

Schlussbericht

ANKommEn

Automatische **N**avigation und **K**ommunikation
zur **E**xploration

FKZ 50 NA 1518
(Teilprojekt TU Braunschweig)

Laufzeit des Vorhabens:
01.05.2015 – 15.02.2018

August 2018

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Braunschweig
Universitätsplatz 2
38106 Braunschweig

Ausführende Stelle: Technische Universität Braunschweig
Institut für Flugführung
Hermann-Blenk-Str. 27
D-38108 Braunschweig

Dieser Schlussbericht wurde entsprechend den Gliederungsrichtlinien des DLR erstellt. Zuwendungsempfänger ist die Technische Universität Braunschweig (Teilprojekt TU BS, FKZ 50NA1518). Die Projektleitung des Teilprojektes TU Braunschweig und des Verbundvorhabens erfolgte durch Prof. Dr.-Ing. Hecker, die technische Leitung durch Dipl.-Ing. Martin Becker.

Die beschriebenen Ergebnisse (Abschnitt 6) umfassen die durchgeführten Tätigkeiten des Verbundvorhabens ANKommEn, bestehend aus den gleichnamigen Teilprojekten an der Technischen Universität Braunschweig (FKZ 50NA1518) und der AirRobot GmbH & Co. KG (FKZ 50NA1519). Dieses erfolgt, um eine zusammenhängende Darstellung des entwickelten und aufgebauten Gesamtsystems zu erreichen, da die Tätigkeiten in vielen Bereichen zwischen den Verbundpartnern verzahnt durchgeführt wurden.

Die Beschreibung der erzielten Ergebnisse in Abschnitt 6 wurde von folgenden Mitarbeitern erstellt:

Technische Universität Braunschweig:

- Dipl.-Ing. Martin Becker, Institut für Flugführung
- Dipl.-Ing. Simon Batzdorfer, Institut für Flugführung
- M. Sc. Markus Bobbe, Institut für Flugführung
- Dipl.-Ing. Jan Schattenberg, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
- Dipl.-Ing. Hannes Harms, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
- M. Sc. Julian Schmiemann, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

AirRobot GmbH & Co. KG:

- Dipl.-Ing.(FH) Thomas Linkugel M.Eng.
- M. Sc. Ralf Süß
- Dipl.-Ing. (FH) Rainer Eichhorn

Beteiligte Institute und Ansprechpartner an der TU Braunschweig:

Institut für Flugführung (IFF)

Hermann-Blenk-Str. 27
38108 Braunschweig

Dipl.-Ing. Martin Becker
Tel. 0531 391-9842
Fax 0531 391-9804
m.becker@tu-braunschweig.de

Institut für mobile Maschinen
und Nutzfahrzeuge (IMN)
Langer Kamp 19a
38106 Braunschweig

Dipl.-Ing. Jan Schattenberg
Tel. 0531 391-7192
Fax 0531 391-5951
j.schattenberg@tu-braunschweig.de

Inhaltsverzeichnis

1	<u>AUFGABENSTELLUNG</u>	5
1.1	POSITIONIERUNG	6
1.2	KOMMUNIKATION	6
1.3	MAPPING	7
1.4	FÜHRUNG & HMI	7
1.5	DEMONSTRATOR	8
2	<u>VORAUSSETZUNGEN UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE</u>	8
3	<u>PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS</u>	9
4	<u>WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEM ANGEKNÜPFT WURDE</u>	12
5	<u>ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN</u>	15
6	<u>ERZIELTE ERGEBNISSE</u>	16
6.1	SZENARIO UND SYSTEM	16
6.1.1	FEUERWEHR – ANFORDERUNGEN UND SZENARIEN	16
6.1.2	KÜSTENSCHUTZ – ANFORDERUNGEN UND SZENARIEN	17
6.1.3	SYSTEMKONZEPTIONIERUNG	19
6.1.4	TESTGELÄNDE	21
6.2	POSITIONIERUNG UND LAGEBESTIMMUNG	26
6.2.1	ARCHITEKTUR	26
6.2.1.1	Sensorauswahl	27
6.2.2	GNSS MULTICONSTELLATION	27
6.2.2.1	Evaluation Multiconstellation	30
6.2.3	GPS TRÄGERPHASENAUSWERTUNG IM TEAM	33
6.2.4	FUSION VON INS/GNSS MIT WEITEREN SENSOREN	38
6.2.5	GNSS POSITION & LAGE FÜR UAV-STEUERUNG	41
6.2.5.1	Einführung RTK	41
6.2.5.2	Komponenten und Testkonfiguration	41
6.2.5.3	Protokollauswahl	43
6.2.5.4	Statische Tests mit mobiler Bodenplattform (relative Genauigkeit)	43
6.2.5.5	Dynamische Tests im Flug mit anschließendem Postprocessing	46
6.2.5.6	Flugsoftwareintegration	47
6.2.5.7	Fail-Safe-Funktionalität bei Sprung durch Wechseln der RTK-Lösung	48
6.2.5.8	Fazit der Evaluation	49
6.3	KOMMUNIKATION	51
6.3.1	KONZEPT & ARCHITEKTUR	51
6.3.2	NETZWERKAUFBAU, ROUTING & KOMMUNIKATIONSALGORITHMEN	51
6.3.3	KOMMUNIKATIONSMANAGER	53
6.3.3.1	Middleware Systeme	53
6.3.3.2	Kommunikationskonzept	54
6.3.4	DATENSTREAMING	57
6.3.4.1	HD-Videostrecke – Anwendungsfall und Anforderungen	60
6.3.4.2	Spezifikation der HD-Übertragungsstrecke	61
6.3.4.3	Konzepte und Evaluierung des Antennensystems	62
6.3.4.4	Implementierung und Schirmung im Gesamtsystem:	62
6.3.4.5	Dekodierung und Videodarstellung:	62
6.3.4.6	Bandbreiten- und Reichweitenuntersuchungen	63
6.3.4.7	Integration und Gesamtsystemtest	64
6.3.4.8	Zusammenfassung:	65

