufgabe
feedback	Status und Rückkanal der aktuell ausgeführten Fähigkeit
error	Liegt ein Fehler vor, werden hier Informationen zu Ursache und getroffener Maßnahme übertragen

Bei der Anfrage der notwendigen Flugrouten schickt der AFR-Agent über den Zustandsautomaten des aktuell ausgeführten Auftrags eine Pfad-anfrage an die Routenplanung. Wird eine gültige Flugroute ermittelt, wird diese analog an den AFR-Agenten bzw. die aufgerufene Fähigkeit weitergegeben. Wird innerhalb einer definierten Zeitspanne keine gültige Flugroute zurückgegeben, werden der Auftrag und die Aufgabe abgebrochen und es wird eine Fehlermeldung an das übergeordnete System übermittelt.

Ebenfalls überträgt jeder AFR mit einer festen Frequenz Statusinformationen entsprechend Tabelle 3 an das bei der Registrierung angelegte virtuelle Abbild des AFR.

Tabelle 3: Inhalt der Datenpakete, die zur Statusübermittlung periodisch vom AFR an das zugehörige, virtuelle Abbild im Flottenmanagement gesendet werden.

Attribut	Beschreibung
timestamp	Zeitstempel
checksum	Prüfsumme zur Validierung der Datenintegrität
afr_id	Systemweit eindeutige ID des AFR
position	Aktuelle Position des AFR
velocity	Aktueller Geschwindigkeitsvektor des AFR
path[n]	Feld, mit den nächsten n Zielpunkten des AFR
system_state	Informationen zum aktuellen Flugmodus
system_health	Indikator des aktuellen Systemzustands
battery_state	Informationen zum aktuellen Akku-Ladestand

Dies ermöglicht neben der Visualisierung auch die automatisierte Funktionsüberwachung und dient als zyklische Benachrichtigung, um Zuverlässigkeit und Latenz der Funkkommunikation zu prüfen. Analog zur Darstellung im vorherigen Abschnitt werden die globalen Positionsdaten nochmals über den Funkkanal zwischen GCS und AFR übertragen. Hierfür befinden sich die GCS und der Lokalisierungsserver im gleichen Netzwerk. Die Nachrichtenstruktur ist dabei analog zur Darstellung in Tabelle 1.

In einem weiteren Nachrichtenkanal werden die Kamerabilder des On-Board-Sensorsystems zum zentralen Sicherheitsframework gesendet und dort ausgewertet. Die extrahierten Umgebungsinformationen und situationsabhängige Fluganweisungen (vgl. Abschnitt 6.4) werden zurück an den AFR-Agent gesendet. Ebenfalls können von der GCS an bestimmte oder alle registrierten AFR Notfallbefehle versendet werden, die alle auf dem AFR laufenden Aktionen abbrechen und eine Notlandung bzw. die Rückkehr zu einer Ladestation veranlassen. Dies ist beispielsweise erforderlich, wenn eine manuelle Notlandung ausgelöst wird oder ein Ausfall oder Fehlverhalten von zentralen Systemkomponenten vorliegt.

Neben den vorab spezifizierten Informationen, die kontinuierlich zwischen GCS und AFR ausgetauscht werden müssen, dient die Schnittstelle ebenfalls zur Übertragung von Protokolldateien und Auftragsergebnissen wie hochauflösenden Kamerabildern. Diese Informationen müssen nicht zwingend während des Flugs übertragen werden, sondern können nach dem Landen an die GCS zur weiteren Auswertung versendet werden.

Aufgrund der zyklisch zu übertragenden Datenmenge und der erforderlichen geringen Latenzzeiten wird für diese Kommunikation ein lokales Funknetzwerk auf Basis des IEEE 802.11ac Standards eingesetzt. Entsprechende Systeme sind der derzeitige Status Quo für die drahtlose Kommunikation von Produktionsanlagen, fahrerlosen Transportsysteme etc. und ermöglichen Datenraten im Gigabit-Bereich sowie eine geringe Übertragungslatenz [124, 125]. Alternativ sind auch zukünftige Campusnetzwerke auf Basis der 5G-Technologie optimal für diesen Einsatz ausgelegt [126].

4.2.4 Technische Ausführung und Protokoll der Kommunikation zwischen den AFR

Neben der Kommunikation der AFR mit der GCS und dem zentralen Lokalisierungsserver ist eine zusätzliche Kommunikation der AFR untereinander vorgesehen. Diese wird einerseits benötigt, um im Falle eines Ausfalls

des zentralen WLAN eine fortlaufende Kommunikation der AFR zu gewährleisten und Kollisionen zu verhindern. Weiterhin ermöglicht die AFR-Kommunikation weiterführende Applikationen wie die dezentrale Positions- und Geschwindigkeitssynchronisation von mehreren AFR. Die Kommunikation der AFR ist dabei als Broadcast umgesetzt, wobei jeder AFR zyklisch die in Tabelle 4 dargestellten Informationen zum eigenen Systemzustand an alle in Reichweite befindlichen AFR verschickt.

Tabelle 4: Inhalt der Datenpakete, die bei der Ad-hoc Kommunikation zwischen den einzelnen AFR ausgetauscht werden.

Attribut	Beschreibung
timestamp	Zeitstempel
checksum	Prüfsumme zur Validierung der Datenintegrität
afr_id	Systemweit eindeutige ID des AFR
size	Größenklasse des AFR
position	Aktuelle Position des AFR
velocity	Aktueller Geschwindigkeitsvektor des AFR
path[n]	Feld, mit den nächsten n Zielpunkten des UA

Somit können anhand der übertragenen Daten während des Fluges situationsabhängige Entscheidungen getroffen werden. Hierzu zählt beispielsweise die Reduktion der Geschwindigkeit bei Vorbeiflug anderer AFR.

Zur Übertragung der Informationen ist jeder AFR mit einem geeigneten Kommunikationsmodul ausgestattet, um mit allen in Reichweite befindlichen AFR in seiner Umgebung ein geeignetes Ad-hoc-Netzwerk aufbauen zu können. Analog zum Stand der Forschung bietet sich hier ein System auf Basis des Standard IEEE 802.11p oder des Standard IEEE 802.15.4 an [127, 128].

4.3 Kombinierte Lokalisierung mittels globaler Positionsbestimmung und On-Board-Sensorik

Entscheidend für den Einsatz von AFR ist eine kontinuierliche, präzise Lokalisierung. Da in Innenräumen die Platzverhältnisse stark eingeschränkt sind und hierdurch die Kollisionsgefahr im Vergleich zu Außenbereichen stark erhöht ist, wird eine robuste Positionsbestimmung mit hoher Genauigkeit gefordert. Dabei ist sowohl aus sicherheitstechnischen als auch aufgabenspezifischen Gründen eine verteilte Lokalisierung erforderlich. Dies bedeutet, der AFR muss zum einen über ein zentrales System lokalisiert

werden und zum anderen seine Position auch unabhängig von diesem System über On-Board-Sensoren bestimmen können. Weiterhin ist es notwendig, dass sich ein AFR nicht nur in einem globalen Koordinatensystem, sondern auch relativ zu Objekten präzise lokalisieren kann. Das daraus abgeleitete Vorgehen zur präzisen und skalierbaren Lokalisierung der AFR wird im Folgenden vorgestellt.

4.3.1 Methode zur globalen Lokalisierung der AFR

Da GNSS in Innenräumen nicht zur Verfügung stehen, wird ein UWB-Lokalisierungssystem als übergeordnetes System zur globalen Positionsbestimmung gewählt. Entsprechend der Betrachtung in Abschnitt 2.2.1 ermöglichen UWB-Systeme die präzise Lokalisierung mit einer Absolutgenauigkeit bis in den Zentimeterbereich. Gängige Systeme ermöglichen weiterhin die gleichzeitige, echtzeitfähige Lokalisierung einer Vielzahl von Objekten. Aus diesen Gründen haben sich UWB-Systeme bereits zur Lokalisierung von fahrerlosen Transportsystemen etabliert und bieten sich ebenfalls zur dreidimensionalen Positionsbestimmung von AFR an. Da neben der Position auch die Orientierung eines AFR bestimmt werden muss, ist es erforderlich, jedes AFR mit mehreren UWB-Sensoren auszustatten. Hierdurch kann auf Basis der verschiedenen Signallaufzeiten und der bekannten räumlichen Beziehung der Sensoren zueinander, die Orientierung des AFR bestimmt werden. Das hierfür entwickelte Vorgehen ist in Bild 22 dargestellt.

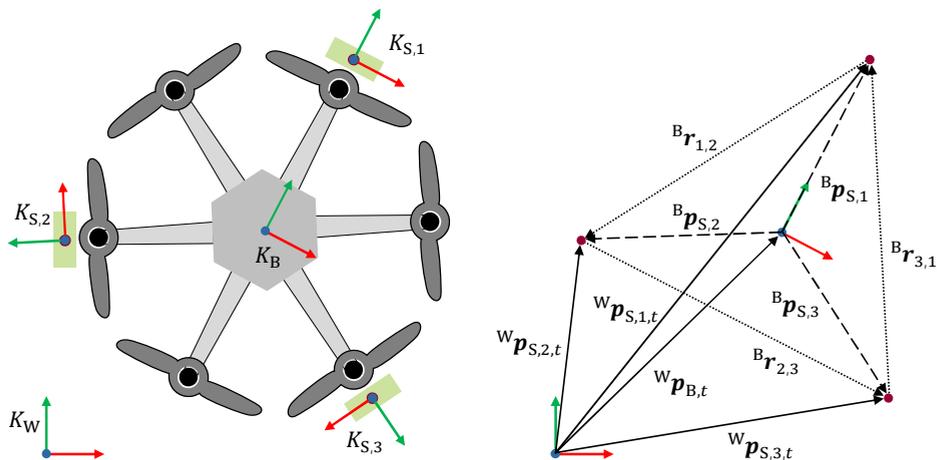


Bild 22: Skizze eines AFR mit angebrachten UWB-Sensoren und zugehörigen Koordinatensystemen (links) und genutzte geometrische Zusammenhänge zur Berechnung der Orientierung des AFR (rechts)

Zunächst werden am Rahmen des AFR mehrere UWB-Sensoren so angebracht, dass die Anbringungsorte der Sensoren die Eckpunkte eines regulären Polygons definieren, dessen Schwerpunkt mit dem körperfesten Koordinatensystem K_B des AFR übereinstimmt. In diesem Fall wird der mittlere Abstand der Sensoren zueinander maximiert, wodurch bei der Berechnung des Gierwinkels ψ die besten Ergebnisse erzielt werden.

Jeder Sensor i besitzt nach der Anbringung am AFR eine bekannte Translation ${}^B\mathbf{p}_{S,i}$ gegenüber K_B . Die Anzahl der angebrachten Sensoren wird im Folgenden als N_S bezeichnet. Die Positionsbestimmung der UWB-Sensoren erfolgt in Bezug auf das ortsfeste Koordinatensystem K_W , somit liegt für jeden Messzeitpunkt t für jeden Sensor eine Positionsmessung ${}^W\mathbf{p}_{S,i,t}$ vor. Die zugehörige globale Position ${}^W\mathbf{p}_{B,t}$ des AFR wird anschließend unter Ausnutzung der symmetrischen Sensoranbringung aus dem Mittelwert der Einzelmessungen bestimmt und kann anhand der Gleichung

$${}^W\mathbf{p}_{B,t} = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} {}^W\mathbf{p}_{S,i,t} \quad (4.1)$$

berechnet werden. Um die Orientierung des AFR in Bezug zu K_W möglichst exakt zu bestimmen, werden die bekannten, geometrischen Zusammenhänge der angebrachten UWB-Sensoren ausgenutzt. Dabei wird berücksichtigt, dass der Roll- und Nickwinkel mit Hilfe einer IMU hinreichend präzise erfasst werden, so dass nur der Gierwinkel ψ mit Hilfe des UWB-Systems bestimmt wird.

Aus den bekannten Translationen ${}^B\mathbf{p}_{S,i}$ lässt sich für jede Kombination ohne Wiederholung k zweier Sensoren i und j ein ebenfalls bekannter Richtungsvektor ${}^B\mathbf{r}_{i,j}$ bestimmen. Sowohl ${}^B\mathbf{p}_{S,i}$ als auch ${}^B\mathbf{r}_{i,j}$ sind dabei konstant und müssen nur bei Umbauten des AFR neu bestimmt werden.

Während des Fluges lässt sich aus den gemessenen Positionen zweier UWB-Sensoren ${}^W\mathbf{p}_{S,i,t}$ und ${}^W\mathbf{p}_{S,j,t}$ der zugehörige Richtungsvektor ${}^W\mathbf{r}_{i,j,t}$ bestimmen. Anhand der aus den geometrischen Anbringungsorten abgeleiteten Richtungsvektoren ${}^B\mathbf{r}_{i,j}$ und den aus den Messdaten bestimmten Richtungsvektoren ${}^W\mathbf{r}_{i,j,t}$ lässt sich der Gierwinkel $\psi_{k,t}$ der einzelnen Sensorkombinationen k in Bezug auf K_W über den Zusammenhang

$$\psi_{k,t} = \arctan2\left({}^W\mathbf{r}_{i,j,t}^x, {}^W\mathbf{r}_{i,j,t}^y\right) - \arctan2\left({}^B\mathbf{r}_{i,j}^x, {}^B\mathbf{r}_{i,j}^y\right) \quad (4.2)$$

bestimmen. Dabei wird $\psi_{k,t}$ auf Basis der bekannten geometrischen Beziehungen und der Messwerte der einzelnen Sensorkombinationen mehrfach

bestimmt. Für den AFR folgt der globale Gierwinkel ψ_t in Bezug auf K_W als Mittelwert der Einzelwinkel $\psi_{k,t}$, welcher über die Gleichung

$$\psi_t = \arctan2\left(\sum_{k=1}^{N_k} \sin \psi_{k,t}, \sum_{k=1}^{N_k} \cos \psi_{k,t}\right) \quad (4.3)$$

bestimmt werden kann [129]. Die Anzahl der möglichen Sensorkombinationen N_k berechnet sich dabei über den Binomialkoeffizient $\binom{N_s}{2}$.

Da die Positionsbestimmung bei UWB-Systemen in der Regel auf einer zentralen Recheneinheit erfolgt, müssen zur Lokalisierung eines AFR lediglich die UWB-Sensoren an diesem angebracht und mit Strom versorgt werden. Die Übertragung der berechneten Position an den OBC erfolgt drahtlos.

4.3.2 Optimierung der globalen Position mittels On-Board-Sensorik

Während die UWB-Technologie die robuste, globale Posebestimmung der AFR ermöglicht, ist es in vielen Anwendungsfällen oftmals erforderlich, eine sehr präzise Positionierung des AFR in Relation zu einem Objekt zu erzielen. Typische Anwendungsfälle sind beispielsweise das automatisierte Aufnehmen von Transportgütern, die Manipulation von Objekten sowie die optische Inspektion und Inventur. Da die relevanten Objekte in der Regel nicht durch das UWB-System erfasst werden und die erforderliche Flugpräzision mit den durch das UWB-System bereitgestellten Messdaten oftmals nicht erreicht werden kann, muss der AFR in der Lage sein, die relevanten Objekte zu lokalisieren und seine Flugposition relativ zu diesen Objekten präzise auszurichten und zu stabilisieren.

Weiterhin kann durch geeignete On-Board-Lokalisierungsverfahren die erreichbare Flugpräzision weiter erhöht werden und eine Redundanz bei der Lokalisierung erzielt werden. Hierdurch kann auch bei Ausfall des globalen Lokalisierungssystems die Flugstabilität bis zur sicheren Notlandung aufrechterhalten werden. Um die Fusion der verschiedenen Lokalisierungsinformationen sowie eine präzise relative Positionierung anhand von On-Board-Sensoren zu ermöglichen, wird ein hierfür entwickeltes Framework auf dem AFR ausgeführt. Der grundlegende Aufbau und der Ablauf bei der Datenfusion sind in Bild 23 dargestellt.

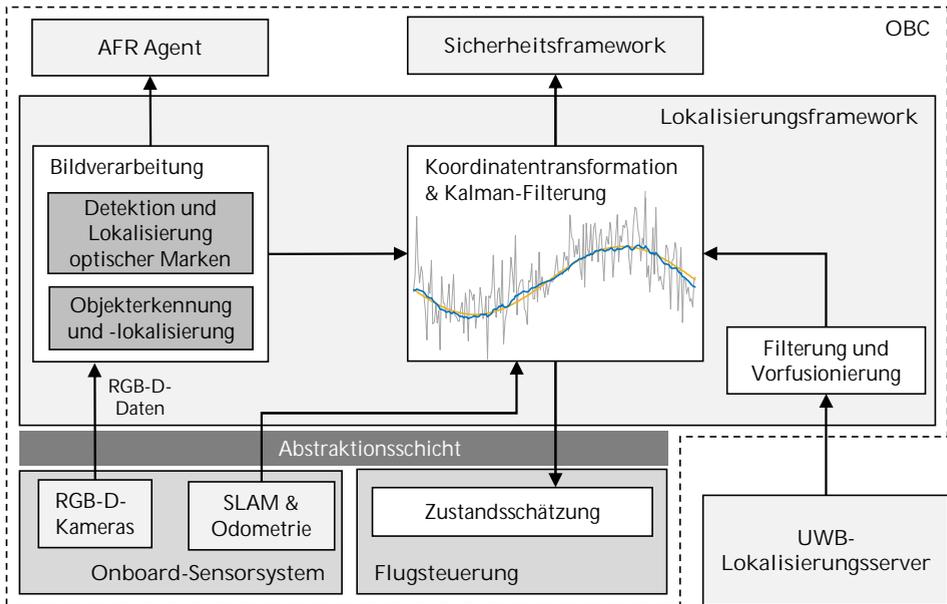


Bild 23: Lokalisierungsframework zur Fusion von Pose- und Geschwindigkeitsdaten aus mehreren Quellen bzw. Sensorsystemen.

Das Kernelement des auf dem OBC ausgeführten Lokalisierungsframeworks bildet die dynamische Sensordatenfusion, welche auf einem erweiterten Kalman-Filter beruht. Dieser fusioniert die verfügbaren Eingangsdaten und übergibt das Ergebnis an die interne Zustandsschätzung der Flugsteuerung sowie das Sicherheitsframework.

Die Eingangsdaten der Fusionierung bestehen dabei aus der auf Basis des globalen UWB-Lokalisierungssystems bestimmten Flugposition und Orientierung des AFR. Weiterhin können Positions- oder Geschwindigkeitsmessungen des On-Board-Sensorsystems, welche beispielsweise mittels visueller Odometrie oder SLAM bestimmt werden, bei der Fusionierung berücksichtigt werden. Der aktuelle Stand der Technik bietet dabei kleine, leichte Sensorsysteme, die direkt auf dem Sensor eine SLAM durchführen und zusätzlich Odometriedaten bereitstellen. Weiterhin sind Frameworks verfügbar, die auf Basis von Farb- und Tiefendaten eine SLAM durchführen und direkt auf dem OBC ausgeführt werden können.

Erkennung und Lokalisierung von Objekten

Zusätzlich können auch die Positionen von optischen Referenzmarken sowie von erkannten und lokalisierten Objekten in der Umgebung bei der Fusion mit einbezogen werden. Hierfür muss zunächst deren Position in Relation zum AFR bestimmt werden. Dazu wird das Objekt auf Basis von

Farb- und ggf. Tiefendaten erkannt und unter Einbeziehung der bekannten intrinsischen Parameter des eingesetzten Kameramodells die räumliche Position der erkannten Objekte bestimmt. Zur echtzeitnahen Erkennung der Interaktionsobjekte eignen sich sowohl feature- und farbbasierte Algorithmen aus der klassischen Bildverarbeitung als auch maschinelle Lernverfahren. Eine Darstellung und tiefgehende Evaluation geeigneter Methoden zur Erkennung und Lokalisierung von Interaktionsobjekten ist in den Publikationen [P5] und [P4] zu finden.

In der vorliegenden Gesamtsystemarchitektur erfolgt die Erkennung und Lokalisierung der Objekte als individuelles Softwaremodul, das als Eingangsdaten die benötigten Kameradaten enthält und die Position der gesuchten Objekte im Kamerabild an das Lokalisierungsframework weitergibt. Hierdurch wird gewährleistet, dass ein AFR lediglich ein Update dieses Softwaremoduls benötigt, um die präzise Positionierung zu weiteren Objekten zu ermöglichen. Dabei wird bei der Lokalisierung des AFR anhand von stationären Objekten in der Umgebung das nachfolgend beschriebene Vorgehen angewendet. Bild 24 zeigt die hierzu notwendigen Koordinatensysteme und Transformationen.

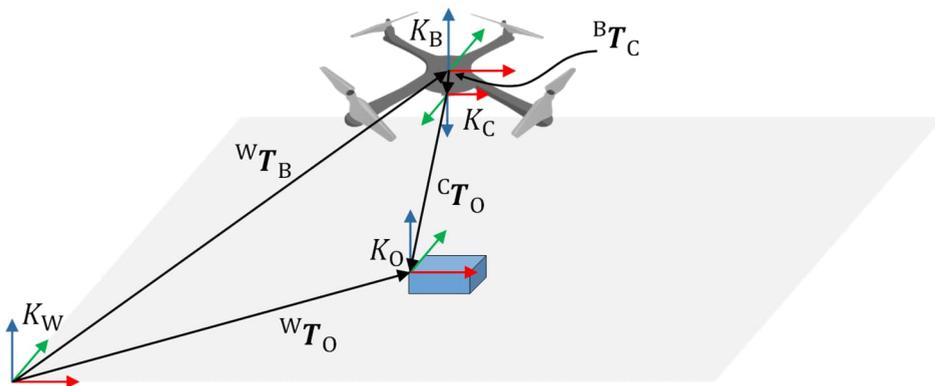


Bild 24: Darstellung der zur objektbezogenen Lokalisierung des AFR definierten Koordinatensysteme und der zugehörigen Transformationen, in Anlehnung an [P5]

Wird ein geeignetes Objekt in den Kamerabildern detektiert, wird über das zugehörige Lokalisierungsmodul die Transformationsmatrix ${}^C T_O$ bestimmt, welche die Lage des Objektkoordinatensystems K_O im Kamerakoordinatensystem K_C angibt. Zudem ist die Transformation ${}^B T_C$ zwischen dem körperfesten Koordinatensystem K_B des AFR und K_C anhand der Montageposition der Kamera bekannt.

Anschließend kann das erkannte Objekt als Landmarke in eine Datenbank eingetragen werden. Die hierfür benötigte globale Pose des Objekts ergibt sich dabei über die Transformation

$${}^W\mathbf{T}_O = {}^W\mathbf{T}_B \cdot {}^B\mathbf{T}_C \cdot {}^C\mathbf{T}_O \quad (4.4)$$

und kann in entsprechenden Anwendungsfällen, wie beispielsweise der Lokalisierung von Objekten oder der Bestandserfassung, direkt als Auswertergebnis verwendet werden. Die Transformation ${}^W\mathbf{T}_B$ wird dabei, wie in Abschnitt 4.3.1 dargestellt, anhand der Daten des UWB-Lokalisierungssystems berechnet. Zur Optimierung der Positionsschätzung des AFR anhand eines stationären Objekts wird die Pose des Objekts in den Kamerabildern bestimmt und über die bekannte Transformation ${}^C\mathbf{T}_B$ in K_B überführt. Unter der Bedingung, dass das Objekt ortsfest ist, lässt sich über die inverse Transformation ${}^O\mathbf{T}_B$ die Pose des AFR in Relation zum Objekt sowie die Relativgeschwindigkeit zwischen AFR und Objekt berechnen.

Wird die Position des AFR in Relation zu einem Objekt bestimmt, muss berücksichtigt werden, dass bei Verfahren, welche bei der Objektlokalisierung die extrinsischen Kameraparameter mittels Homographie bestimmen, insbesondere die Rotation der Transformation ${}^S\mathbf{T}_O$ nur genau berechnet werden kann, wenn das Objekt ausreichend groß im Kamerabild abgebildet und der Winkel zwischen optischer Achse der Kamera und Objektoberfläche hinreichend klein ist [49, 130]. Wird dies nicht berücksichtigt, kann bei der Rücktransformation ${}^O\mathbf{T}_S$ zur Bestimmung der Pose des AFR entsprechend die Translation signifikant abweichen und die Lokalisierungsgenauigkeit deutlich verschlechtern [131].

Die Lokalisierung relativ zu Objekten wird daher primär für Interaktionsobjekte ober- oder unterhalb des AFR (Transportgüter, Lade- und Dockingstationen etc.) eingesetzt. Liegt die Neigung des AFR dabei unterhalb von 5° , wird der Winkel zwischen Objekt und optischer Achse der Kamera hinreichend klein, um die Pose des AFR in Relation zum Objekt präzise zu bestimmen. Weiterhin kann durch geeignete Korrekturmaßnahmen der Einfluss des Blickwinkels minimiert werden. [130]

Erweiterter Kalman-Filter zur Zustandsschätzung

Zur Fusionierung der verfügbaren Messinformationen kommt ein erweitertes Kalman-Filter zum Einsatz, da dieses die Möglichkeit bietet, auch nicht-lineare Zusammenhänge abzubilden. Dabei gehen die anhand des zentralen UWB-Lokalisierungssystems bestimmte Position und Orientierung des AFR in absoluter Form in die Kalman-Filterung ein. Zusätzlich können die

auf Basis von erkannten Objekten berechnete Pose des AFR sowie Geschwindigkeitsmessungen basierend auf der visuellen Odometrie bei der Schätzung der aktuellen Flugpose als Eingangswerte berücksichtigt werden. Steht über eine SLAM eine zusätzliche Poseschätzung zur Verfügung, kann diese als Redundanzinformation zu den UWB-Daten als absolute Messinformation verwendet werden. Fällt die Lokalisierung über das UWB-System aus, kann ein direkter Wechsel zu den Daten des SLAM erfolgen. Um beim Wechsel keinen Sprung in den Messdaten zu verursachen, müssen die mittels SLAM bereitgestellten Poseinformationen noch aus dem Koordinatensystem K_M der erstellten Karte nach K_W transformiert werden. Hierfür wird im Normalbetrieb zyklisch die aktuelle Roboterpose in K_M und K_W bestimmt, um aus der Differenz der beiden Posen die erforderliche Transformation ${}^W T_M$ zu bestimmen.

Bei einem Kalman-Filter handelt es sich um ein rekursives Filter, welches die Zustände eines linearen dynamischen Systems auf Basis von rauschbehafteten Messungen schätzt. Der Prozess lässt sich dabei in einen Vorhersageschritt sowie einen Korrekturschritt unterteilen. Während der Vorhersage werden die Zustände für den nachfolgenden Zeitschritt anhand eines Dynamikmodells des zugrundeliegenden Systems geschätzt, welche im anschließenden Schritt anhand von Messdaten korrigiert werden. Für die genaue Herleitung, die mathematische Beschreibung sowie Bedeutung und Aufbau der nachfolgend berücksichtigten Größen und Matrizen sei an dieser Stelle auf die zugehörige Fachliteratur verwiesen. [132, 133]

Der genannte Vorhersageschritt wird durch die beiden Gleichungssysteme

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{t-1} \quad (4.5)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_t = \mathbf{A}\mathbf{P}_{t-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (4.6)$$

beschrieben. Dabei beschreibt $\hat{\mathbf{x}}_t$ den im aktuellen Schritt t geschätzten Zustandsvektor des Systems und \mathbf{x}_{t-1} den Zustandsvektor im vorhergehenden Zeitschritt. Die Syntax gilt in gleicher Form für die zugehörige Kovarianzmatrix $\hat{\mathbf{P}}$ der Schätzung. Zusätzlich benötigt werden die Dynamikmatrix \mathbf{A} , in der das Systemmodell, beispielsweise in Form von Bewegungsgleichungen, abgebildet ist, sowie die Matrix \mathbf{Q} , die das Prozessrauschen festlegt. Hierdurch können zusätzliche Fehlereinflüsse, die durch Ungenauigkeiten des Systemmodells hervorgerufen werden, berücksichtigt werden. Sind die von außen auf das System wirkenden deterministischen Steuersignale, wie beispielsweise die vorgegebene Rotordrehzahl, bekannt, werden diese als Steuervektor \mathbf{u}_{t-1} modelliert. Hierfür wird ergänzend die

Steuermatrix \mathbf{B} benötigt, die den Einfluss der Steuersignale auf den Systemzustand beschreibt.

Der nachfolgende Korrekturschritt ist durch die Gleichungssysteme

$$\mathbf{K}_t = \hat{\mathbf{P}}_t \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \hat{\mathbf{P}}_t \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{x}_t = \hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{K}_t (\mathbf{z}_t - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_t) \quad (4.8)$$

$$\mathbf{P}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}) \hat{\mathbf{P}}_t \quad (4.9)$$

beschrieben. Während dieses Schritts wird die vorhergehende Schätzung des Zustandsvektors und der zugehörigen Kovarianzmatrix auf Basis der aktuellen Messung \mathbf{z}_t korrigiert. Dabei bestimmt der Kalman-Gain \mathbf{K}_t wie stark die Differenz zwischen der Messung \mathbf{z}_t und der vorangegangenen Schätzung $\hat{\mathbf{x}}_t$ bei der Korrektur gewichtet werden soll. Neben dem geschätzten Zustandsvektor und der geschätzten Kovarianzmatrix aus dem Vorhersageschritt wird für jeden einfließenden Sensor eine Beobachtungsmatrix \mathbf{H} , welche die Messwerte des Sensors auf die Systemzustände abbildet, sowie die Kovarianzmatrix des Messrauschens \mathbf{R} benötigt. Beide Matrizen werden vorab für jeden einfließenden Sensor des AFR bestimmt. Zusätzlich erforderlich ist eine initiale Schätzung für $\hat{\mathbf{x}}_t$ und $\hat{\mathbf{P}}_t$, welche die Systemzustände und deren Unsicherheit direkt nach der Initialisierung des Filters angibt.

Liegt, wie bei der vorherrschenden Problemstellung, ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen den Zuständen und Messinformationen vor, ist das beschriebene, klassische Kalman-Filter nicht mehr anwendbar. Stattdessen wird ein erweitertes Kalman-Filter eingesetzt, das die lineare Abbildung zwischen den Größen durch nichtlineare Funktionen ersetzt. Um dabei auch die Kovarianzen zwischen zwei Zeitschritten weitergeben zu können, werden die nichtlinearen Funktionen zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt linearisiert, wofür eine Taylor-Näherung erster Ordnung verwendet wird. [134]

Somit ändern sich für ein erweitertes Kalman-Filter die Gleichungen (4.5) und (4.6) zu

$$\hat{\mathbf{x}}_t = f(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{u}_{t-1}) \quad (4.10)$$

und

$$\mathbf{x}_t = \hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{K}_t (\mathbf{z}_t - h(\hat{\mathbf{x}}_t)). \quad (4.11)$$

Dabei kennzeichnet $f(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{u}_{t-1})$ eine nicht-lineare Funktion, die den Zustandsübergang zwischen zwei Zeitschritten beschreibt und $h(\hat{\mathbf{x}}_t)$ eine nicht-lineare Funktion, die die geschätzten Zustandsgrößen auf die verfügbaren Messwerte abbildet. Zur Abbildung der Kovarianzen werden die konstanten Matrizen \mathbf{A} , \mathbf{B} und \mathbf{H} durch die zeitabhängigen Varianten \mathbf{F}_t und \mathbf{H}_t ersetzt, deren Inhalt sich über die Vorschrift

$$\mathbf{F}_t = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{H}_t = \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_t} \quad (4.13)$$

berechnet. Die Gleichungen (4.7) bis (4.9) werden anschließend mit den entsprechend Matrizen aktualisiert. [134, 62]

Sollen die Daten mehrerer Sensoren bei der Korrektur berücksichtigt werden, wird der Korrekturschritt sequentiell für jede verfügbare Sensorbeobachtung durchgeführt. Nach jedem Abschluss der Vorhersage- und Korrekturphase werden aus dem geschätzten Zustandsvektor $\hat{\mathbf{x}}_t$ die aktuelle Position ${}^W\mathbf{p}_{B,t}$ und der Gierwinkel ψ_t an die Flugsteuerung zur weiteren Zustandsschätzung weitergeleitet. Der Gierwinkel wird in einem Wertebereich von $[-\pi, \pi]$ definiert, Übergänge zwischen den beiden Bereichsgrenzen werden dabei bei der Zustandsschätzung entsprechend erfasst und korrigiert. Durch das beschriebene Vorgehen wird es ermöglicht, während des Fluges Lokalisierungsinformationen aus unterschiedlichen Quellen dynamisch zu fusionieren. Dies ermöglicht es, die Flugpräzision signifikant zu steigern und hierdurch Interaktionsprozesse sowie präzise optische Datenerfassungen zu realisieren.

4.4 Zusammenfassung und Bewertung

In den vorangegangenen Ausführungen wurde die übergeordnete Gesamtarchitektur des erforschten AFRS vorgestellt. Durch den darin vorgesehenen AFR-Agenten wird eine Abstraktion der eingesetzten AFR ermöglicht, sodass die durchzuführenden Aufgaben und hierfür notwendigen Fähigkeiten unabhängig von der zugrundeliegenden FCU und dem Hardwareaufbau des AFR beschrieben werden können. Ebenfalls vorgesehen sind in der Architektur ein geeignetes Flotten-, Auftrags- und Infrastrukturmanagement und es werden einheitliche Kommunikationskanäle und Schnittstellen definiert.

Erweiternd zum Stand der Technik und Forschung führt die vorgestellte Systemarchitektur alle für den Einsatz einer heterogenen Flotte von AFR notwendigen Funktionalitäten, Schnittstellen und Informationen in einem modularen System zusammen. Der spezifizierte AFR-Agent ermöglicht die schnelle, herstellerunabhängige Integration verschiedener AFR in das System. Durch die Abstraktion in Elementarfunktionen, Fähigkeiten, Aufgaben und Aufträge bietet jede Ebene der Systemarchitektur nach oben hin einheitliche Schnittstellen, wodurch eine flexible Erweiterung ermöglicht wird. Zudem können AFR mit unterschiedlichem Aufbau und Funktionsumfang integriert werden, ohne dass hierfür Anpassungen an der Systemarchitektur notwendig sind. Die spezifizierte Kommunikationsarchitektur ermöglicht die zuverlässige und, sofern notwendig, redundante Übertragung aller relevanten Daten und Zustandsinformationen.

Ein weiteres innovatives Kernelement der Systemarchitektur stellt das Lokalisierungsframework mit integrierter Objektlokalisierung und Sensordatenfusion dar. Durch den Einsatz eines UWB-Lokalisierungssystems kann mit der vorgestellten Methode auch in weitläufigen Werks- und Logistikumgebungen die globale Pose der AFR zuverlässig und robust bestimmt werden. Um auch in Bereichen mit geringerer Signalqualität und Genauigkeit des UWB-Lokalisierungssystems eine präzise Posebestimmung zu ermöglichen, werden im Lokalisierungsframework zudem die verfügbaren Messdaten des On-Board-Sensorssystems mit den UWB-Messinformationen fusioniert. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Erkennung und Lokalisierung von aufgabenspezifischen Objekten wie Transportgütern oder optischen Informationsträgern. Hierdurch kann die Positioniergenauigkeit soweit gesteigert werden, dass eine präzise Objektinteraktion ermöglicht wird, die im Stand der Technik und Forschung sonst oftmals nur durch den Einsatz kostenintensiver und für das weitläufige Produktions- und Logistikumfeld ungeeigneter Motion-Capturing-Systeme möglich wird.

Wie bereits in der Anforderungsanalyse aufgeführt, müssen neben der präzisen Lokalisierung für den Einsatz von AFR ebenfalls die Navigation und Pfadplanung automatisiert erfolgen. Weiterhin ist es erforderlich, dass die Flugrouten an die Einsatzumgebung innerhalb einer Werks- oder Produktionshalle angepasst sind und der Flugverkehr kontinuierlich überwacht und koordiniert wird. Ein hierfür geeignetes, in die vorgestellte Gesamtarchitektur integrierbares Routenplanungs- und Luftraummanagementsystem wird im Folgekapitel vorgestellt.

5 Methode zum Luftraummanagement und zur ebenenbasierten Routenplanung in Werks- und Logistikhallen

Mit ihrem bislang vorgestellten Funktionsumfang ermöglicht die Systemarchitektur bereits den automatisierten, gleichzeitigen Flug mehrerer AFR, deren Kommunikation untereinander sowie mit stationären Systemkomponenten und eine präzise Lokalisierung sowie Objektinteraktion. Jedoch fehlt für die Realisierung eines AFRS noch ein geeignetes holistisches Weltmodell, auf dessen Basis die Routenplanung erfolgen kann. Weiterhin ist ein geeignetes Luftraummanagementsystem erforderlich, das die aktuelle Position der registrierten AFR überwacht, Kollisionen zwischen AFR zuverlässig verhindert und dabei auch die Baugröße der AFR und die verursachte Luftströmung berücksichtigt. Da hierfür geeignete Lösungen im Stand der Forschung und Technik derzeit nicht verfügbar sind, wird für die Gesamtarchitektur ein entsprechendes Framework zum Luftraummanagement sowie zur dreidimensionalen Routenplanung konzeptioniert und umgesetzt.

In diesem Zusammenhang muss zudem das Luftraummanagement der zivilen Luftfahrt betrachtet werden, um bestehende Ansätze ggf. übertragen zu können. Entsprechend den Vorgaben der ICAO [135–137] erfolgt die Planung des Flugverkehrs anhand von definierten Wegpunkten, die durch ihre geografischen Koordinaten gekennzeichnet sind. Weiterhin sind Luftstraßen für vielbeflogene Routen definiert, die sich aus geradlinigen, zwischen zwei Wegpunkten verlaufenden, Streckensegmenten zusammensetzen.

Die vertikale Ausdehnung des für die zivile Luftfahrt genutzten Luftraums ist in definierte Flugebenen unterteilt, die, je nach Höhe über dem Meeresspiegel, einen Abstand von 300 m bzw. 600 m aufweisen. Um den Luftraum weiter zu strukturieren, werden die Flugebenen nach der Halbkreisflugregel in West- und Ostrichtung unterteilt, sodass einem Flugzeug abhängig von seinem Kurs nur bestimmte Flugflächen zur Verfügung stehen. Um in allen Flugphasen die definierten horizontalen und vertikalen Mindestabstände zwischen zwei oder mehreren Flugzeugen sicherzustellen, existieren klare Flugregeln und es erfolgt eine durchgängige Koordination und Überwachung aller betreffenden Luftfahrzeuge durch die Flugsicherung.

Während das in der zivilen Luftfahrt angewandte Verfahren für eine Umgebung mit definierten, gleichbleibenden Start- und Zielpunkten bislang

noch ausreichend ist, kann es für den Einsatz eines AFRS in einem dynamischen, industriellen Umfeld nicht eingesetzt werden. Dies ist neben der Notwendigkeit zur Anpassung der Flugrouten an unterschiedliche, zeitlich veränderliche Einsatzräume auch dadurch begründet, dass eine manuelle Planung und Koordination des Flugbetriebs für ein AFRS nicht zielführend ist. Stattdessen müssen alternative Vorgehen erforscht werden, die explizit auf die Anforderungen eines AFRS im Produktions- und Logistikumfeld zugeschnitten sind und die erforderliche Flexibilität ermöglichen.

Einzelne Aspekte der folgenden Abschnitte 5.1 bis 5.3 sowie der in Abschnitt 7.1 beschriebenen zugehörigen Implementierung sind an mehrere am Lehrstuhl FAPS entstandene, vom Autor initiierte studentische Arbeiten angelehnt [S14–S23]. Weiterhin wurden Teilaspekte der beschriebenen Methoden sowie der zugehörigen Implementierung bereits durch den Autor vorab publiziert [P6], um sie der internationalen Fachwelt zugänglich zu machen.

5.1 Architektur und Funktionsweise des Luftraummanagements und der Routenplanung

Zu Beginn erfolgt die Beschreibung der zu berücksichtigenden Anforderungen, des übergeordneten Lösungsansatzes und der Schnittstellen zur Integration in die spezifizierte Gesamtsystemarchitektur. Anschließend werden das erforschte Weltmodell, die darauf basierende Ableitung geeigneter Planungsgraphen sowie die Routenplanung und die Kollisionsüberwachung im Detail beschrieben.

5.1.1 Anforderungsdefinition

Um eine geeignete Architektur für Luftraummanagement und Routenplanung spezifizieren zu können, werden zunächst die zugrundeliegenden Rahmenbedingungen und Anforderungen herausgearbeitet.

Jeder AFR muss sich nach der Initialisierung beim Luftraummanagement anmelden, um anschließend von der Routenplanung geeignete Flugrouten zugewiesen bekommen zu können. Das Luftraummanagement muss dabei die aktuelle Position aller registrierten AFR überwachen, Abweichungen von vorgegebenen Flugpfaden detektieren und Kollisionen verhindern. In Bezug auf den Arbeitsraum gilt, dass die horizontalen Abmessungen einer Produktions- oder Logistikhalle deutlich größer als die Höhe sind. Zudem verursachen AFR einen nach unten gerichteten Luftstrom, welcher einen Einfluss auf ein darunter fliegendes AFR haben kann. Beide Faktoren

müssen in geeigneter Form bei der Weltmodellierung und Pfadplanung berücksichtigt werden. Weiterhin müssen Bereiche für den Flugverkehr ausgeschlossen werden können und Landekorridore definiert werden können, in denen sich ein AFR jeweils nur während des Start- oder Landevorgangs aufhalten darf.

5.1.2 Methode und Lösungsansatz

Unter dem Gesichtspunkt, dass die horizontale Ausdehnung des Arbeits- und Konfigurationsraums die vertikale Ausdehnung deutlich übersteigt, wird zur Darstellung des Luftraums und der darauf basierenden Routenplanung analog zur zivilen Luftfahrt ein ebenenbasiertes Modell erforscht. Dabei steht jedoch explizit eine freie Navigation innerhalb und zwischen den Flugebenen im Fokus. Die Grundidee dieses Ansatzes ist in Bild 25 visualisiert.

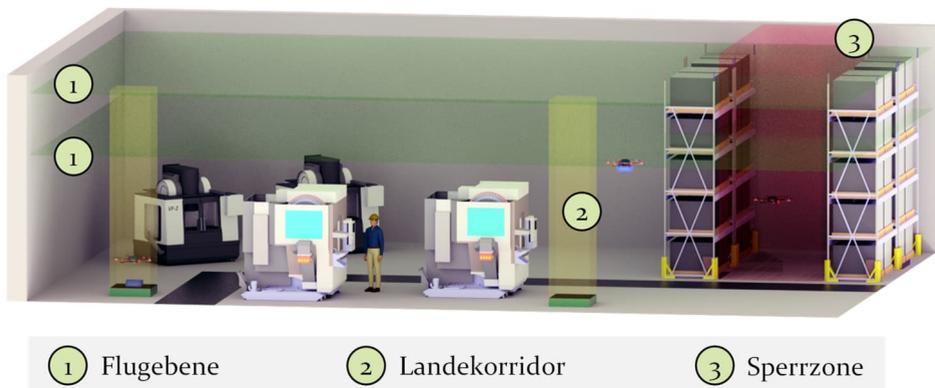


Bild 25: Konzept der ebenenbasierten Routenplanung und des Luftraummanagements für den Einsatz von AFRS innerhalb von Werks- und Logistikhallen.