6.4 MAPPING	66
6.4.1 KAMERA-BASIERTES MAPPING.....	66
6.4.1.1 Kamera-Mappingkonzept.....	66
6.4.1.2 Kamera-basiertes Mapping – Verfahren	69
6.4.2 LiDAR-BASIERTES MAPPING	81
6.4.2.1 LiDAR-Mappingkonzept.....	81
6.4.2.2 LiDAR-basiertes Mapping – Verfahren	82
6.4.3 A PRIORI INFORMATIONEN	88
6.4.4 MERKMALSERKENNUNG	89
6.5 FÜHRUNG & HMI	93
6.5.1 USER-INTERFACE	93
6.5.2 MISSIONS- & PFADPLANUNG.....	96
6.5.3 MONITORING UAV/UGV SYSTEMZUSTAND.....	100
6.6 DEMONSTRATOR & VERIFIKATION	102
6.6.1 TRÄGERSYSTEME	102
6.6.1.1 UAV – AR200.....	102
6.6.1.2 UGV – Summit XL	105
6.6.2 PAYLOAD	106
6.6.2.1 Basis Nav/Com-Stack.....	106
6.6.2.2 modulare Sensorpayload (UAV).....	107
6.6.2.3 Sensorpayload UGV.....	109
6.6.3 BODENSTATION/LEITSTAND	110
6.6.4 FELDTTESTS & DEMONSTRATIONEN.....	112
6.6.5 FEEDBACK & FAZIT	118
<u>7 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES.....</u>	<u>119</u>
<u>8 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT.....</u>	<u>119</u>
<u>9 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN, VERWERTBARKEIT</u>	<u>119</u>
<u>10 BEKANNTGEWORDENER FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN.....</u>	<u>120</u>
<u>11 ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN</u>	<u>121</u>
11.1 VERÖFFENTLICHUNGEN DER TU BRAUNSCHWEIG.....	121
11.2 PRESSE UND BERICHTE	122
11.3 GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DER TU BRAUNSCHWEIG	123
<u>12 ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	<u>123</u>

1 Aufgabenstellung

Das Projekt ANKommEn soll ein System bestehend aus unterschiedlichen unbemannten Trägersystemen – sowohl fliegend als auch bodengebunden, ausgestattet mit unterschiedlicher optischer Sensorik – entwickeln, mit dem (teil-)automatisiert unbekannte Gebiete bzw. Szenerien erkundet werden können. Als Anwendungsszenarien dienen dabei Aufgaben aus dem Bereich des Hochwasser- bzw. Küstenschutz sowie Feuerwehreinsatzszenarien. Zu diesem Zweck werden als assoziierte Partner und potentielle Nutzer eines solchen Systems die Feuerwehr Braunschweig und der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) in das Vorhaben mit eingebunden. Neben den unbemannten Systemen (UAVs und UGVs) wird eine zentrale Bodenstation aufgebaut und in ein Gesamtsystem integriert. Diese dient als zentrales Nutzerinterface, zum einen zur Aufgaben- bzw. Missionsdefinition für die unbemannten Systeme sowie deren Überwachung und Kontrolle, zum anderen zur Visualisierung der Messdaten der optischen Sensoren zur Exploration (Mapping). Diese erfolgt, abhängig von der Sensorart bereits zur Missionslaufzeit und/oder zur detaillierteren Analyse im Nachgang einer Mission. Zentral für diese Funktionalitäten ist eine Übertragung der bildgebenden Messdaten sowie Maschinenposition und –status über zu entwickelnde Datenlinks mit zugehörigen Kommunikationsstrategien, um auch bei fehlender direkter Datenverbindung einer Maschine mit der Bodenstation einen Datenaustausch zu gewährleisten.

Automatisiertes Explorationssystem
zur Unterstützung von
Rettungskräften in
Katastrophenszenarien

Zentrale Lagebilddarstellung im
Leitstand zur Erhöhung des
Situationsbewusstseins



**Für den Nutzer steht die
Definition der Aufgabe bzw.
Mission im Vordergrund.**

Abbildung 1-1: Motivation ANKommEn

Zu diesem Zweck wird inhaltlich an dem Vorgängervorhaben NExtUAV (Navigation zur Exploration mit tieffliegenden UAV in Katastrophenszenarien, Teilprojekt TU Braunschweig, FKZ 50NA1003, [1]) angeknüpft. In diesem wurden durch die beteiligten Institute der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Flugführung (IFF) und Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN), bereits grundlegende Technologien zur Positionierung und Austausch dieser Daten in einem Schwarm entwickelt und untersucht, die im Rahmen von ANKommEn entsprechend weiterentwickelt und erweitert werden müssen.

Die entwickelten Technologien sollen in Abstimmung und unter Berücksichtigung der Anforderungen der assoziierten Partner in Demonstratoren umgesetzt und in Feldversuchen erprobt werden.