Ausgehend von den geometrischen Abmessungen der Einsatzumgebung der AFR wird der Flugbereich zunächst in diskrete Ebenen unterteilt. Die einzelnen Flugebenen haben einen vorab festgelegten, unveränderlichen Abstand zueinander. Die Pfade der AFR werden anschließend mit einem auf das Ebenenmodell angepassten Pfadplanungsalgorithmus so geplant, dass sie lediglich aus horizontalen Bewegungen innerhalb der einzelnen Ebenen sowie vertikalen Übergängen zwischen den Ebenen bestehen.

Die einzelnen Flugebenen repräsentieren dabei nicht nur die vorhandenen statischen Hindernisse, sondern können zusätzliche Informationen über Sperrzonen, Landekorridore und bestehende Flugrouten enthalten. In Sperrzonen ist der Flug aller oder einzelner AFR untersagt. Sperrzonen

werden daher auch genutzt, um einzelnen AFR eine ebenenunabhängige Navigation, beispielsweise bei der Inventur in Regallagern, zu ermöglichen. Landekorridore sollen nur durchflogen werden dürfen, wenn eine Landung auf einer darunterliegenden Lade- oder Warenübergabestation geplant ist. Zusätzlich werden bei der Planung neuer Flugpfade auch die noch aktiven Flugrouten anderer AFR berücksichtigt, um sich kreuzende Flugpfade auszuschließen. Durch die Definition von Flugebenen wird die Komplexität des Pfadplanungsproblems signifikant reduziert, da sich die Auflösung des Konfigurationsraums in vertikaler Richtung stark verringert.

Neben der Umgebung soll bei der Routenplanung auch die Größe der AFR und der Betrag der verursachte Abwind berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck werden die AFR entsprechend der nachfolgenden Tabelle 5 anhand ihres Durchmessers in diskrete Größenklassen \mathcal{C} eingeordnet. Jede Größenklasse $c \in \mathcal{C}$ besitzt einen unteren und oberen Durchmesser, die festlegen, welche AFR dieser Klasse zugeordnet sind.

Tabelle 5: Auflistung der bei der Routenplanung berücksichtigten Größenklassen von AFR und den jeweiligen Klassen zugeordnete Baugrößen von AFR

Klassenbezeichnung	Nach Durchmesser zugeordnete AFR
c_{250}	[0 mm, 250 mm]
c_{500}]250 mm, 500 mm]
c_{750}]500 mm, 750 mm]
c_{1000}]750 mm, 1000 mm]
c_{1250}]1000 mm, 1250 mm]
c_{1500}]1250 mm, 1500 mm]

Die Methode lässt sich um beliebige Größenklassen erweitern, jedoch werden Systeme mit einem Durchmesser von mehr als 1,5 m nicht weiter berücksichtigt, da diese für den Einsatz in Innenräumen in der Regel keine Rolle spielen. Auch die Granularität der Klassen lässt sich frei wählen, eine feinere Unterteilung als die definierte wird für das betrachtete Umfeld aber als nicht zielführend erachtet.

Die Unterteilung in einzelne Klassen ermöglicht es, angepasste Weltmodelle zu berechnen, in denen die jeweiligen Größenverhältnisse und erforderlichen Mindestabstände berücksichtigt sind. Zudem kann für die größeren Klassen festgelegt werden, dass der Raumbereich direkt unterhalb des AFR nicht von einem anderen AFR durchflogen werden soll, da durch die stärkere Luftströmung die Flugstabilität beeinträchtigt werden kann.

Entsprechende Analysen der Strömungsverhältnisse und Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb von Multikoptern sind in [138–140] zu finden.

5.1.3 Struktureller Aufbau und Integration in das Gesamtframework

Bevor auf die methodische Umsetzung der erforderlichen Bestandteile im Detail eingegangen wird, werden nachfolgend der in Bild 26 dargestellte strukturelle Aufbau der Routenplanung und des Luftraummanagements sowie die Schnittstellen zu den weiteren Modulen des AFRS beschrieben.

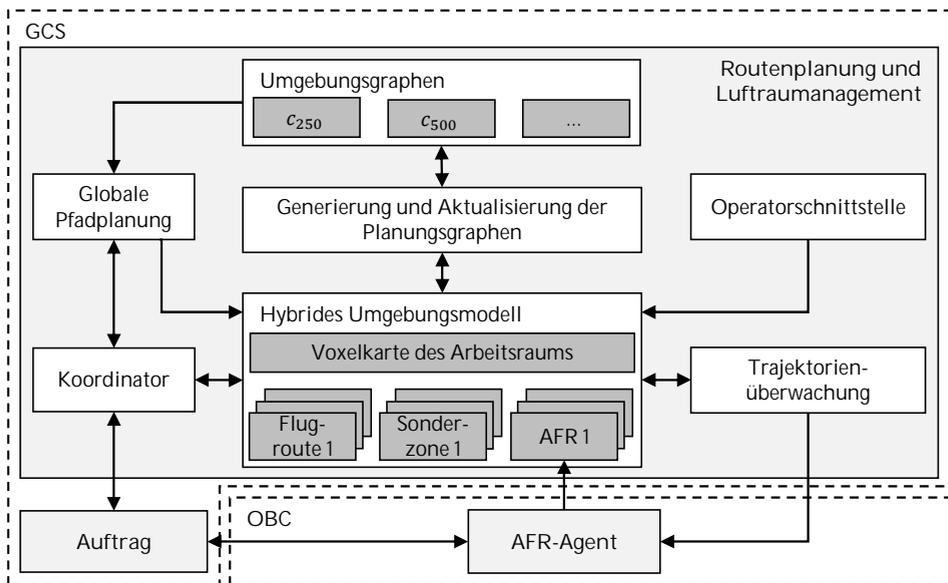


Bild 26: Darstellung des Aufbaus der Routenplanung und des Luftraummanagements sowie die Integration der beiden Komponenten in die Gesamtsystemarchitektur

Kernelement ist dabei ein hybrides Weltmodell, in welchem die verfügbaren Informationen über den Einsatzraum verwaltet und fortlaufend aktualisiert werden. Berücksichtigt werden dabei neben einer dreidimensionalen Karte des Arbeitsraumes auch bestehende Flugrouten sowie Sperrzonen und Landekorridore. Während diese Sonderzonen durch den Bediener über die Operatorschnittstelle oder durch einen spezifischen Auftrag angelegt und entfernt werden können, werden die Flugrouten nach der Planung direkt in das Modell eingespeist und fortlaufend aktualisiert, während der AFR die Route abfliegt.

Zur Aktualisierung der Karte des Arbeitsraums können neben Modellen aus der rechnergestützten Konstruktion (engl. computer-aided design

(CAD)) auch Informationen aus der optischen Vermessung des Arbeitsraums zum Einsatz kommen. Auf Basis des Weltmodells werden Umgebungsgraphen generiert, welche die Datenbasis für die globale Pfadplanung darstellen. Dabei wird für jede im System registrierte AFR-Klasse $c \in \mathcal{C}$ ein individueller Graph mit spezifischen Anpassungen erzeugt und bei Änderungen des Weltmodells aktualisiert.

Um über das Framework Flugpfade zu erhalten, muss sich jedes AFR beim Luftraummanagement registrieren. Nur wenn ein AFR registriert ist, kann über einen dem AFR zugewiesenen Auftrag ein geeigneter Flugpfad angefordert sowie bei Bedarf das Anlegen und Entfernen von spezifischen Sperrzonen veranlasst werden. Hierfür steht ein separates Koordinationsmodul bereit, das bei einer eingehenden Pfadanfrage zunächst prüft, ob der zugehörige AFR registriert ist und ob die übermittelte Start- und Zielposition valide sind. Wurde ein gültiger Flugpfad berechnet, gibt der Koordinator diesen an den AFR-Agent zurück und veranlasst eine Aktualisierung des Weltmodells.

Der AFR-Agent überträgt nach der Registrierung zudem zyklisch die aktuelle Position des AFR an das hybride Weltmodell, sodass dort bereits abgeflogene Pfade wieder freigegeben und die Planungsgraphen entsprechend aktualisiert werden können. Mittels einer separaten Trajektorienüberwachung wird überprüft, dass die AFR während des Fluges nicht von ihren vorgegebenen Pfaden abweichen. In kritischen Situationen und bei bevorstehenden Kollisionen kann das Luftraummanagement über den AFR-Agenten eine Notlandung und den Abbruch der Aufgabe auslösen.

5.2 Hybrides Weltmodell als Grundlage der **Routenplanung**

Entsprechend der vorherigen Beschreibung müssen bei der Routenplanung für AFR in Werks- und Logistikhallen verschiedene Einflussfaktoren und Datenquellen berücksichtigt und zusammengeführt werden. Die bei der Erstellung des Weltmodells berücksichtigten Informationen und Datensätze sind in Bild 27 dargestellt.

Ausgehend von einer geeigneten dreidimensionalen Repräsentation des Arbeitsraums werden diskrete Flugebenen abgeleitet und die vorhandenen statischen Hindernisse in diese Ebenen projiziert. Die vorab aufgeführten Sonderzonen werden durch den Anwender definiert und in geeigneter Form hinterlegt.

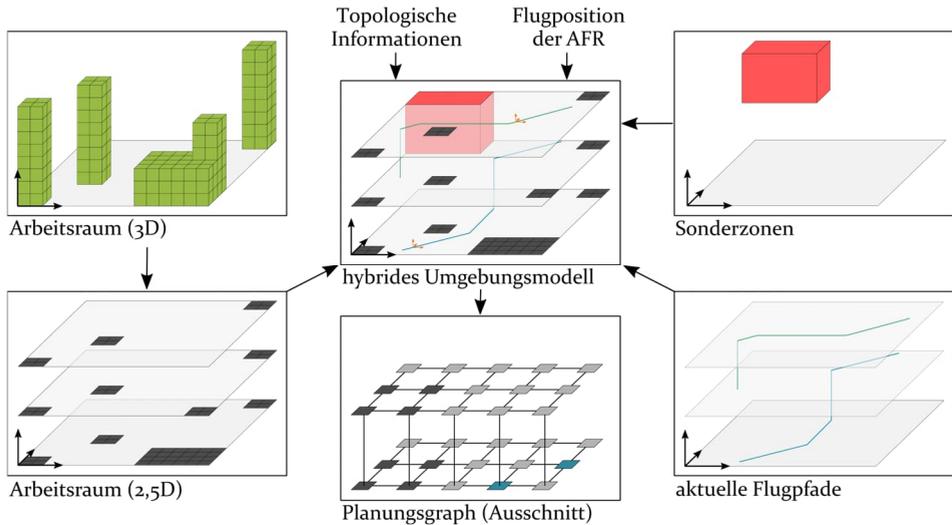


Bild 27: Darstellung des Aufbaus des hybriden Weltmodells aus der ebenenbasierten Arbeitsraumrepräsentation, den Sonderzonen, topologischen Informationen, den Flugpfaden der AFR sowie den aktuellen Positionen der registrierten AFR

Weiterhin besteht die Möglichkeit, in bestimmten Ebenen oder Raumbereichen nur eine limitierte Anzahl an Flugrichtungen zu erlauben, um den Flugverkehr besser kanalisieren und strukturieren zu können. Hierfür werden in das Weltmodell zusätzlich topologische Informationen aufgenommen. Weiterhin werden im Weltmodell die Position der registrierten AFR sowie die aktuell bestehenden Flugrouten abgebildet, um auch diese bei der Routenplanung berücksichtigen zu können. Die einzelnen Informationen werden anschließend zu einem hybriden Weltmodell fusioniert. Aus diesem Modell werden die Planungsgraphen für die einzelnen Größenklassen abgeleitet, welche die Grundlage der Routenplanung für die AFR bilden. Das detaillierte Vorgehen zur Modellierung des hybriden Weltmodells und zur Ableitung des Planungsgraphen wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

5.2.1 Modellierung des dreidimensionalen, statischen Arbeitsraums

Während sich bei der Navigation von flurgebundenen Transportfahrzeugen der Arbeitsraum durch Material- und Personenbewegungen kontinuierlich verändert, kann ein Großteil der Hindernisse im Flugbereich von AFR als statisch betrachtet werden. Lediglich andere AFR, Systeme zum

automatisierten Materialtransport wie Hallenkräne oder Hängebahnen sowie Personen auf Hebebühnen etc. müssen ggf. bei der Navigation als dynamische Hindernisse berücksichtigt werden.

Da sich die statischen Hindernisse nicht unvorhergesehen ändern, können diese auf Basis von Vermessungsdaten oder Planungsmodellen in das Weltmodell integriert werden. Im industriellen Kontext liegen diese Informationen über die Fabrikumgebung in der Regel in Form von CAD-Modellen eines Bauwerks oder als Punktwolken vor. Letztere werden durch geeignete Vermessungsverfahren gewonnen und geben das aktuelle Layout der Umgebung genauer wieder als die oftmals veralteten oder ungenauen CAD-Modelle. Zur Modellierung des Arbeitsraums sollen jedoch beide Varianten berücksichtigt werden.

An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass zwar viele Hindernisse als statisch betrachtet werden können, es dennoch zielführend ist, das Arbeitsraummodell der AFR regelmäßig zu aktualisieren, um den Bedarf an lokaler Kollisionsvermeidung zu minimieren. Ein hierfür geeignetes Vorgehen wurde im Rahmen der Forschungstätigkeit entwickelt und publiziert [P7]. Kernelement dabei ist, während des Fluges gewonnene Vermessungsdaten einer Fabrikumgebung direkt in die Karte zurückzuspielen. Als Ergebnis erhält man ein aktualisiertes Modell des Arbeitsraums in Form einer Punktwolke. Da das Verfahren zur Ableitung der Flugebenen unabhängig vom Alter der zugrundeliegenden Daten ist, wird an dieser Stelle jedoch nicht weiter auf das Verfahren eingegangen und auf die Veröffentlichung [P7] verwiesen.

Um die Hindernisse im Arbeitsraum der AFR und die Flugebenen auf Basis von aufgenommenen Punktwolken oder CAD-Modellen bestimmen zu können, müssen diese zunächst in ein geeignetes, einheitliches Datenmodell umgewandelt werden. Entsprechend der Betrachtung in Abschnitt 2.2.2 wird hierfür ein Octree gewählt. Dies ermöglicht zum einen die metrisch diskrete Darstellung beliebiger Strukturen in hinreichender Genauigkeit und zum anderen eine performante Datenverarbeitung. Bild 28 zeigt die aus einem CAD-Modell bzw. einer Punktwolke resultierende Umgebungsdarstellung in Form eines Octree. Zur Modellierung des Octree und Abbildung der Umgebung kommt das in [72] beschriebene Framework zum Einsatz.

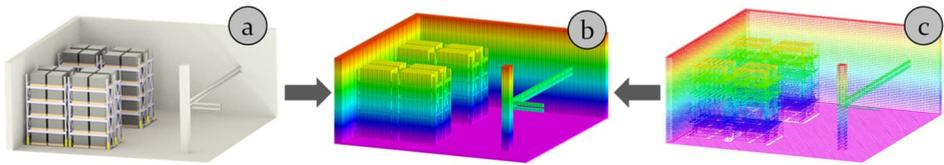


Bild 28: Ausgehend von CAD-Modellen der Einsatzumgebung (a) oder von aus Vermessungsprozessen gewonnenen Punktwolken (c) können die statischen Hindernisse im Arbeitsraum der AFR als Voxelkarte (b) modelliert werden.

Soll das Weltmodell auf Basis von CAD-Daten generiert werden, werden die bereitgestellten Gebäudemodelle automatisiert in ein geeignetes Polygonnetz überführt und als Anordnung von Eckpunkten und flächenspezifischen Normalenvektoren gespeichert. Zur Überführung des resultierenden Polygonnetzes in diskrete Voxel wird die in [141] theoretisch vorgestellte und in [142] implementierte Methodik herangezogen. Basierend auf ihren berechneten Mittelpunkten erfolgt abschließend eine Überführung der generierten Voxel in einen Octree.

Liegen die Daten als Punktwolke aus einem Vermessungsprozess vor, werden die einzelnen Punkte anhand ihrer Koordinaten direkt in den Octree eingetragen, wodurch die betreffenden Oktanten als belegt markiert werden. Somit kann das Weltmodell auch aus beiden Datenquellen generiert werden, wodurch beispielsweise initial verfügbare CAD-Informationen mit nachträglichen Vermessungsdaten aktualisiert werden können.

5.2.2 Modellierung des Arbeits- und Konfigurationsraums in Form diskreter Flugebenen

Im nachfolgenden Schritt werden aus dem Octree, der nun eine in geeigneter Weise diskretisierte Darstellung des Arbeitsraums enthält, die individuellen Flugebenen einschließlich der darin enthaltenen Hindernisse abgeleitet. Zur Repräsentation und mathematischen Beschreibung der Flugebenen kommen gerasterte Kostenkarten zum Einsatz, bei denen es sich um eine Untergruppe der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen metrisch diskreten Karten handelt. Eine Kostenkarte besteht aus einem gleichmäßigen Zellraster, bei dem jede Zelle Informationen darüber trägt, ob der zugehörige Raumbereich für ein AFR zugänglich ist. Je höher die Kosten einer Zelle sind, desto geringer soll bei der nachfolgenden Pfadplanung die Wahrscheinlichkeit ausfallen, dass der Pfad durch diese Zelle führt.

Beim zugrundeliegenden Wertebereich wird sich an etablierten Ansätzen orientiert [143], wodurch die einzelnen Zellen jeder Kostenkarte einen ganzzahligen Wert zwischen 0 und 254 einnehmen. Kosten mit einem Wert

größer als 252 werden dabei auch als *lethal costs* bezeichnet und geben an, dass es bei einer Bewegung in dieser Zelle zu einer Kollision kommen wird. Besitzt eine Zelle dabei einen Kostenwert von 254, liegt in der betreffenden Zelle ein physikalisches Hindernis vor. Bei einem Kostenwert von 253 enthält die Zelle kein Hindernis, ist aber für den AFR nicht zugänglich, da er aufgrund seiner räumlichen Ausdehnung sonst mit einem Hindernis kollidieren würde. Zellen mit Kostenwerten von 252 und kleiner sind für die AFR kollisionsfrei zugänglich. Durch die feine Unterteilung der Kostenwerte für frei zugängliche Zellen kann die Karte so modelliert werden, dass die Zellkosten mit zunehmender Entfernung zu Hindernissen abfallen. Hierdurch halten die AFR einen erweiterten Sicherheitsabstand zu Hindernissen ein, der bei Bedarf aber auch dynamisch unterschritten werden kann, wenn die Platzverhältnisse dies erfordern oder hierdurch Umwege vermieden werden können. Je größer dabei der mögliche Umweg ausfällt, desto näher kann sich ein AFR einem Hindernis annähern, um diesen Umweg zu vermeiden. Die Entscheidung, welche Flugroute einem AFR zugewiesen wird, trifft der in Abschnitt 5.3.2 beschriebene Pfadplanungsalgorithmus auf Basis des Umgebungsmodells.

Zur Generierung der Flugebenen wird der als Octree abgebildete Arbeitsraum anschließend entsprechend des in Bild 29 dargestellten methodischen Vorgehens segmentiert.

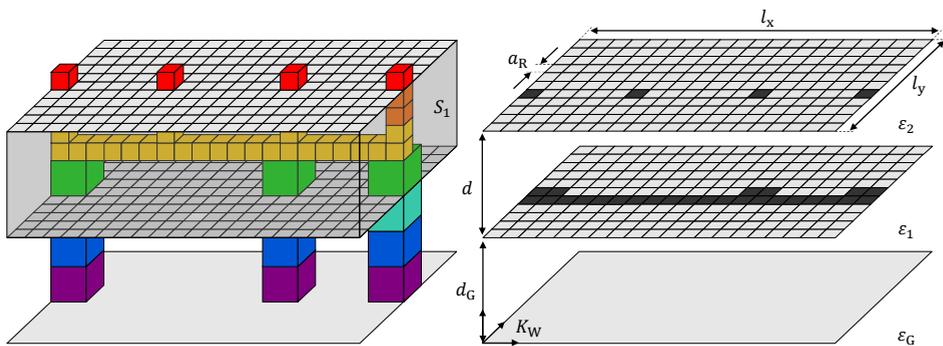


Bild 29: Der als Octree dargestellte Arbeitsraum wird zunächst in übereinander gestapelte Raumsegmente unterteilt (links). Zur Generierung der statischen Hinderniskarten werden die in den Segmenten enthaltenen Voxel in die Grundebenen projiziert (rechts).

Initial wird der Octree in eine definierte Anzahl N_ϵ von diskreten, vertikal übereinanderliegenden Raumsegmenten unterteilt. Jedes Raumsegment S_i mit $i \in \mathbb{N} : 0 \leq i \leq N_\epsilon$ wird dabei durch seine Grundebene ϵ_i sowie den Abstand d zur drüberliegenden Ebene eindeutig bestimmt. Aus der bekannten räumlichen Ausdehnung des Octree wird die horizontale Ausdehnung l_x

und l_y der Ebenen bestimmt und die Auflösung a_R des Zellrasters der Ebene wird gleich der Auflösung des Octree gesetzt. Da AFR in der Regel erst ab einer definierten Höhe über dem Boden robust fliegen können, wird der Abstand der untersten Flugebene ε_1 zur Grundfläche des Arbeitsraums ε_G über die Distanz d_G festgelegt. Die Anzahl und die Höhe der Raumsegmente werden entsprechend den Umgebungsbedingungen vorab festgelegt.

Zur Übertragung der im Octree eingetragenen statischen Hindernisse in die Flugebenen werden die Hindernisse jedes Raumsegments in die zugehörige Grundebene projiziert. Dazu wird für jeden belegten Voxel des Octree geprüft, ob der von ihm beschriebene Raumbereich eine Überlappung mit einem oder mehreren der definierten Raumsegmente aufweist. Ist dies der Fall, werden in den zugehörigen Grundebenen die Kosten aller Zellen, die einen Schnittpunkt mit dem projizierten Voxel besitzen, auf den vorab definierten Wert von 254 gesetzt. In jeder Kostenkarte ist somit die Projektion aller Hindernisse des darüberliegenden Raumsegments eingetragen. Da die resultierenden Hinderniskarten eine Vereinfachung der realen Hindernisse darstellen, wird bei der ebenenbasierten Navigation der freie Konfigurationsraum der AFR über das minimal notwendige Maß hinaus verkleinert. Dennoch überwiegen für den Innenraumeinsatz einer Flotte von AFR die Vorteile, die mit dieser Form der Umgebungsdarstellung einhergehen.

Die Umgebung in einer Industriehalle weist in horizontaler Ebene eine deutlich höhere Komplexität auf als in vertikaler Richtung. Dies wird durch die Modellierung der Umgebung in Form diskreter Flugebenen berücksichtigt, wobei die Horizontale hochauflösender modelliert ist als die Vertikale. Weiterhin ist der Raumbereich zwischen Produktions- oder Logistiksystemen und Hallendecke oftmals ungenutzt, daher kann die Flugstrecke zwischen Start- und Zielposition meist in einer Ebene zurückgelegt werden. Gleiches gilt für Schiffswerften oder Flugzeughangare, die sich ebenfalls für den Einsatz von AFRS eignen. Da der vertikale Raumbereich in der Regel erst ab einer gewissen Höhe für den Einsatz von AFR zur Verfügung steht und die einzelnen AFR ausreichend vertikalen Abstand zueinander aufweisen müssen, ist die Anzahl der AFR, die übereinander fliegen können, meist auf Zahlen im niedrigen einstelligen Bereich limitiert. Daher stellt die ebenenbasierte Modellierung in diesem Anwendungskontext eine nutzenoptimale Lösung dar und ermöglicht gleichzeitig eine performante und effiziente Abbildung des Arbeits- und Konfigurationsraums innerhalb des AFRS.

Um ausgehend von den projizierten Hindernissen den freien Konfigurationsraum zu berechnen, kommt das nachfolgend beschriebene und in Bild 30 skizzierte Verfahren zum Einsatz.

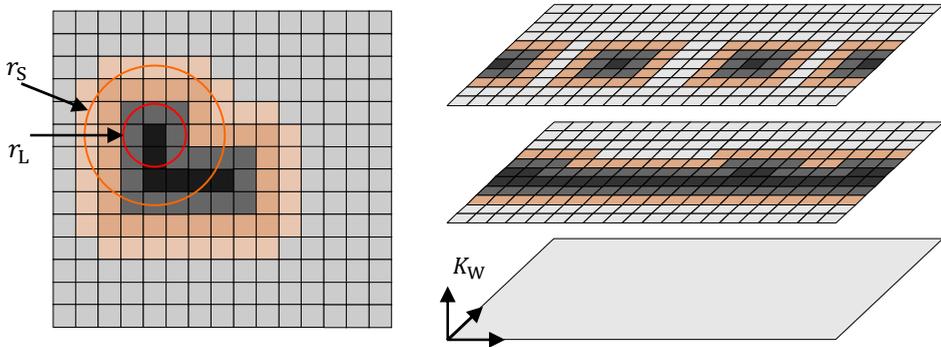


Bild 30: Darstellung des Vorgehens zur Dilatation von Hindernissen in Rasterkarten (links) und des Ergebnisses der Dilatation bei Anwendung auf die in Bild 29 dargestellten Hinderniskarten

Da jeder AFR bei der Pfadplanung als Punkt betrachtet werden soll, wird zur Bestimmung des freien Konfigurationsraums entsprechend die räumliche Ausdehnung der Hindernisse im Arbeitsraum erweitert, um Kollisionen zwischen dem AFR und der Umgebung auszuschließen. Dabei besteht zusätzlich die Möglichkeit, eine erweiterte Sicherheitszone um Hindernisse anzulegen, um auch bei Ungenauigkeiten in der Lokalisierung Kollisionen zu vermeiden und die Wahrscheinlichkeit, dass sich AFR in direkter Nähe zu Hindernissen bewegen, zu minimieren. Um die räumliche Ausdehnung der statischen Hindernisse in den Kostenkarten um das erforderliche Maß zu erweitern, wird das Prinzip der Dilatation angewendet. Dabei werden alle Zellen, die ein statisches Hindernis enthalten, mit einem strukturierenden Element erweitert. [144]

Als strukturierendes Element kommt dabei ein Kreis mit Radius r_L zum Einsatz. Das Vorgehen und das Ergebnis der Dilatation sind in Bild 30 (links) exemplarisch dargestellt. Das strukturierende Element (roter Kreis) wird über die belegten Zellen (schwarz hinterlegt) bewegt und die Kosten aller dabei eingenommenen Zellen (dunkelgrau hinterlegt) werden auf einen Wert von 253 gesetzt.

Entsprechend der anfänglichen Darstellung werden für jede benötigte Größenklasse $c \in \mathcal{C}$ ein individueller Konfigurationsraum und Planungsgraph und somit auch individuelle statische Hinderniskarten bestimmt. Dabei wird der Wert von r_L jeweils auf die Hälfte des oberen Durchmessers der betreffenden Größenklasse gesetzt.

Um einen zusätzlichen Sicherheitsabstand zu Hindernissen vorzusehen und eine Kollision bei unvorhergesehenen Positionsschwankungen auszuschließen, sollen die Kosten der Zellen in der erweiterten Umgebung der Hindernisse ebenfalls erhöht werden können. Hierfür werden analog zur vorherigen Beschreibung alle Zellen, die ein statisches Hindernis enthalten, mit einem Kreis als strukturierendes Element erweitert. Der Radius r_S des Kreises legt dabei fest, in welchem maximalen Umkreis eine Erhöhung der Kosten erfolgen soll. Für alle innerhalb des strukturierenden Elements liegenden Zellen werden die angepassten Kosten über die Funktion

$$\xi_{\text{Zelle}}(x) = \lceil e^{-k \cdot (x - r_L)} \cdot 253 \rceil \quad (5.1)$$

berechnet. Die Variable $x \in [r_L, r_S]$ beschreibt dabei den metrischen Abstand des Mittelpunkts der aktuellen Zelle vom Zentrum des strukturierenden Elements und k stellt einen Skalierungsfaktor dar, der die Stärke des Kostenabfalls mit zunehmender Entfernung vom Hindernis variiert. Zudem werden die Kosten auf die nächste ganze Zahl aufgerundet, um mit dem Wertebereich der Kostenkarte übereinzustimmen. [143, P6]

Bild 30 (links) zeigt die Erweiterung des Hindernisses um einen Sicherheitsabstand mit dem beschriebenen Ansatz. Die abgestuften Orangetöne kennzeichnen die mit zunehmendem Abstand vom Hindernis abfallenden Kosten zur Erhöhung des Sicherheitsabstands. Wendet man das Vorgehen auf die in Bild 29 dargestellten Hinderniskarten an, resultieren daraus die in Bild 30 (rechts) dargestellten Kostenkarten. Zur besseren Übersicht und um die Hindernisse nicht zu stark auszuweiten, wurde der Wert von r_S dabei kleiner gewählt als in der Darstellung in Bild 30 (links).

5.2.3 Modellierung von Sperrzonen und Landekorridoren

Um die Flugbewegungen weiter zu strukturieren, werden im nächsten Schritt Sperrzonen und Landekorridore definiert. Jede dieser Sonderzonen wird dabei als Quader modelliert, der den zur Sonderzone gehörigen Raumbereich definiert. Hierfür werden neben den Kantenlängen des Quaders auch dessen Position und Ausrichtung festgelegt. Zusätzlich wird für jede definierte Zone der jeweilige Typ hinterlegt. Ergänzend kann spezifiziert werden, ob die Sonderzone alle AFR betrifft oder nur auf eine Teilmenge der im System registrierten AFR angewendet werden soll. Die Bedeutung der einzelnen Zonen für die Strukturierung und Unterteilung des Luftraums wird im Folgenden beschrieben.

Sperrzonen werden entsprechend ihres Namens eingesetzt, um Raumbereiche für den Durchflug von AFR dauerhaft oder temporär zu sperren. Dies

kann beispielsweise oberhalb von frequentierten Fuß- und Fahrwegen, in sicherheitskritischen Produktions- oder Lagerbereichen, nahe von stör anfälligen Anlagen oder auch in Arealen mit erhöhten Anforderungen an Sauberkeit erforderlich sein. Auch die Durchführung von Instandhaltungsarbeiten im Flugbereich oder Systemstörungen können die temporäre Limitierung des Flugbereichs durch Sperrzonen erfordern. Die Definition der Sperrzonen erfolgt in diesen Fällen bei Inbetriebnahme des Systems oder situationsabhängig über eine graphische Benutzeroberfläche.

Zusätzlich besteht die Option, dass das System ohne Einwirken eines Operators Sperrzonen dynamisch definiert und wieder aufhebt. Dies ist insbesondere bei Inspektions- oder Vermessungsaufträgen vorgesehen, bei denen die Bewegungsfreiheit in den globalen Flugebenen nicht ausreicht und stattdessen auf eine freie Navigation gewechselt wird. In diesem Fall wird der erforderliche Raumbereich für den Durchflug anderer AFR gesperrt und nach Abschluss des Auftrags wieder freigegeben. Befinden sich zu diesem Zeitpunkt noch weitere AFR im betreffenden Raumbereich, wird dieser erst gesperrt, sobald die AFR den Bereich verlassen haben.

Landekorridore befinden sich oberhalb von Lade-, Service- oder Warenübergabestationen und stellen sicher, dass der Flugverkehr in diesem Bereich auf das mögliche Minimum reduziert wird. Weiterhin soll hierdurch der kollisionsfreie, ebenenunabhängige Steig- und Sinkflug innerhalb des Korridors ermöglicht werden. Ein Landekorridor ist daher so modelliert, dass er nur von einem AFR durchflogen werden kann, wenn dessen Zielpunkt innerhalb des Korridors bzw. an der darunterliegenden Plattform liegt. Es handelt sich dabei somit um einen Sperrbereich, der nur für den am zugehörigen POI registrierten AFR freigegeben ist.

Die Anlage der Landekorridore erfolgt vollautomatisiert anhand der definierten Lade-, Service- oder Warenübergabestationen, kann bei Bedarf jedoch auch durch den Operator übernommen werden.

5.3 Methode zur Ableitung der Planungsgraphen und der darauf basierenden Routenplanung

Um alle verfügbaren Informationen berücksichtigen zu können, müssen die Inhalte des hybriden Weltmodells in einem geeigneten Datenmodell zusammengeführt werden. Entsprechend der dem Modell zugrundeliegenden Daten wird hierfür ein gerichteter, knoten- und kantengewichteter Graph gewählt. Somit kann anschließend eine unter einer vorgegebenen Kostenfunktion optimale Flugroute bestimmt werden.

5.3.1 Modellierung der Planungsgraphen und Bestimmung der Knoten- und Kantengewichte

Basierend auf der Zusammenfassung zu Beginn von Abschnitt 2.2 müssen im Weltmodell neben metrischen auch semantische und topologische Informationen zusammengeführt werden. Für die Beschreibung der Umgebung wird daher ein graphenbasierter Ansatz gewählt.

Für jede Größenklasse $c \in \mathcal{C}$ wird ein Graph der Form $\mathcal{G}_c = (\mathcal{V}_c, \mathcal{E}_c)$ definiert, der als Grundlage der Pfadplanung dient. Dabei beschreibt \mathcal{V}_c die Menge aller Knoten des Graphen, während \mathcal{E}_c die Menge der zugehörigen Kanten beschreibt. Um auch Richtungsinformationen abbilden zu können, wird ein gerichteter Graph ohne Mehrfachkanten gewählt. In diesem Fall wird \mathcal{E}_c zu einer Teilmenge aller möglichen Knotenverbindungen, welche aus dem kartesischen Produkt $\mathcal{V}_c \times \mathcal{V}_c$ resultieren. [145]

Jeder Knoten soll dabei eine Zelle der vorgestellten gestapelten Rasterkarten repräsentieren. Die Kanten des Graphen geben an, welche benachbarten Zellen von einer Zelle aus erreichbar sind. Der Graph kann somit als gleichmäßiges Gitter dargestellt werden, das in horizontaler Richtung eine deutlich höhere Auflösung als in vertikaler Richtung besitzt. Bild 31 zeigt den Zusammenhang zwischen gestapelten Rasterkarten und Planungsgraph am Beispiel der in Bild 31 (links) rot umrandeten Knoten. Jeder Knoten $v_{x,y,z}$ besitzt eine eindeutige Position $\mathbf{s} = (x, y, z)^T$ innerhalb des Gitters und repräsentiert hierdurch einen zugehörigen Raumbereich sowie dessen Eigenschaften.

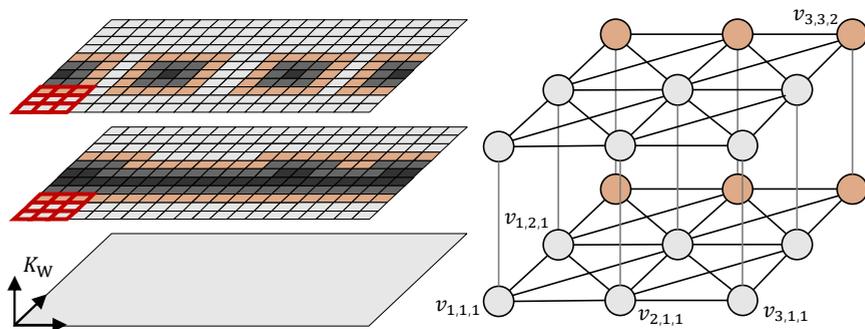


Bild 31: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Rasterkarten und Planungsgraph am Beispiel der 18 rot umrandeten Zellen. Innerhalb des Graphen können die einzelnen Knoten dabei über einen eindeutigen Index zugeordnet werden.

Bei der Modellierung der Planungsgraphen werden zunächst die erforderlichen Knoten und anschließend die Kanten zwischen den einzelnen Knoten modelliert. Ausgehend von den bekannten räumlichen Abmessungen

l_x und l_y , der Anzahl der vertikal übereinanderliegenden Raumsegmente bzw. Flugebenen N_ε sowie der Auflösung a_R der Rasterkarten wird die Menge der erforderlichen Knoten über die Beziehung

$$\mathcal{V}_c = \left\{ v_{x,y,z} \mid x \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{l_x}{a_R} \right\}, y \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{l_y}{a_R} \right\}, z \in \{ 1, 2, \dots, N_\varepsilon \} \right\} \quad (5.2)$$

bestimmt. Die Anzahl der Knoten $n(\mathcal{V}_c)$ lässt sich dementsprechend über die Gleichung

$$n(\mathcal{V}_c) = \frac{l_x \cdot l_y}{a_R^2} \cdot N_\varepsilon \quad (5.3)$$

berechnen. Durch den Aufbau als dreidimensionales Gitter mit bekannten Abmessungen und bekannter Auflösung kann auf die Knoten des Planungsgraphen sowohl über ihre Indizes als auch über den von ihnen repräsentierten Raumbereich zugegriffen werden. Für einen durch den Ortsvektor ${}^W\mathbf{p}_P$ definierten Raumpunkt P lässt sich die Position \mathbf{s} des zugehörigen Knotens innerhalb des dreidimensionalen Gitters über die Beziehung

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left\lfloor \left(\frac{{}^W\mathbf{p}_P^x}{a_R} \right) \right\rfloor + 1 \\ \left\lfloor \left(\frac{{}^W\mathbf{p}_P^y}{a_R} \right) \right\rfloor + 1 \\ \left\lfloor \left(\frac{{}^W\mathbf{p}_P^z - d_G}{d} \right) \right\rfloor + 1 \end{pmatrix} \quad \text{für} \quad \begin{array}{l} 0 \leq {}^W\mathbf{p}_P^x \leq l_x \\ 0 \leq {}^W\mathbf{p}_P^y \leq l_y \\ d_G \leq {}^W\mathbf{p}_P^z \leq d_G + N_\varepsilon \cdot d \end{array} \quad (5.4)$$

bestimmen. Jedem Knoten des Graphen werden nun die vorab bestimmten Kosten der durch ihn repräsentierten Zelle zugewiesen. Somit erhält jeder Knoten $v \in \mathcal{V}_c$ die zugeordneten, ganzzahligen statischen Zellkosten $\xi_Z(v) \in [0, 254]$.

Zusätzlich wird in jedem Knoten hinterlegt, ob er Teil einer Sonderzone ist, welche Kosten hieraus für den Knoten resultieren und welche AFR diesen Knoten aktuell durchfliegen dürfen. Hierfür werden für jede Sonderzone anhand ihrer bekannter Pose und Abmessungen mit Hilfe der Gleichung (5.4) die von ihr eingenommenen Knoten bestimmt und allen zugehörigen Knoten wird ein weiterer ganzzahliger Kostenwert $\xi_S(v) \in [0, 254]$ zugeordnet. Die Ablage der Kostenwerte in zwei getrennten Feldern $\xi_Z(v)$ und $\xi_S(v)$ ist notwendig, um nach dem Aufheben einer Sperr- oder Landezone die ursprünglichen statischen Kosten des Knotens wiederherstellen zu können.

Wie zuvor die statischen Hindernisse werden auch die Sperrzonen und Landekorridore in den einzelnen Weltmodellen um den oberen Radius der jeweiligen Größenklasse erweitert. Somit wird sichergestellt, dass ein entsprechendes AFR die Sperrzone bzw. den eigentlichen Landekorridor im Vorbeiflug nicht schneidet. In den hiervon betroffenen Knoten gilt für $\xi_S(v)$ ein Wert von 253. Ergänzend kann $\xi_S(v)$ für Zellen im erweiterten Raumbereich um die Sperrzone über die Gleichung (5.1) erhöht werden. Liegt ein Knoten direkt innerhalb des eine Sonderzone beschreibenden Quaders, wird $\xi_S(v)$ ein Wert von 254 zugewiesen.

Zusätzlich werden in jedem Knoten zwei Datenfelder definiert, in denen die ID der innerhalb des Knoten zulässigen AFR sowie die Information, ob der Knoten aktuell einer Sperrzone oder einem Landekorridor zugeordnet ist, hinterlegt sind. Ein Knoten kann stets nur einer Sonderzone zugeordnet sein, daher werden Sperrzonen höher priorisiert und können als Landekorridore spezifizierte Knoten überschreiben. Wird eine Sonderzone neu definiert oder gelöscht, werden alle im Luftraummanagement registrierten Sonderzonen durchlaufen und die Knoten der Planungsgraphen entsprechend dem beschriebenen Vorgehen aktualisiert.

Entsprechend der vorangegangenen Darstellung besitzt jeder Knoten einen statischen Kostenwert, der aus der dreidimensionalen Repräsentation des Arbeitsraums abgeleitet ist. Zusätzlich kann dem Knoten ein weiterer, durch eine Sonderzone spezifizierter Kostenwert zugeordnet sein. Um die Kostenwerte für die Pfadplanung zusammenzuführen, ist in jedem Knoten dessen Gesamtkostenwert $\xi_T(v)$ definiert, der sich aus der Vorschrift

$$\xi_T(v) = \max(\xi_Z(v), \xi_S(v)) \quad (5.5)$$

ergibt. Die Bestimmung von $\xi_T(v)$ erfolgt dabei zur Laufzeit, wenn sich einer der beiden Kostenwerte aktualisiert.

Zusätzlich zur Definition der Knoten müssen die Kanten des Planungsgraphen bestimmt werden. Die Kanten legen die Erreichbarkeit zwischen benachbarten Knoten fest und geben somit für jeden Knoten an, welche Bewegungs- bzw. Flugrichtungen in diesem Knoten zulässig sind. Hierdurch wird es möglich, in bestimmten Bereichen die zulässigen Flugrichtungen individuell festzulegen. Dies ermöglicht neben der Strukturierung des Flugbetriebs auch die Einrichtung von Einbahnstraßen in engen Korridoren oder Durchgängen. Über ein entsprechendes Interface kann der Operator die erlaubten Flugrichtungen in einer kompletten Ebene oder analog zur Definition der Sperrzonen in einem quaderförmigen Raumbereich einschränken.

Zu Beginn wird jeder Planungsgraph als vollständig unverbunden initialisiert, für die Gesamtmenge aller Kanten gilt somit $\mathcal{E}_c = \emptyset$. Anschließend werden anhand der Position und der Kosten eines Knotens die benachbarten, zugänglichen Knoten bestimmt und die gültigen Kanten jedes Knotens berechnet. Als Nachbarn eines Knotens gelten dabei die in der gleichen Ebene direkt angrenzenden Knoten sowie der senkrecht darüber und der senkrecht darunterliegende Knoten.

Liegt im benachbarten Knoten ein statisches Hindernis oder eine Sperrzone vor, wird keine Kante zu diesem Knoten generiert. Ist der Knoten Bestandteil einer Ebene oder Zone mit eingeschränkten Flugrichtungen, werden zwischen den betreffenden Knoten unidirektionale Kanten gesetzt, welche die erlaubten Flugrichtungen abbilden. Alle verbleibenden Kanten werden in den Graphen eingetragen, woraus sich für den Graphen jeder Größenklasse c die zugehörige Menge an Kanten \mathcal{E}_c ergibt. Gleichzeitig ist für jeden Knoten v die Menge der aktuell gültigen Kanten \mathcal{E}_v und somit auch die Menge der erreichbaren Nachbarknoten bekannt.

Jede Kante $e \in \mathcal{E}_c$ des Graphen gibt neben der Erreichbarkeit der Nachbarzelle einen zusätzlichen Kostenwert $\xi(e)$ an, der die Bewegungskosten entlang dieser Kante berücksichtigt. Dabei wird die euklidische Distanz zwischen den Knoten als Kostenwert zu Grunde gelegt, wodurch auch die erhöhte Distanz beim Wechsel der Flugebene bei der Pfadplanung berücksichtigt werden kann. Bild 32 zeigt zur Verdeutlichung die exemplarische Definition zweier Knoten sowie die Modellierung der erlaubten Flugrichtungen und Kantengewichte im Umgebungsgraphen.

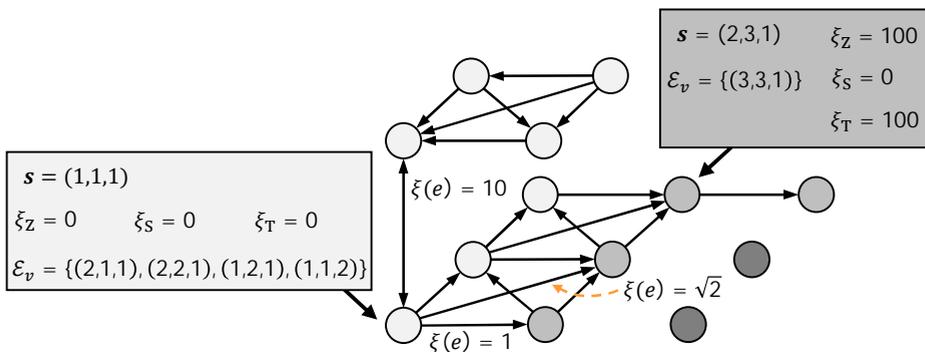


Bild 32: Integration der zulässigen Kanten und erlaubten Flugrichtungen in den Planungsgraph. Zusätzlich sind die Kostenwerte der Kanten sowie die Parameter und Eigenschaften der Knoten exemplarisch dargestellt. Je stärker die Intensität des Grautons bei der Visualisierung der Knoten ist, desto höher fallen die statischen Zellkosten der Knoten aus.

Jeder Knoten v ist über seine Position s innerhalb der Gitterstruktur definiert und besitzt die Kostenwerte $\xi_Z(v)$, $\xi_S(v)$ und $\xi_T(v)$. Weiterhin ist in jedem Knoten hinterlegt, welche benachbarten Zellen erreicht werden können. Hierfür ist je Knoten eine Menge \mathcal{E}_v von Kanten definiert, die von v auf die erreichbaren Endknoten zeigen. Die beiden zusätzlichen Attribute, in denen hinterlegt ist, welche AFR im betreffenden Knoten fliegen dürfen und ob der Knoten Bestandteil einer Sperrzone oder eines Landekorridors ist, sind zur besseren Übersicht nicht mit dargestellt.

Aus dem Verlauf der Kanten ist erkennbar, dass im dargestellten Beispiel in jeder Flugebene nur bestimmte Flugrichtungen zugelassen werden. Weiterhin ist erkennbar, dass keine Verbindung zwischen zwei benachbarten Knoten besteht, wenn die betreffenden Knoten Sperrbereiche oder Hindernisse repräsentieren (dunkelgrau dargestellt). Da diese Raumbereiche für AFR nicht zugänglich sind, wird dort keine Topologie modelliert.

5.3.2 Berechnung der Flugrouten mittels heuristischer Suchalgorithmen

Wie beschrieben, liegen die Weltmodelle der einzelnen Größenklassen als gerichteter Graph vor. Als Pfadplanungsalgorithmen kommen daher graphenbasierte Varianten, wie sie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben sind, in Betracht. Entsprechend der dort vorgestellten Verfahren wird zur Bestimmung der kostenminimalen Flugrouten ein A*-Algorithmus mit geeigneter Heuristik gewählt. Bevor nachfolgend im Detail auf die Modellierung der Heuristik eingegangen wird, sei darauf hingewiesen, dass der Pfadplanungsalgorithmus unabhängig vom erforschten Weltmodell ist und als modularer Baustein betrachtet werden kann. Es besteht somit die Möglichkeit, innerhalb des Frameworks auf Basis desselben Weltmodells auch andere Algorithmen zur Pfadplanung einzusetzen.

Beim A*-Algorithmus handelt es sich um einen informierten Suchalgorithmus, der einen kostenminimalen, kollisionsfreien Pfad bestimmt, indem er eine Kostenfunktion der Form

$$f(v) = g(v) + h(v) \quad (5.6)$$

minimiert. Dabei bezeichnet v den aktuell betrachteten Knoten des Graphen, $g(v)$ beschreibt die Kosten vom Ausgangspunkt der Suche bis zum Knoten v und $h(v)$ eine Heuristik, welche den kostenminimalen Pfad vom Knoten v zum Zielpunkt abschätzt.

Als Datengrundlage dient dem A*-Algorithmus dabei das graphenbasierte Weltmodell entsprechend der vorangegangenen Beschreibung, als Heuristik zur Abschätzung der Kosten zum Zielpunkt soll die euklidische Distanz zwischen dem aktuellen Knoten v und dem Zielknoten v_d dienen. Entsprechend ergibt sich die Heuristikfunktion

$$h(v) = \sqrt{\left(s_v^x - s_{v,d}^x\right)^2 + \left(s_v^y - s_{v,d}^y\right)^2 + \left(\left(s_v^z - s_{v,d}^z\right) * \frac{d}{a_R}\right)^2} \quad (5.7)$$

bei der s_v die Position von v im Planungsgraph und $s_{v,d}$ die Position des Zielknotens im Planungsgraph beschreibt.

Unter Ausnutzung der Gitterstruktur des Planungsgraphen ist die euklidische Distanz der beiden Knotenpositionen ein direktes Maß für die euklidische Distanz zwischen Start- und Zielposition im Weltkoordinatensystem K_W . Dabei muss lediglich berücksichtigt werden, dass die räumliche Distanz der Flugebenen höher ist als der horizontale Abstand zweier Knoten. Dies wird durch den Faktor $d * a_R^{-1}$ in der Heuristikfunktion berücksichtigt, der den vertikalen metrischen Ebenenabstand d in ein Vielfaches der Zellgröße a_R der Kostenkarten überführt.

Die Kosten $g(v)$ eines Knotens v berechnen sich aus der Summe der Kosten der auf dem Weg zu diesem Knoten zu durchlaufenen Kanten zuzüglich der Kosten der dabei besuchten Knoten. Die Menge der Vorgängerknoten von v wird als \mathcal{V}_{pre} bezeichnet, und die auf dem Weg durchlaufenen Kanten als \mathcal{E}_{pre} . Somit lässt sich $g(v)$ über die Beziehung

$$g(v) = \sum_{v_p \in \mathcal{V}_{\text{pre}}} \xi_T(v_p) + \sum_{e_p \in \mathcal{E}_{\text{pre}}} \xi(e_p) \quad (5.8)$$

bestimmen. Speichert man für jeden Knoten die Kosten, die auf dem kürzesten (bislang bekannten) Weg zu diesem bereits angefallen sind als $g_{\text{pre}}(v)$, können die Kosten $g(v)$ des über die Kante e als Nachfolger erreichten Knotens v über die Beziehung

$$g(v) = g_{\text{pre}}(v) + \xi(e) + \xi_T(v) \quad (5.9)$$

berechnet werden. Ausgehend vom Startknoten werden zunächst über die berechneten Kanten die zugänglichen benachbarten Knoten geprüft. Für jeden Knoten v wird dabei unter Verwendung der Gleichung (5.6) der Ge-

samtkostenwert $f(v)$ bestimmt. Die besuchten Knoten werden anhand ihrer Kosten $f(v)$ in absteigender Reihenfolge in eine Liste einsortiert. Der Knoten mit den niedrigsten Gesamtkosten $f(v)$ wird im nachfolgenden Prozessschritt als Ausgangsbasis für die weitere Suche gewählt. Knoten, für die bereits alle ausgehenden Kanten geprüft wurden, werden gespeichert und nicht erneut betrachtet. Zusätzlich wird für jeden besuchten Knoten gespeichert, von welchem Vorgängerknoten dieser mit minimalsten Kosten erreicht werden kann. Das beschriebene Vorgehen wird wiederholt, bis ein gültiger Pfad zum Zielpunkt gefunden wurde oder keine Knoten mehr besucht werden können. Ist die Suche erfolgreich, wird der Flugpfad aus der Verkettung der Knoten anhand ihrer optimalen Vorgänger ermittelt.

5.3.3 Flugpfadüberwachung und Rückführung von geplanten Pfaden in das Modell

Wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, sollen bei der Pfadplanung auch die bereits bestehenden Flugpfade anderer im System registrierter AFR berücksichtigt werden. Konkret sollen dabei die Abschnitte der bestehenden Pfade berücksichtigt werden, die von den zugehörigen AFR noch nicht passiert wurden. Hierdurch können sich kreuzende Flugpfade zuverlässig ausgeschlossen werden, wodurch das Kollisionsrisiko reduziert wird. Gleichzeitig wird der freie Konfigurationsraum für alle nachfolgenden AFR nur um das notwendige Maß reduziert, da Streckenabschnitte nach dem Durchflug direkt wieder freigegeben werden.

Nach jeder erfolgreichen Pfadplanung wird für die berechnete Flugroute ein zugehöriges Objekt im Luftraummanagement angelegt. Darin gespeichert sind neben den dem Pfad zugehörigen Knoten auch die Größenklasse des zugehörigen AFR. Auf Basis der einzelnen Pfadobjekte können anschließend die von einem Pfad belegten Knoten in die Planungsgraphen der einzelnen Größenklassen eingetragen werden. Somit stehen die Pfade jedes AFR in allen Planungsgraphen zur Verfügung und können dort bei der Planung nachfolgender Pfade als unzulässige Bereiche berücksichtigt werden, sodass sich keine Flugpfade kreuzen. Beim Eintragen eines Pfadobjekts in die Planungsgraphen der einzelnen Größenklassen muss zusätzlich berücksichtigt werden, welcher Größenklasse der AFR angehört, dem dieser Pfad zugeordnet ist. Dies ist notwendig, da bei der Pfadplanung die AFR als Punkt betrachtet werden und somit die Flugpfade die Abmessungen der AFR nicht wiedergeben. Das Vorgehen bei der Abbildung von bestehenden Flugpfaden in den Planungsgraphen und die Auswirkungen auf den Konfigurationsraum der anderen AFR ist in Bild 33 dargestellt.

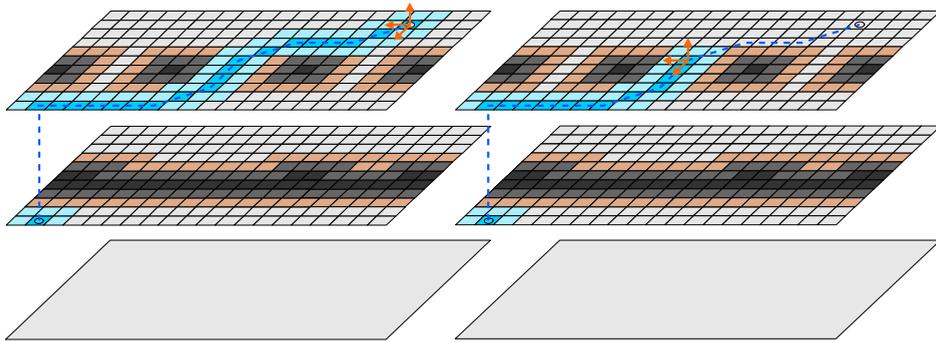


Bild 33: Integration des geplanten Pfades in den Planungsgraphen (visualisiert am Beispiel des Weltmodells aus Bild 29) (links) und Darstellung der fortlaufenden Pfadfreigabe, wenn der AFR einen Streckenabschnitt passiert hat (rechts). Zur besseren Erkennbarkeit ist der Graph nicht über eine Gitterstruktur, sondern mittels Rasterkarten visualisiert.

Zunächst wird in den Planungsgraphen bei allen Knoten, die Bestandteil eines Flugpfades sind, die entsprechende Information eingetragen. Um anschließend auch die räumliche Ausdehnung der AFR zu berücksichtigen werden in den Planungsgraphen analog zum Vorgehen für Hindernisse und Sonderzonen die Pfadknoten mittels Dilatation um die betreffenden Nachbarknoten erweitert. Der Durchmesser des strukturierenden Elements wird dabei so gewählt, dass er dem oberen Durchmesser der Größenklasse des dem Pfad zugeordneten AFR zuzüglich dem oberen Durchmesser der Größenklasse des Planungsgraphen plus einem Sicherheitsfaktor entspricht. Wird beispielsweise der Pfad eines AFR aus der Klasse c_{500} in den Planungsgraph der Klasse c_{750} eingetragen und ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von einem Meter gewählt, folgt für den Durchmesser des strukturierenden Elements r_L ein Wert von $r_L = 500 \text{ mm} + 750 \text{ mm} + 1000 \text{ mm} = 2250 \text{ mm}$. In jedem durch das strukturierende Element eingenommenen Knoten wird hinterlegt, dass aktuell ein Pfad durch den zugehörigen Raumbereich verläuft.

Bei AFR in den Klassen c_{1250} und höher wird das strukturierende Element weiterhin so angepasst, dass auch in der darunterliegende Flugebene der Pfadbereich gesperrt wird. Hierdurch wird der von diesen AFR erhöhte Abwind und dessen Einfluss auf die Flugpräzision darunter fliegender AFR berücksichtigt. Somit ist sichergestellt, dass bei der Planung weiterer Flugrouten der von einem AFR benötigte Flugbereich mit der notwendigen räumlichen Ausdehnung berücksichtigt wird. Gleichzeitig wird die Gefahr von Kollisionen und gegenseitiger Beeinflussung der AFR reduziert.

Entsprechend der Darstellung in Abschnitt 5.1.3 verfügt das Luftraummanagement stets über die aktuellen Positionsdaten aller registrierten AFR. Somit ist es möglich, den Flugfortschritt zu überwachen und die aktuelle Flugposition jedes AFR entlang des zugeordneten Pfads zu bestimmen. Weicht der AFR auf Grund einer internen Funktionsstörung oder externer Einflüsse wie einer starken Luftströmung von der vorgegebenen Flugroute ab, wird dies entsprechend detektiert und eine Notlandung des AFR ausgelöst.

Weiterhin wird es durch die Rückführung der aktuellen Flugposition möglich, die Pfadabschnitte, die durch den AFR bereits abgeflogen wurden, für die Pfadplanung wieder freizugeben. Zur Freigabe der bereits abgeflogenen Pfadabschnitte werden die einzelnen Pfadobjekte, in denen die zum Flugpfad gehörigen Knoten in der Reihenfolge von Start- zu Zielpunkt als sortierter Vektor vorliegen, zyklisch überprüft. Für die in den Vektoren gespeicherten Knoten wird mit Hilfe von Gleichung (5.4) geprüft, welcher Pfadknoten mit der aktuellen Flugposition übereinstimmt. Alle vorherigen Einträge des Vektors werden aus diesem entfernt und die zugehörigen Pfadknoten sowie deren vorab ebenfalls gesperrtes Umfeld durch die Umkehroperation zur beschriebenen Dilatation zurückgesetzt.

5.4 Zusammenfassung und Bewertung

Um AFR auch in industriellen Innenräumen einsetzen zu können und dabei einen effizienten und kollisionsfreien Flugbetrieb sicherzustellen, ist die Integration eines geeigneten Weltmodells sowie einer darauf angepassten Routenplanung notwendig.

Die vorgestellte Methode zum Luftraummanagement und zur Routenplanung umfasst daher ein hybrides Weltmodell, das explizit auf den Einsatz von AFR in Werks- und Logistikhallen zugeschnitten ist. In das Weltmodell werden neben dreidimensionalen Hinderniskarten auch topologische Informationen zur Modellierung der erlaubten Flugrichtungen einbezogen. Zusätzlich werden bestehenden Flugrouten sowie die aktuelle Flugposition der AFR integriert, um diese bei der Planung neuer Routen berücksichtigen zu können. Die zusätzliche Modellierung von Sperrzonen und Landekorridoren ermöglicht die Strukturierung des Flugverkehrs und die Limitierung der zugänglichen Raumbereiche. Da Sperrzonen auch von den einzelnen AFR-Agenten angelegt und definiert werden, können hierdurch Flugbereiche auch auftragspezifisch gesperrt und freigegeben werden.

Um die notwendigen Sicherheitsabstände in Abhängigkeit des Durchmessers der AFR modellieren zu können und im Weltmodell auch den von einem AFR verursachten Luftstrom berücksichtigen zu können, werden die AFR in verschiedene Größenklassen eingeteilt. Für jede Klasse wird ausgehend vom hybriden Weltmodell ein individueller Planungsgraph berechnet, der die für die spezifische Klasse zu berücksichtigenden Hindernisse, Flugrouten und Sicherheitsabstände abbildet. Ein graphenbasierter Suchalgorithmus mit auf die Planungsgraphen angepasster Heuristik dient anschließend zur Berechnung der streckenoptimalen Flugrouten.

Durch die vorgestellte Methode wird eine effiziente Modellierung des Arbeitsraums für ein AFRS im Produktions- und Logistikumfeld ermöglicht, die sich durch ihren ebenenbasierten Ansatz und die Modellierung von Flugrichtungen sowie die Berücksichtigung von bestehenden Flugrouten von vergleichbaren Ansätzen abhebt. Der ebenenbasierte Ansatz berücksichtigt dabei, dass die horizontale Ausdehnung der betrachteten Einsatzumgebung in der Regel deutlich größer als die vertikale ist und gibt entsprechend den horizontalen Arbeits- und Konfigurationsraum hochauflöser wieder als den vertikalen. Hierdurch kann es vorkommen, dass der für die AFR zugängliche Konfigurationsraum stärker reduziert wird, als dies auf Grund der statischen Hindernisse notwendig wäre. Gleichzeitig wird der Flugverkehr jedoch strukturiert und durch die Limitierung auf definierte Ebenen die Komplexität des Routenplanungsproblems reduziert.

Bietet der betrachtete Raumbereich zwischen Produktions- oder Logistiksystemen und der Hallendecke ausreichend Freiraum, können AFRS mit dem vorgeschlagenen Modell flexibel und zuverlässig in bestehende Werks- und Logistikhallen integriert werden. Dies gilt insbesondere auch für Schiffswerften oder Flugzeughangare, die aufgrund ihrer Ausdehnung, ihrer Höhe und ihres Aufbaus es den AFR oftmals ermöglichen, die Flugstrecke zwischen Start- und Ziel innerhalb einer Ebene zurückzulegen.

Daher stellt das erforschte ebenenbasierte Weltmodell für die betrachteten Einsatzumgebungen eine nutzenoptimale Lösung dar und ermöglicht die performante Abbildung des Arbeits- und Konfigurationsraums innerhalb des AFRS. Der darauf angepasste Routenplanungsalgorithmus berücksichtigt die im Weltmodell abgebildeten und periodisch aktualisierten Informationen und ermöglicht die Berechnung von streckenoptimierten Flugrouten.

Somit ermöglicht die erarbeitete Systemarchitektur nunmehr die robuste und präzise Lokalisierung der AFR, eine auf die betrachteten Einsatzumge-

bungen zugeschnittene Routenplanung sowie die Koordination der AFR innerhalb des Luftraums. Durch die Funktionalitäten des spezifizierten AFR-Agenten und des Flotten-, Auftrags- und Intrastrukturmanagements sowie der entworfenen Kommunikationsarchitektur wird weiterhin die vollautomatisierte Bearbeitung von Aufträgen innerhalb des AFRS ermöglicht und die einzelnen AFR können dabei situationsabhängige Entscheidungen treffen.

Entscheidend für den industriellen Einsatz ist nunmehr noch, dass sichergestellt wird, dass die eingesetzten AFR für Personen in ihrem Umfeld keine unmittelbare Gefährdung darstellen. Im nachfolgenden Kapitel 6 liegt der Forschungsschwerpunkt daher auf der Realisierung eines umfassenden Sicherheitsframeworks, das die Fehler- und Ausfallwahrscheinlichkeit der AFR reduziert und durch neue Lösungsansätze die Gefährdung von Personen im Umfeld der AFR vermindert.

6 Methode zur Eliminierung der von autonomen Flugrobotern ausgehenden Gefährdungen

Eine der zentralen Herausforderungen beim Einsatz von AFR stellt die von diesen Systemen ausgehende Gefährdung dar. Als zentrale Gefährdungen sind dabei die Gefahr von Schnittverletzungen durch die Propeller, die Gefahr durch herabfallenden Teile und Abstürze des AFR sowie die von den Rotoren verursachte Schallemission anzuführen. Weiterhin geht von den eingesetzten Lithium-Polymer-Akkumulatoren ein erhöhtes Brand- und Explosionsrisiko aus.

Während bei stationären Anlagen mittels trennender Schutzeinrichtungen oder sicherheitszertifizierter sensorischer Umfeld erfassung der Zugang zum Gefährdungsbereich normgerecht unterbunden werden kann, steht diese Möglichkeit bei AFRS in der Regel nicht zur Verfügung. Zwar lassen sich einzelne Prozesse wie die automatisierte Vermessung oder Bestandserfassung mit AFR auch auf Zeiten verlegen, in denen keine Mitarbeiter anwesend sind. Um das volle Potential von AFRS sinnvoll nutzen zu können und AFR auch im regulären Produktionsbetrieb einsetzen zu können, sind jedoch weiterführende Maßnahmen zur Reduktion der Gefährdung notwendig.

Weiterhin steht im Betrieb für AFR, im Gegensatz zu stationären und flur gebundenen Systemen, im Fehlerfall nicht die Option eines Not-Aus durch Stromlos-Schalten des Antriebssystems zur Verfügung. Dies hat den Hintergrund, dass ein Abschalten des Antriebs bei AFR während des Fluges stets einen Absturz zur Folge hat, wodurch sowohl das AFR als auch darunter befindliche Anlagen beschädigt werden. Weiterhin tritt eine direkte Gefährdung von umstehenden Personen durch ggf. auftretende Splitter sowie die eingangs aufgeführten Gefahren auf.

Somit sind die heute in der Industrie etablierten Schutzmaßnahmen nur bedingt auf AFRS übertragbar. Stattdessen ist es notwendig, analog zur Personenluftfahrt, durch eine redundante Auslegung aller sicherheitsrelevanten Systemkomponenten sowie eine integrierte Fehlerdetektion und –mas kierung kritische Systemausfälle zu jedem Zeitpunkt zu verhindern.

Im Stand der Forschung und Technik wurden im Zusammenhang mit UA bereits zahlreiche Ansätze und Vorgehen zur redundanten Auslegung der Steuerung sowie zur Fehlerdetektion an Antriebssystemen und Sensoren vorgestellt [146]. Insbesondere die Realisierung einer redundanten Flugsteuerungsarchitektur aus zeitlich nicht synchronisierten FCU sowie die durchgängige Fehlerdetektion und –maskierung als zentraler Bestandteil eines AFRS für den industriellen Einsatz werden im Stand der Forschung bislang jedoch nur unzureichend betrachtet. Auch der Punkt einer selbstständigen und situationsabhängigen Reaktion eines AFR auf Personen in seinem Umfeld zur Reduktion der Stressbelastung von Personen weist noch Forschungsbedarf auf.

Daher wird als dritter Schwerpunkt in der vorliegenden Forschungsarbeit ein dreifach-redundante Flugsteuerungsarchitektur vorgestellt, welche die Erkennung und Maskierung von Fehlern auch ohne exakte Zeitsynchronisation zwischen den einzelnen Modulen ermöglicht und über eine automatisierte Parametrisierung verfügt. Hierdurch lässt sich die erforschte Lösung ohne mathematische Modellierung und Hardwaremodifikationen auf unterschiedliche AFR anwenden.

Ergänzt wird dies mit einem Vorgehen zur Anomaliedetektion und Fehlerprädiktion auf Basis von Vibrationsmesswerten. Der erforschte Ansatz bezieht dabei ebenfalls Wissen über die aktuelle Flugmission und den Systemzustand mit ein und hebt sich hierdurch vom allgemeinen Stand der Technik und Forschung ab. Weiterhin wird eine neuartige Lösung vorgesehen, die es einem AFR ermöglicht, Personen in seinem Flugbereich selbstständig zu erkennen und auf Basis der von den erkannten Personen ausgeführten Gesten sein Flugverhalten anzupassen. Durch das entwickelte System wird dabei eine hohe Robustheit und Genauigkeit der Erkennung sowie die schnelle Reaktion des AFR sichergestellt.

Die aufgeführten Forschungsinhalte werden in prototypischer Form umgesetzt und in Form eines Sicherheitsframeworks in die spezifizierte Gesamtarchitektur integriert. Das Sicherheitsframework soll dabei durch strukturelle Redundanz, intelligente Algorithmen zur Fehlerdetektion und Verfahren zur Fehlermaskierung die Wahrscheinlichkeit von Abstürzen und ungewolltem Systemverhalten während des Flugs reduzieren. Hierdurch wird im Rahmen der Forschungsarbeit erstmalig ein AFRS vorgestellt, das Sicherheitsaspekte in umfassender Form berücksichtigt.

Teile der folgenden Abschnitte 6.1 bis 6.5 sowie der in Abschnitt 7.1 beschriebenen zugehörigen Implementierung sind an mehrere am Lehrstuhl

FAPS entstandene und vom Autor initiierte studentische Arbeiten angelehnt [S24–S32]. Weiterhin wurden einzelne Aspekte der nachfolgenden Methoden in den Veröffentlichungen [P1, P8–P10] durch den Autor der internationalen Fachwelt zugänglich gemacht.

6.1 Grundlagen und Aufbau des Sicherheitsframeworks

Bevor die im Sicherheitsframework vorgesehenen Diagnoseverfahren und entwickelten Algorithmen im Detail vorgestellt werden, erfolgt ein Blick auf die zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit gültigen Regularien und Richtlinien zum Betrieb von UAS. Dies ist erforderlich, um ggf. vorhandene Vorgaben und Anforderungen bei der Spezifikation der Sicherheitsarchitektur berücksichtigen zu können. Betrachtet wird dabei die im Jahr 2021 in der Europäischen Union (EU) sowie in Deutschland geltende Rechtslage.

6.1.1 Regulative Vorgaben und Richtlinien zum Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen

Für den Außeneinsatz von UAS gelten seit dem 01.01.2021 die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 sowie die delegierte Verordnung (EU) 2019/945. Auf Basis dieser Verordnungen werden drei grundlegende Kategorien definiert, in die sich UAS einteilen lassen. [147, 148]

In der offenen Kategorie werden Flüge mit geringem Risiko zusammengefasst, wobei das UA im ferngesteuerten Betrieb eingesetzt wird und sich dabei stets im Sichtbereich des Piloten oder einem mit dem Piloten in Kontakt stehenden Beobachter befindet. Die spezifische Kategorie beschreibt Szenarien, bei denen eine oder mehrere Anforderungen der offenen Kategorie überschritten werden. Dies trifft beispielsweise auf Flüge außerhalb des Sichtbereichs zu und erfordert eine Ausnahmegenehmigung sowie eine individuelle Risikobewertung. In der zulassungspflichtigen Kategorie werden Betriebsszenarien zusammengefasst, bei denen Menschenansammlungen überflogen oder Personen sowie gefährliche Güter transportiert werden. Da die europäische Drohnenverordnung jedoch keine Gültigkeit für den Einsatz von UAS in Innenräumen besitzt, kann entsprechend der Auflage 2.2 des Leitfadens für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG in diesem Fall die Maschinenrichtlinie angewandt werden. [149]

Dabei gilt zum Zeitpunkt der vorliegenden Arbeit noch die Ausnahme, dass die Maschinenrichtlinie nicht für UA zum Personen- oder Warentransport angewendet werden kann. Hintergrund ist, dass in diesem Fall ggf. andere Vorgaben aus dem Bereich des Luftrechts anzuwenden sind. Da UA für den

Innenraumeinsatz jedoch weder von luftrechtlichen Vorschriften noch der EU-Drohnenverordnung erfasst werden, steht zu erwarten, dass die Maschinenrichtlinie zukünftig auch für Transportdrohnen in Innenräumen angewendet werden wird. Diese Einschätzung ist ebenfalls in einem vom Autor mitverfassten Whitepaper [P1] publiziert. Dort findet sich ergänzend auch eine Auflistung, welche Regularien und Normen beim Einsatz von UA in Innenräumen berücksichtigt werden müssen und ein Beispiel, wie eine Sicherheitsbetrachtung für den Einsatz von UA in Innenräumen durchgeführt werden kann.

Bereits der Hersteller eines UA bzw. AFR muss eine Vielzahl an Anforderungen berücksichtigen und durch eine EU-Konformitätserklärung bescheinigen, dass die durch den Gesetzgeber vorgegebenen harmonisierten Normen erfüllt werden. Die mit der Konformitätserklärung einhergehende Konformitätsvermutung gilt jedoch ausdrücklich nur für die in den anwendbaren Normen spezifizierten Gefährdungen. Gefährdungen, die nicht über die Normen abgedeckt sind und aus dem Einsatz bzw. den Einsatzumgebungen des UA resultieren, müssen separat mittels einer Risikobeurteilung ermittelt und bewertet werden. [P1, 149, 150]

Das Ziel der erforschten Methoden ist es, einen Beitrag zur auf die Risikobeurteilung folgenden Risikoreduktion zu leisten. Entsprechend der Vorgaben der Maschinenrichtlinie bzw. der zugehörigen Norm DIN EN ISO 12100 soll eine Gefährdungsreduktion in absteigender Priorisierung durch Beseitigung der Gefahrenquelle, durch konstruktive Anpassungen, technische Schutzmaßnahmen sowie Benutzerinformationen erreicht werden [150, 151]. Da die Beseitigung der Gefahrenquelle den Einsatz von AFR oftmals ausschließen würde und konstruktive Anpassungen zur Einhausung der Propeller bzw. des vollständigen AFR durch das hierdurch erhöhte Eigengewicht die verfügbare Nutzlast verringern oder bestimmte Anwendungsszenarien ausschließen, zielen die erforschten Methoden auf eine Risikoreduktion mittels technischer Schutzmaßnahmen ab.

Entsprechend der Angaben aus DIN EN ISO 12100 ist die redundante Auslegung von sicherheitsrelevanten Komponenten von entscheidender Bedeutung und ein probates Mittel zur Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Systems. Daher wird im erforschten Sicherheitsframework auch die Unterstützung von dreifach redundanten, modularen (engl. triple modular redundant (TMR)) Flugsteuerungsarchitekturen vorgesehen. Dabei werden auf dem AFR drei FCU installiert, die durch eine davon unabhängige, übergeordnete Instanz im Sicherheitsframework überwacht und kontrolliert werden. Werden dabei Ausfälle oder Abweichungen zwischen den

FCU festgestellt, wird die fehlerhafte FCU deaktiviert und die Steuersignale einer funktionsfähigen FCU werden an das Antriebssystem umgeleitet.

Anzumerken ist, dass die im Folgenden vorgestellten und prototypischen Methoden nicht darauf abzielen, eine Konformität mit den für sicherheitsrelevante Steuerungen geltenden Normen herzustellen. Vielmehr sollen die dargestellten Sicherheitsfunktionalitäten aufzeigen, welche technischen Lösungen perspektivisch die Ausfallsicherheit von AFR erhöhen und gleichzeitig das Gefährdungsrisiko von Personen reduzieren können. Um dabei jedoch eine Konformität mit den anzuwendenden Normen zu erreichen, müssen zahlreiche Hard- und Softwareanforderungen und weitere Vorgaben bzgl. Implementierung und Fehlerwahrscheinlichkeit erfüllt werden, die im Rahmen der Forschungsarbeit nicht adressiert werden.

6.1.2 Lösungsansatz und Integration des Sicherheitsframeworks in die Gesamtsystemarchitektur

Der gewählte Lösungsansatz unterscheidet drei grundlegende Arten von Fehlern bzw. Situationen, die im Sicherheitsframework erfasst und behandelt werden müssen. Hierfür ist entsprechend Bild 34 jeweils ein individuelles Softwaremodul vorgesehen.

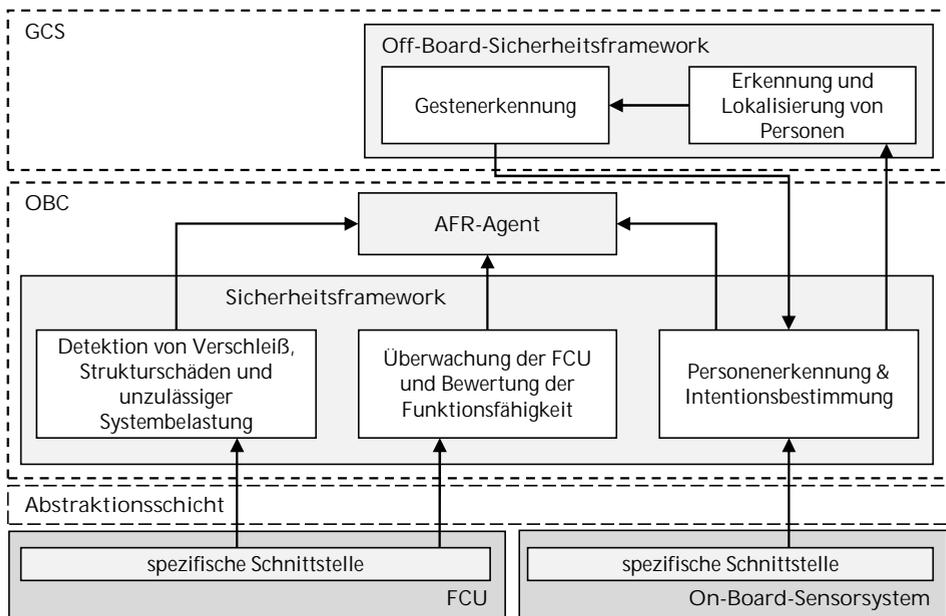


Bild 34: Darstellung der im Sicherheitsframework vorgesehenen Erfassungs- und Diagnosemodule und deren Einbindung in die Gesamtarchitektur

Zunächst können Fehler auftreten, die ihre Ursache in Verschleiß, einer mechanischen Schädigung des AFR sowie Fehlern bei Montage, Reparatur oder Beladung haben. Diese Fehler sollen, sofern bereits vorhanden, direkt beim Start des AFR detektiert werden, um den Startvorgang abubrechen. Zusätzlich sollen auch während des Fluges auftretende Fehler dieser Art detektiert werden, um geeignete Notfallmaßnahmen auszulösen.

Als zweite Fehlerursache können interne Defekte der FCU sowie Fehler bei der Implementierung der spezifischen Flugsteuerungssoftware Auswirkungen auf das Flugverhalten besitzen. Auswirkungen dieser Fehler auf die Flugsicherheit sollen durch den Einsatz einer TMR-Flugsteuerungsarchitektur in Verbindung mit intelligenten Algorithmen zur Überwachung der Funktionsfähigkeit und zur Fehlermaskierung verhindert werden.

Weiterhin soll der AFR zusätzlich in der Lage sein, Personen in seiner Flugbahn zu erkennen und seine aktuelle Aufgabe zu pausieren. Anschließend soll es den erkannten Personen ermöglicht werden, das Flugverhalten des AFR durch einfache Gesten zu steuern und hierdurch beispielsweise eine Notlandung oder die Fortsetzung des Fluges zu veranlassen. Dazu werden die Bilddaten des Sensorsystems sowohl lokal auf dem OBC als auch auf einem externen Cloud-System ausgewertet. Das Cloud-System ermöglicht dabei eine weiterführende Pose- und Gestenerkennung, die auf dem AFR nicht in der erforderlichen Zeit und Genauigkeit möglich ist.

Um das Flugverhalten situationsabhängig anzupassen und Reaktionen auf Fehler auszulösen, geben alle drei beschriebenen Sicherheitsmodule entsprechend ihrer Analyse eine Rückmeldung an den AFR-Agenten, der daraufhin die notwendigen Maßnahmen einleitet. Im Folgenden werden die Umsetzung und die detaillierte Funktionsweise der drei Sicherheitsmodule im Detail beschrieben.

6.2 Detektion von Verschleiß, Strukturschäden und unzulässiger Systembelastung

Von entscheidender Bedeutung für die Gewährleistung der Personensicherheit und Vermeidung von Abstürzen ist die frühzeitige Detektion bzw. Prädiktion von Systemfehlern, idealerweise noch vor dem Abheben des AFR. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass AFR nur bei optimaler Funktionsfähigkeit eingesetzt werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit einer Funktionsstörung während des Fluges reduziert wird. Hierfür

werden während des Startvorgangs und im Flug die Daten der Beschleunigungssensoren des AFR ausgewertet und die Ergebnisse mit den aus einem physikalischen Modell des AFR abgeleiteten Erwartungswerten verglichen.

6.2.1 Lösungsansatz und Systemarchitektur

Entsprechend der Darstellung in Abschnitt 2.1.2 wird bei den in dieser Arbeit betrachteten Bauformen von AFR der notwendige Auftrieb und Voranschub durch die Rotation von vier oder mehr Rotoren erreicht. Bei bekanntem Abfluggewicht des AFR kann auf Basis von Gleichung (2.1) eine mittlere Drehzahl $\bar{\omega}$ der Rotoren bestimmt werden, bei welcher sich der AFR im Schwebезustand befindet und die Auftriebskraft der Gewichtskraft betragsgleich entgegen wirkt. Entsprechend gilt die Erwartung, dass bei einem fehlerfrei funktionierenden AFR ohne schwingende oder vibrierende Bauteile die zugehörige mittlere Drehfrequenz \bar{f} (sowie deren Vielfache) in einer diskreten Fourier-Transformation (DFT) der Beschleunigungsmesswerte die dominante Frequenz darstellt. Sind Eigengewicht des AFR sowie das Gewicht der Nutzlast bekannt, lässt sich bei Kenntnis der konstanten Propellereigenschaften die im Schwebeflug zur Kompensation der Schwerkraft notwendige Motordrehzahl präzise vorhersagen.

Eine fortlaufende Auswertung der Beschleunigungsmesswerte im Frequenzbereich ermöglicht es, über eine Bestimmung der dominanten Frequenz und deren Abgleich mit der aus dem Modell erwarteten Frequenz noch während des Startvorgangs falsche Zuladungen bzw. Gewichtsbelastungen des AFR zu detektieren. Zusätzlich liefert eine Frequenzanalyse Informationen über Strukturschäden, lose Teile oder eine falsche Ladungssicherung. Weichen die dominante Frequenz oder der Effektivwert des Beschleunigungssignals signifikant vom zugehörigen Erwartungswert ab, kann hierüber auf die genannten Fehler rückgeschlossen werden. Um die beschriebenen Analysen vorzunehmen und eine darauf basierende Fehlerdetektion umzusetzen, wird eine Methode und Architektur entsprechend Bild 35 vorgesehen.

Die wirkenden Beschleunigungen $\mathbf{a}(t)$ werden auf der Flugsteuerung mit der Abtastfrequenz f_s erfasst und an den OBC übertragen. Hieraus folgt das zeitdiskrete Signal $\mathbf{a}[n] = \mathbf{a}(nf_s^{-1})$, das den Wert von $\mathbf{a}(t)$ zum Zeitpunkt nf_s^{-1} beschreibt [152]. Dabei bezeichnet $n \in [-\infty, \infty]$ einen ganzzahligen Wert, der das zugehörige Element innerhalb des diskretisierten Signals bezeichnet.

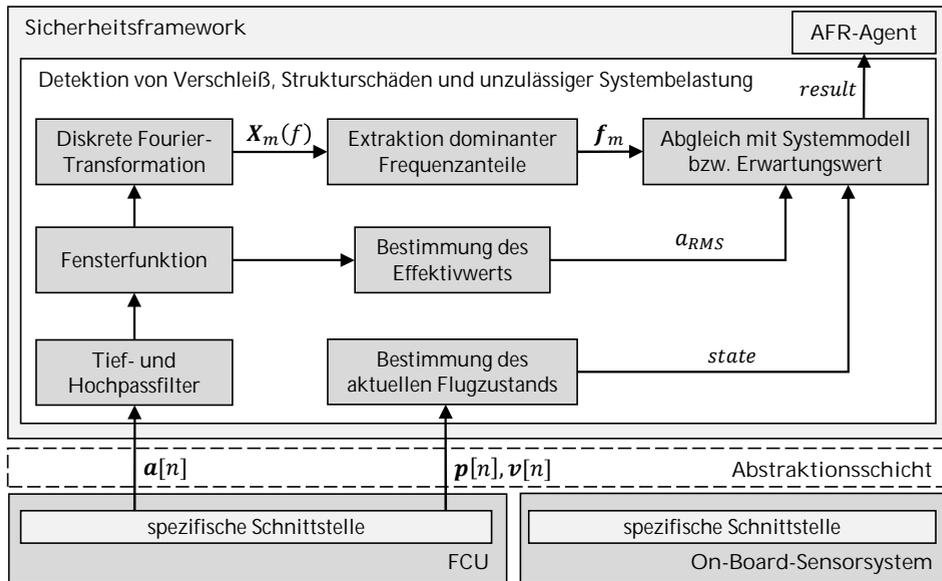


Bild 35: Schematische Darstellung des Analyseprozesses zur Bewertung der gemessenen Beschleunigungssignale und Ableitung eventueller Fehler und Defekte

Auf dem OBC erfolgt zunächst eine Filterung des Signals $\mathbf{a}[n]$, um quasi-statische Frequenzanteile sowie Frequenzen oberhalb der maximalen Motordrehfrequenz zu unterdrücken. Anschließend wird das Beschleunigungssignal mit Hilfe der Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. short-time fourier transform (STFT)) analysiert. Bei der STFT wird das eingehende zeitdiskrete Signal mittels einer Fensterfunktion in Signalblöcke unterteilt, die anschließend mittels einer DFT in den Frequenzbereich überführt werden. Hierdurch wird es möglich, die zeitliche Änderung des Frequenzspektrums zu ermitteln und auszuwerten. Im vorliegenden Fall wird die Beschleunigung entlang jeder Achse des Koordinatensystems K_B individuell ermittelt. Daher wird für jede der drei Komponenten $\mathbf{a}^x[n]$, $\mathbf{a}^y[n]$ und $\mathbf{a}^z[n]$ eine separate DFT durchgeführt und die resultierenden Spektren werden anschließend gemittelt.