Technologisch liegt der Fokus auf der Nutzung von Satellitennavigationssystemen (GNSS), Inertialsensorik sowie bildgebenden Sensoren. Die einzusetzende Sensorik unterliegt dabei der Randbedingung, dass UAVs Einschränkungen hinsichtlich Nutzlastkapazität, Bauraum und Energieversorgung aufweisen. Dieses muss insbesondere bei der Auswahl von

Sensoriken zur Positionierung, Kommunikation und bildgebender Exploration entsprechend berücksichtigt werden.

Die Bearbeitung der im Folgenden erläuterten Themenfeldern erfolgte als Verbundvorhaben des Instituts für Flugführung (IFF) und Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) der Technischen Universität Braunschweig und der AirRobot GmbH & Co. KG aus Arnsberg. Darüber hinaus sind als assoziierte Partner die Feuerwehr Braunschweig und der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) in das Vorhaben eingebunden.

1.1 Positionierung

Eine zuverlässige und möglichst genaue Bestimmung der Position der eingesetzten UAV und UGV ist in mehrfacher Hinsicht essentiell für die Funktionalität eines Explorationssystems. Diese ist grundsätzlich für die gezielte Einsetzbarkeit unbemannter Systeme – unabhängig davon ob fliegend oder bodengebunden – notwendig. Nur so können Missionen z. B. in Form von definierten Trajektorien/Wegpunktlisten abgeflogen bzw. gefahren werden, sowie eine Überwachung einer laufenden Mission erfolgen. Darüber hinaus ist es für die eigentliche Aufgabe – der Erkundung mit bildgebender Sensorik – essentiell, diese Messdaten zu georeferenzieren. Es kann nur ein Mehrwert generiert werden, wenn der in den übertragenen Messdaten erkannte Eigenschaft oder Ereignis, zum Beispiel ein Feuer/Glutnest oder ein Deichbruch, eine Position zugeordnet ist und so durch Einsatzkräfte entsprechend gezielt weitere Maßnahmen eingeleitet werden können.

Dabei spielt neben einer ausreichenden absoluten Genauigkeit der Positionsinformation auch eine möglichst hohe Verfügbarkeit dieser, eine entscheidende Rolle. Bei einer GNSS-basierten Positionierung kann insbesondere durch Signalabschattungen die Verfügbarkeit stark eingeschränkt sein. Dieses ist besonders in urbanen Szenarien der Fall, verschärft bei dem Einsatz von bodengebundenen Trägersystemen (UGV). Zu diesem Zweck sollen für die GNSS-basierte Positionierung die Signale verschiedener GNSS Systeme (z. B. GPS, GLONAS, Galileo, Beidou) in sogenannten Multiconstellation-Verfahren kombiniert ausgewertet werden. Darüber hinaus sollen die optischen Sensoren, die zur Exploration auf den UAV bzw. UGV mitgeführt werden, auf ihre Eignung zur Bestimmung von Positionsinformationen untersucht werden. Diese sollen dann mit der INS/GNSS Positionierung und Lagebestimmung fusioniert werden. Im Bereich der Teampositionierung soll ausgehend vom codebasierten GPS-Ansatz des Vorhabens NExtUAV untersucht werden inwiefern GPS Phasenmessungen im Gesamtsystem ausgetauscht und zum Zwecke einer Genauigkeitssteigerung ausgewertet werden können.

Die Messaufgabe zur Exploration erfordert ebenfalls eine stabile Fluglage und exakte Positionierung des Flugsystems, die vom Verbundpartner AirRobot im Rahmen von ANKommEn hinsichtlich der Positions- und Lageregelung weiterentwickelt wird. Zu diesem Zweck soll das UAV ausgehend von der bestehenden standalone GPS Positionierung um ein differentielles GPS erweitert werden, welches aus Sicherheitsgründen getrennt von der sonstigen experimentellen, im Vorhaben aufgebauten, Payload einen sicheren Betrieb des UAV gewährleistet.

Die Bearbeitung dieses Themenfeldes erfolgte schwerpunktmäßig beim IFF der TU Braunschweig für die Payload der UAV und UGV, die Tätigkeiten zur Integration und Evaluation des differentiellen GNSS zur Steuerung/Regelung des UAV beim Partner AirRobot.

1.2 Kommunikation

Ausgehend von den Entwicklungen im Rahmen von NExtUAV, wo der Schwerpunkt auf der Netzerkundung und dem Austausch von GPS-Codemessungen zum Zwecke der Schwarmpositionierung lag, muss im Vorhaben ANKommEn der Austausch größerer Datenmengen ermöglicht werden. Diese resultieren aus dem Einsatz bildgebender Sensoren (z. B. RGB und IR Kameras, Laserscanner) zur Erkundung und zum Mapping, um eine globale Karte generieren zu können. Hierzu ist eine Erweiterung des

Kommunikationssysteme aus NExtUAV erforderlich, um die benötigte Bandbreite für den Datenaustausch zur Verfügung stellen zu können, zum Beispiel basierend auf WLAN. Entsprechend müssen geeignete Mechanismen und Protokolle entwickelt und implementiert werden, um zum Beispiel mehrere Kanäle innerhalb der Funkstandards zu nutzen und eine gezielte Datenverteilung gewährleisten zu können. Da unterschiedliche Faktoren – größere Entfernungen, Dämpfung bzw. Störung durch Infrastruktur oder Vegetation – sich negativ auf die Verbindungsqualität auswirken können, soll durch Auswertung der Verbindungsqualität unter Einbeziehung der Missions- und Wegplanung eine Sicherstellung der Kommunikation betrachtet werden. So können z. B. gezielt UAV oder UGV als Relaisstation eingesetzt werden, um die Verbindung mit der Bodenstation sicherzustellen, was wiederum ein geeignetes Management der Übertragungskapazitäten und Routing der Datenströme erfordert. Ebenso sind Algorithmen zu entwickeln, die z. B. eine Pufferung von Daten ermöglichen oder auch eine Priorisierung.

Die Bearbeitung dieses Themenfeldes erfolgte schwerpunktmäßig beim IMN der TU Braunschweig, im Bereich Datenstreaming beim IMN und AirRobot.

1.3 Mapping

Zum Zweck der Exploration sollen Informationen über ein ausgewähltes Gebiet bzw. aktuell interessierende Szenarien ermittelt werden. Im Rahmen von ANKommEn basiert dies auf bildgebender Sensorik, die auf die Trägersysteme (UAV und UGV) integriert und von diesen mitgeführt werden. Die von den Sensoren gelieferten Rohdaten (Einzelbilder bei Kameras, Laserscannermessungen) müssen entsprechend weiterverarbeitet werden, je nach Art auf den Trägersystemen oder in der Bodenstation, nachdem sie über die Datenlinks an diese übermittelt wurden. Die Daten und Informationen, z. B. in Form von Lagebildern, Bodenstrukturen, photogrammetriebasierte Modelle, werden in der Bodenstation dargestellt und in Form einer Karte abgelegt, womit sie einem Einsatzleiter/Operator zur Verfügung stehen.

Es sollen dabei folgende Sensoren exemplarisch betrachtet und auf den Trägersystemen eingesetzt werden:

- UAV:
 - Laserscanner
 - Thermalkamera
 - hochauflösende RGB-Kamera
- UGV:
 - Thermalkamera & Laserscanner
 - RGB Stereokamera System & Laserscanner

Aufgrund der geringeren Einschränkung auf den bodengebundenen UGV hinsichtlich Nutzlastkapazität und Stromversorgung können Kamera und Laserscanner kombiniert eingesetzt werden.

Die Bearbeitung dieser Themenfelder erfolgte schwerpunktmäßig durch die TU Braunschweig, Institut für Flugführung (primär kamerabasiertes Mapping) und Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (primär laserscannerbasiertes Mapping).

1.4 Führung & HMI

Um die unbemannten Trägersysteme zum Zweck von Explorationsmissionen kontrollieren zu können, Missionen zu planen bzw. Aufgaben zu definieren, sowie Explorationsergebnisse einem Nutzer zur Verfügung zu stellen, soll eine zentrale Bodenstation aufgebaut und in das Gesamtsystem integriert werden. Für die Missionsplanung sollen bekannte Informationen berücksichtigt werden, sei es durch vorhandenes Kartenmaterial oder vorangegangene Missionen. Ebenfalls werden trägersystemspezifische und payloadspezifische Eigenschaften berücksichtigt. Darüber hinaus muss auf manuelle Eingaben der Einsatzleitung reagiert werden können. Eine Kollisionsvermeidung soll dabei planerisch in der Missionsplanung/Aufgabendefinition berücksichtigt werden.

Zu diesen Zwecken wird eine grafische Nutzerschnittstelle entwickelt und umgesetzt, durch die die gesamte Prozesskette von der Missionsdefinition über die Kontrolle der Missionsdurchführung bis hin zur Datenvisualisierung und weiteren Auswertung ermöglicht wird. Um eine Einsatzkraft unabhängig vom Standort der Basisstation/Leitstand in das System zu integrieren und den Zugriff auf die beschriebenen Daten und Visualisierungen zu ermöglichen, wird ein tragbares Gerät aufgebaut und in die Datenaustauschstrategien integriert.

Diese Themenfelder wurden schwerpunktmäßig durch die TU Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge und Institut für Flugführung, bearbeitet.

1.5 Demonstrator

Zur Erprobung und Demonstration der entwickelten Verfahren und Applikationen anhand realer Versuche wird das Gesamtsystem als Demonstrator aufgebaut. Dieses besteht aus folgenden Kernkomponenten:

- 3 fliegende Einheiten (UAV)
- 3 Sensorpayloads für UAV (Laserscanner, RGB- & IR-Kamera)
- 2 bodengebundenen Einheiten (UGV) – Sensorik fest integriert
- Bodenstation/Leitstand
- mobiles Gerät (mit HMI für Einsatzkraft unabhängig von der Bodenstation)
- mobiles Anzeigegerät für HD-Video Livestream

Als bodengebundene Versuchsträger haben sich die durch das IMN in das Vorhaben NExtUAV eingebrachten UGV als nicht ausreichend geländegängig für die avisierten Einsatzgebiete erwiesen, so dass für ANKommEn gezielt, geeignet erscheinende UGV beschafft werden – basierend auf den Erfahrungen aus NExtUAV und anderen Vorhaben am IFF und IMN. Bezüglich der UAV werden Systeme des Projektpartners AirRobot aufgebaut und vorgehalten, sowie an die Rahmenbedingungen in ANKommEn angepasst.