Aus dem resultierenden Spektrum erfolgt eine Extraktion der dominanten Frequenzen \mathbf{f}_m , um diese anschließend unter Berücksichtigung des aktuellen Flugzustandes mit dem aus dem Systemmodell abgeleiteten Erwartungswert abzugleichen. Hierbei werden die vier Frequenzanteile mit der höchsten Amplitude extrahiert und aus diesen wird der Mittelwert \bar{f} gebildet. Dies ist notwendig, da AFR mit vier oder mehr Rotoren betrachtet werden und durch ungleiche Lastverteilung, Luftströmungen und weitere Störeinflüsse die Rotoren auch im Schwebeflug mit leicht unterschiedlicher

Frequenz rotieren. Parallel werden der Zeitverlauf des Effektivwertes a_{RMS} des Signals und die Frequenzverteilung bestimmt, um abschließend den Systemzustand zu bewerten und im Fehlerfall eine entsprechende Rückmeldung an den AFR-Agent zu geben. Hierfür wird zusätzlich die aktuelle Flughöhe $p^z[n]$ einbezogen, um den aktuellen Flugzustand zu bestimmen.

6.2.2 Systemanalyse mittels Kurzzeit-Fourier-Transformation

Bei der STFT wird das Zeitsignal jeweils über eine Länge von N Messwerten zwischengespeichert und für diesen Signalblock anschließend das Frequenzspektrum berechnet. Da die Frequenzzusammensetzung vorab unbekannt ist, wird der Signalblock vor der Analyse mit einer Fensterfunktion multipliziert, um Leck-Effekte und damit verbundene, ungewollte Frequenzverbreiterungen zu reduzieren [153]. Zum Einsatz kommt dabei ein Hamming-Fenster, dessen Verlauf über die Funktion

$$w[n] = 0,54 - 0,46 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), n = 0, \dots, M-1 \quad (6.1)$$

beschrieben wird. Dabei beschreibt n den aktuellen Index des Eingangssignals und M die Anzahl der Messwerte pro Fenster. Das Hamming-Fenster wird gewählt, da es eine schmale Hauptkeule und somit eine gute Frequenzauflösung bei gleichzeitig ausreichender Dämpfung der Nebenmaxima bietet. [154]

Anschließend wird das zeitdiskrete Signal $x[n]$ mittels DFT in den Frequenzbereich überführt. Die entsprechende Transformation folgt der Gleichung

$$\mathbf{X}_m(m, f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n - m(M - L)]e^{-j2\pi fn} \quad (6.2)$$

wobei $w[n]$ die gewählte Fensterfunktion mit einer Länge von M Messwerten bezeichnet. Dabei können die in zwei aufeinanderfolgenden DFT auszuwertenden Signalblöcke überlappen; ist dies der Fall, beschreibt L die Anzahl der überlappenden Messwerte. Es wird somit in jedem Auswertungsschritt m die DFT für ein um den Zeitpunkt $m(M - L)$ zentriertes Fenster berechnet. Die resultierenden Frequenzspektren werden fortlaufend aneinandergereiht, um daraus den zeitlichen Verlauf $\mathbf{X}_m(m, f)$ der Frequenzen darzustellen. [155–157]

Hierbei muss zusätzlich die Kūpfmüllersche Unbestimmtheitsrelation berücksichtigt werden, die besagt, dass Zeitdauer und Bandbreite eines Signals nicht gleichzeitig beliebig klein werden können [158]. Um einen ausreichenden Drehzahlbereich abzudecken, wird die Abtastfrequenz zu 400 Hz gewählt, woraus sich ein analysierbarer Frequenzbereich von 0 bis 200 Hz ergibt. Die Fensterbreite wird auf einen Wert von 512 Messwerten festgesetzt, wodurch das Beschleunigungssignal mit einer Auflösung $\frac{200 \text{ Hz}}{512/2} = 0,78 \text{ Hz}$ ausgewertet werden kann. Die Überlappung der auszuwertenden Signalblöcke wird auf 50 % festgelegt. Eine Überlappung der Signalblöcke ist erforderlich, da durch die Form der Fensterfunktion die Signalamplituden an den Rändern des Signalblocks signifikant reduziert und die betreffenden Signalanteile sonst in der Analyse nicht berücksichtigt werden. Eine Überlappung von 50 % bietet dabei entsprechend der Darstellung in [159] den optimalen Kompromiss zwischen Rechenleistung und Auswertegenauigkeit.

Der berechnete Effektivwert jedes Signalblocks und die jeweils ermittelten Frequenzanteile mit dominanter Amplitude können entsprechend der nachfolgenden Beschreibung mit bekannten Erwartungswerten abgeglichen werden, um Systemfehler zu detektieren.

6.2.3 Vorgehen zur Detektion von Systemfehlern während des Startprozesses

Zur Detektion von Systemfehlern mittels STFT kommt ein zweistufiges Verfahren zum Einsatz, das in der initialen Startphase durchgeführt wird. Zunächst werden die Rotoren in den Leerlauf geschaltet, um defekte Propeller zu detektieren. Werden keine Defekte festgestellt, folgt ein kontrollierter Steigflug auf eine Höhe von 1,5 m, wobei die maximale Steiggeschwindigkeit auf einen Wert von 0,2 m/s limitiert wird. Die Flughöhe ist dabei so gewählt, dass der Bodeneffekt das Flugverhalten der betrachteten Systeme nicht mehr beeinflusst. In dieser zweiten Phase können eine unzulässige Gewichtsbelastung sowie gelöste Bauteile detektiert werden. Die jeweils zugrundeliegenden Zusammenhänge zwischen den Daten der STFT und den einzelnen Defekten werden nachfolgend aufgeführt.

Detektion beschädigter oder verschlissener Propeller

Defekte an Propellern haben einen signifikanten Einfluss auf die Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Flugstabilität der AFR. Kommt es während des Fluges zu einem Versagen des Propellers, kann dies zu einem Absturz des AFR führen und muss daher ausgeschlossen werden. Weist ein

Propellerblatt eine Beschädigung auf, führt dies durch die resultierende ungleiche Gewichtsverteilung des Propellers bereits bei Leerlaufdrehzahl im Frequenzspektrum zu einer erhöhten Amplitude an der Rotationsfrequenz. Weiterhin steigt der Effektivwert des Signals deutlich an. Durch einen Vergleich des Effektivwerts des Beschleunigungsmesswerte mit einem vorab, im vollfunktionsfähigen Zustand, aufgenommenen Referenzwert, können defekte Propeller eindeutig identifiziert werden. Weicht der über den Zeitraum des Leerlaufs gemessene, mittlere RMS-Wert um mehr als 50 % vom Erwartungswert ab, wird dies als Fehler interpretiert und der Startvorgang abgebrochen.

Detektion gelöster Bauteile oder unzureichender Ladungssicherung

Lösen sich Teile bzw. kommt es durch eine fehlerhafte Ladungssicherung zu einer Schwingung der Nutzlast, zeigt sich dies ebenfalls durch einen Anstieg des Effektivwerts des Beschleunigungssignals. Zusätzlich können Störfrequenzen im Frequenzspektrum auftreten, die nicht mit der Motordrehzahl übereinstimmen. Durch die kontinuierliche Analyse der Frequenzspektren sowie der Änderungen gegenüber den vorherigen Messungen und dem Ausgangszustand lassen sich lockere Komponenten während der zweiten Phase des Startvorgangs sowie fortlaufend während des Flugs detektieren. Dabei erfolgt ebenfalls ein Vergleich des Effektivwerts des Beschleunigungssignals mit einem vorab, im vollfunktionsfähigen Zustand, aufgenommenen Referenzwert. Wenn der gemessene Effektivwert den Erwartungswert um mehr als 50 % überschreitet oder das Spektrum nicht mehr eindeutig von der erwarteten Motordrehfrequenz dominiert wird, stellt dies einen Fehler dar, der durch eine Notlandung behandelt wird.

Detektion unzulässiger Gewichtsbelastung

Unter Berücksichtigung der vorab dargestellten Zusammenhänge kann über eine STFT fortlaufend die mittlere Motordrehzahl und somit die wirkende Schubkraft berechnet werden. Um eine unzulässige Gewichtsbelastung zu bestimmen, wird die STFT während des Startvorgangs sowie im nachfolgenden Schwebeflug ausgewertet. Die in diesem Zeitraum ermittelte mittlere Drehzahl wird mit dem Erwartungswert abgeglichen. Übersteigt die gemessene Drehzahl noch während des Bodenkontakts die erwartete Drehzahl um mehr als zehn Prozent, lässt dies auf eine signifikante Überladung schließen und der Startvorgang wird abgebrochen. Ist dies nicht der Fall, wird im nachfolgenden Schwebeflug erneut ein Abgleich vorgenommen. Dabei kann bereits ab einer Abweichung von fünf Prozent und mehr des Erwartungswerts zuverlässig eine unvorhergesehene Beladung des AFR abgeleitet werden.

Wird während der beiden Phasen die erwartete Drehzahl um die gleichen Prozentsätze unterschritten, folgt daraus im Umkehrschluss, dass sich Teile oder die Nutzlast vom AFR gelöst haben bzw. nicht am AFR angebracht wurden. Analog kann mit der vorgestellten Methode auch der Verlust von Ladung und anderen Teilen während des Fluges detektiert werden.

6.3 Bewertung der Funktionsfähigkeit von Flugsteuerungen

Eine zentrale Limitierung der vorab beschriebenen Methodik ist, dass Defekte der FCU bzw. Implementierungsfehler der darauf laufenden Software nicht eindeutig detektiert bzw. maskiert werden können. Ein Sensorausfall oder kritischer Softwarefehler der FCU kann daher ohne zusätzliche Maßnahmen zu einem Absturz des AFR und einer Gefährdung im Umkreis befindlicher Personen führen.

Daher wird ergänzend eine Methodik zur fortlaufenden Auswertung der Zustandsinformationen einer FCU und der darauf basierenden Fehlererkennung und –maskierung vorgesehen. Zu diesem Zweck wird im Folgenden die Anzahl der auf dem AFR vorgesehenen FCU auf drei erhöht, wodurch ein TMR-Flugsteuerungssystem vorliegt. Wird dabei dreimal die gleiche FCU mit identischer Software verwendet, kann es durch systematische Fehler in der Hardwareschaltung oder der Software zu einem gleichzeitigen Versagen aller drei FCU kommen. Daher ist die Methodik so ausgelegt, dass sie auch FCU von unterschiedlichen Herstellern integrieren kann, wenn die notwendige Schnittstellenabstraktion gegeben ist.

6.3.1 Aufbau und Einbindung in die Systemarchitektur

Die Grundlage für die kontinuierliche Auswertung von Zustandsinformationen und Bestimmung der aktuellen Funktionsfähigkeit eines AFR stellt ein durch den Autor entwickeltes und vorab publizierte Analyseframework [P8] dar. Hierfür werden die in [160–162] publizierten Ideen und Lösungsansätze aufgegriffen und weitergeführt, um den Stand der Forschung um eine auf inexaktem Voting basierende Fehlerdetektion für Multirotorsysteme mit einer TMR-Flugsteuerungsarchitektur zu erweitern.

Das Framework bezieht von allen angeschlossenen FCU über das verfügbare Telemetrieinterface die aktuellen Zustandsinformationen der FCU und wertet diese im Zeitbereich aus. Die aus der Analyse resultierenden statistischen Kenngrößen werden anschließend mit Hilfe von mathemati-

schen Bewertungsfunktionen untereinander sowie mit definierten Grenzwerten abgeglichen, um daraus auf mögliche Funktionsstörungen der FCU rückschließen zu können. Dabei wird zusätzlich die aktuelle Flugphase berücksichtigt, um Grenzwerte und zulässige Abweichungen dynamisch anpassen zu können. Weiterhin bietet das Framework die Möglichkeit, die einzelnen FCU hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit zu bewerten, auftretende Fehler zu maskieren und während des Flugs die Kontrolle von einer fehlerhaften auf eine funktionsfähige Flugsteuerung zu übertragen, ohne dass hierdurch das Flugverhalten beeinträchtigt wird. Das detaillierte Vorgehen zur Zustandserfassung und -analyse ist in Bild 36 dargestellt.

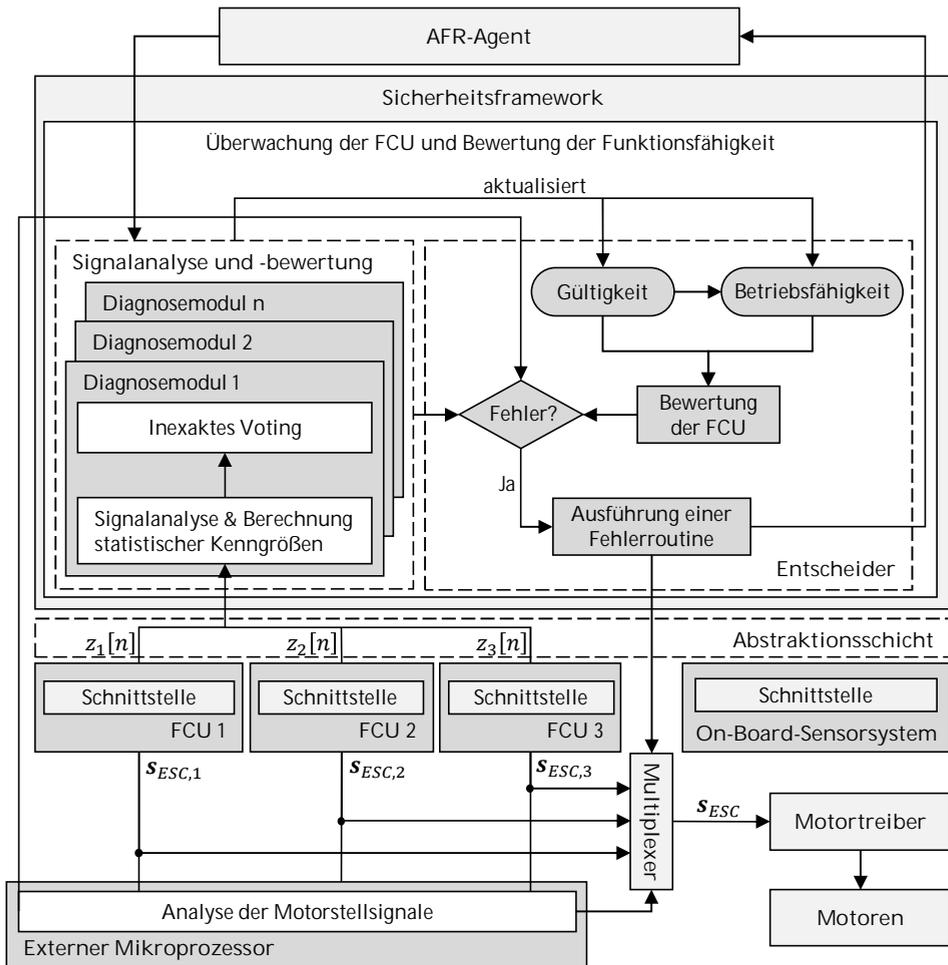


Bild 36: Darstellung des entwickelten Systemaufbaus zur Fehlerdetektion und Bewertung der Funktionsfähigkeit von FCU innerhalb einer TMR-Architektur

Die Sensordaten und Zustandsinformationen der angeschlossenen Flugsteuerungen (FCU_{1-3}) werden über die Abstraktionsschicht an die auf dem OBC ausgeführte Zustandsüberwachung übertragen. Dort wird für jedes auszuwertende Signal (z.B. Position, Geschwindigkeit, Temperatur etc.) ein Diagnosemodul ausgeführt, welches fortlaufend die relevanten statistischen Kenngrößen für das Signal jeder FCU berechnet. Die bestimmten Kennwerte werden mittels einer Bewertungsfunktion untereinander sowie mit statischen Grenzwerten verglichen. Da zwischen den FCU keine Zeitsynchronisation erfolgt und jede FCU eine eigene Sensoreinheit besitzt, deren Messwerte aufgrund von stochastischen Einflüssen voneinander abweichen, erfolgt der Abgleich auf Basis eines inexakten Voting-Algorithmus. Als Ergebnis liefert das Diagnosemodul für jede FCU-Paarung eine Gültigkeit, welche die Übereinstimmung der analysierten Signale beschreibt. Weichen dabei die Signale einer FCU von den beiden anderen in unzulässiger Weise ab, lässt dies auf eine Funktionsstörung der betreffenden FCU schließen.

In einem nachfolgenden Modul wird auf Basis aller berechneten Gültigkeiten die übergeordnete Betriebsfähigkeit jeder FCU bestimmt sowie bei Bedarf die Fehlerbehandlung durchgeführt. Entscheidender Vorteil einer TMR-Architektur ist dabei, dass im Fehlerfall die primäre FCU deaktiviert werden kann und die Stellsignale eines Redundanzsystems an die Motortreiber weitergegeben werden können. Hierfür werden die Stellsignale der drei FCU über einen Multiplexer geleitet, der über eine entsprechende softwareseitige Ansteuerung verfügt, wodurch sichergestellt wird, dass in jedem Fall die Signale einer voll funktionsfähigen FCU an die Motoren weitergegeben werden. Das Umschalten der FCU kann dabei während des Flugs ohne Auswirkung auf das Flugverhalten erfolgen.

Zusätzlich werden in einer separaten Auswerteeinheit die Motorstellsignale der FCU untereinander verglichen, um Fehler bei der Motoransteuerung zu detektieren. Analog zur Auswertung der internen Zustände der FCU erfolgt auch hier im Fehlerfall eine Deaktivierung der entsprechenden FCU. Das genaue Vorgehen zur Signalanalyse und Fehlerbehandlung wird im Folgenden vorgestellt.

6.3.2 Beschreibung der Diagnosemodule und der Methodik zur Bewertung der Funktionsfähigkeit einer FCU

Da zwischen den FCU keine Zeitsynchronisation erfolgt und jede FCU eine eigene Sensoreinheit besitzt, deren Messwerte aufgrund von stochasti-

schen Einflüssen voneinander abweichen, können die Signale nicht bitweise verglichen werden. Stattdessen muss beim Abgleich der Signale ein Toleranzbereich vorgesehen werden, um unterschiedliche Ankunftszeiten der Signale und stochastische Abweichungen zu kompensieren. Daher wird ein inexakter Voting-Algorithmus implementiert, der mittels einer Schwellenwertfunktion die Übereinstimmung zweier Signale bewertet. Hierfür wird zunächst nochmals der Unterschied zwischen exakter und inexakter Signalbewertung betrachtet, welcher zur Verdeutlichung in Bild 37 (links) graphisch dargestellt ist.

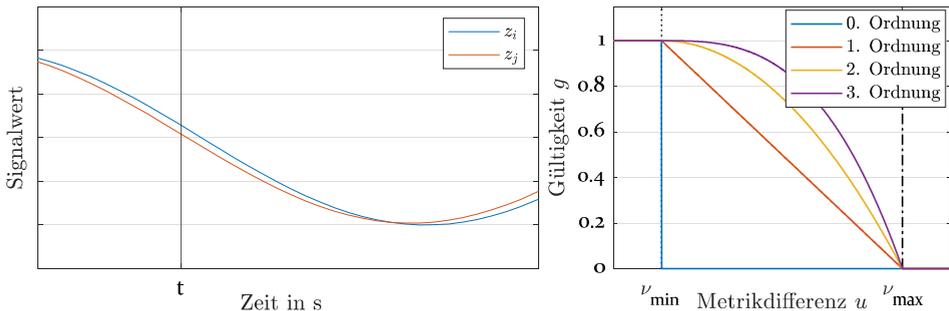


Bild 37: Darstellung des Signalverlaufs zwei zeitlich verschobener Sinussignale (links) und des grafischen Verlaufs sowie des Wertebereichs von vier Bewertungsfunktionen unterschiedlicher Ordnung (rechts)

Werden zwei Signale $z_i(t)$ und $z_j(t)$ zum Zeitpunkt t exakt verglichen, wird die Übereinstimmung, welche im Folgenden auch als Gültigkeit $g_{i,j}$ dieser Signalpaarung bezeichnet wird, über den Zusammenhang

$$g_{i,j} = \begin{cases} 1, & z_i(t) = z_j(t) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.3)$$

bestimmt. Hingegen gilt für den inexakten Vergleich der Zusammenhang

$$g_{i,j} = f(|z_i(t) - z_j(t)|), \quad (6.4)$$

bei dem $g_{i,j}$ einen Wert im Bereich von $[0,1]$ annehmen kann. Je höher der Betrag der Abweichung ist, desto geringer fällt der Wert von $g_{i,j}$ aus. Die Funktion $f(|z_i(t) - z_j(t)|)$ wird im Folgenden als Bewertungsfunktion bezeichnet.

Innerhalb des Sicherheitsframeworks steht entsprechend der vorangegangenen Darstellung für jeden auszuwertenden Signaltyp ein individuelles Diagnosemodul zur Verfügung. Die zugehörigen Größen $z_i(t)$ werden während des Fluges auf jeder verbundenen FCU i kontinuierlich mit der

Abtastfrequenz f_s erfasst und als zeitdiskrete Signale an das Diagnosemodul übertragen. Innerhalb jedes Diagnosemoduls sind die zur Signalanalyse zu verwendenden Metriken spezifiziert. Eine Metrik kann dabei der aktuelle Signalwert oder eine statistische Kenngröße wie die Min-Max-Spanne, der Mittelwert, die Standardabweichung etc. sein. Diese statistischen Kenngrößen werden innerhalb jedes Diagnosemoduls über ein Fenster von N Messwerten berechnet und mit jedem Eintreffen eines neuen Signalwerts aktualisiert.

Somit stehen innerhalb des Diagnosemoduls zu jedem Auswertzeitpunkt t die Metriken $m_{n,i,t}$ zur Verfügung. Dabei gilt $n \in \mathbb{N} : 1 \leq n \leq N_M$, wobei N_M die Anzahl der definierten Metriken darstellt. Durch die fortlaufend aktualisierten Metriken wird es möglich, die Übereinstimmung zweier Signale zu bewerten und den aus einer möglichen Abweichung resultierenden Einfluss auf das Gesamtsystem abzuleiten. Die hierfür definierte Bewertungsfunktion folgt der in Gleichung (6.6) aufgeführten Definition und ist als Kurvenschar in Bild 37 (rechts) dargestellt.

Berechnet wird hierfür zunächst die Distanz u_i , welche zum Auswertzeitpunkt t zwischen zwei gleichartigen Metriken $m_{n,i,t}$ und $m_{n,j,t}$ zweier Flugsteuerungen herrscht. Für die Distanz $u_{n,i,j,t}$ gilt dabei der Zusammenhang

$$u_{n,i,j,t} = |m_{n,i,t} - m_{n,j,t}| \text{ für } i < j. \quad (6.5)$$

Liegt die $u_{n,i,j,t}$ oberhalb eines vorab definierten unteren Schwellenwerts $v_{\min,n,i,j}$ und unterhalb eines definierten oberen Schwellenwerts $v_{\max,n,i,j}$, wird die zugehörige Gültigkeit $g_{n,i,j,t}$ der Metriken über den Zusammenhang

$$g_{n,i,j,t} = 1 - \left(\frac{|u_{n,i,j,t} - v_{\max,n,i,j}|}{|v_{\max,n,i,j} - v_{\min,n,i,j}|} \right)^q \text{ für } i < j \quad (6.6)$$

berechnet. Andernfalls gelten für $g_{n,i,j,t}$ die aus Bild 37 (rechts) ersichtlichen Werte von 0 bzw. 1. Über den Exponent q kann zusätzlich gewichtet werden, wie stark sich bereits kleinere Abweichungen auf die Gültigkeit auswirken. Die beiden Grenzen $v_{\min,n,i,j}$ und $v_{\max,n,i,j}$ werden dabei für jede Metrik und jede Flugsteuerungspaarung vorab automatisiert ermittelt und innerhalb des Sicherheitsframeworks hinterlegt. Die zur Ermittlung der Grenzen gewählte Methode ist im nachfolgenden Abschnitt 6.3.3 beschrieben.

Erfolgt die Bewertung der Signalübereinstimmung auf Basis mehrerer Metriken, liegt zu jedem Auswertzeitpunkt eine Menge von Gültigkeiten vor, in der für jede Metrik und jede verglichene Flugsteuerungspaarung eine individuelle Gültigkeit enthalten ist. Um diese Gültigkeiten zusammenzufassen, kommt eine Multiplikationslogik zum Einsatz, welche der Definition

$$g_{i,j,t} = \prod_{n=1}^{N_M} g_{n,i,j,t} \quad (6.7)$$

folgt und das Produkt der Gültigkeiten der einzelnen Kennwerte berechnet. Hierdurch setzt sich im Wert von $g_{i,j,t}$ ein Fehler stets unabhängig von den weiteren Gültigkeiten durch und bleibt auch nach der Zusammenfassung erkennbar. Dies ist beispielsweise von Bedeutung, wenn sich durch verstärkte stochastische Einflüsse die Min-Max-Spanne eines Signals deutlich erhöht und die zugehörige Gültigkeit beim Vergleich auf 0 absinkt, während der Mittelwert annähernd gleichbleibt und die zugehörige Gültigkeit nahe einem Wert von 1 verbleibt.

Beim Einsatz von drei FCU ergeben sich somit für das im Diagnosemodul ausgewertete Signal die Gültigkeiten $g_{1,2,t}$, $g_{1,3,t}$ und $g_{2,3,t}$, welche die Übereinstimmung des Signals zwischen den jeweiligen FCU ausdrücken. Hieraus kann über die Zusammenhänge

$$g_{1,t} = \frac{g_{1,2,t} + g_{1,3,t}}{2}, g_{2,t} = \frac{g_{1,2,t} + g_{2,3,t}}{2}, g_{3,t} = \frac{g_{1,3,t} + g_{2,3,t}}{2} \quad (6.8)$$

jeweils die zusammengefasste Gültigkeit $g_i \in [0,1]$ definiert ist. Diese repräsentiert die Funktionsfähigkeit des zugehörigen Berechnungsmoduls oder Sensors der jeweiligen FCU und ermöglicht es, Fehler eindeutig einer FCU zuzuordnen. Neben Abweichungen zwischen den Signalen kann es auch zu einem Ausfall bzw. Ausbleiben des Signals kommen. Für diesen Fall werden zusätzlich die Ankunftszeiten der Signale der einzelnen FCU im Diagnosemodul überwacht. Wird von einer FCU über einen vorgegebenen Zeitraum T kein Signal übertragen, gilt dies als Fehler, und die zugehörige Gültigkeit g_i wird auf 0 gesetzt.

Zur abschließenden Bewertung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Flugsteuerungen und Auswahl der aktiven Flugsteuerung kommt die in Bild 37 dargestellte Entscheidungslogik zum Einsatz. Dabei wird auf Basis der berechneten Gültigkeiten g_i die Betriebsfähigkeit $b_i \in \{0, 1\}$ des zugehörigen Berechnungsmoduls oder Sensors bestimmt. Liegt die Gültigkeit g_i über einen Zeitraum von N Auswertzyklen unterhalb eines definierten Schwellwerts δ , wird b_i auf einen Wert von 0 gesetzt. Dies impliziert gleichzeitig

eine schwerwiegende Fehlfunktion der zugehörigen FCU, was die Ausführung einer Fehleroutine sowie die Deaktivierung der FCU und den Wechsel auf ein Redundanzsystem zur Folge hat. Bei Abweichungen eines der Redundanzsysteme wird statt dem Wechsel der aktiven FCU ein Abbruch des aktuellen Auftrags und ein Flug zum nächstgelegenen Landeplatz ausgelöst.

6.3.3 Vorgehen zur Bestimmung der erforderlichen Grenzen

Wie in Bild 37 gezeigt, erfordert das gewählte Vorgehen zwei Schwellenwerte $v_{\min,n,i,j}$ und $v_{\max,n,i,j}$, anhand derer in Verbindung mit der Bewertungsfunktion die Signalübereinstimmung bewertet wird. Dabei ist für die korrekte Funktionsweise der Zustandsüberwachung die Auswahl der Grenzen von entscheidender Bedeutung. Diese müssen so gewählt werden, dass andauernde, kritische Fehler direkt erkannt werden. Gleichzeitig dürfen jedoch die durch die fehlende Zeitsynchronisation und die stochastische Signalverteilung entstehenden Abweichungen die Gültigkeit nicht signifikant beeinflussen und eine ungewollte Notlandung oder einen Wechsel der aktiven FCU auslösen. Zusätzlich sollen die Grenzwerte automatisiert aus dem fehlerfreien Zustand abgeleitet werden können. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, kommt die von Tschebyscheff formulierte Ungleichung zum Einsatz. Mit dieser lässt sich bei einem vorgegebenen Konfidenzniveau γ ein Konfidenzintervall der Form

$$\left[\mu - \frac{\sigma}{\sqrt{1-\gamma}}; \mu + \frac{\sigma}{\sqrt{1-\gamma}} \right] \quad (6.9)$$

bestimmen, welches unabhängig von der Signalverteilung garantiert, dass sich eine Stichprobe X mit einer Wahrscheinlichkeit von $P(X) \geq \gamma$ in diesem Intervall befindet. Dabei beschreibt μ den Erwartungswert und σ die Varianz. [163]

Zur Ermittlung valider Grenzen werden während eines Referenzflugs, bei dem sichergestellt ist, dass sich das System in einem fehlerfreien Zustand befindet, für jede FCU-Paarung die Differenzen der gewählten Metriken erfasst. Anhand dieser Information werden anschließend die zugehörigen Schwellenwerte $v_{\min,n,i,j}$ und $v_{\max,n,i,j}$ als untere bzw. obere Grenze des anhand von Gleichung (6.6) bestimmten Konfidenzintervall definiert.

Dabei wird zusätzlich berücksichtigt, dass bei einem AFR die Ausprägung und Schwankung relevanter Zustandsgrößen vom aktuellen Flugzustand abhängig ist. Somit müssen die Grenzen für alle relevanten Flugzustände

ermittelt werden und während des Fluges dynamisch angepasst werden können. Hierfür benachrichtigt der AFR-Agent das Sicherheitsframework bei allen relevanten Zustandswechseln, sodass die zugehörigen Grenzen geladen und der Auswertung zugrunde gelegt werden können.

6.3.4 Analyse der Motorstellsignale

Wie in Bild 36 gezeigt, erfolgt neben der Analyse der internen Zustände der FCU auch die Überwachung der ausgegebenen Motorstellsignale. Zur Analyse dieser Stellsignale kommt ein Algorithmus zur Bereichsprüfung zum Einsatz. Die drei FCU müssen hierfür das gleiche Protokoll zur Ansteuerung der Motoren verwenden. Allen gängigen Protokollen ist gemein, dass die Vorgabe der Drehzahl für jeden Motor, bezeichnet mit Index n , über ein Stellsignal $s_{ESC,n,t}$ erfolgt, das Werte innerhalb eines vorgegebenen, ganzzahligen Wertebereichs von $[s_{min}, s_{max}]$ annehmen kann. Der Wert s_{min} entspricht dabei einem Stillstand des Motors, s_{max} der maximalen Drehzahl. Das Stellsignal wird mit einer festen Frequenz f_{ESC} von der FCU an die Motoren gesendet.

In Bild 38 sind die Stellsignale für zwei Motoren und die für die Analyse relevanten Größen am Beispiel eines verbreiteten Protokolls auf Basis pulswidenmodulierter Signale dargestellt.

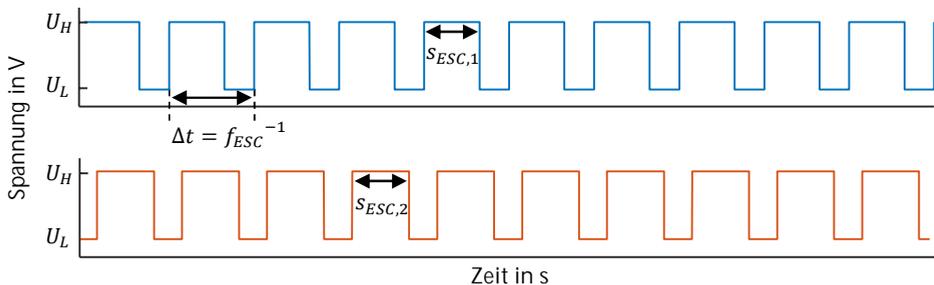


Bild 38: Exemplarischer Verlauf von zwei Motorstellsignalen und Darstellung der zur Bewertung der Übereinstimmung der Stellsignale genutzten Kenngrößen

Durch den externen Mikroprozessor wird für jede FCU und jeden Motor geprüft, ob innerhalb eines Zeitfensters der Länge $\frac{1}{f_{ESC}}$ ein Datenpaket mit einem validen Sollwert $s_{ESC,n,t} \in [s_{min}, s_{max}]$ übertragen wird. Zusätzlich werden die Stellsignale für jeden Motor zwischen den drei FCU abgeglichen. Da alle drei FCU die gleiche Solltrajektorie erhalten, kann im Normalbetrieb davon ausgegangen werden, dass die ausgegebenen Stellsignale hinreichend ähnlich sind. Somit gilt im Normalbetrieb die Erwartung, dass

die Differenz zwischen zwei Stellsignalen für denselben Motor nicht größer als 10 % des Betrags der Differenz von s_{\min} und s_{\max} ist.

Werden die genannten Kriterien erfüllt, funktioniert die Motoransteuerung fehlerfrei, andernfalls liegt ein Fehler vor. Analog zur Auswertung der internen Zustände der FCU gilt auch bei der Analyse der Motorstellsignale die Annahme, dass zum Betrachtungszeitpunkt maximal eine FCU ein Fehlverhalten aufweist und die defekte FCU somit durch den paarweisen Abgleich der Stellsignale der drei FCU eindeutig identifiziert werden kann. Gibt eine FCU fehlerhafte Signale aus, wird durch entsprechendes Schalten des Multiplexer sichergestellt, dass diese Signale nicht an die Motoren weitergegeben werden.

Ergänzend zu einer Analyse der Motorstellsignale können die Motoren zudem direkt auf Fehler und korrekte Funktionsfähigkeit überwacht werden. Hierfür bestehen im Stand der Forschung und Technik zahlreiche Ansätze [164, 165]. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden diese jedoch nicht mit integriert, da hier der Fokus auf der Realisierung einer TMR-Flugsteuerungsarchitektur sowie einer von der im AFR eingesetzten Motorbauweise unabhängigen Fehlerdetektion liegt.

6.4 Erkennung von Personen und gestengesteuerte Anpassung des Flugverhaltens

Wie bereits in Abschnitt 1.1 gezeigt, können AFR von Personen als bedrohlich empfunden werden, sodass der Flug von AFR in ihrem Umfeld als Gefährdungssituation wahrgenommen wird. Daher ist neben der Erkennung und Prädiktion von Fehlern ein weiterer, entscheidender Aspekt des Sicherheitsframeworks die Erkennung von Personen. Auf diese Weise wird es den AFR ermöglicht, auf Personen in ihrem Flugbereich zu reagieren und auf deren Anweisungen Rücksicht zu nehmen.

In der von Wojciechowska et al. veröffentlichten Studie [166] wird aufgezeigt, dass bei den Probanden für ein UA mit 580 mm Durchmesser und geschützten Rotoren ein minimaler Abstand von 1,2 m bevorzugt wird. Mit steigendem Abstand sinkt bei den Probanden die durch das UA verursachte Erregung, gleichzeitig steigt das Sicherheitsgefühl. Das Wohlgefühl der Probanden steigt mit zunehmendem Abstand jedoch nicht weiter an.

Um auf diese Einflussfaktoren Rücksicht zu nehmen und Personen durch den Einsatz von AFR nicht zu beunruhigen, wird im Folgenden eine Methodik vorgestellt, um während des Fluges Personen sowie deren Gestik zu erkennen und somit situationsabhängig das Flugverhalten anzupassen. Ziel

dabei ist, definierte Mindestabstände zu Personen einzuhalten, die nur bei entsprechender Erlaubnis der betreffenden Personen unterschritten werden dürfen. Zusätzlich soll von den erkannten Personen auf Wunsch eine Landung des AFR initiiert werden können. Überwacht wird dabei die bevorstehende Flugstrecke, sodass Personen nicht ohne deren Zustimmung überfliegen werden.

6.4.1 Architektur zur Reaktion auf Personen

Die zur Erkennung von Personen und Ableitung angemessener Reaktionen entwickelte Architektur ist in Bild 39 dargestellt. Die Architektur teilt sich dabei in ein direkt auf dem AFR ausgeführtes Softwaremodul sowie ein auf der externen GCS ausgeführtes Modul auf. Die Aufteilung wird durchgeführt, um von der erhöhten Rechenleistung stationärer Systeme zu profitieren. Gleichzeitig soll auch direkt auf dem AFR eine Personenerkennung möglich sein, um eine schnelle Reaktion zu gewährleisten und die Erkennung auch bei fehlender Kommunikation mit der GCS sicherzustellen.

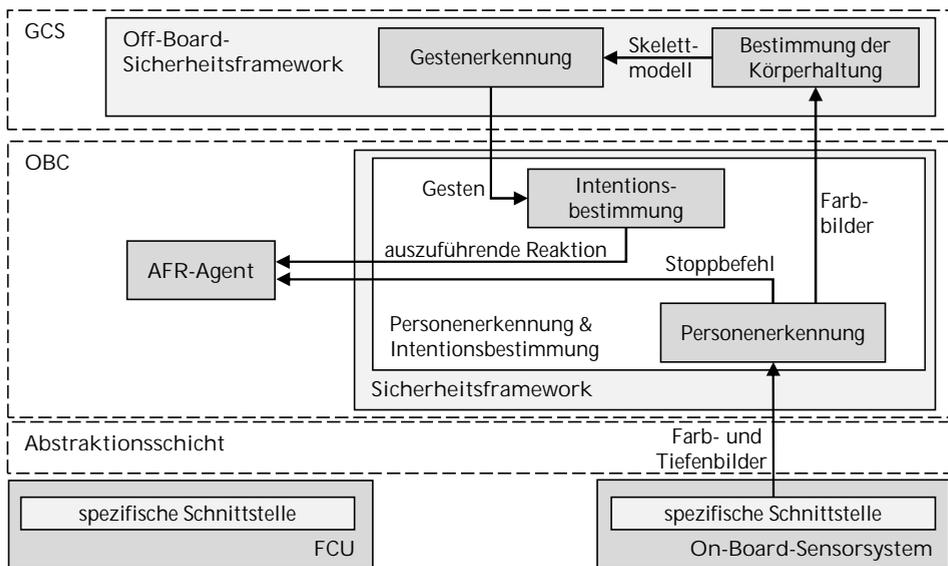


Bild 39: Darstellung des Vorgehens und der Softwarearchitektur zur Personen- und Gestenerkennung und der darauf basierenden Anpassung des Flugverhaltens

Ausgehend von den Farb- und Tiefenbildern der Umgebung, die durch das On-Board-Sensorsystem bereitgestellt werden, erfolgt direkt auf dem AFR eine Erkennung von Personen in den erfassten Bildern. Entsprechend dem aktuellen Stand der Technik und Forschung kommt hierfür ein auf maschi-

nellen Lernverfahren basierender Ansatz zum Einsatz, der auch auf mobilen Systemen eine Auswertung der Bilder mit ausreichend hoher Geschwindigkeit ermöglicht. Durch die Einbeziehung von Tiefenbildern und geeigneten Segmentierungsalgorithmen kann weiterhin der Abstand zu den erfassten Personen bestimmt werden. Dabei bieten Segmentierungsalgorithmen auf Basis neuronaler Netze in Kombination mit aktuellen Einplatinenrechnern eine ausreichende Performance, um die Kameradaten direkt auf dem AFR mit mehr als 20 Hz auszuwerten. [P9, 167–170]

Sobald eine oder mehrere Personen im Flugbereich erkannt werden, die sich näher als der definierte Mindestabstand am AFR befinden, wird diese Information an den AFR-Agent weitergeleitet, woraufhin dieser den aktuellen Auftrag pausiert und den AFR zunächst veranlasst, an der aktuellen Position zu schweben. Die Unterbrechung des Fluges wird solange aufrechterhalten, bis die Personen den geplanten Flugbereich des AFR verlassen hat bzw. die Freigabe zum Weiterflug erteilt. Zusätzlich kann ein akustisches Signal ausgegeben werden, das den Personen im Umfeld signalisiert, dass der AFR seine aktuelle Position halten wird.

Diese geforderte Freigabe erfolgt anhand einer einfachen Geste, mit welcher eine Person dem AFR signalisieren kann, dass sie dem Weiterflug zustimmt und sich des Über- oder Vorbeiflugs des AFR bewusst ist. Da die Gestenerkennung sowie die Lokalisierung von Personen einen höheren Rechenaufwand besitzen, wird diese auf der GCS durchgeführt.

Auch hier wird ausgehend vom aktuellen Stand der Forschung ein neuronales Netz zur Erkennung der aktuellen Körperhaltung eingesetzt. Dabei besteht bereits eine Vielzahl etablierter Lösungen, die die Körperhaltung von Personen auf Basis von Farb- sowie kombinierten Farb- und Tiefeninformationen bestimmen können [171, 172]. Als etablierte und leistungsstarke Lösung zur Berechnung der Körperhaltung wird das OpenPose-Frameworks [173] gewählt und dieses zur Auswertung der übertragenen Farbbilder auf der GCS ausgeführt.

Das Ergebnis dieser Auswertung stellt ein Skelettmodell analog zu Bild 40 dar. Dabei wird die Körperhaltung durch die Position und Anordnung der einzelnen Gelenke zueinander beschrieben. Das Skelettmodell dient als Eingangsgröße der im nachfolgenden Abschnitt vorgestellten Methode zur Gestenerkennung, welche die erkannten Gesten wiederum zurück an den AFR sendet. Dort wird aus den erkannten Gesten die von der Person angeforderte Reaktion des AFR abgeleitet und diese abschließend an den AFR-Agenten zur Ausführung übertragen.

6.4.2 Methode zur robusten Gestenerkennung

Entsprechend der vorherigen Beschreibung pausiert der AFR seine aktuelle Aufgabe und schwebt an einer festen Position in der Luft, sobald er eine Person in seinem Flugbereich erkannt hat. Anschließend wird mit Hilfe eines neuronalen Netzes die Körperhaltung der Person bestimmt, wobei das Ergebnis ein Modell der erkannten Skelettpunkte darstellt. Anhand dieser Daten erfolgt im nachgelagerten Schritt die Gestenerkennung. Die hierfür genutzten geometrischen Zusammenhänge sind in Bild 40 dargestellt.

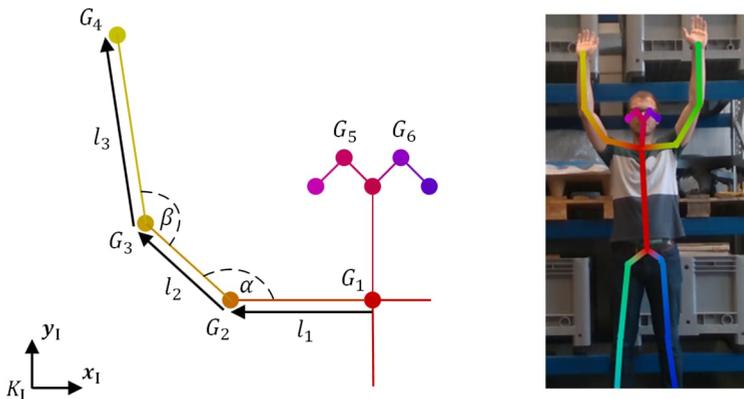


Bild 40: Darstellung der zur Gestenerkennung genutzten geometrischen Zusammenhänge des Skelettmodells (links, in Anlehnung an [173]) und Visualisierung des Skelettmodells einer erkannten Person (rechts)

Betrachtet werden hierfür die Gelenkpositionen des erkannten Skelettmodells im zweidimensionalen Bildkoordinatensystem K_1 . Benötigt werden für die Gestenerkennung die Ortsvektoren des Halsgelenks (${}^1\mathbf{q}_{G,1}$) sowie des Schulter- (${}^1\mathbf{q}_{G,2}$), Ellenbogen- (${}^1\mathbf{q}_{G,3}$) und Handgelenks (${}^1\mathbf{q}_{G,4}$). Zusätzlich wird über eine Bestimmung der Augenposition (${}^1\mathbf{q}_{G,5}$, ${}^1\mathbf{q}_{G,6}$) sichergestellt, dass die Person den AFR im Blick hat und die Gesten zur Kontrolle des AFR gedacht sind.

Die Definition und Erkennung der Gesten erfolgt anhand des Winkels α zwischen Schulterblatt und Oberarm sowie des Winkels β zwischen Ober- und Unterarm. Berechnet werden diese Winkel auf Basis der geometrischen Beziehungen zwischen den vorab genannten Gelenken. Der Winkel α kann somit über die Gleichung

$$\alpha = \arccos \left(\frac{({}^1\mathbf{q}_{G,2} - {}^1\mathbf{q}_{G,1}) \circ ({}^1\mathbf{q}_{G,3} - {}^1\mathbf{q}_{G,2})}{|{}^1\mathbf{q}_{G,2} - {}^1\mathbf{q}_{G,1}| \cdot |{}^1\mathbf{q}_{G,3} - {}^1\mathbf{q}_{G,2}|} \right) \quad (6.10)$$

bestimmt werden. Für den Winkel β gilt die Berechnung mit den zugehörigen Gelenkpositionen bzw. Ortsvektoren entsprechend Bild 40 analog. Da die Gestenerkennung sowohl für den rechten als auch den linken Arm umgesetzt wird, werden die zugehörigen Winkel im Folgenden entsprechend als α_r bzw. β_r sowie α_l bzw. β_l bezeichnet.

Entsprechend der vorhergehenden Darstellung soll über die Gestenerkennung entweder eine Landung ausgelöst werden oder der Über- bzw. Vorbeiflug freigegeben werden. Zu diesem Zweck werden Gesten definiert, die auch bei ungenauer Erkennung der Skelettpunkte noch klar erkannt werden und gleichzeitig von Personen intuitiv durchgeführt werden können. Die Gesten sind dabei entsprechend Tabelle 6 definiert. Die Flugfreigabe kann durch das Anheben des rechten oder linken Arms ausgelöst werden, während für eine Landung beide Arme nach oben ausgestreckt werden müssen. Befinden sich im Erfassungsbereich des AFRS mehrere Personen, die gleichzeitig eine mit einem Kommando verknüpfte Geste ausführen, erfolgt stets eine Priorisierung des Landebefehls. Führen die Personen keine der Gesten aus, wartet der AFR, bis die Personen den betreffenden Bereich verlassen haben. Ist die notwendige Wartezeit länger als ein definierter Grenzwert, wird eine Notlandung ausgelöst.

Tabelle 6: Aufstellung der mit dem definierten Flugkommandos verknüpften Gesten sowie der zugehörigen Gelenkwinkel

Kommando	Geste	Zugehöriger Wertebereich der Winkel
Flugfreigabe	Rechter oder linker Arm gehoben	$(80^\circ < \alpha_l < 160^\circ \wedge 125^\circ < \beta_l < 190^\circ) \vee (80^\circ < \alpha_r < 160^\circ \wedge 125^\circ < \beta_r < 190^\circ)$
Landung	Rechter und linker Arm gehoben	$(80^\circ < \alpha_l < 160^\circ \wedge 125^\circ < \beta_l < 190^\circ) \wedge (80^\circ < \alpha_r < 160^\circ \wedge 125^\circ < \beta_r < 190^\circ)$

Neben den beschriebenen Gesten lassen sich mit der vorgestellten Methode noch eine Vielzahl weiterer Gesten definieren und unterscheiden. Dies hat im Kontext des Sicherheitsframeworks keine Relevanz, ermöglicht jedoch zusätzliche Anwendungsfelder wie die Gestensteuerung eines AFR, was sich beispielsweise für teilautomatisierte Inventur-, Inspektions- oder Vermessungsprozesse nutzen lässt. Weiterführende Informationen hierzu sind in der Publikation [P10] zu finden.

6.5 Zusammenfassung und Bewertung

Beim Einsatz von AFRS im industriellen Einsatz ist die Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten sowie die Gewährleistung der Personensicherheit von entscheidender Bedeutung. Daher beinhaltet das erforschte AFRS ein umfassendes Sicherheitsframework.

Eine Kernfunktionalität des Sicherheitsframeworks stellt die in Abschnitt 6.2 vorgestellte Erkennung von Strukturschäden sowie einer unsachgemäßen Beladung des AFR dar. Hierfür werden die von der FCU übermittelten Beschleunigungsdaten fortlaufend erfasst und im Zeit- und Frequenzbereich ausgewertet. Der dabei ermittelte Effektivwert des Signales sowie die berechneten dominanten Frequenzen werden mit Erwartungswerten abgeglichen, um auf die genannten Fehler rückschließen zu können. Die Methode ermöglicht dabei die Erkennung von defekten Propellern, sich lösenden Komponenten sowie einer falschen Beladung oder fehlerhaften Ladungssicherung. Durch die Einbeziehung von Auftragsinformationen, der Bauform des AFR sowie der charakteristischen Propellereigenschaften wird eine robuste Fehlerdetektion vor bzw. während des Abhebens erreicht, die dazu beiträgt, die Sicherheitsfunktionalitäten innerhalb des AFRS über vergleichbare Systeme aus dem Stand der Forschung hinauszuhoben.

Neben der Erkennung von Strukturschäden sowie einer fehlerhaften Ladungssicherung stellt die Detektion von Fehlern innerhalb einer FCU sowie die Vermeidung von hierdurch verursachten Abstürzen ein Kernelement des Sicherheitsframeworks dar. Die hierfür erforschte und in Abschnitt 6.3 vorgestellte Methode zum Einsatz einer TMR-Flugsteuerung und der zugehörigen Überwachung und Bewertung der Betriebsfähigkeit der verbundenen FCU zeigt erstmals, wie sich inexakte Voting-Algorithmen auch für die Fehlererkennung und -maskierung bei AFR einsetzen lassen. Durch den gewählten Lösungsansatz wird es möglich, die Daten der FCU auch ohne exakte Zeitsynchronisation zu vergleichen und Fehler dennoch sicher zu erkennen und durch den Wechsel auf ein Redundanzsystem zuverlässig zu maskieren.

Den dritten Forschungsschwerpunkt des Sicherheitsframeworks stellt die in Abschnitt 6.4 vorgestellte Methode zur Lokalisierung von Personen im Umfeld der AFR sowie die Anpassung des Flugverhaltens auf Basis von erkannten Gesten dar. Hierfür kommt eine verteilte Architektur zum Einsatz, die sowohl die Erkennung und Lokalisierung von Personen als auch die robuste Erkennung der ausgeführten Gesten in Echtzeit ermöglicht. Durch den verteilten Aufbau funktioniert die Personenerkennung auch, wenn die Funkverbindung des AFR zur GCS unterbrochen wird. Durch die Auswahl

von Gesten, die einerseits schnell und intuitiv ausgeführt werden können und gleichzeitig zuverlässig erkannt werden können, wird sichergestellt, dass der AFR die beabsichtigte Reaktion direkt ausführt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die beschriebenen Methoden eine umfassende Fehlerdiagnose innerhalb des AFRS ermöglichen und den einzelnen AFR zudem eine situationsabhängige Reaktion auf Fehler bzw. Personen in ihrem Arbeitsbereich ermöglichen.

7 Exemplarische Implementierung der Gesamtsystemarchitektur und Evaluation der entwickelten Methoden

Um die quantitative Evaluierung der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Methoden zu ermöglichen, werden diese in geeigneter Form implementiert. Ziel dabei ist, die implementierten Methoden anschließend im Rahmen definierter, industrieller Anwendungsfälle und unter Einsatz einer heterogenen Flotte autonomer Flugroboter zu evaluieren. Um sowohl die Skalierbarkeit der Methoden als auch deren Eignung zur praktischen Applikation evaluieren zu können, erfolgt die Umsetzung in Form eines realen Systems und als Simulation.

Abschnitt 7.1 beschreibt hierfür zunächst den grundlegenden Aufbau des umgesetzten Systems und liefert Informationen zu den eingesetzten Technologien und Softwareframeworks. Weiterhin werden die berücksichtigten Rahmenbedingungen beschrieben und es erfolgt eine vergleichende Betrachtung der Evaluation mittels Simulation und der Evaluation am realem System. Anschließend werden in Abschnitt 7.2 die in Simulation und realem Aufbau erzielten Validierungsergebnisse der erforschten Methoden dargestellt und diskutiert. Abschließend werden in Abschnitt 7.3 die Ergebnisse und die Einsatzmöglichkeit des implementierten Frameworks diskutiert. Einige Aspekte der im Folgenden dargestellten Implementierung und der beschriebenen Systeme sind dabei an die durch den Autor initiierten und betreute studentischen Arbeiten [S33–S50] angelehnt.

7.1 Beschreibung der prototypischen Umsetzung der erforschten Methoden und des Gesamtsystems

Im Folgenden wird die während der Forschungsarbeit erfolgte prototypische Umsetzung und Implementierung der in den vorangegangenen Kapiteln methodisch beschriebenen Systemkomponenten erläutert. Das daraus resultierende AFRS dient anschließend zur systematischen Validierung der erforschten Methoden. Nachfolgend wird zunächst die softwareseitige Umsetzung und die Auswahl der zentralen Hardwaresysteme beschrieben, gefolgt von einer Spezifikation der entwickelten und eingesetzten AFR. Abschließend werden die zur Evaluation umgesetzten Anwendungsszenarien sowie die zusätzlich realisierte Simulation des Gesamtsystems dargestellt. Die Simulation dient dabei zur Evaluation der entwickelten Methoden mit

einer größeren Zahl an AFR, die sich im realen Versuchsumfeld aus Platzgründen nicht realisieren lässt.

7.1.1 Entworfen und umgesetzte AFR

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden zahlreiche AFR mit unterschiedlichen Bauweisen, Fähigkeiten und Abmessungen realisiert. Im Fokus steht dabei stets der Einsatz des AFR für den Warentransport oder die Objektinteraktion sowie für die optische Informationserfassung zum Zweck der Vermessung oder Inventur. Eine Auswahl der realisierten und eingesetzten AFR ist in Bild 41 zu finden.



Bild 41: Auswahl der zur Evaluation der erforschten Methoden entwickelten und eingesetzten AFR. Dargestellt sind auf den Warentransport und die Objektinteraktion spezialisierte AFR sowie AFR zur optischen Informationserfassung [P5, P11, S6, S47]

Allen realisierten AFR ist dabei gemein, dass sie sich in die spezifizierte Gesamtsystemarchitektur integrieren lassen. Zu diesem Zweck sind die AFR neben der erforderlichen FCU bzw. einem TMR-Flugsteuerungssystem mit einem geeigneten OBC sowie einem aufgabenspezifischen On-Board-Sensorsystem ausgestattet. Als Flugsteuerung kommen primär die Pixracer, die Pixhawk 3 Pro, die Pixhawk 4 sowie die integrierte Flugsteuerung der Intel Aero RTF Drone in Verbindung mit der PX4-Firmware in den Release-Versionen 1.09 bis 1.12 zum Einsatz. Als OBC kommen bei den Systemen primär der Odroid XU4, das Intel Aero Compute Board sowie der LattePanda Alpha 864s zum Einsatz. Für den performanten Einsatz von neuronalen Netzen werden alternativ der NVIDIA Jetson Nano bzw. der NVIDIA Jetson Xavier NX als OBC verwendet. Die Übertragung der notwendigen Befehle

und Systeminformationen von der FCU an den OBC erfolgt über eine Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Schnittstelle mit geeigneter Bandbreite.

Die Ausprägung des On-Board-Sensorsystems reicht von einer miniaturisierten Farbkamera zur Detektion und Lokalisierung von optischen Marken und Ladungsträgern bei Transportdrohnen bis zu umfassenden Sensorsystemen. Wird der AFR zur Inspektion oder Vermessung eingesetzt, umfasst das On-Board-Sensorsystem eine kombinierte Farb- und Tiefenkamera und Ultraschallsensoren zur Umgebungserfassung und Kartenerstellung, eine Infrarot-Stereokamera für die visuelle Odometrie sowie eine hochauflösende Farbkamera zur Erfassung der benötigten Informationen. Zum Warentransport genutzte AFR besitzen zusätzlich ein geeignetes Lastaufnahmemittel zur Aufnahme von Ladungsträgern bzw. mechanische Greifer oder Vakuum-Greifer zur Interaktion mit einzelnen Objekten. Um an den in der Einsatzumgebung installierten Ladestationen anzudocken, ist auf einigen AFR zusätzlich das notwendige Gegenstück montiert.

Neben den AFR wurden im Rahmen der Forschungsarbeit zwei Infrastruktursysteme entwickelt, die ebenfalls in das AFRS integriert werden. Bei den umgesetzten Systemen handelt es sich um eine automatisierte Plattform zur Warenübergabe sowie eine Ladestation. An der entwickelten Ladestation docken die AFR von unten an und werden anschließend in der Station arretiert (vgl. Bild 44). Durch dieses System wird es möglich, AFR direkt unterhalb der Hallendecke oder an Kragträgern zu stationieren, wodurch sie ihre Umgebung sensorisch erfassen können. Dies ermöglicht beispielsweise die Durchführung von Inventur- oder Vermessungsprozessen während des Ladevorgangs. [P3, P12]

Weiterführende Informationen zu den einzelnen AFR und Infrastruktursystemen, dem detaillierten Hardwareaufbau und ihrem Funktionsumfang sind in den vom Autor verfassten Publikationen [P3–P5, P7, P8, P11] zu finden.

7.1.2 Implementierung und Realisierung der Gesamtsystemarchitektur

Die Implementierung der erforderlichen Softwarekomponenten erfolgt analog zu den in den vorherigen Kapiteln dargestellten Strukturdiagrammen der einzelnen Module. Dabei kommt das ROS als Framework und Middleware zum Einsatz. Der Einsatz des ROS ermöglicht die schnelle Imple-

mentierung der Kommunikationsarchitektur zwischen den einzelnen Softwaremodulen sowie die Nutzung einer bestehenden und umfassenden Hardwareabstraktion. [174]

Für die im Kontext der Arbeit umgesetzten Komponenten werden nachfolgend der genaue Aufbau sowie die bei der Implementierung verwendeten Softwarebibliotheken und Werkzeuge kurz vorgestellt.

Globales Lokalisierungssystem

Zur globalen Lokalisierung der AFR kommt ein UWB-Lokalisierungssystem der Firma Kinexon GmbH zum Einsatz. Das System erlaubt die dreidimensionale Echtzeitlokalisierung der zugehörigen Sensoren und bietet dabei nach Herstellerangaben eine erreichbare Absolutgenauigkeit von bis zu 0,1 m. Das System unterstützt die beiden Lokalisierungsverfahren TDoA sowie TWR und lässt sich auf den Einsatz in weitläufigen Produktions- und Lagerhallen skalieren. [175, 176]

Entsprechend der Darstellung in Abschnitt 4.3.1 befinden sich auf jedem AFR zwei bzw. drei Sensoren, um mit dem vorgestellten Algorithmus sowohl Position als auch Orientierung des AFR präzise berechnen zu können. Die 3D-Position jedes Sensors wird dabei auf einem zum Kinexon-System gehörigen Server bestimmt und anschließend den einzelnen AFR drahtlos via WLAN bereitgestellt. Zusätzlich kann die Position der Sensoren nochmals über das UWB-System an die AFR übertragen werden. Für das zur Evaluation genutzte Laborsystem kommen für einen quaderförmigen Flugbereich mit einer Grundfläche von 9,9 m auf 6,3 m und einer Höhe von 4,1 m zwölf UWB-Anker zum Einsatz. Diese werden in den Ecken sowie mittig an den Seitenflächen des Flugbereichs angebracht. Die hierdurch erzielbaren Absolutgenauigkeiten befinden sich im Bereich von 0,03 m bis 0,2 m und werden in Abschnitt 7.2.1 weiter evaluiert.

Routenplanung und Luftraummanagement

Die Umsetzung der Routenplanung und des Luftraummanagements folgt der Spezifikation in Kapitel 5. Neben dem ROS kommen bei der Implementierung der eigenen Softwaremodule zusätzlich Funktionen und Algorithmen der PointCloud-Library [177] sowie der frei verfügbaren octomap_ros und costmap_ros Pakete [72, 143] zum Einsatz. Zusätzlich wird das Softwaretool binvox [142] in das Framework eingebunden.

Als Eingangsdaten für das Weltmodell können aus einer vorherigen Vermessung generierte Punktwolken und 3D-Modelle der Einsatzumgebung sowie die für die Simulation erstellten Weltmodelle zum Einsatz kommen. Für die Verwaltung von Sonderzonen sowie der aktuell belegten

Flugrouten werden individuelle Verwaltungsklassen implementiert, in denen die notwendigen Informationen gespeichert und automatisiert aktualisiert werden. Die Algorithmen zur Pfadplanung werden als eigenständige Plugins mit einheitlicher Schnittstelle implementiert, sodass diese ohne Anpassung des Frameworks ausgetauscht werden können.

Flottenmanagement und Auftragsmanagement

Die Realisierung des Flotten- und Auftragsmanagements erfolgt in zwei individuellen Softwaremodulen, die unter Verwendung der Kommunikationsarchitektur des ROS im Rahmen der Forschungsarbeit implementiert wurden. Die Implementierung folgt dabei der in Abschnitt 4.1.4 spezifizierten Methodik.

Für jeden AFR wird nach der Registrierung im Flottenmanagement dort ein zugehöriges Objekt initialisiert, in welchem die spezifischen Eigenschaften des AFR abgelegt sind und über die spezifizierten Schnittstellen kontinuierlich Status- und Zustandsinformationen erfasst und zur Visualisierung aufbereitet werden. Analog wird für jeden eingehenden Auftrag im Auftragsmanagement ein zugehöriges Objekt angelegt und in eine Warteschlange zur Auftragszuweisung eingetragen. Die Auftragszuweisung durchläuft zyklisch die registrierten Auftragsobjekte und prüft beim Flottenmanagement, ob ein zur Ausführung des Auftrags geeigneter AFR registriert und aktuell verfügbar ist. Die Zuweisung der Aufträge erfolgt dabei anhand der im Auftrag spezifizierten Fälligkeit bzw. Priorisierung sowie der aktuellen Entfernung der geeigneten AFR zum Startpunkt des Auftrags.

Sobald einem Auftrag ein geeigneter AFR zugewiesen wurde, wird die direkte Kommunikation zwischen Auftrag und AFR-Agent aufgebaut und der Zustandsautomat des Auftrags wird gestartet. Dieser löst wiederum den Zustandsautomaten der im AFR-Agenten implementierten Aufgabe aus. Während der Auftragsbearbeitung werden der Fortschritt und Zustand des Auftrags kontinuierlich erfasst und für die Visualisierung aufbereitet. Nach Abschluss des Auftrags wird ein Protokoll der Auftragsbearbeitung für ggf. nachfolgende Auswertungen gespeichert.

Abstraktionsschicht und AFR-Agent

Entsprechend der Darstellung im vorangegangenen Abschnitt kommt bei den umgesetzten AFR die PX4-Firmware auf den FCU zum Einsatz. Für diese Firmware existiert bereits eine standardisierte, frei verfügbare Schnittstellendefinition, die zur Kommunikation zwischen OBC und FCU verwendet wird. Diese wird als Mavlink-Protokoll bezeichnet [178][179] und von zahlreichen FCU unterstützt. Bei der Implementierung wird ergänzend das

mavros-Paket [180] verwendet, welches die Einbindung des Mavlink-Protokolls in die Kommunikationsarchitektur des ROS ermöglicht. Somit stehen unabhängig von der Wahl der FCU dem darüber liegenden AFR-Agenten die notwendigen Informationen stets in identischer Form zur Verfügung. Durch die auf diese Weise erzielte Hardwareabstraktion können alle AFR, die das Mavlink-Protokoll und die notwendigen Funktionen unterstützen, direkt in das AFRS integriert werden. Hierfür werden die Elementarfunktionen des AFR-Agenten mit den entsprechenden Funktionen der Mavlink-Schnittstelle verknüpft. Soll die Architektur auf AFR weiterer Hersteller erweitert werden, müssen somit lediglich die Elementarfunktionen mit der Schnittstellenbeschreibung der jeweiligen Hersteller verknüpft werden. Die weitere Implementierung des AFR-Agenten erfolgt als C++-Software entsprechend der Darstellung in Abschnitt 4.1.3.

Sicherheitsarchitektur

Um den Zeitanforderungen der fortlaufenden Zustandsauswertung während des Flugs gerecht zu werden, ist das Sicherheitsframework ebenfalls vollständig in C++ implementiert. Die Funktionen und Methoden werden dabei entsprechend der Darstellung in Kapitel 6 umgesetzt. Zusätzlich verwendet wird dabei die Eigen-Bibliothek [181], um eine performante Signalanalyse zu ermöglichen.

Entsprechend der Darstellung in Abschnitt 6.4 umfasst die Sicherheitsarchitektur zusätzlich ein Offboard-Modul auf der GCS, die eine performante Gestenerkennung ermöglicht. Als GCS wird eine Workstation mit Intel Xeon W-1390P Prozessor sowie einer NVIDIA RTX Quadro 6000 Grafikkarte eingesetzt. Zur Berechnung der Skelettmodelle der im Flugbereich der AFR erkannten Personen kommt OpenPose [173] zum Einsatz.

HMI, Visualisierung sowie ERP- und MES-Schnittstelle

Abschließend bietet das Framework eine grafische Benutzerschnittstelle, die eine umfassende Konfiguration und Analyse des Gesamtsystems ermöglicht. Zur Flottenverwaltung, zur Konfiguration der individuellen Flugroboter sowie zur Visualisierung der relevanten Statusinformationen des Gesamtsystems steht eine Webapplikation zur Verfügung, sodass der Zugriff auf das System von beliebigen Endgeräten erfolgen kann. Umgesetzt ist die Webanwendung unter Verwendung des Webframeworks Angular sowie der Robot Web Tools [182], die eine Kommunikation zwischen der Webapplikation und dem ROS-Framework ermöglichen. Wie in Bild 42 gezeigt, können über die implementierte Webanwendung Zustands- und

Leistungsdaten aller verbundenen AFR visualisiert sowie Flugbefehle an die AFR weitergegeben werden.

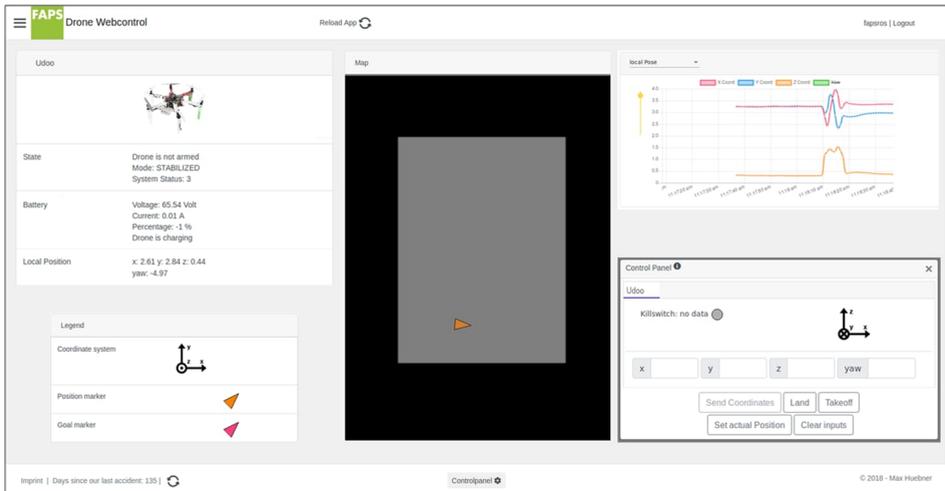


Bild 42: Darstellung der Webanwendung zum Flottenmanagement sowie zur Statusvisualisierung (in Anlehnung an [S39])

Zum Anlegen von Transport- oder Inventuraufträgen sowie zum Anlegen von Sperrzonen und Landeflächen steht weiterhin eine separate Applikation mit echtzeitfähiger 3D-Visualisierung zur Verfügung, welche in Bild 43 dargestellt ist. Die Anwendung basiert auf der Laufzeit- und Entwicklungsumgebung Unity sowie dem ROS#-Framework [183] und ist plattformunabhängig für alle gängigen Betriebssysteme umgesetzt.

Weiterführend zur Webapplikation ermöglicht die Unity-Applikation die 3D-Visualisierung der AFR und ihrer aktuellen Einsatzumgebung. Weiterhin können innerhalb der Umgebung an beliebigen Positionen Aufträge angelegt werden. Dies kann beispielsweise die Anweisung zur Durchführung einer Inventur entlang eines Hochregals oder der Transport eines Ladungsträgers sein. Durch die zeitliche und räumliche Verknüpfung dieser Anweisungen können schnell neue Aufträge erstellt und an die Auftragsverwaltung weitergegeben werden.

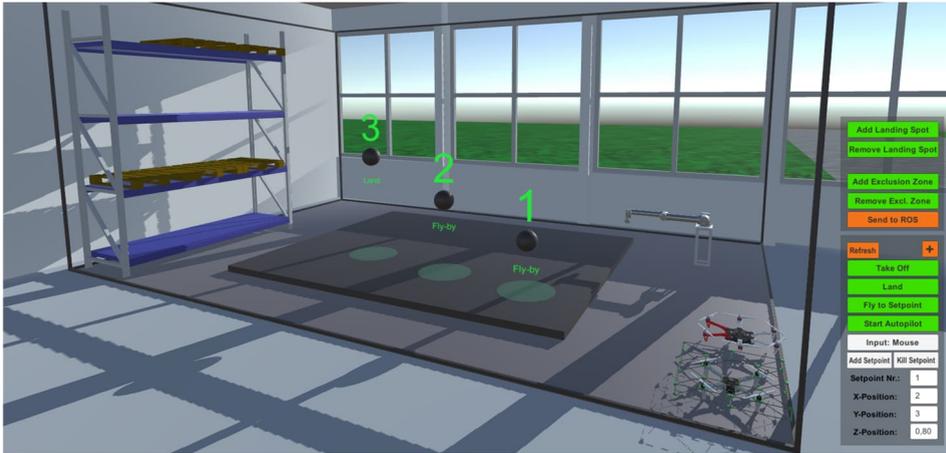


Bild 43: Darstellung der virtuellen Umgebungsrepräsentation in Unity mit integrierter Schnittstelle zum Flottenmanagement sowie zur Auftragsverwaltung

Zur Anbindung der Webapplikation und der Unity-Applikation werden selbstdefinierte Nachrichtenformate und Schnittstellenprotokolle verwendet, die als individuelles Paket auch in andere Softwareapplikationen eingebunden werden können. Hierdurch können auch weitere Systeme direkt an die Gesamtarchitektur angekoppelt werden.

Kommunikation der AFR

Entsprechend der Darstellung in Abschnitt 4.2 stehen zur Kommunikation der AFR untereinander sowie mit den übergeordneten Systemen drei, auf unterschiedlichen Technologien basierende, Schnittstellen bereit. Jeder AFR ist hierfür zunächst mit einem WLAN-Modul, welches den IEEE 802.11 ac Standard unterstützt, ausgestattet. Hierdurch steht bei geeigneter Infrastruktur und Umgebung ausreichend Bandbreite für die Übertragung von Status- und Positionsinformationen sowie Auftrags- und Kameradaten zwischen AFR und der GCS zur Verfügung [184].

Zur Kommunikation der AFR untereinander können die AFR zusätzlich mit ZigBee/XBee-Modulen ausgestattet werden, die eine Kommunikation nach dem IEEE 802.15.4 Standard erlauben. Mit den eingesetzten Digi XBee3® Zigbee® 3.0 Modulen kann eine direkte Funkkommunikation zwischen den AFR aufgebaut werden, die eine Übertragungsrates von bis zu 250 Kbps ermöglicht [185]. Die Kommunikation wird dabei automatisch als Punkt-zu-Punkt-Kommunikation mit allen in Reichweite befindlichen AFR aufgebaut. Die Übertragung der aktuellen Sensorpositionen über das UWB-System basiert auf den vom Hersteller angebotenen Schnittstellen und Protokollen.

7.1.3 Gewählte Anwendungsszenarien zur Evaluation

Um eine quantifizierbare Evaluierung der erforschten Methoden zu gewährleisten, wird auf Basis der vorab vorgestellten prototypisch umgesetzten Gesamtarchitektur sowie der entwickelten Hardwareplattformen ein industrienahes Anwendungsszenario umgesetzt. Die Umsetzung erfolgt hierbei sowohl in Form eines realen Demonstrators sowie in Form einer Simulation. Im Rahmen des Szenarios kommen alle in der Arbeit erforschten Methoden zum Einsatz, sodass diese applikationsübergreifend evaluiert werden können.

Zur Evaluation wird die Gesamtarchitektur entsprechend der vorangegangenen Beschreibung implementiert und aufgebaut. Dabei werden AFR eingesetzt, welche die Aufgaben *Transport* oder *Inventur* übernehmen können. Initial befinden sich die AFR entweder in einer Ladestation und sind dort registriert oder an einer beliebigen Position innerhalb der Einsatzumgebung. Bild 44 zeigt den zur Evaluation des realen Systems genutzten Flugbereich. Darin installiert sind das UWB-Lokalisierungssystem, zwei Dockingstationen, ein Palettenregal sowie eine Bin-Picking-Station, die als Zielpunkt für den Materialtransport dient.

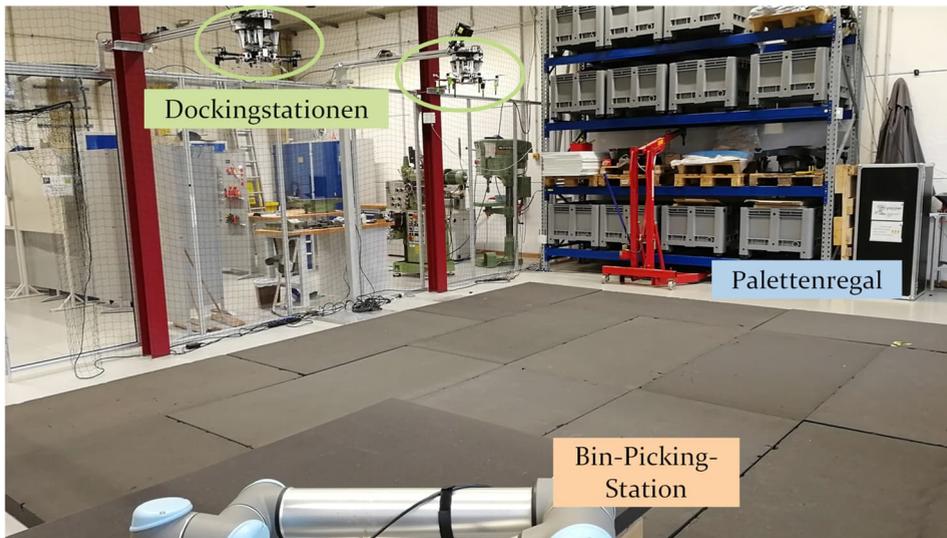


Bild 44: Während der Forschungsarbeit am Lehrstuhl FAPS aufgebautes Flugfeld mit Docking-Stationen, Bin-Picking-Station im Vordergrund und Palettenlager

Über die beschriebene Schnittstelle werden automatisiert Aufträge in das System eingelastet und verfügbaren und geeigneten AFR zugewiesen. Bei einem Transportauftrag fliegt der AFR nach der Auftragszuweisung zum

Lagerplatz des Transportguts, nimmt den zugehörigen Ladungsträger automatisiert auf, transportiert diesen zur Zielposition und stellt ihn ab.

Zur Durchführung einer Inventur werden dem Flugroboter die Position, Bauform und Abmessungen der zu analysierenden Regalreihe übergeben. Mit Beginn des Auftrages und einem damit verbundenen Flug zur initialen Startposition wird der Bereich vor dem Regal für den Durchflug von anderen AFR gesperrt, um nachfolgend eine freie Navigation ohne die Bindung an diskrete Flugebenen zu ermöglichen. Anschließend erfolgt eine automatisierte Erfassung der eingelagerten Güter anhand der daran angebrachten optischen Informationsträger. Nach Abschluss eines Auftrags erfolgt bei Bedarf ein selbstständiger Flug zur nächstgelegenen Ladestation.

7.1.4 Vergleich von Simulation und Realität

Während in der realen Versuchsumgebung aus Platz- und Sicherheitsgründen die Zahl der gleichzeitig in der Luft befindlichen AFR auf drei limitiert ist, können in der Simulation die vorab beschriebenen Aufträge mit einer höheren Anzahl an parallel arbeitenden Flugrobotern evaluiert werden. Zu diesem Zweck wird mit Hilfe des Simulationsframeworks Gazebo [186] eine Fabrikumgebung simuliert. Diese besteht wie in Bild 45 dargestellt, aus drei zusammenhängenden Hallen, die eine kombinierte Produktions- und Logistikumgebung abbilden. Die beiden äußeren Hallen sind dabei über jeweils zwei Tore mit der mittleren Halle verbunden, insgesamt weist die simulierte Umgebung eine Grundfläche von ca. 37500 m² auf.

Innerhalb der simulierten Umgebung können somit neben der Funktionalität der Gesamtarchitektur auch die ebenbasierte Routenplanung sowie das Luftraummanagement evaluiert werden. Ebenso können in der Simulation die Erkennung und präzise Lokalisierung von Interaktionsobjekten sowie die Erkennung von Personen und Gesten evaluiert werden. Die Auftragseinlastung, das Flottenmanagement und die Visualisierung erfolgen wie auch im realen Versuchsaufbau über das entwickelte HMI bzw. automatisiert über die implementierten Schnittstellen.

Um die Simulation möglichst an die Realität anzunähern, erfolgt eine physikalische Simulation des Flugverhaltens sowie der Sensoren inklusive des Sensorrauschens. Dies ermöglicht auch in der Simulation die sensorbasierte Erkennung von Interaktionsobjekten oder Dockingstationen sowie die darauf basierende Optimierung der Flugpräzision. In gleicher Weise kann auch eine sensorgestützte Umgebungserfassung mit zugehöriger Kartenstellung und darauf basierender freier Navigation simuliert werden. Zur

Aufnahme von Transportobjekten und zum Andocken an Ladestationen werden zudem die notwendigen Verbindungen und Zwangsbedingungen zwischen AFR und Interaktionsobjekt simuliert. Die vorgestellte Architektur und zugehörigen Methoden werden somit ohne Modifikation auch für die simulierten Daten eingesetzt, um die Ergebnisse auf die realen Anwendungsfälle übertragen zu können.

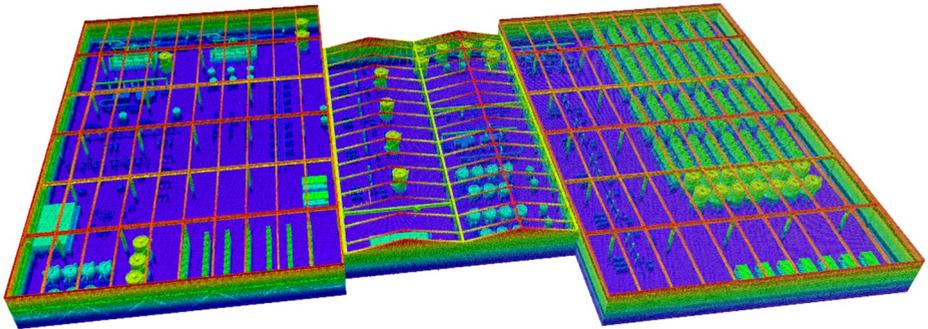


Bild 45: Darstellung der in Gazebo modellierten Fabrikumgebung zur Evaluation des erforschten AFRS. Hierfür ist die Voxelkarte, welche die Grundlage der Pfadplanung bildet, visualisiert.

Nicht simuliert wird das physikalische Funktionsprinzip des UWB-Lokalisierungssystems. Um dessen Funktionsweise in der Simulation abzubilden, wird die exakte Position der AFR aus dem zugehörigen Zustandsvektor des Simulationsframeworks entnommen. Anschließend wird diese mit normalverteiltem Rauschen, dessen Standardabweichung dem in der Realität eingesetzten UWB-System entspricht, beaufschlagt und als Messwert an das Lokalisierungsframework übergeben.

7.2 Bewertung der vorgestellten Methoden im Kontext der umgesetzten Beispielanwendungen

Im Folgenden werden die Evaluationsergebnisse auf Basis des vorab beschriebenen Szenarios im Detail vorgestellt. Zur Bewertung der Funktionserfüllung der Gesamtarchitektur, der Routenplanung und des Luftraummanagements kommt primär die Simulationsumgebung zum Einsatz, da hier deutlich mehr AFR gleichzeitig operieren können als in der zur Verfügung stehenden Laborfläche. Die Bewertung der Objektinteraktion und der hierfür notwendigen Lokalisierungs- und Flugpräzision erfolgt hingegen am realen System. Zur Bewertung des Sicherheitsframeworks kommen sowohl das reale System als auch die Simulation zum Einsatz.

7.2.1 Evaluierung der Robustheit und Funktionserfüllung der Gesamtarchitektur

Um die Funktionserfüllung der umgesetzten Architektur und der zugehörigen Methoden bewerten zu können, erfolgt zunächst die Betrachtung und Evaluation der Gesamtfunktionalität des AFRS und anschließend die detaillierte Betrachtung der Methode zur präzisen Lokalisierung der AFR als Grundlage einer robusten Objektinteraktion.

Gesamtfunktionalität des erforschten AFRS

Im ersten Schritt erfolgt die Validierung der korrekten und robusten Funktionsweise und des optimalen Zusammenspiels der einzelnen Systemkomponenten. Um dabei auch die Einflüsse weitläufiger Fabrikareale und unterschiedlicher Flottengrößen abbilden zu können, erfolgt die Validierung anhand der vorab beschriebenen Simulation. Die Deckenhöhe der simulierten Umgebung beträgt 13 m, sodass eine Flugebenenzahl von vier gewählt wird. Die unterste Ebene befindet sich 3 m oberhalb des Bodens und die einzelnen Ebenen haben einen vertikalen Abstand von 2 m zueinander.

Zur Evaluation werden automatisiert zufallsgenerierte Transport- oder Inventuraufträge in das System eingelastet. Ein Transportauftrag beschreibt den Transport eines standardisierten Ladungsträgers mit vorgegebenem Inhalt von einem Lagerplatz zu einer Zielposition. Zusätzlich gibt jeder Auftrag das Gesamtgewicht des zu transportierenden Ladungsträgers an, sodass bei der Auftragszuweisung ein AFR mit einer geeigneten Lastaufnahmevorrichtung und der erforderlichen Traglast vorgesehen werden kann. Zur Abbildung des automatisierten Materialtransports sind innerhalb der simulierten Fabrikumgebung 20 Lagerplätze und 20 Übergabepunkte an Fertigungsstationen spezifiziert. Weiterhin werden 16 Ladungsträger simuliert, die von den AFR auch innerhalb der Simulation automatisiert gegriffen und abgelegt werden können. Die Ladungsträger befinden sich initial auf zufällig ausgewählten Lagerplätzen und werden anschließend mit jedem Auftrag zu einem zufällig ausgewählten Lagerplatz oder Übergabepunkt transportiert.

Ein Inventurauftrag besteht dabei aus der Position der zu erfassenden Regalzeile, der räumlichen Abmessungen der Zeile sowie der Anzahl und Höhe der einzelnen Regalebenen. Hierfür sind in der Simulation insgesamt 25 Regalgassen mit einer Länge von 20 m bis 45 m und 55 bis 124 belegten Regalplätzen aufgebaut. Wird der Auftrag zur Durchführung der Inventur einer Regalzeile gestartet, wird im zugehörigen Regalgang eine Sperrzone angelegt, die nur für den ausführenden AFR zugänglich ist. Durch die

Sperrzone wird dem AFR während der Durchführung der Inventur eine freie Navigation ohne Bindung an die vorgegebenen Flugebenen ermöglicht. Verlaufen nach dem Anlegen der Sperrzone noch Pfade anderer AFR durch die Sperrzone, wartet der AFR mit dem Abflug solange, bis die AFR die Sperrzone durchquert haben.

Da die Aufträge zufallsgeneriert sind, wird für jeden Auftrag bei einem Lagerverwaltungssystem abgeprüft, dass der zu transportierende Ladungsträger gerade verfügbar ist und der vorgesehene Zielpunkt derzeit nicht belegt ist oder bereits ein anderes Transportgut dorthin geliefert wird. Bei Inventuraufträgen besteht die Wahrscheinlichkeit, dass durch die zufallsgenerierte Einlastung der Auftrag zur Erfassung einer bestimmten Regalreihe mehrfach hintereinander ausgelöst wird. In diesem Fall warten die AFR, denen diese Aufträge zugewiesen werden, mit der Ausführung, bis die Sperrzone des vorherigen Auftrags wieder freigegeben ist.

Alle validen Aufträge werden in der Simulation abgearbeitet und dabei wird die Funktionsweise des Gesamtframeworks evaluiert. Es werden mehrere Simulationsdurchläufe durchgeführt und die Anzahl der eingesetzten AFR wird variiert, um zusätzliche, aus der Flottengröße resultierende Effekte gezielt untersuchen zu können. Dabei besteht die Flotte stets zur Hälfte aus Transportdrohnen und zur Hälfte aus Inventurdrohnen. Jeder Simulationsdurchlauf wird so lange ausgeführt, bis 1000 Aufträge erfolgreich abgeschlossen wurden.