Der Aufbau der Demonstratoren erfolgte durch alle beteiligten Partner. Hierbei wurden die UAV von AirRobot aufgebaut und modifiziert, die UAV Payloads gemeinsam von AirRobot und der TU Braunschweig aufgebaut. Die UGVs und Bodenstation sowie das mobile Gerät von der TU Braunschweig beschafft und aufgebaut.

2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bei ANKommEn (Teilprojekt TU Braunschweig) handelt es sich um ein Teilprojekt des gleichnamigen Verbundvorhabens.

Der Zuwendungsempfänger TU Braunschweig wurde zu 100% von dem Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

An der TU Braunschweig waren zwei Institute an der Bearbeitung des Vorhabens beteiligt:

- Institut für Flugführung (IFF)
- Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN)

An beiden beteiligten Instituten der TU Braunschweig waren die für das Vorhaben eingeplanten Mitarbeiter bereits zu Beginn des Vorhabens tätig, oder befanden sich kurz vor Einstellung bzw. waren im Rahmen studentischer Arbeiten/HiWi-Tätigkeiten bereits an den beteiligten Instituten thematisch involviert, so dass zur Laufzeit des Vorhabens keine signifikante Personalakquise für das wissenschaftliche Personal durchgeführt werden musste. Studentische Hilfskräfte wurden während des Vorhabens eingestellt.

Für das Vorhaben benötigte Hardware wurde nach einer Anforderungsanalyse mit anschließender Produktrecherche beschafft.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist zum 01.05.2015 gestartet und zum 15.02.2018 nach einer zweiwöchigen kostenneutralen Verlängerung erfolgreich abgeschlossen worden. Abbildung 3-1 zeigt den zugehörigen, eingetretenen zeitlichen Ablauf des Verbundvorhabens zum Projektende.

Die kurze kostenneutrale Verlängerung erfolgte, um die Teilnahme an einer Konferenz zu ermöglichen, die wenige Tage über das ursprünglich geplante Projektende (31.01.2018) hinausging. Eine Verschiebung oder Verlängerung von Arbeitspaketen fand dadurch nicht statt.

Um die erforderliche Verzahnung in der Bearbeitung der einzelnen Themenbereiche zu gewährleisten, wurden neben regelmäßigen Telefonkonferenzen, zahlreiche Projektmeetings bzw. Arbeitstreffen aller Projektbeteiligten durchgeführt, zusätzlich zu gemeinsamen Integrations-, Teilsystem- und Gesamtsystemtests.

Zur Überprüfung des Projektfortschritts und Abgleich mit dem Zeitplan wurden zusätzlich zwei Meilensteine zur Projektlaufzeit durchgeführt:

- Meilenstein 1: 26./27.04.2016
Fokus: Gesamt- und Subsystemkonzepte
finalisiertes Hardware & Software Systemdesign
- Meilenstein 2: 01.06.2017
Fokus: Review Subsysteme, Kommunikation, Mapping
Startpunkt Finalisierung der Arbeiten zu Führung & HMI
Eintritt in die Versuchsphase des Gesamtsystems

Die Ergebnisse der Meilensteine wurden jeweils in einem Bericht an den Zuwendungsgeber dokumentiert.

Ergänzend wurden im Nachgang der Meilensteine jeweils eine Projektdemonstration unter Beteiligung des Zuwendungsgebers und teilweiser Beteiligung der assoziierten Partner durchgeführt. Diese bestanden jeweils aus einer Präsentation/Vortrag zur Vorstellung der bisher durchgeführten Tätigkeiten und des aktuellen Projektstandes, kombiniert mit einer Präsentation des aktuellen Ausbaustandes des Demonstrators im Feld.

Begleitend zu allen Entwicklungen erfolgten Veröffentlichungen (Abschnitt 11) zu den bereits fertiggestellten Komponenten. Zum Abschluss und nach Fertigstellung aller Arbeiten erfolgte am 07.02.2018 in Braunschweig das Projektabschlussmeeting im Beisein des Zuwendungsgebers (DLR Raumfahrtmanagement).

Das Verbundvorhaben ANKommEn ist in die in Abbildung 3-2 dargestellten Haupt- und Unterarbeitspakete gegliedert.