In jedem Durchlauf werden zahlreiche Kenngrößen des Systems erfasst, die im Folgenden in Abhängigkeit von der Flottengröße ausgewertet werden. Bild 46 zeigt hierfür zunächst die Anzahl der erfolgreich durchgeführten Aufträge pro Auftragstyp, die Anzahl der jeweils angefallenen Wartevorgänge sowie die Anzahl der fehlgeschlagenen Aufträge.

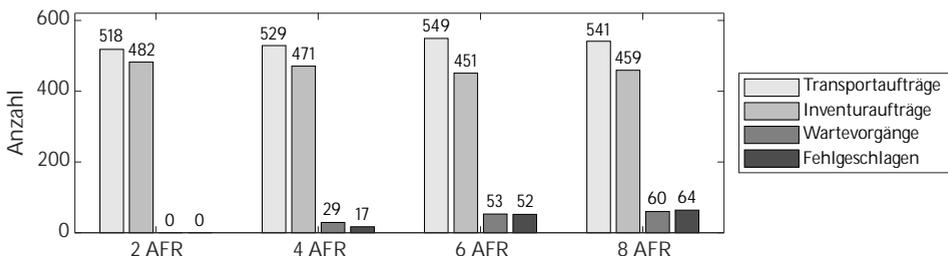


Bild 46: Aufstellung der durchgeführten Aufträge, der dabei aufgetretenen Wartevorgänge und der fehlgeschlagenen Aufträge in Abhängigkeit von der Flottengröße

Es ist erkennbar, dass die Anzahl der durchgeführten Transportaufträge stets über der Zahl der Inventuraufträge liegt und sich die Differenz mit

zunehmender Flottengröße leicht erhöht. Dies ist auf die etwas geringere mittlere Durchführungszeit eines Transportauftrags gegenüber einem Inventurauftrag zurückzuführen. Während beim Einsatz jeweils eines AFR für Transport- bzw. Inventuraufträge weder Wartezeiten noch fehlgeschlagene Aufträge auftreten, erhöhen sich beide Zahlen mit zunehmender Flottengröße. Die Effekte lassen sich direkt mit der erhöhten Flottengröße und deren Auswirkung auf das Weltmodell des Luftraummanagements erklären. Befinden sich mehr AFR im Luftraum, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass bei der Durchführung eines Inventurauftrags gewartet werden muss, bis der erzeugte Sperrbereich frei von bestehenden Flugrouten und AFR ist. Zudem steigt durch die höhere Zahl an belegten Knoten des Weltmodells auch die notwendige Berechnungszeit, sodass häufiger innerhalb der vorgegebenen Zeit von 20 s kein valider Flugpfad gefunden werden kann. Schlägt die Suche eines validen Flugpfades fünfmal in Folge fehl, wird der zugehörige Auftrag abgebrochen. Weitere Ursachen für fehlgeschlagene Aufträge sind während der Evaluation nicht aufgetreten.

Weiterführend ist in Bild 47 die statistische Verteilung der Flugzeit und der Flugstrecke pro Auftrag sowie die Verteilung der Wartezeit für alle betreffenden Aufträge in Abhängigkeit der Flottengröße als Box-Whisker-Plot visualisiert.

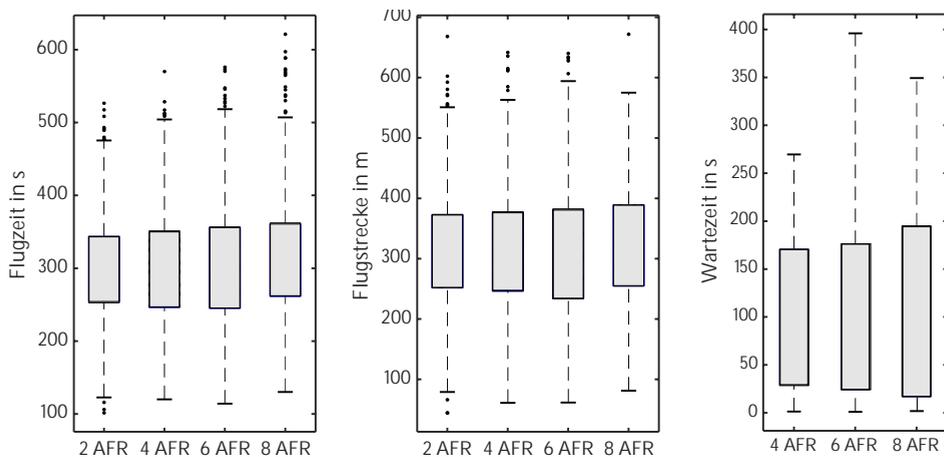


Bild 47: Statistische Verteilung der Gesamtflugzeit und –strecke (links, Mitte) sowie der anfallenden Wartezeit (rechts) in Abhängigkeit von der Flottengröße

Für alle drei Kenngrößen zeigt sich, dass sowohl der Median als auch der Interquartilsabstand sowie die Länge der Whisker nahezu unabhängig von der Flottengröße sind. Diese Eigenschaft deckt sich mit der Erwartung und zeigt, dass keine systematischen Fehler in der Architektur vorliegen, die

sich mit erhöhter Anzahl an AFR auf die Gesamtperformance auswirken. Die stärkere Schwankung der oberen Whisker bei der Auswertung der Wartezeit lässt sich auf die geringe Größe der Stichprobe zurückführen. Die Anzahl der hier ausgewerteten Datensätze entspricht der Anzahl der erfolgten Wartevorgänge (vgl. Bild 46).

Da bestehende Flugpfade bei der Routenplanung berücksichtigt werden und überlappende Flugpfade ausgeschlossen werden sollen, lässt sich mit zunehmender Flottengröße auch eine Erhöhung der Flugstrecke erwarten, da seltener der streckenoptimale Flugpfad genutzt werden kann. Da dieser Effekt aus der Auswertung in Bild 47 nicht hervorgeht, erfolgt abschließend eine Betrachtung der berechneten Flugpfade. Hierzu wird für jeden angefragten Flugpfad der Pfad sowohl unter Berücksichtigung von bestehenden Flugpfaden und Sperrzonen als auch ohne deren Berücksichtigung berechnet. Ersterer wird an die Aufträge bzw. AFR zur Ausführung zurückgegeben, während der zweite Pfad als Referenz dient und angibt, welchen Verlauf und welche Länge der aus dem Luftraum- und Ebenenmodell resultierende, kürzest mögliche Pfad zwischen den gegebenen Punkten besitzt.

Bild 48 (links) zeigt den Anteil der erfolgreichen Planungsanfragen, bei dem die Länge der aus den beiden vorab beschriebenen Planungsvarianten resultierenden Pfade verschieden ist. Im danebenstehenden Bild 48 (rechts) ist die statistische Verteilung der Differenz der beiden Pfade dargestellt.

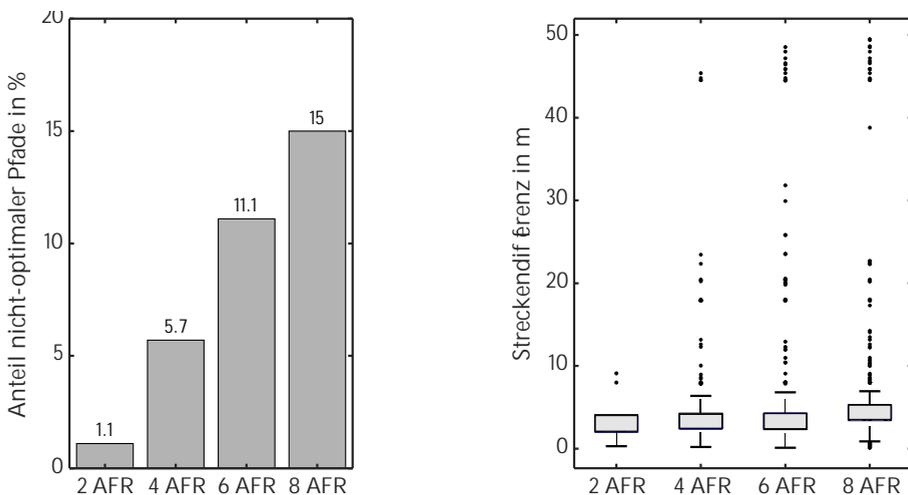


Bild 48: Anteil der nicht mit kürzester Flugstrecke geplanten Pfade (links) und statische Verteilung der Pfaddifferenz (rechts) in Abhängigkeit von der Flottengröße.

Da die Anzahl der berechneten Pfade abhängig vom ausgeführten Auftrags-typ ist (drei bei einem Transportauftrag, zwei bei einem Inventurauftrag), liegt die Gesamtzahl der ausgewerteten Pfade für jede betrachtete Flottengröße im Bereich zwischen 2600 und 2800. Gezählt sind dabei nur die tatsächlichen Flugpfade ohne die als Referenz geplanten optimalen Pfade. Aus der Auswertung ist deutlich erkennbar, dass der Anteil der Pfade, die aufgrund des Ausweichens von Sperrzonen oder bestehenden Flugrouten nicht die kürzest mögliche Fluglänge besitzen, mit der Flottengröße linear ansteigt und abhängig von der Flottengröße zwischen 1,1 % und 15 % der Gesamtmenge der berechneten Flugpfade liegt. Je höher die Zahl der eingesetzten AFR ist, desto mehr Routen bestehen gleichzeitig im Luftraum, weshalb sich auch mehr Routen verlängern, um bestehenden Routen nicht zu kreuzen.

Bei der Betrachtung der Pfaddifferenz in Bild 48 (rechts) zeigt sich, dass unabhängig von der Flottengröße der Median der Differenz einen Wert von 4 m einnimmt. Dies entspricht dem doppelten Ebenenabstand und zeigt zusammen mit dem Interquartilsabstand, dass sich der große Teil der Pfadkreuzungen durch einen Ebenenwechsel oder geringfügiges Ausweichen in der Ebene vermeiden lässt. Gleichzeitig zeigt sich, dass ab einer Flottengröße von 4 AFR die Verteilung der Ausreißer und somit deutlich längerer Flugpfade ähnlich ist und insbesondere Werte ober- bzw. unterhalb von 20 m bzw. 40 m einnimmt. Dies ist auf das Layout der simulierten Fabrik zurückzuführen, die aus drei miteinander verbundenen Hallen besteht. Von den beiden äußeren Hallen führen jeweils zwei Durchgänge in die zentrale Halle. Dabei kann es vorkommen, dass ein Durchgang bereits durch bestehende Flugpfade blockiert ist und somit der entfernter liegende Durchgang gewählt wird, wodurch sich die Flugstrecke je nach Ausgangspunkt um bis zu 50 m verlängern kann. Im Vergleich zur Länge des optimalen Pfades werden die Flugrouten beim Ausschluss von Kreuzungen der Pfade dennoch nur geringfügig länger. Bei einer Flottengröße von 8 AFR weichen die kreuzungsfreien Pfade im Mittel um 3,1 % vom optimalen Pfad ab.

Optimierung der globalen Position mittels drohnenspezifischer Sensorik

Da in vielen Anwendungsbereichen von AFR die präzise Positionierung vor oder oberhalb von Objekten sowie die robuste und präzise Interaktion mit Objekten von Bedeutung ist, ist es notwendig, dass das Lokalisierungsframework die aktuelle Flugpose in der erforderlichen Genauigkeit bereitstellen kann. Dies wird im Folgenden evaluiert.

Dazu wird ein AFR mit einer nach unten gerichteten Farbkamera sowie einer nach vorne gerichteten Tracking-Kamera vom Typ Intel RealSense T265 ausgestattet. Zusätzlich besitzt der AFR drei Sensoren des Kinexon-UWB-Trackingsystems und optische Reflexionsmarken, die notwendig sind, um seine aktuelle Pose über ein Motion-Capturing-System hochpräzise zu erfassen. Als Motion-Capturing-System kommt das System ART-TRACK2.2 der Firma Advanced Realtime Tracking GmbH & Co. KG zum Einsatz, dessen Daten im Folgenden als Referenz (engl. ground truth) verwendet werden.

Ein separates Softwaremodul verarbeitet die Daten der nach unten gerichteten Kamera, erkennt vorgegebene Objekte (in diesem Fall Kleinladungsträger) und stellt die Relativposition (${}^B\mathbf{p}_{O,t}$) und den Gierwinkel (${}^B\psi_{O,t}$) zwischen AFR und Objekt als Ausgangsinformation bereit. Die Tracking-Kamera liefert die aktuelle Bewegungsgeschwindigkeit des AFR (${}^B\mathbf{v}_{B,t}$, ${}^B\dot{\psi}_{B,t}$) und die Poseberechnung anhand der Kinexon-Daten stellt die Position und den Gierwinkel (${}^W\mathbf{p}_{B,t}$, ψ_t) des AFR im globalen Bezugssystem bereit. Die berechneten Posen und Geschwindigkeiten werden anschließend, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, fusioniert.

Bild 49 zeigt die daraus resultierende, geschätzte Flugposition des AFR, die aus den UWB-Daten berechnete Flugposition sowie die Messung des Motion-Capturing-Systems, jeweils exemplarisch in y- und z-Richtung.

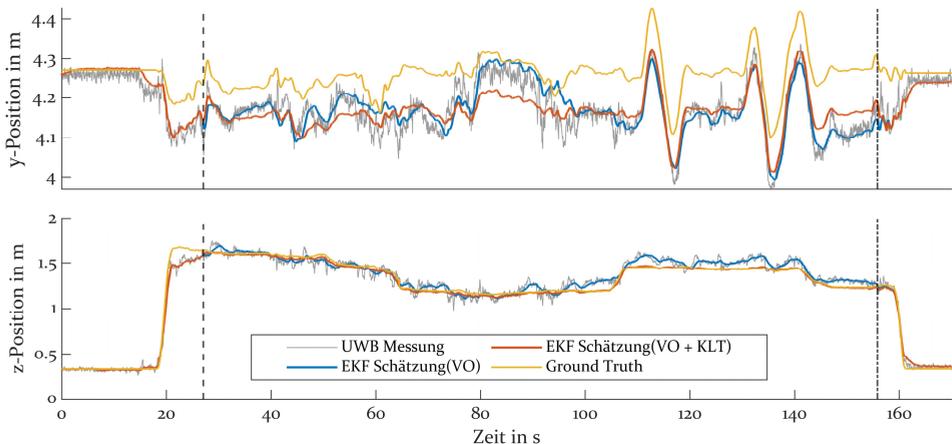


Bild 49: Vergleich der Positionsschätzung anhand der UWB-Lokalisierung (grau), mit der Positionsschätzung des Lokalisierungsframeworks bei Fusion der UWB- und Odometriedaten (blau), zusätzlicher Fusion der Position des KLT (rot) und der Messung eines Motion-Capturing-Systems (gelb)

Dabei wird, sobald der Kleinladungsträger (KLT) erstmalig erkannt wird, eine Landmarke angelegt, die die Position des KLT im Weltkoordinatensystem beschreibt. Hierfür wird die zu diesem Zeitpunkt gültige Poseschätzung des EKF herangezogen. Anschließend kann über die Position des in den Kamerabildern erkannten KLT auf die globale Flugposition des AFR rücktransformiert werden. Die beiden vertikal verlaufenden Linien in Bild 49 kennzeichnen den Anfang und das Ende des Zeitraums, in dem der KLT detektiert und zur Poseschätzung des AFR verwendet wird. Odometriedaten der Tracking-Kamera stehen während des gesamten dargestellten Zeitraums zur Verfügung.

Aus der dargestellten Auswertung ist zunächst erkennbar, dass die Absolutgenauigkeit der UWB-Lokalisierung stark von der Position des AFR innerhalb des Flugfelds abhängig ist. Während zu Beginn und Ende, wenn der AFR am Boden steht, die Positionsmessungen des UWB- und des Motion-Capturing-Systems gut übereinstimmen, liegt während des Fluges eine systematische Abweichung der UWB-Daten vor. Dieses Verhalten ist charakteristisch für das UWB-System, die vom Hersteller spezifizierte Absolutgenauigkeit von 10 cm oder besser ist stark von der Einsatzumgebung abhängig und verschlechtert sich insbesondere, wenn die Funksignale von Objekten gestreut oder reflektiert werden. Gleichzeitig ist erkennbar, dass durch die Fusion der Odometriedaten von Beginn an das Rauschen der UWB-Messungen gut geglättet werden kann, sodass sich kurzfristige starke Abweichungen der UWB-Lokalisierung nicht auf das Flugverhalten des AFR auswirken.

Mit Beginn der Fusion der aus der KLT-Erkennung gewonnenen Positionsdaten steht eine weitere hochpräzise Positionsmessung zur Verfügung. Fließen diese in die Lokalisierung mit ein, stimmt der Verlauf der Poseschätzung des EKF sehr gut mit den Messungen des Referenzsystems überein. Die verbleibende statische Abweichung zwischen EKF-Schätzung und Messung des Motion-Capturing-Systems ist durch die positionsabhängige Absolutgenauigkeit des UWB-Lokalisierungssystems bedingt. Bei der präzisen Objektinteraktion oder Positionierung relativ zu Objekten führt dies jedoch zu keiner Beeinträchtigung, da die verbleibende Abweichung durch die Positionsregelung kompensiert wird. Das dargestellte Vorgehen ermöglicht somit die robuste und präzise Lokalisierung, um den AFR an einer vorgegebenen Position hochgenau in der Luft zu stabilisieren und hierdurch eine exakte Objektinteraktion zu realisieren.

7.2.2 Analyse und Bewertung der Fehlerdetektion und der Gestenerkennung

Nach der Evaluation des Gesamtframeworks und der Funktionalität der Routenplanung und des Luftraummanagements folgt nun die fundierte Analyse und Bewertung der umgesetzten Sicherheitsfunktionalitäten. Begonnen wird hierbei mit der Evaluation des Funktionsmoduls zur Detektion von Verschleiß, Strukturschäden und unzulässigen Gewichtsbelastungen.

Erkennung von defekten Propellern

Die Detektion von verschlissenen oder beschädigten Propellern sowie Strukturschäden wie sich lösender Bauteile am Rahmen des AFR erfolgt vor Abflug, während sich der AFR noch am Boden befindet. Hierfür muss jede im AFR-Agenten definierte Aufgabe initial die Fähigkeit *CheckSystem* aufrufen, bei der alle Rotoren des AFR auf die Leerlaufdrehzahl geschaltet werden. Dabei werden fortlaufend die wirkenden Beschleunigungen erfasst und entsprechend der Darstellung in Abschnitt 6.2 ausgewertet. Die dabei erfassten Daten und daraus resultierenden Zustandsanalysen werden im Folgenden anhand mehrerer Beispiele diskutiert und sind hierfür grafisch aufbereitet. Bild 50 zeigt den zeitlichen Verlauf des Frequenzspektrums der erfassten Beschleunigungsdaten für verschiedene Systemzustände und mögliche Fehlerquellen. Im Spektrogramm ist die Auswertung der x-Komponente des Beschleunigungssignals dargestellt. Die rote Linie beschreibt dabei den zeitlichen Verlauf der ermittelten dominanten Frequenz, die blaue Linie den zeitlichen Verlauf des RMS-Wert des Signals.

Bild 50 (a) zeigt das Spektrogramm eines Quadropters mit Propellern der Klasse 9x3,3 im fehlerfreien Zustand. Als dominante Frequenzanteile sind die vorgegebene Drehfrequenz der Rotoren bei 40 Hz sowie die zweite und vierte Harmonische erkennbar. Der RMS-Wert liegt durchgehend unterhalb von $0,1 \text{ m/s}^2$. Bild 50 (b) zeigt den Frequenzverlauf im Falle eines beschädigten Propellers. Bei einem der Propellerblätter ist die Spitze durch eine Kollision beschädigt worden, weshalb dort ein Stück mit einem Gewicht von $0,10 \text{ g}$ fehlt. Deutlich erkennbar steigt im Spektrogramm die Amplitude der Drehfrequenz, gleichzeitig erhöht sich der RMS-Wert abhängig vom Betrachtungszeitpunkt um 200 % und mehr. Der mittlere RMS-Wert über den gesamten Auswertzeitraum erhöht sich von $0,04 \text{ m/s}^2$ im unbeschädigten Fall auf $0,17 \text{ m/s}^2$ im Falle eines beschädigten Propellers. Anhand des mittleren RMS-Werts können somit auch geringste Beschädigungen zuverlässig detektiert werden.

7 Exemplarische Implementierung der Gesamtsystemarchitektur und Evaluation der entwickelten Methoden

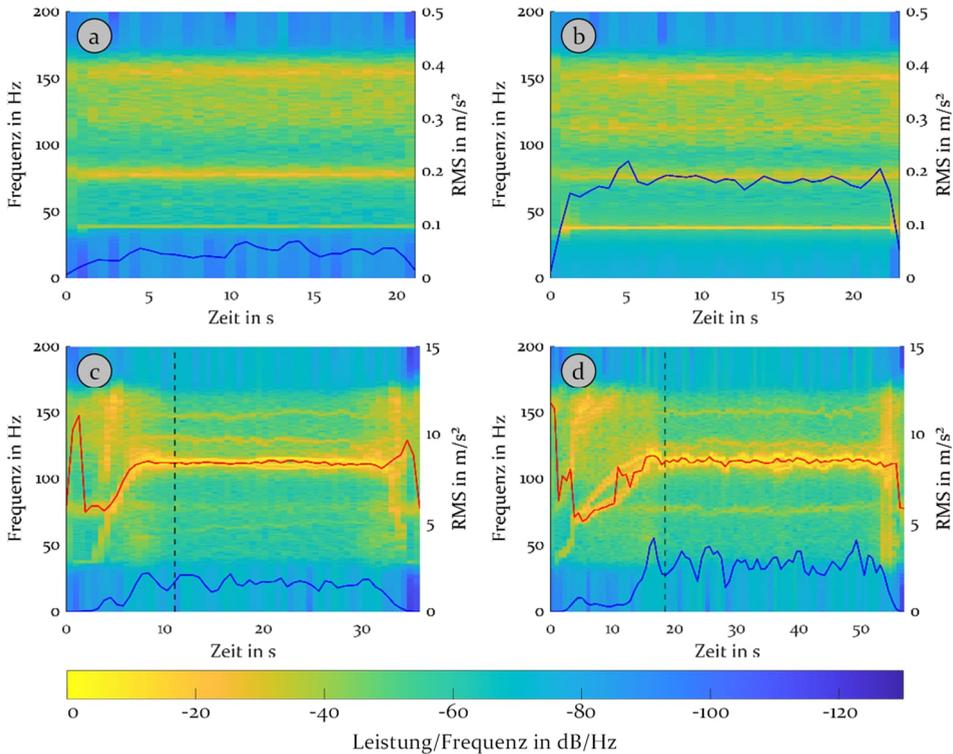


Bild 50: Verlauf der im Leerlauf gemessenen RMS-Werte (blaue Kurve) im fehlerfreien Zustand (a) sowie mit einem beschädigten Propellerblatt (b). Verlauf des im Flug gemessenen RMS-Werts im fehlerfreien Zustand (c) sowie mit einem gelösten Spannungswandler (d).

Das Vorgehen ermöglicht auch die Detektion von gelösten Teilen, jedoch sind bei leicht gelösten oder leichten, lockeren Bauteilen die Effekte im Leerlauf zu gering, um direkt detektiert werden zu können. Daher folgt bei positiver Rückmeldung der Leerlaufanalyse eine kontrollierte Erhöhung der Motordrehzahl und ein Abheben auf eine Flughöhe von 1,5 m. Erneut dient der beschriebene Quadrocopter im fehlerfreien Zustand als Referenz, die entsprechende Auswertung ist in Bild 50 (c) dargestellt.

Ergänzend ist dabei in Rot die aus den einzelnen Frequenzspektren ermittelte dominante Frequenz im Zeitverlauf dargestellt. Zusätzlich ist der Zeitpunkt, bei dem eine Flughöhe von 1 m erreicht wird, als vertikale, gestrichelte Linie dargestellt. Im fehlerfreien Zustand schwankt der RMS-Wert im Flug (gemessen ab einer Flughöhe von 1 m für einen Zeitraum von 20 s) um einen mittleren Wert von $1,6 \text{ m/s}^2$.

Bei der in Bild 50 (d) dargestellten Auswertung hat sich der primäre Spannungswandler des AFR mit einem Gewicht von 19 g gelöst und liegt beweglich auf der Oberseite des AFR auf. Entsprechend ist erkennbar, dass sich der RMS-Wert deutlich erhöht und um einen mittleren Wert von $2,7 \text{ m/s}^2$ schwankt. Gleichzeitig treten ein unruhigeres Flugverhalten und erhöhte Schwankungen der Drehfrequenz der Rotoren auf, dennoch ist es dem AFR möglich, stabil und präzise an der vorgegebenen Position zu schweben.

Erkennung einer unzulässigen Zuladung

Gleichzeitig kann während des definierten Startvorgangs auf eine Zielflughöhe von einem Meter auch eine mögliche Überladung des AFR bzw. eine fehlerhafte Sicherung der Ladung festgestellt werden. Hierzu wird wie in Abschnitt 6.2 beschrieben aus dem Frequenzspektrum der dominante Frequenzanteil extrahiert und dieser zyklisch mit dem aus dem Modell abgeleiteten Erwartungswert verglichen. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die dominante Frequenz der Drehfrequenz der Rotoren entspricht. Bei einem gut abgestimmten, fehlerfreien System ist dies der Fall, dominieren hingegen andere Frequenzen, lässt dies stattdessen auf lose Komponenten rückschließen.

Zur Evaluation wird erneut der beschriebene Quadrokopter aus der vorherigen Auswertung zum Einsatz. An den Quadrokopter werden verschiedene Nutzlasten angebracht, und das erwartete Abfluggewicht wird mit einer präzisen Waage gemessen. Insgesamt wird ein Gewichtsbereich von 1151 g bis 1995 g betrachtet. Anschließend wird validiert, dass die spezifizierte Methode während des Abflugs das aktuelle Gewicht des AFR über den gesamten Gewichtsbereich zuverlässig bestimmen kann. Ist dies der Fall, kann daraus abgeleitet werden, dass auch Differenzen zwischen tatsächlichem und erwartetem Abfluggewicht präzise und robust bestimmt werden können.

Bild 51 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Analyse des korrekten Abfluggewichts. Hierfür wird nach dem Erreichen einer Flughöhe von 1 m die mittlere dominante Frequenz über einen Zeitraum von 3 s ermittelt und mit dem Erwartungswert abgeglichen. Die vertikale, gestrichelte Linie kennzeichnet den Zeitpunkt, bei dem eine Flughöhe von 1 m erreicht wird, die Strichpunktlinie das Ende der Auswertung nach 3 s.

7 Exemplarische Implementierung der Gesamtsystemarchitektur und Evaluation der entwickelten Methoden

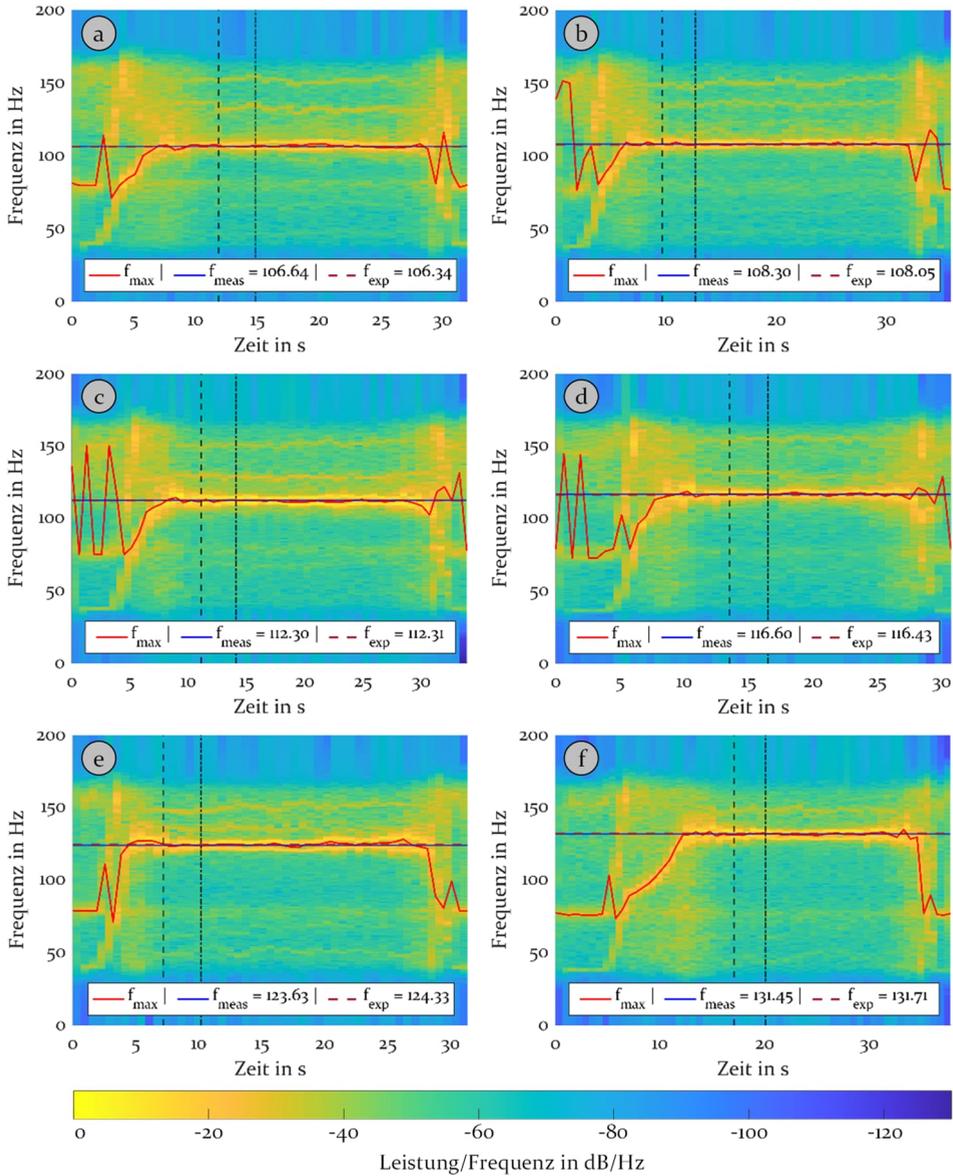


Bild 51: Zeitlicher Verlauf des Frequenzspektrums während des Abhebens und Vergleich der geschätzten mit der erwarteten Motordrehzahl für verschiedene Gewichtsbelastungen eines Quadropters. Die Auswertung ist für folgenden Abfluggewichte dargestellt: a) 1113 g, b) 1151 g, c) 1252 g, d) 1352 g, e) 1552 g, f) 1751 g

Die horizontale Linie mit dem Wert f_{meas} beschreibt den Mittelwert der in diesem Zeitraum dominanten Frequenz, die auf Grund der geringen Steig-

geschwindigkeit auch gleich der im Schwebeflug auftretenden Drehfrequenz der Rotoren ist. Die horizontale Linie mit dem Wert f_{exp} kennzeichnet den aus dem Modell erwarteten Wert der Drehfrequenz. Stimmen dabei die Werte von f_{meas} und f_{exp} überein, bedeutet dies, dass die Methode das tatsächliche Abfluggewicht exakt ermittelt hat. Treten Abweichungen auf, lässt dies auf Fehler innerhalb der Methode schließen.

Bild 51 (a) bis Bild 51 (f) zeigen den zeitlichen Verlauf der dominanten Frequenz f_{max} und der Werte von f_{meas} und f_{exp} für verschiedene Nutzlasten und Abfluggewichte. Von denen insgesamt 43 durchgeführten Versuchen sind exemplarisch sechs Startvorgänge grafisch aufbereitet und dargestellt. Über den gesamten betrachteten Gewichtsbereich von 1151 g bis 1995 g zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Erwartungswert. Über alle 43 durchgeführten Versuche hinweg zeigt sich eine mittlere Abweichung zwischen Messung und Erwartungswert von 0,42 Hz, die Standardabweichung liegt dabei bei 0,32 Hz. Aus dem Vergleich von Bild 51 (a) und Bild 51 (b) ist ersichtlich, dass bereits Differenzen von weniger als 50 g zwischen tatsächlichem und erwartetem Abfluggewicht erkannt werden. Entsprechend können auch größere Abweichungen, die eine signifikante Reduktion der Flugzeit sowie Verschlechterung der Flugstabilität bewirken, zuverlässig detektiert werden.

Bewertung der Funktionsfähigkeit von FCU

Nachfolgend erfolgt die Bewertung der erforschten Methode zur Bewertung der Funktionsfähigkeit einer FCU und der Fehlerdetektion in TMR-Flugsteuerungssystemen. Hierfür wird das in Abschnitt 6.3 vorgeschlagene System umgesetzt, auf einem selbstentwickelten Hexakopter installiert und evaluiert. Zur Evaluation wird das System gezielt manipuliert, indem die Sensormesswerte und Zustandsgrößen der primären Flugsteuerung über ein zusätzliches Softwaremodul verfälscht werden. Durch dieses Vorgehen sind Ursache und Auswirkung auf das Gesamtsystem bekannt, so dass die Fehlertoleranz des Systems gezielt bewertet werden kann.

Bild 52 zeigt den Prozess der Fehlereinbringung und die Auswirkung auf die Bewertung der Funktionsfähigkeit exemplarisch am Beispiel einer durch das Einbringen eines statischen Offset manipulierten Positionsschätzung. Dargestellt sind der manipulierte und fehlerfreie Verlauf der x-Position von FCU_1 sowie der fehlerfreie Verlauf der x-Position der beiden zusätzlichen FCU. Weiterhin ist die Gültigkeit der x-Position von FCU_1 im fehlerfreien sowie manipulierten Fall abgebildet. Die vertikalen Linien kennzeichnen dabei die Zeitpunkte, zu denen das Signal von FCU_1 verfälscht und der statische Offset jeweils um den Wert von 1 cm erhöht wird.

Zur Berechnung der Gültigkeit wird als Metrik die absolute Signalabweichung eingesetzt und eine Bewertungsfunktion zweiter Ordnung entsprechend Gleichung (6.6) gewählt.

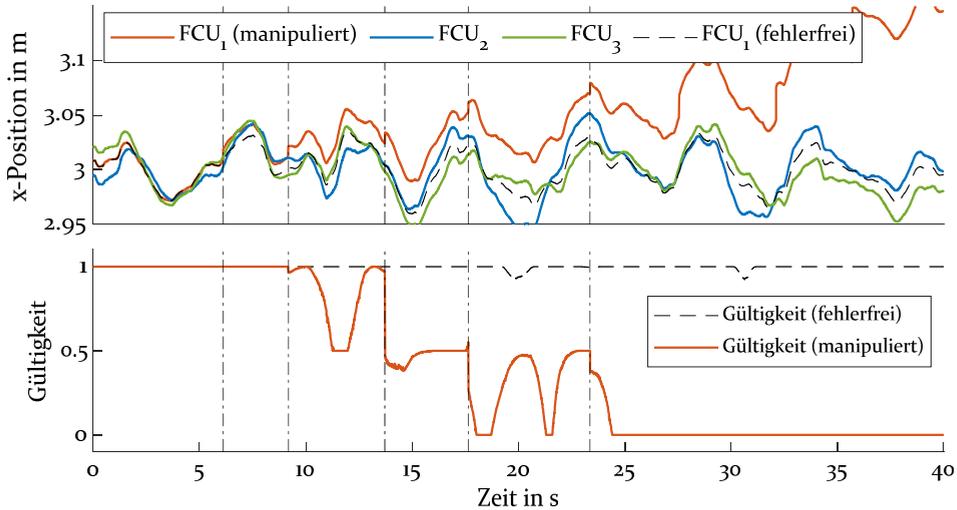


Bild 52: Oben: Verlauf der x-Position dreier FCU, wobei die Werte von FCU_0 zu den durch vertikale Linien gekennzeichneten Zeitpunkten mit einem Offset von jeweils 1 cm beaufschlagt werden. Unten: Zeitverlauf der Gültigkeit der von FCU_0 berechneten x-Position

Zu Beginn, solange keine Verfälschung vorliegt, liegt die Gültigkeit zunächst konstant bei 1. Bereits ab einer Verfälschung von 1 cm sinkt die Gültigkeit temporär, kehrt jedoch auf den Ausgangswert von 1 zurück. Der Effekt verstärkt sich bei einem Offset von 2 cm. Ab einem Offset von 4 cm erreicht die Gültigkeit temporär einen Wert von 0, ab 5 cm Offset liegt die Gültigkeit konstant bei 0.

Dass die Gültigkeit unterhalb eines Offset von 5 cm ansteigt und abfällt, ist durch die im Normbetrieb auftretende Abweichung der Signale der drei FCU zu erklären. Stimmen die Signale von FCU_2 und FCU_3 gut überein, wirkt sich die Abweichung von FCU_1 in der Bewertung stärker aus, als wenn auch zwischen den beiden korrekt funktionierenden FCU eine Abweichung besteht. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der Gültigkeit im manipulierten Zustand mit der Gültigkeit im fehlerfreien Zustand. Letztere liegt nahezu konstant bei einem Wert von 1 und weicht von diesem Wert nur dann minimal ab, wenn eine hohe Differenz zwischen den x-Positionen der drei FCU besteht. Somit lässt sich mit dem erforschten Vorgehen bereits bei geringen Signalabweichungen, die das Flugverhalten nicht kritisch beeinflussen, eine Fehlfunktion detektieren.

Evaluation und Bewertung der Gestenerkennung

Abschließend und als letzte der umgesetzten Sicherheitstechnologien erfolgt die Evaluation und Bewertung der Gestenerkennung. Dabei erfolgt die Analyse sowohl mittels Simulation als auch am realen System. Entsprechend der Darstellung in Abschnitt 6.4 müssen bei der Evaluation vier Szenarien berücksichtigt werden, die im Folgenden als *kg* (keine Geste), *bag* (beide Arme nach oben gestreckt), *lag* (linker Arm nach oben gestreckt) und *rag* (rechter Arm nach oben gestreckt) bezeichnet werden. Zur Auswertung werden sowohl in der Simulation als auch in der Realität jeweils 90 Bilder pro Szenario und mit einem Abstand von 3 m, 6 m und 9 m zwischen Personen und AFR aufgenommen und ausgewertet.

Insgesamt werden somit pro Szenario 360 Bilder ausgewertet, die sich auf vier Klassen aufteilen. Die Bewertung der Genauigkeit und Robustheit der Gestenerkennung erfolgt anhand der in Bild 53 und Bild 54 dargestellten Wahrheitsmatrizen. Dabei ist für jede Kombination aus Umgebung (Simulation bzw. Realität) und Abstand eine individuelle Matrix dargestellt. Für jede Klasse wird bestimmt, wie die in den Bildern enthaltenen Gesten klassifiziert werden. Die Häufigkeiten der entsprechenden Klassifizierung werden in die Matrix eingetragen und auf den Bereich von 0 bis 1 normiert. Bei der gewählten Darstellung ergibt sich hierdurch eine Einheitsmatrix, wenn alle Bilder richtig klassifiziert werden. Ist dies nicht der Fall, reduzieren sich die Werte der Hauptdiagonale, während sich die anderen Einträge entsprechend erhöhen.

Zusätzlich werden für die Klassifikation die Genauigkeit G , die Sensitivität S_{macro} , die Präzision P_{macro} sowie der $F1$ -Wert $F1_{\text{macro}}$ in Abhängigkeit vom Abstand und der Umgebung bestimmt. Die Berechnung basiert auf der Darstellung in [187] und [188] und folgt den in Gleichung (7.1) aufgeführten Zusammenhängen.

$$\begin{aligned}
 G &= \frac{\sum_{i=1}^N TP_i + TN_i}{\sum_{i=1}^N TP_i + TN_i + FP_i + FN_i} \\
 P_{\text{macro}} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \\
 S_{\text{macro}} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} \\
 F1_{\text{macro}} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2 * TP_i}{2 * TP_i + FN_i + FP_i}
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Ausgehend von der Gesamtzahl der Klassen N werden für jede Klasse i die richtig positiven (TP), richtig negativen (TN), falsch positiven (FP) sowie falsch negativen (FN) Klassifikationen ermittelt, um daraus die einzelnen statistischen Gütekriterien der Klassifikation zu bestimmen. Bei optimalem Ergebnis ohne fehlerhafte Einstufungen nehmen alle vier Werte den Wert 1 an und reduzieren sich mit zunehmender Zahl an falschen Klassifikationen. Wie in Bild 53 dargestellt, werden in der Simulation alle Personen unabhängig von der Entfernung erkannt und alle Gesten richtig klassifiziert. Dementsprechend ergeben sich drei Einheitsmatrizen und die Kenngrößen nehmen, wie aus Tabelle 7 ersichtlich, einen Wert von 1 an.

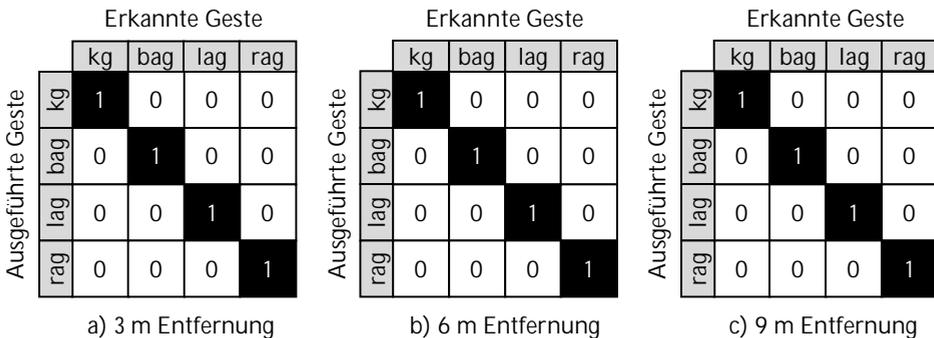


Bild 53: Erfolgsquote der Gestenerkennung bei Bilddaten aus einer simulierten Umgebung; dargestellt als Wahrheitsmatrix und in Abhängigkeit von der Entfernung

Bei den in Bild 54 aufgeführten Daten aus den Flugversuchen in der Realität zeigt sich für die Entfernung von 3 m und 6 m ein ähnliches Bild. Lediglich bei einer Entfernung von 6 m konnte ein Bild der Kategorie *rag* nicht richtig klassifiziert werden. Schlechter fällt die Analyse hingegen bei einer Distanz von 9 m aus, in diesem Fall werden in der Kategorie *lag* knapp 20 Prozent der Gesten falsch zugeordnet.

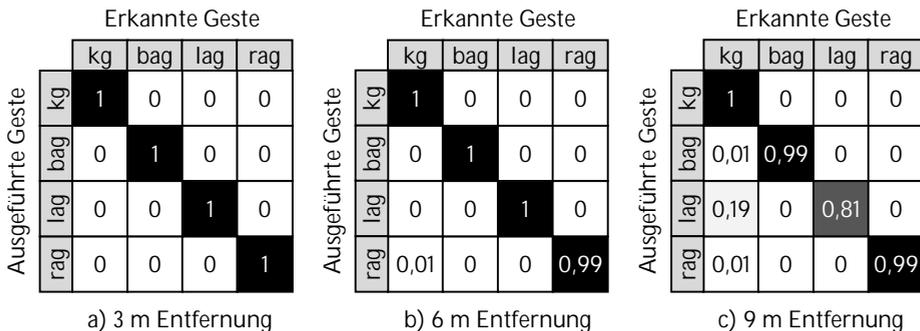


Bild 54: Erfolgsquote der Gestenerkennung bei Bilddaten aus realen Flugversuchen; dargestellt als Wahrheitsmatrix und in Abhängigkeit von der Entfernung

Die schlechtere Erkennung ist darauf zurückzuführen, dass sich mit zunehmendem Abstand zwischen AFR und Person die Abbildungsgröße der Person in den Bildern reduziert. Gleichzeitig führen die in der Realität auftretenden Schwankungen der Flugposition und die geringere Ausleuchtung der Umgebung, verglichen mit der Simulation, zu unschärferen Bildern. Hierdurch kann das genutzte OpenPose-Framework in den betreffenden Bildern kein vollständiges Skelettmodell bestimmen, wodurch die Gestenerkennung fehlt schlägt. In den verbleibenden drei Klassen ist der Anteil der richtigen Klassifikation mit 99 Prozent weiterhin sehr hoch, die in Tabelle 7 dargestellten zugehörigen Kennwerte reduzieren sich dementsprechend nur gering. Weiterhin kann bei einer Auswertefrequenz von 30 Hz auch bei einer reduzierten Erkennungsrate sichergestellt werden, dass die Geste innerhalb weniger Bilder richtig erkannt wird.

Die vorgestellte Methode zur Personen- und Gestenerkennung ermöglicht bei Entfernungen von bis zu 9 m eine zuverlässige Erkennung der durchgeführten Gesten. Weiterhin zeigt die Evaluation, dass es in den betrachteten Szenarien nicht zu einer Verwechslung der Gesten und somit zu einer falschen Anweisung für den AFR kommt.

Tabelle 7: Statistische Gütekriterien der Gestenerkennung und -klassifikation, unterteilt nach Umgebung und Distanz zwischen AFR und Person

	Simulation			Realität		
	3 m	6 m	9 m	3 m	6 m	9 m
Präzision	1.0	1.0	1.0	1.0	0.99	0.94
Sensitivität	1.0	1.0	1.0	1.0	0.99	0.95
Genauigkeit	1.0	1.0	1.0	1.0	0.99	0.94
F1-Wert	1.0	1.0	1.0	1.0	0.99	0.94

7.3 Zusammenfassung und Bewertung

Um die in den Kapiteln 4 bis 6 vorgestellten Methoden bewerten zu können, wurden diese, wie in Abschnitt 7.1 dargestellt, im Rahmen eines umfassenden Gesamtsystems umgesetzt. Integriert sind dabei AFR unterschiedlicher Größe und Bauform, die sowohl Transport- als auch Inventur- und Inspektionsaufträge vollautomatisiert durchführen können. Dabei kommen unterschiedliche FCU und OBC zum Einsatz, wobei der entworfene AFR-Agent sowie die Gesamtarchitektur mit allen eingesetzten Komponenten kompatibel ist. Das Flotten-, Auftrags- und Infrastrukturmanagement sind in geeigneter Weise implementiert worden, um einen vollautomatisierten Prozessablauf inklusive nachfolgendem Ladevorgang zu

ermöglichen. Die umgesetzten Bedienerchnittstellen ermöglichen dabei die Überwachung aller im System registrierten AFR und die Visualisierung der zugehörigen Zustandsinformationen. Das eingesetzte UWB-Lokalisierungssystem ermöglicht in Kombination mit dem umgesetzten Lokalisierungsframework die präzise Positionierung der AFR, welche die Grundlage der ermöglichten Objektinteraktion darstellt. Um die erforschten Methoden sowie das entstandene AFRS umfassend und quantitativ evaluieren zu können, ist neben dem realen Laborsystem auch eine leistungsstarke Simulation entwickelt und eingesetzt worden.

Die durchgeführte Evaluation der Gesamtarchitektur zeigt, dass das spezifizierte AFRS den Betrieb einer heterogenen Flotte von AFR ermöglicht und eingelastete Aufträge zuverlässig und vollautomatisiert bearbeitet werden. Die Analyse zeigt, dass das System auch auf weitläufige Einsatzbereiche und eine größere Flotte von AFR skaliert werden kann, ohne dass hierdurch negative Effekte oder Fehler innerhalb des AFRS auftreten. Die Routenplanung und das Luftraummanagement funktionieren ebenfalls zuverlässig und unabhängig von der Flottengröße. Dabei gilt, dass sich mit zunehmender Zahl an eingesetzten AFR die geplanten, streckenoptimalen Flugrouten teilweise verlängern, da einer größeren Zahl an bestehenden Flugrouten ausgewichen werden muss. Während der durchgeführten Evaluationsdurchläufe sind keine Fehlfunktionen des Luftraummanagements und damit verbundene Kollisionen zwischen AFR festgestellt worden.

Das erforschte und implementierte Sicherheitsframework für AFRS ist in der Lage, alle während der Evaluation aufgetretenen oder gezielt eingebrachten Fehler zu detektieren. Dies umfasst neben der Erkennung von defekten Propellern oder gelösten Bauteilen auch die Erkennung einer falschen Zuladung während des Startvorgangs. Die dabei erreichte Genauigkeit und Auflösung ermöglicht eine zuverlässige Fehlerdetektion bereits zu Zeitpunkten, an denen die spezifischen Fehler das Flug- bzw. Systemverhalten noch nicht beeinflussen. Die spezifizierte Methode zur Personen- und Gestenerkennung ermöglicht die zuverlässige Erkennung aus Entfernungen von bis zu 9 m, wodurch sichergestellt ist, dass eine Wahrnehmung von Personen und gestengesteuerte Anpassung des Flugverhaltens bereits frühzeitig möglich ist.

Die durchgeführte experimentelle Validierung die Funktionsfähigkeit des erforschten AFRS und der zugehörigen Methoden und Komponenten. Das AFRS lässt sich mit einer heterogenen Flotte von AFR einsetzen, ermöglicht die autonome Durchführung unterschiedlicher Aufgaben und berücksichtigt dabei auch sicherheitstechnische Anforderungen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit hat die Konzeptionierung und Realisierung eines sicheren autonomen Flugrobotersystems für den Einsatz in Produktions- und Logistikumgebungen zum Ziel. Dies hat zum Hintergrund, dass AFR durch ihren dreidimensionalen Bewegungsraum hohes Einsatzpotential für die Durchführung von Inspektions- und Inventuraufgaben sowie den Transport von eiligen Gütern in der Luft bieten. Bestehende Forschungsansätze ermöglichen dabei jedoch nur unzureichende Funktionalitäten und vernachlässigen die Integration eines geeigneten Weltmodells sowie die Berücksichtigung von Sicherheitsanforderungen.

Daher werden nach einer umfassenden Analyse des aktuellen Stands der Technik und Forschung und einer Abfrage der im Maschinen- und Anlagenbau bestehenden Erwartungen an AFRS die notwendigen Anforderungen und zentralen Handlungsbedarfe abgeleitet. Die identifizierten und in dieser Dissertationsschrift adressierten Handlungsfelder fokussieren sich auf die nachfolgenden drei Kernaspekte.

Ein zentraler Forschungsaspekt ist die Spezifikation einer Gesamtsystemarchitektur, die auf den Einsatz einer heterogenen Flotte von AFR im Produktions- und Logistikumfeld zugeschnitten ist und den gegebenen Anforderungen gerecht wird. Hierfür wird ein AFRS entworfen, das den Einsatz einer heterogenen Flotte von AFR unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlicher Ausführung ermöglicht. Durch einen Softwareagenten, der auf dem OBC der jeweiligen AFR ausgeführt wird, erfolgt eine Abstraktion nach Elementarfunktionen, daraus zusammengesetzten Fähigkeiten und übergeordneten Aufgaben. Hierdurch bieten die einzelnen AFR einheitliche Schnittstellen und können direkt in das AFRS eingebunden werden und vorgegebene Aufträge autonom bearbeiten. Als zentrale Systemkomponenten werden weiterhin ein geeignetes Flotten-, Auftrags- und Infrastrukturmanagement vorgesehen. Ergänzend werden die Kommunikationsschnittstellen vereinheitlicht und, wo notwendig, redundant ausgeführt. Zusätzlich wird ein Lokalisierungsframework vorgesehen, das die Daten eines globalen UWB-Positionsmesssystems mit den On-Board-Sensordaten des AFR fusioniert und hierdurch die zur Objektinteraktion notwendige Flugpräzision ermöglicht.

Innerhalb des AFRS sind die Planung von geeigneten Flugrouten sowie die Koordination der AFR innerhalb des Luftraums von entscheidender Bedeu-

tung. Da der Stand der Technik und Forschung hier keine geeigneten Methoden und Modelle bietet, stellt eine Methode zur dreidimensionalen Routenplanung und zum Luftraummanagement in Innenräumen den zweiten Schwerpunkt der Forschungsarbeit dar. Hierfür wird ein geeignetes Weltmodell entworfen, das die Rahmenbedingungen und Anforderungen des Einsatzes von AFR in Innenräumen berücksichtigt. Innerhalb des Modells werden neben statischen Hindernissen auch vordefinierte Sonderzonen und bestehende Flugrouten abgebildet und kontinuierlich aktualisiert. Zusätzlich werden die Größenverhältnisse der AFR und die verursachten Luftströmungen berücksichtigt. Zur Bestimmung der Flugrouten kommt ein auf das Weltmodell angepasster graphenbasierter Suchalgorithmus zum Einsatz, der unter einer vorgegebenen Kostenfunktion optimale Flugrouten bestimmt.

Als dritten Kernaspekt verfolgt die Dissertationsschrift die Realisierung eines Sicherheitsframeworks, um einen Beitrag zur Reduktion der von AFR ausgehenden Gefährdung zu liefern. Aufgrund des Verletzungsrisikos bei Abstürzen der AFR oder bei Kontakt mit den Rotorblättern werden drei Methoden erforscht, um diese Gefährdungspotentiale zu reduzieren. Ermöglicht wird hierdurch die Detektion von Strukturschäden sowie einer fehlerhaften Ladungssicherung oder falschen Zuladung noch während des Abflugs. Weiterhin wird ein neuartiger Lösungsansatz vorgestellt, um bei AFR eine TMR-Flugsteuerungsarchitektur auf Basis eines inexakten Voting-Algorithmus zu realisieren und in der Praxis einzusetzen. Zusätzlich wird aufgezeigt, wie durch eine integrierte Personen- und Gestenerkennung auf Personen im Arbeitsbereich der AFR reagiert und das Flugverhalten der AFR in geeigneter Weise angepasst werden kann. Hierdurch werden im Vergleich zu bestehenden AFRS deutlich erweiterte Sicherheitsfunktionalitäten vorgesehen.

Um die Funktionserfüllung der vorab aufgeführten Methoden zu validieren, erfolgt deren Implementierung und Integration in ein prototypisches Gesamtsystem. Das realisierte System erlaubt den Einsatz einer heterogenen Flotte von AFR zur Durchführung von Transport-, Inventur- und Inspektionsaufgaben und wird sowohl mittels Simulation als auch als reales Laborsystem evaluiert. Die Evaluation zeigt, dass die erforschten Methoden die spezifizierten Anforderungen erfüllen und das realisierte AFRS zuverlässig innerhalb von Werks- und Logistikhallen eingesetzt werden kann. Dabei stellt die Routenplanung unter einer gegebenen Kostenfunktion optimale Flugrouten bereit und das Luftraummanagement stellt einen kollo-

sionsfreien und strukturierten Flugbetrieb sicher. Durch das integrierte Sicherheitsframework können Defekte sowie Manipulationen an den AFR zuverlässig erkannt und behandelt werden.

Die vorliegende Arbeit erweitert hierdurch den Stand der Forschung um die erstmalige Spezifikation und Umsetzung eines AFRS, das die vollautomatisierte Durchführung unterschiedlicher Aufgaben in Innenräumen ermöglicht und dabei erstmalig auch umfassende Sicherheitsanforderungen berücksichtigt. Durch das erforschte, neuartige Vorgehen zum Luftraummanagement und zur Routenplanung wird demonstriert, wie auch bei den in Produktions- und Logistikhallen vorherrschenden beengten Platzverhältnissen eine heterogene Flotte von AFR eingesetzt werden kann.

Das dabei erforschte ebenenbasierte Umgebungsmodell erweitert den Stand der Forschung um eine performante Darstellung von Flugbereichen, bei denen die horizontale Ausdehnung deutlich größer ist als die vertikale Ausdehnung. Weiterhin wird eine Methode zum automatisierten Luftraummanagement vorgestellt, die kollisionsfreie Flugbahnen sicherstellt und bereits abgeflogene Routenabschnitte dynamisch wieder freigibt.

Die erforschte Sicherheitsarchitektur zeigt erstmals, wie sich auch für Multikopter eine TMR-Architektur ohne exakte Zeitsynchronisation basierend auf inexakten Voting-Algorithmen realisieren lässt. Dabei wird ebenfalls aufgezeigt, dass Fehler frühzeitig erkannt und maskiert werden können und dass der Wechsel der aktiven FCU während des Fluges ohne Auswirkungen auf das Flugverhalten möglich ist.

Weiterhin wird aufgezeigt, wie Auftragsinformationen in eine auf Vibrationsdaten basierende Zustandsüberwachung einbezogen werden können, und der Stand der Technik in diese Richtung erweitert. Durch die zusätzliche Überwachung des Umfelds, durch Reaktion auf Personen und durch die zusammenfassende Implementierung aller vorgestellten Sicherheitsfunktionen in einem Gesamtframework wird ein umfassendes Sicherheitssystem für AFR erzielt, das in dieser Form bislang noch nicht verfügbar ist.

Ausblickend bietet sich zunächst die Erweiterung der Einsatzumgebung um den Außenbereich an. Die in Kapitel 4 und 6 vorgestellten Methoden sind dabei in gleicher Weise direkt für AFR in Außenbereichen einsetzbar. Hierfür kann das bestehende Lokalisierungsframework dahingehend erweitert werden, dass im Außenbereich GNSS-Daten bei der Lokalisierung ergänzend miteinbezogen werden. Auch das ebenenbasierte Weltmodell lässt sich in gleicher Weise auf den Außenbereich übertragen und kann da-

bei noch mit den aktuellen Vorgaben für den Einsatz von UA im öffentlichen Luftraum erweitert werden [189]. Zudem können neue Aufträge, Aufgaben und Fähigkeiten modelliert werden, um das Einsatzspektrum des AFRS zu erweitern.

Weiterhin ist es zielführend, das Weltmodell fortlaufend anhand der Sensordaten der AFR zu aktualisieren. Dabei können die während des Fluges über entsprechende Sensoren als Punktwolke erfassten Hindernisse direkt in das Weltmodell zurückgespielt werden. Hierfür können die Punktwolken in die jeweilige Flugebene projiziert und auf Basis der resultierenden Kostenkarten die Planungsgraphen aktualisiert werden. Da dies insbesondere bei ausgedehnten Weltmodellen und dem Einsatz mehrere AFR sehr rechenintensiv ist, können hier auch innovative Ansätze wie der von Hofmann et al. [P13] vorgestellte Ansatz zur effizienten semantischen Umgebungsmodellierung zum Einsatz kommen. Hierdurch wird eine performante Interpretation der Umgebung ermöglicht und die erkannten Hindernisse können direkt klassifiziert werden.

In diesem Kontext wird auch die Erweiterung des vorgestellten Routenplanungsalgorithmus als sinnvoll angesehen. Im aktuellen Stand werden bei der Planung eines neuen Pfads die bestehenden, noch aktiven Flugrouten berücksichtigt, aber Kreuzungen der Flugpfade ausgeschlossen. Daher müssen, trotz Ausweichmöglichkeit auf eine andere Flugebene, teilweise verlängerte Flugstrecken und längere Flugzeiten in Kauf genommen werden. Hier bietet sich ergänzend der Einsatz von Routenplanungsalgorithmen an, die neben den räumlichen Bedingungen auch zeitliche Zielgrößen mit einbeziehen. Hierdurch kann auch bei sich kreuzenden Flugrouten sichergestellt werden, dass sich nicht zwei AFR gleichzeitig an einem Kreuzungspunkt befinden [190]. Durch die Aufnahme weiterer Zielgrößen wie des spätesten Liefer- oder Ausführungszeitpunkt oder der verbleibenden Batteriekapazität können die Flugrouten noch nach weiteren Gesichtspunkten optimiert werden.

Eine Optimierung des Flugverhaltens bietet sich auch im Kontext der spezifizierten Sicherheitsfunktionen an. So können innerhalb des Weltmodells Raumbereiche entsprechend des beim Durchflug eines AFR zu erwartenden Risikos klassifiziert werden, um die Flugrouten anschließend so zu planen, dass das erwartete Risiko minimal wird. Als Erweiterung der beschriebenen Methoden zur Detektion von Systemfehlern und Anomalien können zudem maschinelle Lernverfahren oder weiterführende Klassifikationsalgorithmen zum Einsatz kommen. Dies hat den Vorteil, dass die aktuell

noch erforderliche Aufnahme eines fehlerfreien Referenzdatensatzes obsolet wird bzw. die aktuell verwendete Tschebyscheff-Ungleichung durch präzisere Verfahren ersetzt werden kann.

Abschließend steht der Einsatz und die weitere Evaluation des erforschten AFRS in verschiedenen industriellen Pilotanwendungen an, um die Vorteile von AFRS nutzbar zu machen. Aufzuführen sind hier neben der automatisierten Inventur in Logistikhallen auch die optische Informationserfassung im Bereich der Flugzeugmontage oder bei der Instandhaltung von Flugzeugen, Schiffen sowie industriellen Großanlagen.

9 Summary and outlook

The presented thesis targets the conception and realization of a safe autonomous flying robot system for use in production and logistics environments. This is due to the fact that AFR offer a high potential for the execution of inspection and inventory tasks as well as the transport of urgent goods in the air due to their three-dimensional movement space. However, existing research approaches, only provide insufficient functionalities and neglect the integration of a suitable environment model as well as the consideration of safety requirements. Therefore, after a comprehensive analysis of the current state of the art and a survey of the current expectations of AFRS, the necessary requirements and central needs for action are derived. Those identified needs for actions can be divided into the three key topics that are presented in the following.

A core aspect of this thesis is the specification of an overall system architecture that meets the given requirements and is designed for the use of a heterogeneous fleet of AFR in production and logistics environments. For this purpose, an AFRS is presented which allows the use of a heterogeneous fleet of AFR from different manufacturers and of different designs. By means of a software agent, which is executed on the OBC of the respective AFR, an abstraction takes place according to elementary functions, capabilities composed of them and superordinate tasks. In doing so, the individual AFRs offer uniform interfaces and can be directly integrated into the AFRS and perform predefined tasks autonomously. Furthermore, a suitable fleet management, order management and infrastructure management are provided. In addition, the communication interfaces are standardized and, where necessary, implemented redundantly. In addition, a localization framework is provided that fuses the data of a global UWB positioning system with the on-board sensor data of the AFR and thus provides the flight precision required for object interaction.

Within the AFRS, the planning of suitable flight trajectories as well as the coordination of the AFR within the airspace are of crucial importance. Since the state of the art does not offer suitable methods and models, a method for three-dimensional route planning and indoor airspace management represents the second key aspect of the this thesis. Therefore, a suitable environment model is designed which takes into account the conditions and requirements of the use of AFR in indoor environments. Within the model, obstacles, predefined special zones and existing flight trajectories are represented and continuously updated. In addition, the size of the AFR

and their generated air flows are taken into account. To calculate the flight trajectories, a graph-based search algorithm adapted to the environment model is used, which determines optimal flight routes under a given cost function.

As third key aspect, the thesis pursues the design of a safety framework in order to reduce the hazards caused by AFR. Due to the risk of injury in the event of a crash of the AFR or contact with the rotor blades, three methods are presented to reduce these potential hazards. The investigated methods enable the detection of structural damage as well as faulty load securing or incorrect loading. Furthermore, a novel approach to realize a TMR flight control architecture for AFR based on an inexact voting algorithm is presented and evaluated in real world flight tests. In addition, it is demonstrated how an integrated person and gesture recognition system can be used to react to persons in the working area of the AFR and how the flight behaviour of the AFR can be adapted in a suitable manner. Using those methods provides significantly enhanced safety functionalities compared to existing AFRS.

To validate the functionality of the aforementioned methods, they are implemented and integrated into a prototypical system. The resulting AFRS allows the use of a heterogeneous fleet of AFR for the execution of transport, inventory and inspection tasks and is evaluated both by simulation and as a real world system. The evaluation demonstrates that the researched methods meet the specified requirements and that the realized AFRS can be used reliably within factory and logistics halls. The route planning provides optimal flight routes under a given cost function and the airspace management ensures collision-free and structured flight operations. The integrated safety framework allows defects and manipulations of the AFR to be reliably detected and resolved.

This thesis extends the state of the art by the specification and implementation of an AFRS, which enables the fully automated execution of different tasks in indoor environments and, for the first time, also takes comprehensive safety requirements into account. The researched, novel approach to airspace management and route planning demonstrates how a heterogeneous fleet of AFR can be deployed even in the confined space conditions prevailing in production and logistics halls.

The designed plane-based environment model extends the state of the art by a performant representation of flight areas where the horizontal extent is significantly larger than the vertical extent. Furthermore, a method for automated airspace management is presented that ensures collision-free

flight paths and dynamically releases route segments that have already been traversed.

The researched safety architecture shows for the first time how a TMR architecture without exact time synchronization based on inexact voting algorithms can be realized for multicopters. It is also shown that faults can be detected and masked at an early stage and that it is possible to change the active FCU during flight without affecting the flight behaviour. Additionally it's demonstrated how an AFR can adapt its flight behaviour to gestures performed by persons within the AFR's radius of action. Through the implementation of the presented safety functionalities in an overall framework, a comprehensive safety system for AFR is achieved, which is not yet available in this form.

Within future research, the first step will be to extend the operational environment to include outdoor areas. The methods presented in chapters 4 and 6 can thereby be used in the same way for AFR in outdoor areas. Here, the existing localization framework can be extended to include GNSS data. The plane-based environment model can also be transferred to the outdoor area and can be extended with the requirements applying for the use of UA in public airspace [189]. In addition, new missions, tasks and capabilities are to be modelled in order to extend the range of applications of the AFRS.

It is also expedient to continuously update the environment model using the sensor data provided by the AFR. For this purpose, the point clouds provided by the AFR's on-board sensors can be projected into the respective flight level and the planning graphs can be updated based on the resulting cost maps. Since this is very computationally intensive, especially for extensive environments and the application of multiple AFR, innovative approaches such as the efficient semantic environment modelling presented by Hofmann et al. [P13] are to be used here. This enables a performant interpretation of the environment and the detected obstacles can be classified directly.

In this context, the extension of the presented route planning algorithm is also considered useful. In the current state, when planning a new path, the existing, still active flight paths are taken into account, but crossings of flight paths are excluded. Despite the possibility to switch to another flight level, longer flight routes and longer flight times have to be accepted in some cases. To avoid this, the use of route planning algorithms, which include temporal aspects in addition to spatial constraints, is an option. In this way, it can be ensured that two AFRs will not collide, even in the case of intersecting flight routes [190]. By including further dependent variables

such as the due time of a task or the remaining battery capacity, the flight routes can be optimized with respect to other factors.

Optimization of flight behaviour also provides opportunities for improving the specified safety functions. For example, within the environment model spatial regions can be classified according to the risk to be expected when an AFR is flying through, in order to subsequently plan flight routes in such a way that the expected risk is minimized. Machine learning techniques and advanced classification algorithms can also be used as an extension of the methods described for detecting system errors and failures. This has the advantage that the currently required recording of an error-free reference data set becomes obsolete and the currently used Chebyshev inequality can be replaced by more precise methods.

Finally, the use and further evaluation of the researched AFRS in various industrial pilot applications is pending. In addition to automated stocktaking in logistics halls, optical information acquisition in aircraft assembly or in the maintenance of aircrafts, ships or large industrial plants are considered as suitable applications for the AFRS.

Literaturverzeichnis

- [1] NONAMI, K. Prospect and Recent Research & Development for Civil Use Autonomous Unmanned Aircraft as UAV and MAV [online]. *Journal of System Design and Dynamics*, 2007, 1(2), S. 120-128. Verfügbar unter: doi:10.1299/jsdd.1.120
- [2] MARSHALL, D.M., R.K. BARNHART und E. SHAPPEE, Hg. *Introduction to unmanned aircraft systems*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, 2021. ISBN 9780367366599
- [3] POP, S., A. LUCHIAN, R.-G. ZMĂDU und E. OLEA. THE EVOLUTION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES [online]. *Review of the Air Force Academy*, 2017, 15(3), S. 125-132. ISSN 18429238. Verfügbar unter: doi:10.19062/1842-9238.2017.15.3.15
- [4] RAO, B., A.G. GOPI und R. MAIONE. The societal impact of commercial drones [online]. *Technology in Society*, 2016, 45(4), S. 83-90. ISSN 0160791X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tech-soc.2016.02.009
- [5] VERBAND UNBEMANNTE LUFTFAHRT. *Analyse des deutschen Drohnenmarktes* [online], 2021. März 2021 [Zugriff am: 14. Mai 2021]. Verfügbar unter: <https://www.verband-unbemannte-luftfahrt.de/analyse-des-deutschen-drohnenmarktes/>
- [6] DRONE INDUSTRY INSIGHTS UG. *Drone Applications per Industry 2021* [online], 2020. Mai 2021 [Zugriff am: 21. Mai 2021]. Verfügbar unter: <https://droneii.com/project/drone-applications-per-industry-2021>
- [7] MAGHAZEI, O. und T. NETLAND. Drones in manufacturing: exploring opportunities for research and practice [online]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2019, (Vol. 31 No. 6), S. 1237-1259. ISSN 1741-038X. Verfügbar unter: doi:10.1108/JMTM-03-2019-0099
- [8] DRONE INDUSTRY INSIGHTS UG. *Drone Market Size and Forecast 2020 - 2025* [online], 2020. Juni 2020 [Zugriff am: 14. Mai 2021]. Verfügbar unter: <https://droneii.com/project/drone-market-size-2020-2025>

- [9] WAWRLA, L., O. MAGHAZEI und T. NETLAND. *Applications of drones in warehouse operations. Whitepaper* [online], 2019. August 2019 [Zugriff am: 25. Juni 2021]. Verfügbar unter: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/pomdam/documents/Drones%20in%20warehouse%20operations_POM%20whitepaper%202019_Final.pdf
- [10] WRYCZA, P., M. ROTGERI und M. ten HOMPEL. *Spielzeitreduktion autonomer Drohnen für den Transport eiliger Güter durch den Einsatz automatisierter Lastaufnahmemittel im Kontext eines ganzheitlich automatisierten Gesamtsystems*: Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik, 2017
- [11] COHN, P., A. GREEN, M. LANGSTAFF und M. ROLLER. *Commercial drones are here: The future of unmanned aerial systems* [online], 2017. Dezember 2017 [Zugriff am: 25. Mai 2021]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/commercial-drones-are-here-the-future-of-unmanned-aerial-systems>
- [12] EIBFELDT, H., V. VOGELPOHL, M. STOLZ, A. PAPENFUß, M. BIELLA, J. BELZ und D. KÜGLER. The acceptance of civil drones in Germany [online]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2020, 11(3), S. 665-676. ISSN 1869-5582. Verfügbar unter: doi:10.1007/s13272-020-00447-w
- [13] LIDYNIA, C., R. PHILIPSEN und M. ZIEFLE. Droning on About Drones—Acceptance of and Perceived Barriers to Drones in Civil Usage Contexts. In: P. SAVAGE-KNEPSHIELD und J. CHEN, Hg. *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 317-329. ISBN 978-3-319-41958-9
- [14] VERGOUW, B., H. NAGEL, G. BONDT und B. CUSTERS. Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments. In: B. CUSTERS, Hg. *The Future of Drone Use*. The Hague: T.M.C. Asser Press, 2016, S. 21-45. ISBN 978-94-6265-131-9
- [15] International Civil Aviation Organization (ICAO). ICAO Cir 328, *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*
- [16] OTTO, A., N. AGATZ, J. CAMPBELL, B. GOLDEN und E. PESCH. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey [online]. *Networks*,

- 2018, 72(4), S. 411-458. ISSN 00283045. Verfügbar unter:
doi:10.1002/net.21818
- [17] VALAVANIS, K.P. und G.J. VACHTSEVANOS, Hg. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. ISBN 978-90-481-9706-4
- [18] DIN EN ISO 8373: November 2010, *Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch*
- [19] STENZEL, R. *Steuerungsarchitekturen für autonome mobile Roboter*. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002
- [20] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. VDI 2510: Oktober 2005, *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*
- [21] EUROPEAN COCKPIT ASSOCIATION AISBL. *Unmanned Aircraft Systems and the concepts of Automation and Autonomy* [online], 2020
- [22] Society of Automotive Engineers (SAE). J3016_202104: April 2021, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*
- [23] MAHONY, R., V. KUMAR und P. CORKE. Multicopter Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor [online]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, 19(3), S. 20-32. ISSN 1070-9932. Verfügbar unter: doi:10.1109/MRA.2012.2206474
- [24] BOUABDALLAH, S. *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*: Lausanne, EPFL, 2006
- [25] CHOVANCOVÁ, A., T. FICO, L. CHOVANEC und P. HUBINSK. Mathematical Modelling and Parameter Identification of Quadrotor (a survey) [online]. *Procedia Engineering*, 2014, 96(10), S. 172-181. ISSN 18777058. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.pro-eng.2014.12.139
- [26] BOUABDALLAH, S., P. MURRIERI und R. SIEGWART. Design and control of an indoor micro quadrotor. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*: IEEE, 26. April 2004 - 1. Mai 2004, 4393-4398 Vol.5. ISBN 0-7803-8232-3
- [27] QUAN, Q. *Introduction to Multicopter Design and Control*. Singapore: Springer Singapore, 2017. ISBN 978-981-10-3381-0

- [28] GUPTA, S.G., M. GHONGE und P.M. JAWANDHIYA. Review of Unmanned Aircraft System (UAS) [online]. *SSRN Electronic Journal*, 2013. Verfügbar unter: doi:10.2139/ssrn.3451039
- [29] REMONDINO, F., L. BARAZZETTI, F. NEX, M. SCAIONI und D. SARAZZI. UAV PHOTOGRAMMETRY FOR MAPPING AND 3D MODELING – CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES [online]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, XXXVIII-1/C22, S. 25-31. Verfügbar unter: doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011
- [30] NIKOLIC, J., M. BURRI, J. REHDER, S. LEUTENEGGER, C. HUERZELER und R. SIEGWART. A UAV system for inspection of industrial facilities. In: *2013 IEEE Aerospace Conference: IEEE*, 2. März 2013 - 9. März 2013, S. 1-8. ISBN 978-1-4673-1813-6
- [31] HASSLER, S.C. und F. BAYSAL-GUREL. Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and Applications in Agriculture [online]. *Agronomy*, 2019, 9(10), S. 618. Verfügbar unter: doi:10.3390/agronomy9100618
- [32] ERDELJ, M. und E. NATALIZIO. UAV-assisted disaster management: Applications and open issues. In: *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC): IEEE*, 15. Februar 2016 - 18. Februar 2016, S. 1-5. ISBN 978-1-4673-8579-4
- [33] FINN, R.L. und D. WRIGHT. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications [online]. *Computer Law & Security Review*, 2012, 28(2), S. 184-194. ISSN 02673649. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.clsr.2012.01.005
- [34] VECTORBIRDS AIRBORNE SYSTEMS. *Kite 75 - das Profidrohnen- Kraftpaket für Akku- und Tetherbetrieb* [online], 2020 [Zugriff am: 4. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://vectorbirds.com/aircrafts/kite-75>
- [35] WAIBEL, M., B. KEAYS und F. AUGUGLIARO. *Drone shows: Creative potential and best practices*: ETH Zurich, 2017
- [36] DOKS. INNOVATION GMBH. *inventAIRy XL* [online], 2020 [Zugriff am: 4. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://doks-innovation.com/solutions/inventairy-xl>

- [37] HARDIS GROUPE. *Eyesees, the inventory drone solution* [online], 2019 [Zugriff am: 4. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://eyesees-drone.com/eyesees-the-inventory-drone-solution/?lang=en>
- [38] LEVITT, T.S. und D.T. LAWTON. Qualitative navigation for mobile robots [online]. *Artificial Intelligence*, 1990, 44(3), S. 305-360. ISSN 00043702. Verfügbar unter: doi:10.1016/0004-3702(90)90027-W
- [39] AL NUAIMI, K. und H. KAMEL. A survey of indoor positioning systems and algorithms. In: *2011 International Conference on Innovations in Information Technology*; IEEE, 25. April 2011 - 27. April 2011, S. 185-190. ISBN 978-1-4577-0311-9
- [40] ZAFARI, F., A. GKELIAS und K.K. LEUNG. A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies [online]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3), S. 2568-2599. Verfügbar unter: doi:10.1109/COMST.2019.2911558
- [41] ARSLAN, H., Z.N. CHEN und M.-G. DI BENEDETTO. *Ultra Wideband Wireless Communication*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2006. ISBN 9780470042397
- [42] ALARIFI, A., A. AL-SALMAN, M. ALSALEH, A. ALNAFESSAH, S. AL-HADHRAMI, M.A. AL-AMMAR und H.S. AL-KHALIFA. Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances [online]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2016, 16(5). Verfügbar unter: doi:10.3390/s16050707
- [43] LEE, J.-Y. und R.A. SCHOLTZ. Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link [online]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(9), S. 1677-1683. ISSN 0733-8716. Verfügbar unter: doi:10.1109/JSAC.2002.805060
- [44] MAZRAANI, R., M. SAEZ, L. GOVONI und D. KNOBLOCH. Experimental results of a combined TDOA/TOF technique for UWB based localization systems. In: *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*; IEEE, 21. Mai 2017 - 25. Mai 2017, S. 1043-1048. ISBN 978-1-5090-1525-2
- [45] SAHINOGLU, Z., S. GEZICI und I. GÜVENC. *Ultra-wideband Positioning Systems. Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols*. Leiden: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-511-43681-9

- [46] KATO, H. und M. BILLINGHURST. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In: *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*: IEEE Comput. Soc., 20. Oktober 1999, S. 85-94. ISBN 0-7695-0359-4
- [47] GARRIDO-JURADO, S., R. MUÑOZ-SALINAS, F.J. MADRID-CUEVAS und M.J. MARÍN-JIMÉNEZ. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion [online]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(6), S. 2280-2292. ISSN 00313203. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.patcog.2014.01.005
- [48] FIALA, M. Designing highly reliable fiducial markers [online]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2010, 32(7), S. 1317-1324. Verfügbar unter: doi:10.1109/TPAMI.2009.146
- [49] OLSON, E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*: IEEE, 9. Mai 2011 - 13. Mai 2011, S. 3400-3407. ISBN 978-1-61284-386-5
- [50] NISTER, D., O. NARODITSKY und J. BERGEN. Visual odometry. In: *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004*: IEEE, 27. Juni 2004, S. 652-659. ISBN 0-7695-2158-4
- [51] SCARAMUZZA, D. und F. FRAUNDORFER. Visual Odometry: Part I: The First 30 Years and Fundamentals [online]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2011, 18(4), S. 80-92. ISSN 1070-9932. Verfügbar unter: doi:10.1109/MRA.2011.943233
- [52] LUCAS, B.D. und T. KANADE. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (DARPA). *Proceedings of 1981 DARPA Image Understanding Workshop (IUW '81)*, 1981, S. 121-130
- [53] SHI, J. und TOMASI. Good features to track. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94*: IEEE Comput. Soc. Press, 15. Juni 1993 - 17. Juni 1993, S. 593-600. ISBN 0-8186-5825-8
- [54] FRAUNDORFER, F. und D. SCARAMUZZA. Visual Odometry: Part II: Matching, Robustness, Optimization, and Applications [online]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, 19(2), S.

78-90. ISSN 1070-9932. Verfügbar unter:
doi:10.1109/MRA.2012.2182810

- [55] QIN, T., P. LI und S. SHEN. VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator [online]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4), S. 1004-1020. ISSN 1552-3098. Verfügbar unter: doi:10.1109/TRO.2018.2853729
- [56] FORSTER, C., M. PIZZOLI und D. SCARAMUZZA. SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: IEEE, 31. Mai 2014 - 7. Juni 2014, S. 15-22. ISBN 978-1-4799-3685-4
- [57] STUMBERG, L. von, V. USENKO und D. CREMERS. Direct Sparse Visual-Inertial Odometry Using Dynamic Marginalization. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: IEEE, 21. Mai 2018 - 25. Mai 2018, S. 2510-2517. ISBN 978-1-5386-3081-5
- [58] DURRANT-WHYTE, H. und T. BAILEY. Simultaneous localization and mapping: part I [online]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(2), S. 99-110. ISSN 1070-9932. Verfügbar unter: doi:10.1109/MRA.2006.1638022
- [59] THRUN, S. und J.J. LEONARD. Simultaneous Localization and Mapping. In: B. SICILIANO und O. KHATIB, Hg. *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 871-889. ISBN 978-3-540-23957-4
- [60] SICILIANO, B. und O. KHATIB. *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7
- [61] GREWAL, M.S. und A.P. ANDREWS. *Kalman filtering. Theory and practice using MATLAB*. 2. ed. New York, NY: Wiley-Interscience, 2001. ISBN 9780471392545
- [62] HERTZBERG, J., K. LINGEMANN und A. NÜCHTER. *Mobile Roboter*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-01725-4
- [63] BUSCHKA, P. *An investigation of hybrid maps for mobile robots*. Örebro: Universitetsbiblioteket, 2005. Örebro studies in technology. 20. ISBN 91-7668-454-7

- [64] KUIPERS, B. Modeling spatial knowledge [online]. *Cognitive Science*, 1978, 2(2), S. 129-153. ISSN 03640213. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0364-0213(78)80003-2
- [65] KUIPERS, B. und Y.-T. BYUN. A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations [online]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1991, 8(1-2), S. 47-63. ISSN 09218890. Verfügbar unter: doi:10.1016/0921-8890(91)90014-C
- [66] LANG, D. und D. PAULUS. Semantic Maps for Robotics. In: *Proceedings of the Workshop on AI Robotics at the IEEE International Conference on Robotics and Automation 2014*
- [67] KOSTAVELIS, I. und A. GASTERATOS. Semantic mapping for mobile robotics tasks: A survey [online]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 66, S. 86-103. ISSN 09218890. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.robot.2014.12.006
- [68] FILLIAT, D. und J.-A. MEYER. Map-based navigation in mobile robots: [online]. I. A review of localization strategies. *Cognitive Systems Research*, 2003, 4(4), S. 243-282. ISSN 13890417. Verfügbar unter: doi:10.1016/S1389-0417(03)00008-1
- [69] THRUN, S. Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation [online]. *Artificial Intelligence*, 1998, 99(1), S. 21-71. ISSN 00043702. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0004-3702(97)00078-7
- [70] MEAGHER, D. Geometric modeling using octree encoding [online]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, 19(2), S. 129-147. ISSN 0146664X. Verfügbar unter: doi:10.1016/0146-664X(82)90104-6
- [71] WURM, K.M., A. HORNUNG, M. BENNEWITZ, C. STACHNISS und W. BURGARD. OctoMap: A Probabilistic, Flexible, and Compact 3D Map Representation for Robotic Systems. *Proceedings of the ICRA Workshop on Best Practice in 3D Perception and Modeling for Mobile Manipulation*, 2010
- [72] HORNUNG, A., K.M. WURM, M. BENNEWITZ, C. STACHNISS und W. BURGARD. OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees [online]. *Autonomous Robots*, 2013, 34(3), S. 189-206. ISSN 0929-5593. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10514-012-9321-0

- [73] KONOLIGE, K., E. MARDER-EPPSTEIN und B. MARTHI. Navigation in hybrid metric-topological maps. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*: IEEE, 9. Mai 2011 - 13. Mai 2011, S. 3041-3047. ISBN 978-1-61284-386-5
- [74] KUIPERS, B., J. MODAYIL, P. BEESON, M. MACMAHON und F. SAVELLI. Local metrical and global topological maps in the hybrid spatial semantic hierarchy. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*: IEEE, 26. April 2004 - 1. Mai 2004, 4845-4851 Vol.5. ISBN 0-7803-8232-3
- [75] YANG, L., J. QI, D. SONG, J. XIAO, J. HAN und Y. XIA. Survey of Robot 3D Path Planning Algorithms [online]. *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, 2016(1), S. 1-22. ISSN 1687-5249. Verfügbar unter: doi:10.1155/2016/7426913
- [76] CHOSET, H.M. *Principles of robot motion. Theory, algorithms, and implementation*. Cambridge, Mass: MIT Press, 2005. Intelligent robotics and autonomous agents. ISBN 0-262-03327-5
- [77] LAVALLE, S.M. und J.J. KUFFNER. Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects. *Algorithmic and Computational Robotics: New Directions*, 2000
- [78] LAVALLE, S.M. *Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning*. Computer Science Department, Iowa State University, Ames, Iowa, USA
- [79] KARAMAN, S. und E. FRAZZOLI. Sampling-based algorithms for optimal motion planning [online]. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(7), S. 846-894. ISSN 0278-3649. Verfügbar unter: doi:10.1177/0278364911406761
- [80] YERSHOVA, A., L. JAILLET, T. SIMEON und S.M. LAVALLE. Dynamic-Domain RRTs: Efficient Exploration by Controlling the Sampling Domain. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*: IEEE, 18. April 2005, S. 3856-3861. ISBN 0-7803-8914-X
- [81] KAVRAKI, L.E., P. SVESTKA, J.-C. LATOMBE und M.H. OVERMARS. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces [online]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(4), S. 566-580. ISSN 1042296X. Verfügbar unter: doi:10.1109/70.508439