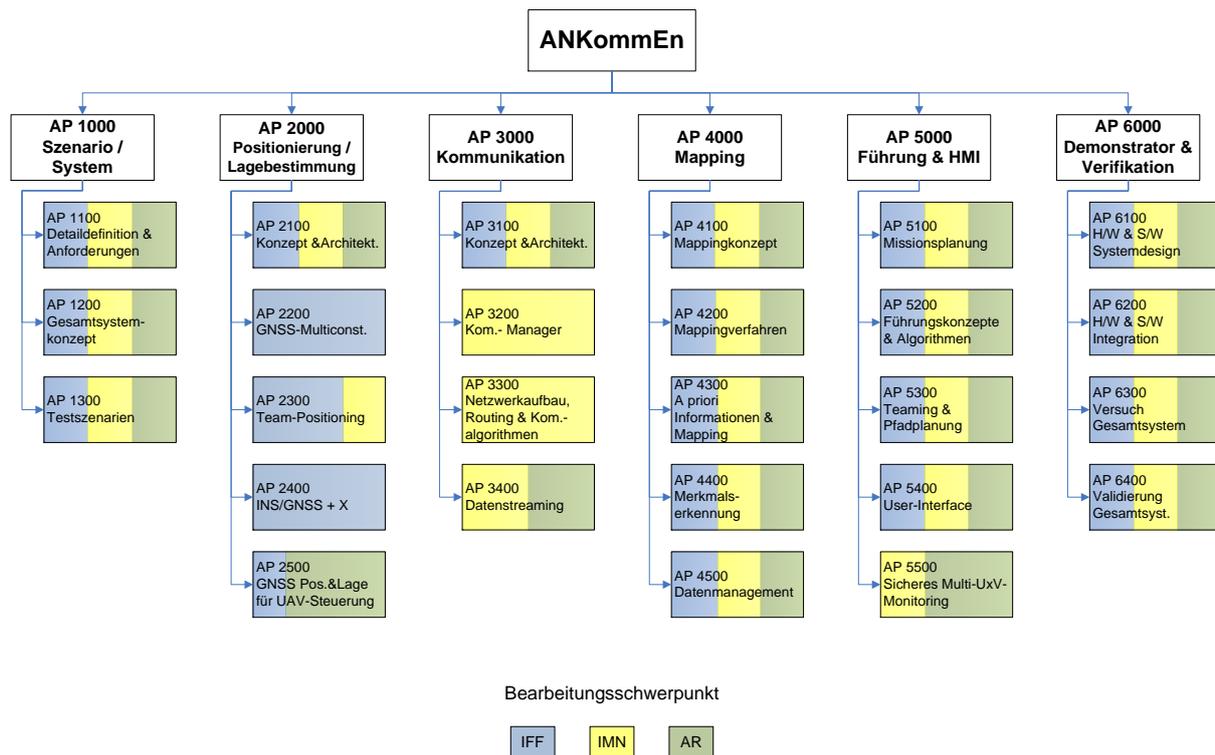


Abbildung 3-2: Arbeitspaketstruktur Verbundvorhaben ANKommEn

Das Hauptarbeitspaket "Szenario/System" bildet den Startpunkt des Vorhabens und die Grundlage für sämtliche folgende Themenschwerpunkte. Es erfolgte die Definition der Szenarien und daraus resultierende grundsätzliche Anforderungen an das Gesamtsystem. Dieses fand unter Einbindung der assoziierten Partner, Feuerwehr Braunschweig und des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) statt. Darauf aufbauend wurden mögliche Testszenarien abgeleitet und das Systemkonzept, welches bereits im Projektantrag skizziert wurde, detailliert und konsolidiert. In dem Hauptarbeitspaket "Positionierung/Lagebestimmung" wurden die für das Gesamtsystem bzw. vorhabensspezifische Payload erforderlichen Positionierungsverfahren konzeptioniert und entwickelt bzw. aufbauend auf dem Stand des Vorhabens NExtUAV weiterentwickelt. Ebenfalls fanden hier die Arbeiten zur Integration von differentiellm GNSS in die UAV Steuerung/Regelung statt. Im Rahmen des Hauptarbeitspaket "Kommunikation" wurde das Kommunikationssystem zum Austausch von Sensordaten, Statusinformationen und Wegplanungen zwischen den UAVs/UGVs untereinander und mit der Bodenstation konzeptioniert, entwickelt und implementiert. In Hauptarbeitspaket "Mapping" sind die Arbeiten zur Umfelderkundung und Kartierung zusammengefasst. Diese erfolgen auf der Basis von RGB- und Thermalbildern sowie Laserscannermessungen. Das Hauptarbeitspaket "Führung & HMI" umfasst die Arbeiten zum zentralen HMI auf der Bodenstation bzw. dem Leitstand mit den integrierten Funktionalitäten zur Missionsplanung/-überwachung und Statusanzeigen der Systeme und Funkstrecken. Dem Hauptarbeitspaket "Demonstrator & Verifikation" sind die Arbeiten zum Aufbau der Demonstratoren mit den mechanisch, elektrisch und datentechnisch integrierten Subsystemen inkl. Softwarearchitekturen zur Datenerfassung, -weiterleitung und -prozessierung, sowie die Planung und Durchführung von Subsystem- und Gesamtsystemtests zugeordnet.

Folgende Themen bzw. Arbeitspakete wurden ausschließlich durch die Institute der Technischen Universität Braunschweig bearbeitet:

- AP 2200 "GNSS-Multiconstellation"
- AP 2300 "Team-Positioning"

- AP 2400 "INS/GNSS+X"
- AP 3200 "Kommunikationsmanager"
- AP 3300 "Netzwerkaufbau, Routing & Kommunikationsalgorithmen"

Diese Arbeiten bauen grundsätzlich auf den Ergebnissen der TU Braunschweig aus dem Vorgängervorhaben NExtUAV (FKZ 50NA1003) auf, die teilweise Bestandteil der institutseigenen Softwareframeworks sind.

Die wissenschaftlich-technische Bearbeitung folgender Arbeitspakete lag schwerpunktmäßig bei der TU Braunschweig, unter konzeptioneller Beteiligung und anwendungsbezogenem Austausch mit dem Verbundpartner AirRobot:

- AP 4000 "Mapping"
- AP 5100-5400 in "Führung & HMI"

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Der Stand an dem die Arbeiten der TU Braunschweig anknüpften, ist im Wesentlichen durch die Ergebnisse, Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Vorgängervorhaben NExt UAV definiert, aber auch durch die an den beteiligten Instituten aufgebaute Expertise in themenverwandten Tätigkeiten.

In dem Bereich der Positionierung konnte sowohl bei den GNSS basierten als auch bei der integrierten Positionierungsverfahren direkt an die Arbeiten aus NExt UAV angeknüpft und im Rahmen von ANKommEn weiterentwickelt werden. Im Bereich der Kommunikation wurde zum einen das in NExtUAV aufgebaute System weiterverwendet und um WLAN-basierte Kommunikation erweitert. Bezogen auf die Aspekte des Routings und Netzwerkaufbaues konnte ebenfalls auf den in NExtUAV entwickelten Strategien zum Datenaustausch aufgebaut werden.

Die softwaretechnische Umsetzung der Positionierungsverfahren erfolgte innerhalb des IFF-eigenen Softwareframeworks. Die Umsetzung des HMI in der Bodenstation bzw. des Leitstandes mit den darin integrierten Funktionalitäten, sowie die Datenerfassung der optischen Sensorik erfolgten basierend auf dem *Robot Operating System* Softwareframework (ROS) mit Qt/C++. Für die photogrammetrische Auswertung der Kamerabilder wurde die kommerzielle Software Agisoft Photoscan verwendet, welche über entsprechende Schnittstellen in die Software auf der Bodenstation skriptbasiert integriert wurde.

Neben der Nutzung von Literaturquellen wurden aktuelle Erkenntnisse und der Austausch mit anderen Wissenschaftlern auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen genutzt, um aktuelle Erkenntnisse in das Vorhaben einfließen zu lassen.

Verwandte Literaturquellen der TU Braunschweig:

- [1] BECKER, M., HECKER, P. ET AL, NAVIGATION ZUR EXPLORATION MIT TIEFFLIEGENDEN UAV IN KATASTROPHENSZENARIEN: NEXT UAV, FKZ 50NA1003 SCHLUSSBERICHT, TECHN. UNIV. BRAUNSCHWEIG, 2013
- [2] NAVCEN, 2016. GLOBAL POSITIONING SYSTEMS DIRECTORATE SYSTEMS ENGINEERING & INTEGRATION, INTERFACE SPECIFICATION, IRN-IS-200H-003, 28 JULY 2016
- [3] ISTC, 2008. RUSSIAN INSTITUTE OF SPACE DEVICE ENGINEERING, „GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM GLONASS: INTERFACE CONTROL DOCUMENT. EDITION 5.1,“ 2008
- [4] GSA, 2016. EUROPEAN GNSS (GALILEO) OPEN SERVICE: SIGNAL-IN-SPACE INTERFACE CONTROL DOCUMENT, OS SIS ICD V1.3, DECEMBER 2016
- [5] BDS, 2016. BEIDOU NAVIGATION SATELLITE SYSTEM , SIGNAL IN SPACE, INTERFACE CONTROL DOCUMENT, OPEN SERVICE SIGNAL (VERSION 2.1), NOVEMBER 2016