- [82] DIJKSTRA, E.W. A note on two problems in connexion with graphs [online]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1), S. 269-271. ISSN 0029-599X. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF01386390
- [83] HART, P., N. NILSSON und B. RAPHAEL. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths [online]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2), S. 100-107. ISSN 0536-1567. Verfügbar unter: doi:10.1109/TSSC.1968.300136
- [84] STENTZ, A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments. In: *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation: IEEE Comput. Soc. Press*, 8. Mai 1994, S. 3310-3317. ISBN 0-8186-5330-2
- [85] STENTZ, A. The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning. In: *Proceedings of the International Joint Conference on AI*, S. 1652-1659
- [86] SHIH, C.L., T.-T. LEE und W.A. GRUVER. A unified approach for robot motion planning with moving polyhedral obstacles [online]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1990, 20(4), S. 903-915. ISSN 00189472. Verfügbar unter: doi:10.1109/21.105088
- [87] CHAMSEDDINE, A., Y. ZHANG, C.A. RABBATH, C. JOIN und D. THEILLIOL. Flatness-Based Trajectory Planning/Replanning for a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle [online]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4), S. 2832-2848. ISSN 0018-9251. Verfügbar unter: doi:10.1109/TAES.2012.6324664
- [88] MILLER, B., K. STEPANYAN, A. MILLER und M. ANDREEV. 3D path planning in a threat environment. In: *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference: IEEE*, 12. Dezember 2011 - 15. Dezember 2011, S. 6864-6869. ISBN 978-1-61284-801-3
- [89] PEHLIVANOGLU, Y.V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV [online]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 16(1), S. 47-55. ISSN 12709638. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ast.2011.02.006

- [90] GLASIUS, R., A. KOMODA und S.C.A.M. GIELEN. Neural Network Dynamics for Path Planning and Obstacle Avoidance [online]. *Neural Networks*, 1995, 8(1), S. 125-133. ISSN 08936080. Verfügbar unter: doi:10.1016/0893-6080(94)E0045-M
- [91] LEVITATE CAPITAL LLC. *The Future of the Drone Economy* [online]. *A comprehensive analysis of the economic potential, market opportunities, and strategic considerations in the drone economy*. A Report From Levitate Capital, 2020 [Zugriff am: 18. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://levitatecap.com/levitate/wp-content/uploads/2020/12/Levitate-Capital-White-Paper.pdf>
- [92] SZ DJI TECHNOLOGY CO., LTD. *FLIGHTHUB - Die ultimative Plattform zur Verwaltung Ihrer Drohneneinsätze* [online] [Zugriff am: 30. November 2020]. Verfügbar unter: <https://www.dji.com/de/flighthub>
- [93] HHLA SKY GMBH. *Das HHLA Sky Drohnensystem*. [online] [Zugriff am: 30. November 2020]. Verfügbar unter: <https://hhlasky.de/drohnen-system>
- [94] DRONEDEPLOY, I. *Drone Operations Management* [online] [Zugriff am: 30. November 2020]. Verfügbar unter: <https://www.dronedeploy.com/product/drone-operations-management/>
- [95] KITTYHAWK.IO, I. *Kittyhawk Air Control* [online] [Zugriff am: 30. November 2020]. Verfügbar unter: <https://kittyhawk.io/air-control/>
- [96] FLYTBASE, I. *Platform for Connected Intelligent Drones* [online] [Zugriff am: 30. November 2010]. Verfügbar unter: <https://flytbase.com/platform/>
- [97] MEYER, J., A. SENDOBRY, S. KOHLBRECHER, U. KLINGAUF und O. von STRYK. Comprehensive Simulation of Quadrotor UAVs Using ROS and Gazebo. In: D. HUTCHISON, T. KANADE, J. KITTLER, J.M. KLEINBERG, F. MATTERN, J.C. MITCHELL, M. NAOR, O. NIERSTRASZ, C. PANDU RANGAN, B. STEFFEN, M. SUDAN, D. TERZOPOULOS, D. TYGAR, M.Y. VARDI, G. WEIKUM, I. NODA, N. ANDO, D. BRUGALI und J.J. KUFFNER, Hg. *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 400-411. ISBN 978-3-642-34326-1

- [98] VAN DE LOOSDRECHT, J., K. DIJKSTRA, J.H. POSTMA, W. KEUNING und D. BRUIN. Twirre: Architecture for autonomous mini-UAVs using interchangeable commodity components [online]. *2014 International Micro Air Vehicle Conference and Competition*, 2014. Verfügbar unter: doi:10.13140/2.1.2300.3522
- [99] BRISSET, P., A. DROUIN, M. GORRAZ, P.-S. HUARD und J. TYLER. The Paparazzi Solution. *MAV 2006, 2nd US-European Competition and Workshop on Micro Air Vehicles*, 2006
- [100] MEIER, L., D. HONEGGER und M. POLLEFEYS. PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: IEEE, 26. Mai 2015 - 30. Mai 2015, S. 6235-6240. ISBN 978-1-4799-6923-4
- [101] ARDUPILOT DEV TEAM. *ArduPilot - Open Source Drone Software* [online], 2021 [Zugriff am: 13. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://ardupilot.org/>
- [102] LAMPING, A.P., J.N. OUWERKERK und K. COHEN. Multi-UAV Control and Supervision with ROS. In: *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 06252018, S. 5. ISBN 978-1-62410-556-2
- [103] GRABE, V., M. RIEDEL, H.H. BULTHOFF, P.R. GIORDANO und A. FRANCHI. The TeleKyb framework for a modular and extendible ROS-based quadrotor control. In: *2013 European Conference on Mobile Robots*: IEEE, 25. September 2013 - 27. September 2013, S. 19-25. ISBN 978-1-4799-0263-7
- [104] MILLAN-ROMERA, J.A., H. PEREZ-LEON, A. CASTILLEJO-CALLE, I. MAZA und A. OLLERO. ROS-MAGNA, a ROS-based framework for the definition and management of multi-UAS cooperative missions. In: *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*: IEEE, 11. Juni 2019 - 14. Juni 2019, S. 1477-1486. ISBN 978-1-7281-0333-4
- [105] MAZA, I., F. CABALLERO, J. CAPITAN, J.R. MARTINEZ-DE-DIOS und A. OLLERO. A distributed architecture for a robotic platform with aerial sensor transportation and self-deployment capabilities [online]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(3), S. 303-328. ISSN 15564959. Verfügbar unter: doi:10.1002/rob.20383

- [106] SANCHEZ-LOPEZ, J.L., R.A.S. FERNANDEZ, H. BAVLE, C. SAMPEDRO, M. MOLINA, J. PESTANA und P. CAMPOY. AEROSTACK: An architecture and open-source software framework for aerial robotics. In: *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*: IEEE, 7. Juni 2016 - 10. Juni 2016, S. 332-341. ISBN 978-1-4673-9334-8
- [107] SANCHEZ-LOPEZ, J.L., J. PESTANA, P. de LA PUENTE und P. CAMPOY. A Reliable Open-Source System Architecture for the Fast Designing and Prototyping of Autonomous Multi-UAV Systems: Simulation and Experimentation [online]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, 84(1-4), S. 779-797. ISSN 0921-0296. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10846-015-0288-x
- [108] SANCHEZ-LOPEZ, J.L., M. MOLINA, H. BAVLE, C. SAMPEDRO, R.A. SUÁREZ FERNÁNDEZ und P. CAMPOY. A Multi-Layered Component-Based Approach for the Development of Aerial Robotic Systems: The Aerostack Framework [online]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 88(2-4), S. 683-709. ISSN 0921-0296. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10846-017-0551-4
- [109] MOLINA, M., R.A. SUAREZ-FERNANDEZ, C. SAMPEDRO, J.L. SANCHEZ-LOPEZ und P. CAMPOY. TML: a language to specify aerial robotic missions for the framework Aerostack [online]. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2017, 10(4), S. 491-512. ISSN 1756-378X. Verfügbar unter: doi:10.1108/IJICC-03-2017-0025
- [110] SAMPEDRO, C., H. BAVLE, J.L. SANCHEZ-LOPEZ, R.A.S. FERNANDEZ, A. RODRIGUEZ-RAMOS, M. MOLINA und P. CAMPOY. A flexible and dynamic mission planning architecture for UAV swarm coordination. In: *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*: IEEE, 7. Juni 2016 - 10. Juni 2016, S. 355-363. ISBN 978-1-4673-9334-8
- [111] PINTO, M.F., L.M. HONÓRIO, A.L.M. MARCATO, M.A.R. DANTAS, A.G. MELO, M. CAPRETZ und C. URDIALES. ARCoG: An Aerial Robotics Cognitive Architecture [online]. *Robotica*, 2020, 143, S. 1-20. ISSN 0263-5747. Verfügbar unter: doi:10.1017/S0263574720000521
- [112] BESADA, J.A., A.M. BERNARDOS, L. BERGESIO, D. VAQUERO, I. CAMPANA und J.R. CASAR. Drones-as-a-service: A manage-

- ment architecture to provide mission planning, resource brokerage and operation support for fleets of drones. In: *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*: IEEE, 11. März 2019 - 15. März 2019, S. 931-936. ISBN 978-1-5386-9151-9
- [113] INSAURRALDE, C.C. Service-oriented agent architecture for unmanned air vehicles. In: *2014 IEEE/AIAA 33rd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*: IEEE, 5. Oktober 2014 - 9. Oktober 2014, 8B1-1-8B1-14. ISBN 978-1-4799-5001-0
- [114] HONG, C. und D. SHI. A Cloud-based Control System Architecture for Multi-UAV. In: UNKNOWN, Hg. *Proceedings of the 3rd International Conference on Robotics, Control and Automation - ICRC '18*. New York, New York, USA: ACM Press, 2018, S. 25-30. ISBN 9781450365307
- [115] KOUBÃA, A., B. QURESHI, M.-F. SRITI, A. ALLOUCH, Y. JAVED, M. ALAJLAN, O. CHEIKHROUHOU, M. KHALGUI und E. TOVAR. Dronemap Planner: A service-oriented cloud-based management system for the Internet-of-Drones [online]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 86, S. 46-62. ISSN 15708705. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.adhoc.2018.09.013
- [116] MEHROOZ, G., E. EBEID und P. SCHNEIDER-KAMP. System Design of an Open-Source Cloud-Based Framework for Internet of Drones Application. In: *2019 22nd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*: IEEE, 28. August 2019 - 30. August 2019, S. 572-579. ISBN 978-1-7281-2862-7
- [117] PRIMATESTA, S., N. BLOISE, R. ANTONINI, G.P. FICI, M. GASPARDONE, G. GUGLIERI und A. RIZZO. A Cloud-based Framework for Intelligent Navigation and Coordination for UASs in Urban Areas. In: *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*: IEEE, 11. Juni 2019 - 14. Juni 2019, S. 1224-1233. ISBN 978-1-7281-0333-4
- [118] SELECKY, M., M. ROLLO, P. LOSIEWICZ, J. READE und N. MAIDA. Framework for incremental development of complex unmanned aircraft systems. In: *2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*: IEEE, 21. April 2015 - 23. April 2015, J3-1-J3-9. ISBN 978-1-4799-8952-2

- [119] KHOSIAWAN, Y. und I. NIELSEN. A system of UAV application in indoor environment [online]. *Production & Manufacturing Research*, 2016, 4(1), S. 2-22. Verfügbar unter: doi:10.1080/21693277.2016.1195304
- [120] PEREZ-GRAU, F.J., J.R. MARTINEZ-DE DIOS, J.L. PANEQUE, J.J. ACEVEDO, A. TORRES-GONZÁLEZ, A. VIGURIA, J.R. ASTORGA und A. OLLERO. Introducing autonomous aerial robots in industrial manufacturing [online]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 60(2), S. 312-324. ISSN 02786125. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmsy.2021.06.008
- [121] PEDERSEN, M.R., L. NALPANTIDIS, R.S. ANDERSEN, C. SCHOU, S. BØGH, V. KRÜGER und O. MADSEN. Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment [online]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 37(3-4), S. 282-291. ISSN 07365845. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.rcim.2015.04.002
- [122] SCHOLZ, M. *Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten*, 2019. ISBN 978-3-96147-238-3
- [123] VOGEL-HEUSER, B., T. BAUERNHANSL und M. ten HOMPEL. *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-53247-8
- [124] GONG, M.X., B. HART und S. MAO. Advanced Wireless LAN Technologies [online]. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 2015, 18(4), S. 48-52. ISSN 2375-0529. Verfügbar unter: doi:10.1145/2721914.2721933
- [125] WELLNITZ, O. und L. WOLF. On latency in IEEE 802.11-based wireless ad-hoc networks. In: *IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2010*: IEEE, 5. Mai 2010 - 7. Mai 2010, S. 261-266. ISBN 978-1-4244-6855-3
- [126] GUPTA, A. und R.K. JHA. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies [online]. *IEEE Access*, 2015, 3, S. 1206-1232. Verfügbar unter: doi:10.1109/ACCESS.2015.2461602
- [127] EICHLER, S. Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard. In: *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*: IEEE, 30. September 2007 - 3. Oktober 2007, S. 2199-2203. ISBN 978-1-4244-0263-2

- [128] RAHMAN, M.A. Enabling drone communications with WiMAX Technology. In: *IISA 2014, The 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*: IEEE, 7. Juli 2014 - 9. Juli 2014, S. 323-328. ISBN 978-1-4799-6171-9
- [129] BISHOP, C.M. *Pattern recognition and machine learning*. Corrected at 8th printing 2009. New York, NY: Springer, 2009. Information science and statistics. ISBN 978-0387310732
- [130] ABBAS, S.M., S. ASLAM, K. BERNIS und A. MUHAMMAD. Analysis and Improvements in AprilTag Based State Estimation [online]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(24). Verfügbar unter: doi:10.3390/s19245480
- [131] MRAZ, E., J. RODINA und A. BABINEC. Using fiducial markers to improve localization of a drone. In: *2020 23rd International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR)*: IEEE, 15. Oktober 2020 - 17. Oktober 2020, S. 1-5. ISBN 978-1-6654-0479-2
- [132] KALMAN, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [online]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1), S. 35-45. ISSN 0021-9223. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.3662552
- [133] ZARCHAN, P. und H. MUSOFF. *Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach, Fourth Edition*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2015. ISBN 978-1-62410-276-9
- [134] ANDERSON, B.D.O. *Optimal filtering*. Dover ed. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2005. Dover books on engineering. ISBN 0486439380
- [135] International Civil Aviation Organization (ICAO): Juli 2001, *Annex 11 to the Convention on International Civil Aviation - Air Traffic Services*
- [136] International Civil Aviation Organization (ICAO). Doc 9426-AN/924: 1984, *Air Traffic Services Planning Manual*
- [137] International Civil Aviation Organization (ICAO). Doc 4444: 2016, *Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management*

- [138] GUO, Q., Y. ZHU, Y. TANG, C. HOU, Y. HE, J. ZHUANG, Y. ZHENG und S. LUO. CFD simulation and experimental verification of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow of a quad-rotor agricultural UAV in hover [online]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 172(4), S. 105343. ISSN 01681699. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compag.2020.105343
- [139] WEN, S., J. HAN, Z. NING, Y. LAN, X. YIN, J. ZHANG und Y. GE. Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad-rotor drone wake at different flight speeds [online]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 166(21), S. 105036. ISSN 01681699. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compag.2019.105036
- [140] ZHENG, Y., S. YANG, X. LIU, J. WANG, T. NORTON, J. CHEN und Y. TAN. The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV [online]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2018, 0(0), S. 0. ISSN 2095-7505. Verfügbar unter: doi:10.15302/J-FASE-2018216
- [141] NOORUDDIN, F.S. und G. TURK. Simplification and repair of polygonal models using volumetric techniques [online]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2003, 9(2), S. 191-205. ISSN 1077-2626. Verfügbar unter: doi:10.1109/TVCG.2003.1196006
- [142] MIN, P. *Binvox - A 3D mesh voxelizer* [online], 2020. 19 Juni 2020 [Zugriff am: 30. Spetember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.patrickmin.com/binvox/>
- [143] ROS.ORG. *costmap_2d* [online], 2021 [Zugriff am: 10. Mai 2021]. Verfügbar unter: http://wiki.ros.org/costmap_2d#Inflation
- [144] SOILLE, P. *Morphological Image Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. ISBN 978-3-642-07696-1
- [145] DIESTEL, R. *Graphentheorie*. 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2000. Springer-Lehrbuch. ISBN 3-540-67656-2
- [146] FOURLAS, G.K. und G.C. KARRAS. A Survey on Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Methods for Unmanned Aerial Vehicles [online]. *Machines*, 2021, 9(9), S. 197. Verfügbar unter: doi:10.3390/machines9090197
- [147] European Commission. (EU) 2019/947: 12. März 2019, *COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/945 of 12 March 2019*

- on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems*: Official Journal of the European Union
- [148] European Commission. (EU) 2019/947: 24. Mai 2019, *COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft*: Official Journal of the European Union
- [149] BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES. *Leitfaden für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG*. Auflage 2.2, Oktober 2019
- [150] European Commission. 2006/42/EG: 17. Mai 2006, *DIRECTIVE 2006/42/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast)*: Official Journal of the European Union
- [151] DIN EN ISO 12100:2011-03: März 2011, *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010)*; Deutsche Fassung EN ISO 12100:2010
- [152] OPPENHEIM, A.V., A.V. OPPENHEIM und R.W. SCHAFER. *Discrete-time signal processing*. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice-Hall International, 1989. Prentice Hall signal processing series. ISBN 9780132167710
- [153] GRÖCHENIG, K. *Foundations of time-frequency analysis*. New York, NY: Springer Science + Business Media, 2001. Applied and numerical harmonic analysis. ISBN 978-1-4612-0003-1
- [154] HARRIS, F.J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform [online]. *Proceedings of the IEEE*, 1978, 66(1), S. 51-83. ISSN 0018-9219. Verfügbar unter: doi:10.1109/PROC.1978.10837
- [155] ALLEN, J.B. und L.R. RABINER. A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis [online]. *Proceedings of the IEEE*, 1977, 65(11), S. 1558-1564. ISSN 0018-9219. Verfügbar unter: doi:10.1109/PROC.1977.10770
- [156] ALLEN, J. Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete Fourier transform [online]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1977, 25(3), S. 235-238. ISSN 0096-3518. Verfügbar unter: doi:10.1109/TASSP.1977.1162950

- [157] MITRA, S.K. *Digital signal processing. A computer-based approach*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780077366766
- [158] MAJERNÍK, V. und L. RICHTEREK. Entropic uncertainty relations. *European Journal of Physics*, 1996, (18), S. 79-89
- [159] HEINZEL, G., A. RÜDIGER und R. SCHILLING. *Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows*, 2002
- [160] LATIF-SHABGAHI, G., A.J. HIRST und S. BENNETT. A novel family of weighted average voters for fault-tolerant computer control systems. In: *2003 European Control Conference (ECC)*: IEEE, 1. September 2003 - 4. September 2003, S. 642-646. ISBN 978-3-9524173-7-9
- [161] SINGAMSETTY, P. und S. PANCHUMARTHY. A Novel History based Weighted Voting Algorithm for Safety Critical Systems [online]. *Journal of Advances in Information Technology*, 2011, 2(3). ISSN 1798-2340. Verfügbar unter: doi:10.4304/jait.2.3.139-145
- [162] PERHINSCHI, M., M. NAPOLITANO, G. CAMPA, H. BURKE, R. LARSON, J. BURKEN und M. FRAVOLINI. Design and Testing of a Safety Monitor Scheme on the NASA Gen_2 IFCS F-15 Flight Simulator. In: *AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 09202004. ISBN 978-1-62410-080-2
- [163] HEDDERICH, J. und L. SACHS. *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R*. 16., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Germany: Springer Spektrum, 2018. ISBN 978-3-662-56656-5
- [164] GANGSAR, P. und R. TIWARI. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review [online]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 144(4), S. 106908. ISSN 08883270. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ymsp.2020.106908
- [165] FROSINI, L. Novel Diagnostic Techniques for Rotating Electrical Machines—A Review [online]. *Energies*, 2020, 13(19), S. 5066. Verfügbar unter: doi:10.3390/en13195066
- [166] WOJCIECHOWSKA, A., J. FREY, S. SASS, R. SHAFIR und J.R. CAUCHARD. Collocated Human-Drone Interaction: Methodology and Approach Strategy. In: *2019 14th ACM/IEEE International*

- Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*: IEEE, 11. März 2019 - 14. März 2019, S. 172-181. ISBN 978-1-5386-8555-6
- [167] SUN, Y., W. ZUO, P. YUN, H. WANG und M. LIU. FuseSeg: Semantic Segmentation of Urban Scenes Based on RGB and Thermal Data Fusion [online]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021, 18(3), S. 1000-1011. ISSN 1545-5955. Verfügbar unter: doi:10.1109/TASE.2020.2993143
- [168] HAZIRBAS, C., L. MA, C. DOMOKOS und D. CREMERS. FuseNet: Incorporating Depth into Semantic Segmentation via Fusion-Based CNN Architecture. In: S.-H. LAI, V. LEPETIT, K. NISHINO und Y. SATO, Hg. *Computer Vision – ACCV 2016*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 213-228. ISBN 978-3-319-54180-8
- [169] LIU, H., R.A. RIVERA SOTO, F. XIAO und Y. JAE LEE. Yo-lactEdge: Real-time Instance Segmentation on the Edge. In: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: IEEE, 30. Mai 2021 - 5. Juni 2021, S. 9579-9585. ISBN 978-1-7281-9077-8
- [170] BOLYA, D., C. ZHOU, F. XIAO und Y.J. LEE. YOLACT: Real-Time Instance Segmentation. In: *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*: IEEE, 27. Oktober 2019 - 2. November 2019, S. 9156-9165. ISBN 978-1-7281-4803-8
- [171] CHEN, Y., Y. TIAN und M. HE. Monocular human pose estimation: A survey of deep learning-based methods [online]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2020, 192, S. 102897. ISSN 10773142. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cviu.2019.102897
- [172] DANG, Q., J. YIN, B. WANG und W. ZHENG. Deep learning based 2D human pose estimation: A survey [online]. *Tsinghua Science and Technology*, 2019, 24(6), S. 663-676. Verfügbar unter: doi:10.26599/TST.2018.9010100
- [173] CAO, Z., G. HIDALGO, T. SIMON, S.-E. WEI und Y. SHEIKH. OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields [online]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2021, 43(1), S. 172-186. Verfügbar unter: doi:10.1109/TPAMI.2019.2929257
- [174] QUIGLEY, M., B. GERKEY, K. CONLEY, J. FAUSTY, T. FOOTEY, J. LEIBSZ, E. BERGERY, R. WHEELERY und A. NG.

- ROS: an open-source Robot Operating System. *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009, 2009
- [175] KINEXON GMBH. *UWB-Technologie* [online], 2021 [Zugriff am: 26. Juni 2021]. Verfügbar unter: <https://kinexon.com/de/uwb-technologie>
- [176] KINEXON GMBH. *Industrielles IoT - Echtzeit-Lokalisierung (RTLS)* [online], 2021 [Zugriff am: 26. Juni 2021]. Verfügbar unter: <https://kinexon.com/de/technologie/echtzeit-lokalisierung-rtls>
- [177] RUSU, R.B. und S. COUSINS. 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation: IEEE*, 9. Mai 2011 - 13. Mai 2011, S. 1-4. ISBN 978-1-61284-386-5
- [178] KOUBAA, A., A. ALLOUCH, M. ALAJLAN, Y. JAVED, A. BELGHITH und M. KHALGUI. Micro Air Vehicle Link (MAVlink) in a Nutshell: A Survey [online]. *IEEE Access*, 2019, 7, S. 87658-87680. Verfügbar unter: doi:10.1109/ACCESS.2019.2924410
- [179] DRONECODE PROJECT, I. *MAVLink - Micro Air Vehicle Communication Protocol* [online] [Zugriff am: 24. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://mavlink.io/en/>
- [180] VLADIMIR ERMAKOV. *MAVROS -- MAVLink extendable communication node for ROS with proxy for Ground Control Station*. [online], 2021 [Zugriff am: 30. November 2021]. Verfügbar unter: <http://wiki.ros.org/mavros>
- [181] GUENNEBAUD, G. und B. JACOB. *Eigen v3* [online]. *C++ template library for linear algebra: matrices, vectors, numerical solvers, and related algorithms*, 2010 [Zugriff am: 30. November 2021]. Verfügbar unter: <https://eigen.tuxfamily.org>
- [182] TORIS, R., J. KAMMERL, D.V. LU, J. LEE, O.C. JENKINS, S. OSENTOSKI, M. WILLS und S. CHERNOVA. Robot Web Tools: Efficient messaging for cloud robotics. In: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): IEEE*, 28. September 2015 - 2. Oktober 2015, S. 4530-4537. ISBN 978-1-4799-9994-1
- [183] MARTIN BISCHOFF. *ROS#* [online], 2021 [Zugriff am: 30. November 2021]. Verfügbar unter: <https://github.com/siemens/ros-sharp/releases/tag/v1.5>

- [184] PERAHIA, E. und M.X. GONG. Gigabit wireless LANs [online]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2011, 15(3), S. 23-33. ISSN 1559-1662. Verfügbar unter: doi:10.1145/2073290.2073294
- [185] DIGI INTERNATIONAL INC. *Digi XBee 3 Zigbee 3 RF Module* [online], 2021 [Zugriff am: 30. November 2021]. Verfügbar unter: <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/2-4-ghz-rf-modules/xbee3-zigbee-3>
- [186] KOENIG, N. und A. HOWARD. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In: *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*: IEEE, 28 Sept.-2 Oct., 2004, S. 2149-2154. ISBN 0-7803-8463-6
- [187] SOKOLOVA, M. und G. LAPALME. A systematic analysis of performance measures for classification tasks [online]. *Information Processing & Management*, 2009, 45(4), S. 427-437. ISSN 03064573. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ipm.2009.03.002
- [188] KRÜGER, F. *Activity, context, and plan recognition with computational causal behavior models*: Universität Rostock, 2018
- [189] LuftVO, *Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1766) geändert worden ist*: Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz
- [190] PARK, J., J. KIM, I. JANG und H.J. KIM. Efficient Multi-Agent Trajectory Planning with Feasibility Guarantee using Relative Bernstein Polynomial. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: IEEE, 31. Mai 2020 - 31. August 2020, S. 434-440. ISBN 978-1-7281-7395-5

Verzeichnis promotionsbezogener eigener Publikationen

- [P1] FRIEDRICH, J., M. LIERET, L. REICH-ROHRWIG, A. SEEL und W. USLAR. *UAS im Indoorbereich* [online]. *Rechtliche und technische Einführung in die Nutzung von Indoor-UAS*, 2020. November 2020 [Zugriff am: 25. Juni 2021]. Verfügbar unter: <http://ids.vdma.org/downloads>
- [P2] FRIEDRICH, J. und M. LIERET. *Drone Readiness Analyse* [online], 2021. März 2021 [Zugriff am: 24. Juni 2021]. Verfügbar unter: <https://ids.vdma.org/downloads>
- [P3] LIERET, M., V. KOGAN, S. DOLL und J. FRANKE. Automated in-house transportation of small load carriers with autonomous unmanned aerial vehicles. In: *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*: IEEE, 22. August 2019 - 26. August 2019, S. 1010-1015. ISBN 978-1-7281-0356-3
- [P4] LIERET, M., M. LALLINGER, M. TAUSCHER und J. FRANKE. Localization and grasping of small load carriers with autonomous unmanned aerial vehicles. In: T. SCHÜPPSTUHL, K. TRACHT und D. HENRICH, Hg. *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 241-250. ISBN 978-3-662-61754-0
- [P5] LIERET, M., B. KREIS, C. HOFMANN, M. ZWINGEL und J. FRANKE. Aerial Grasping and Transport Using an Unmanned Aircraft (UA) Equipped with an Industrial Suction Gripper. In: T. SCHÜPPSTUHL, K. TRACHT und A. RAATZ, Hg. *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*. Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 89-99. ISBN 978-3-030-74031-3
- [P6] LIERET, M., M. KALENBERG, C. HOFMANN und J. FRANKE. Environment representation and path planning for unmanned aircraft in industrial indoor applications [online]. *Procedia Manufacturing*, 2021, 55(2), S. 176-182. ISSN 23519789. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.promfg.2021.10.025](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.025)
- [P7] LIERET, M., V. KOGAN, C. HOFMANN und J. FRANKE. Automated Exploration, Capture And Photogrammetric Reconstruction Of Interiors Using An Autonomous Unmanned Aircraft. In:

- 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*: IEEE, 8. August 2021 - 11. August 2021, S. 301-306. ISBN 978-1-6654-4101-8
- [P8] LIERET, M., J. FERTSCH und J. FRANKE. Fault detection for autonomous multirotors using a redundant flight control architecture. In: *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*: IEEE, 20. August 2020 - 21. August 2020, S. 29-34. ISBN 978-1-7281-6904-0
- [P9] KEDILIOGLU, O., M. LIERET, J. SCHOTTENHAMML, T. WÜRFL, A. BLANK, A. MAIER und J. FRANKE. RGB-D-based Human Detection and Segmentation for Mobile Robot Navigation in Industrial Environments. In: *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 8. Februar 2021 - 10. Februar 2021, S. 219-226. ISBN 978-989-758-488-6
- [P10] LIERET, M., M. HÜBNER, C. HOFMANN und J. FRANKE. Human Detection and Gesture Recognition for the Navigation of Unmanned Aircraft. In: *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 6. Februar 2022 - 8. Februar 2022, S. 831-838. ISBN 978-989-758-555-5
- [P11] LIERET, M., J. LUKAS, M. NIKOL und J. FRANKE. A lightweight, low-cost and self-diagnosing mechatronic jaw gripper for the aerial picking with unmanned aerial vehicles [online]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 51, S. 424-430. ISSN 23519789. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.promfg.2020.10.060
- [P12] LIERET, M., F. WURMER, C. HOFMANN und J. FRANKE. An overhead docking and charging station for autonomous unmanned aircraft. In: *2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*: IEEE, 23. August 2021 - 27. August 2021, S. 1358-1363. ISBN 978-1-6654-1873-7

- [P13] HOFMANN, C., M. FICHTNER, M. LIERET und J. FRANKE. Efficient Semantic Mapping in Dynamic Environments. In: *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 6. Februar 2022 - 8. Februar 2022, S. 803-810. ISBN 978-989-758-555-5

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] BETZ, M. *Entwicklung und Umsetzung einer barcodebasierten Objektidentifikation und -lokalisierung zur Durchführung von Lagerinventuren mit autonomen Multikoptern*. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S2] DONG, Y. *Evaluierung und Implementierung von Methoden zur visuellen Positions- und Bewegungsschätzung für autonome Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S3] HOANG, K. *Definition und Evaluation von Einsatzszenarien für autonome Flugroboter in Produktion und Logistik*. Projektarbeit. Erlangen, 2019
- [S4] JAGFELD, S. *Entwicklung und Umsetzung einer ultrabreitbandbasierten Orientierungsberechnung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S5] KOGAN, V. *Inbetriebnahme und Evaluation eines Ultrabreitband-Ortungssystems für die Positionserfassung autonomer Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S6] KREIS, B. *Entwicklung und Umsetzung einer optischen Objektidentifikation und -lokalisierung sowie einer autonomen Aufnahme der Objekte mittels Flugrobotern*. Masterarbeit. Erlangen, 2020
- [S7] LALLINGER, M. *Entwicklung einer Positionsbestimmung und Landeplatzerkennung für autonome Flugroboter mittels optischer Referenzmarken*. Projektarbeit. Erlangen, 2018
- [S8] LALLINGER, M. *Entwicklung und Umsetzung einer optischen Erkennung von standardisierten Transportboxen und zugehörigen Ablageflächen für den Warentransport mittels autonomer Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S9] SILLER, C. *Entwicklung und Umsetzung einer Software zur dynamischen Trajektorienberechnung für Multicopter im Inneneinsatz*. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S10] STADELMAIER, M. *Spezifikation und Implementierung eines Zustandsautomaten zur Realisierung eines autonomen Flugroboters*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020

- [S11] STRAUßBERGER, S. *Entwicklung und Umsetzung einer markenbasierten optischen Lokalisierung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020
- [S12] TANKOUA, J.T. *Modellierung und Implementierung einer Zustandsschätzung für nichtlineare Systeme am Beispiel eines Quadropters*. Masterarbeit. Erlangen, 2020
- [S13] WANG, X. *Entwicklung und Umsetzung einer markenbasierten optischen Lokalisierung für autonome Flugroboter*. Projektarbeit. Erlangen, 2020
- [S14] DIPPEL, J. *Evaluation von 3D-Pfadplanungsalgorithmen für den Einsatz von autonomen Flugrobotern in dynamischen Umgebungen*. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S15] ECK, S. *Entwicklung und Implementierung eines optimierten Pfadplanungsalgorithmus für autonome Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2020
- [S16] KALENBERG, M. *Entwicklung und Implementierung einer dreidimensionalen Bahnplanung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S17] KOGAN, V. *Konzeptionierung und Umsetzung einer robusten, sensorgestützten Navigations- und Kartographierungslösung für autonome Flugroboter in unbekanntem Umgebungen*. Masterarbeit. Erlangen, 2021
- [S18] MUHL, A. *Entwicklung und Umsetzung einer tiefenkamerabasierten Kollisionsvermeidung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S19] NIU, K. *Weiterentwicklung einer Pfadplanung für autonome Flugroboter im Indoor-Einsatz*. Projektarbeit. Erlangen, 2019
- [S20] SCHALLER, S. *Quantitativer Vergleich und Bewertung von lokalen und globalen Pfadplanungsverfahren für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020
- [S21] SIMACEK, P. *Entwicklung und Implementierung einer dreidimensionalen Bahnplanung für autonome Flugroboter*. Projektarbeit. Erlangen, 2018
- [S22] TCHASSE, H.D.P. *Entwicklung und Umsetzung einer Kollisionsvermeidung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019

- [S23] WANG, D. *Konzeptionierung und Umsetzung eines Frameworks zur dreidimensionalen Routenplanung einer Flotte autonomer Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2020
- [S24] BERLITZ, J. *Entwicklung und Umsetzung einer Stellsignalanalyse und dreifach redundanten Motoransteuerung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020
- [S25] CELIK, M.O. *Umsetzung einer redundanten Motoransteuerung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S26] FERTSCH, J. *Entwicklung und Umsetzung eines dreifach redundanten Flugsteuerungssystems für autonomer Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S27] HÜBNER, M. *Personen- und Intentionserkennung mittels maschineller Lernverfahren und Ableitung von geeigneten Verhaltensstrategien für autonome Flugrobotern im industriellen Umfeld*. Masterarbeit. Erlangen, 2021
- [S28] LEURER, S. *Entwicklung und Umsetzung einer Stellsignalanalyse und redundanten Motoransteuerung für autonome Flugroboter*. Projektarbeit. Erlangen, 2018
- [S29] PERSSON, L.E. *Autonome Flugroboter - Definition der Gefährdungspotentiale und Entwicklung von Möglichkeiten zu deren Reduktion*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S30] SCHALLING, J. *Entwicklung und Umsetzung einer Analyse zum Einfluss einer reduzierten Leistung des Antriebsstrangs von Multikoptern*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020
- [S31] ZHENG, H. *Simulative Analyse der Schallemission eines Hexacopters und Ableitung von Maßnahmen zur deren Reduktion*. Projektarbeit. Erlangen, 2018
- [S32] ZHENG, H. *Entwicklung und Umsetzung von Schallschutzmaßnahmen für einen autonomen Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S33] BIENDARRA, V. *Konzeptionierung und Umsetzung einer Ladestation für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2021
- [S34] DÖLL, S. *Entwicklung und Umsetzung eines Multicopters für den autonomen Transport standardisierter Güter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018

- [S35] DÖLL, S. *Interaktion von Flugrobotern mit der Umwelt: Konzeptionierung und Umsetzung eines Systems zum vertikalen Andocken sowie einer Lösung zur automatisierten Sensorplatzierung*. Masterarbeit. Erlangen, 2021
- [S36] FLEISCHMANN, A. *Entwicklung und Umsetzung einer modellbasierten Optimalregelung für autonome Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2020
- [S37] HARING, C. *Development and evaluation of a cloud-based machine learning approach for alphanumeric label reading in favor of autonomous aerial vehicle organized stocktaking systems*
- [S38] HAUSMANN, J. *Entwicklung und Umsetzung einer drahtlosen Ladestation für autonome Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S39] HÜBNER, M. *Entwurf, Implementierung und Evaluierung eines webbasierten Benutzerinterfaces zur Kontrolle einer Flotte autonomer Flugroboter*. Projektarbeit. Erlangen, 2020
- [S40] JANISCH, L. *Konzeptionierung und Implementierung eines optischen Inventurverfahrens für palettierte Kartonagen mittels autonomer Flugroboter und unter Verwendung von maschinellen Lernverfahren*. Projektarbeit. Erlangen, 2020
- [S41] LI, B. *Entwicklung und Umsetzung einer modellbasierten Zustandsregelung für autonome Flugroboter*. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S42] LUKAS, J. *Entwicklung und Umsetzung von Greifvorrichtungen zur Aufnahme und Manipulation von Objekten mit autonomen Flugrobotern*. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S43] MESTIRI, M.A. *Integration eines PID-Positionsreglers in eine bestehende Flugsteuerung für autonome Flugroboter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S44] MÜCK, P. *Entwicklung und Realisierung eines mechatronischen Containers zum Transport von Schüttgut mit autonomen Flugrobotern*. Projektarbeit. Erlangen, 2019
- [S45] NIKOL, M. *Entwicklung und Umsetzung einer sensorgestützten Steuerung für einen Backengreifer und einen dreiachsigen Leichtbauroboterarm*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019

- [S46] OLSZOWY, J. *Integration einer Mess- und Kommunikationslösung in ein bestehendes System zur induktiv resonanten Energieübertragung*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020
- [S47] TAUSCHER, M. *Design, Auslegung und Evaluation eines gewichtsoptimierten Multikopterrahmens unter Einsatz von Strukturleichtbau und Topologieoptimierung*. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S48] VECERA, B., M. LIERET und J. FRANKE. *Konzeptionierung und Entwicklung einer Schwerlastdrohne für den flexiblen Warentransport in Außenbereichen*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S49] WURMER, F. *Konzeptionierung und Umsetzung eines flurfreien Lade- und Haltesystems zum vertikalen Andocken von Multicoptern*. Projektarbeit. Erlangen, 2021
- [S50] XIAO, Y. *Vergleich und Bewertung existierender Ladetechnologien und konzeptuelle Entwicklung einer Ladeplattform für autonome Multicopter*. Projektarbeit. Erlangen, 2019

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2023):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hergestoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme

FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampfackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöllner

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

- Band 306: Sebastian Suttner**
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.
- Band 307: Bhargav Potdar**
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.
- Band 308: Maria Löffler**
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.
- Band 309: Martin Müller**
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.
- Band 310: Christopher Kästle**
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.
- Band 311: Daniel Vipavc**
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.
- Band 312: Christina Ramer**
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.
- Band 313: Miriam Rauer**
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.
- Band 314: Felix Tenner**
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.
- Band 315: Aarief Syed-Khaja**
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.
- Band 316: Adam Schaub**
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.
- Band 317: Daniel Gröbel**
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.
- Band 318: Philipp Hildenbrand**
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.
- Band 319: Tobias Konrad**
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.
- Band 320: David Meinel**
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.
- Band 321: Andrea Zimmermann**
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.
- Band 322: Christoph Amann**
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.
- Band 323: Jennifer Tenner**
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.
- Band 324: Susan Zöllner**
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.
- Band 325: Stefan Lutz**
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.
- Band 326: Tobias Gnibl**
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-
system für den Einsatz im Produk-
tions- und Logistikumfeld

FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder,
7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-668-8.

Abstract

Due to their three-dimensional movement space, unmanned aerial vehicles offer high application potential for the automated performance of inventory, inspection and measurement processes. Moreover, they can also make in-house and cross-plant transport processes more flexible and take over urgent transport orders. However, currently available unmanned aerial vehicle systems do not meet the requirements and conditions applicable to industrial environments. In addition, current unmanned aerial vehicles system do not operate autonomously because central aspects such as the collision-free three-dimensional navigation in production environments and the necessary safety functions are not provided for.

Therefore, the overall research topic of this dissertation thesis is the investigation of an autonomous aerial robot system (AFRS) for use in manufacturing and logistics environments that is no longer subject to the limitations of existing systems. For this purpose, the first research focus of this thesis is the conceptual design of an overall system architecture that meets the requirements arising from industrial applications and provides the system components, capabilities and interfaces necessary for the realization of fully automated flight operations. In addition, methods for precise, task-adapted localization of autonomous flying robots (AFR) are researched and redundancy requirements are taken into account.

The second object of research is the development of a suitable airspace management and route planning system. Taking into account the three-dimensional workspace and the prevailing space conditions, the aim is to determine optimal flight paths for AFR under specified conditions and to reliably prevent collisions.

The third part of the dissertation addresses redundancy and safety requirements and the investigation and implementation of a comprehensive safety architecture for AFRS. The focus is on developing a method for predicting, detecting, and masking system failures. Furthermore, a method to detect persons near the AFR and to adjust the flight behaviour of the AFR in an appropriate way is presented.

Based on the findings of the specified research topics, an AFRS is implemented and evaluated using comprehensive simulations as well as flight tests in the laboratory environment and under real application scenarios. The evaluation results validate the theoretical research subjects and demonstrate the performance of the developed AFRS.

Unbemannte Luftfahrzeuge bieten ein hohes Einsatzpotential für die automatisierte Durchführung von Inventur-, Inspektions- und Vermessungsprozessen und können Transportprozesse flexibilisieren. Der übergeordnete Forschungsgegenstand dieser Dissertationsschrift ist daher die Erforschung eines autonomen Flugrobotersystems (AFRS) für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld.

Hierfür wird zunächst eine Gesamtsystemarchitektur für ein AFRS vorgestellt, welche den aus dem industriellen Anwendungsfeld entstehenden Anforderungen gerecht wird und die zur Realisierung eines vollautomatisierten Flugbetriebs notwendigen Systemkomponenten, Fähigkeiten und Schnittstellen bietet. Zusätzlich werden Methoden zur präzisen, aufgabenangepassten Lokalisierung der autonomen Flugroboter (AFR) erforscht und Redundanzanforderungen berücksichtigt.

Den zweiten Forschungsgegenstand bildet die Entwicklung eines geeigneten Luftraummanagement- und Routenplanungssystems. Unter Berücksichtigung des dreidimensionalen Arbeitsraums und der vorherrschenden Platzverhältnisse sollen dabei unter vorgegebenen Bedingungen optimale Flugpfade für die AFR bestimmt und gleichzeitig Kollisionen während des fehlerfreien Flugs zuverlässig ausgeschlossen werden.

Der dritte Teil der vorliegenden Arbeit umfasst die Erforschung und Umsetzung einer umfassenden Sicherheitsarchitektur für den Einsatz von AFR unter Berücksichtigung von Redundanz- und Sicherheitsanforderungen. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung einer Methode zur Prädiktion, Erkennung und Maskierung von Systemfehlern. Weiterhin wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, während des Flugs Personen im Umfeld der AFR zu erkennen und das Flugverhalten der AFR in geeigneter Weise anzupassen. Abschließend wird ein leistungsfähiges AFRS umgesetzt und dieses anhand von umfassenden Simulationen sowie von Flugversuchen im Laborumfeld und unter realen Anwendungsbedingungen evaluiert. Die Evaluationsergebnisse validieren die theoretischen Forschungsinhalte und demonstrieren die Leistungsfähigkeit des erforschten AFRS.