- [6] NAVCEN, 2018. U.S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. GPS CONSTELLATION STATUS. 10.07.2018. URL: [HTTP://WWW.NAVCEN.USCG.GOV/?DO=CONSTELLATIONSTATUS](http://www.navcen.uscg.gov/?DO=CONSTELLATIONSTATUS)
- [7] IAC, 2018. INFORMATION-ANALYTICAL CENTRE, FEDERAL SPACE AGENCY. GLONASS CONSTELLATION STATUS. 10.07.2018. URL: [HTTPS://WWW.GLONASS-IAC.RU/EN/GLONASS/](https://www.glonass-iac.ru/en/glonass/)
- [8] GSA, 2018. EUROPEAN GNSS SERVICE CENTER. CONSTELLATION INFORMATION. 10.07.2018. URL: [HTTP://WWW.GSC-EUROPA.EU/SYSTEM-STATUS/CONSTELLATION-INFORMATION](http://www.gsc-europa.eu/system-status/constellation-information)
- [9] IGS, 2018. INTERNATIONAL GNSS SERVICE. MGEX - BEIDOU SATELLITES. 10.07.2018. URL: [HTTPS://WWW.GLONASS-IAC.RU/EN/BEIDOU/](https://www.glonass-iac.ru/en/beidou/)
- [10] CLEMSON UNIVERSITY RESTORATION INSTITUTE. FIGURE DESCRIBING TRIANGULATION. 2005. URL: [HTTP://WWW.CLEMSON.EDU/RESTORATION/WLCC/_FILES/PHOTOGRAMMETRY.JPG](http://www.clemson.edu/restoration/wlcc/_files/photogrammetry.jpg) (BESUCHT AM 20. 07. 2016).
- [11] PAUL R. WOLF; BON A. DEWITT; BENJAMIN E. WILKINSON. ELEMENTS OF PHOTOGRAMMETRY WITH APPLICATIONS IN GIS, 4TH EDITION. UNITED STATES OF AMERICA, 2014.
- [12] TAKAFUMI TAKETOMI, HIDEAKI UCHIYAMA UND SEI IKEDA. "VISUAL SLAM ALGORITHMS: A SURVEY FROM 2010 TO 2016". IN: IPSJ TRANSACTIONS ON COMPUTER VISION AND APPLICATIONS 9 (2017), S. 1–11.
- [13] R. BURNS, "PHOTOGRAMMETRY." [HTTP://WWW.DOT.CA.GOV/HQ/ROW/LANDSURVEYS/LSITWORKBOOK/09.PDF](http://www.dot.ca.gov/hq/row/landsurveys/LSITWorkbook/09.pdf). (BESUCHT AM 17.10.2016)
- [14] THRUN, S. ; BURGARD, W. ; FOX, D.: PROBABILISTIC ROBOTICS : MIT PRESS, 2005
- [15] DELLAERT, FRANK ; KAESS, MICHAEL: SQUARE ROOT SAM: SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING VIA SQUARE ROOT INFORMATION SMOOTHING, INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH, VOL. 25, NR. 12, S. 1181-1203, 2006
- [16] KAESS, MICHAEL ; RANGANATHAN, ANANTH ; DELLAERT, FRANK: ISAM: INCREMENTAL SMOOTHING AND MAPPING, IEEE TRANS. ROBOTICS, 24, NR. 6, S. 1365-1378, 2008
- [17] POMERLEAU, FRANÇOIS ; COLAS, FRANCIS ; SIEGWART, ROLAND ; MAGNENAT, STÉPHANE: COMPARING ICP VARIANTS ON REAL-WORLD DATA SETS - OPEN-SOURCE LIBRARY AND EXPERIMENTAL PROTOCOL, AUTON. ROBOTS, 34, NR. 3, S. 133-148, 2013
- [18] OLSON, EDWIN ; WALTER, MATTHEW R. ; TELLER, SETH J. ; LEONARD, JOHN J. ; THRUN, SEBASTIAN (BEARB.) ; SUKHATME, GAURAV S. (BEARB.) ; SCHAAL, STEFAN (BEARB.): SINGLE-CLUSTER SPECTRAL GRAPH PARTITIONING FOR ROBOTICS APPLICATIONS, ROBOTICS: SCIENCE AND SYSTEMS : THE MIT PRESS, 2005
- [19] OLSON, EDWIN: RECOGNIZING PLACES USING SPECTRALLY CLUSTERED LOCAL MATCHES, ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS, 57, NR. 12, S. 1157-1172, 2009
- [20] KANAYAMA, YUTAKA ; HARTMAN, BRUCE I.: SMOOTH LOCAL PATH PLANNING FOR AUTONOMOUS VEHICLES, PROCEEDINGS OF IEEE ICRA, S. 1265-1270, 1989
- [21] P. T. EUGSTER, P. A. FELBER, R. GUERRAQUI, AND A. M. KERMARREC, "THE MANY FACES OF PUBLISH/SUBSCRIBE," ACM COMPUTING SURVEYS (CSUR), VOL. 35, NO. 2, PP. 114- 131, 2003.
- [22] QUIGLEY, M., CONLEY, K., GERKEY, B. P., FAUST, J., FOOTE, T., LEIBS, J., WHEELER, R. AND NG, A. Y., 2009. ROS: AN OPEN-SOURCE ROBOT OPERATING SYSTEM. IN: ICRA WORKSHOP ON OPEN SOURCE SOFTWARE.
- [23] HUANG, A. S., OLSON, E. AND MOORE, D. C., 2010. LCM: LIGHTWEIGHT COMMUNICATIONS AND MARSHALLING. IN: IROS, IEEE, PP. 4057–4062.
- [24] MARUYAMA, Y., KATO, S. AND AZUMI, T., 2016. EXPLORING THE PERFORMANCE OF ROS2. IN: EMSOFT, ACM, PP. 5:1–5:10.
- [25] SCHWARZ, M., BEUL, M., DROESCHEL, D., SCHLLER, S., PERIYASAMY, A. S., LENZ, C., SCHREIBER, M. AND BEHNKE, S., 2016. SUPERVISED AUTONOMY FOR EXPLORATION AND MOBILE MANIPULATION IN ROUGH TERRAIN WITH A CENTAUR-LIKE ROBOT. FRONT. ROBOTICS AND AI.
- [26] TIDERKO, A., HOELLER, F. AND RHLING, T., 2016. THE ROS MULTIMASTER EXTENSION FOR SIMPLIFIED DEPLOYMENT OF MULTI-ROBOT SYSTEMS, ROBOT OPERATING SYSTEM (ROS): THE COMPLETE REFERENCE (VOLUME 1). STUDIES IN COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, VOL. 1, SPRINGER
- [27] ZSTANDARD - FAST REAL-TIME COMPRESSION ALGORITHM, [HTTPS://GITHUB.COM/FACEBOOK/ZSTD](https://github.com/facebook/zstd), 10.07.2018.
- [28] LINUX CLASSLESS QUEUING DISCIPLINES (QDISCS) [HTTP://LINUX-IP.NET/ARTICLES/TRAFFIC-CONTROLHOWTO/CLASSLESS-QDISCS.HTML](http://linux-ip.net/articles/traffic-controlhowto/classless-qdiscs.html), 10.7. 2018.

- [29] WIRTZ, H., HEER, T., BACKHAUS, R., WEHRLE, K., 2011. ESTABLISHING MOBILE AD-HOC NETWORKS IN 802.11 INFRASTRUCTURE MODE. IN WINTeCH '11, PROCEEDINGS OF THE 6TH ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS NETWORK TESTBEDS, EXPERIMENTAL EVALUATION AND CHARACTERIZATION. PP. 49-52.
- [30] ZSTANDARD - FAST REAL-TIME COMPRESSION ALGORITHM, [HTTPS://GITHUB.COM/FACEBOOK/ZSTD](https://github.com/facebook/zstd), 10.07.2018.
- [31] META-ROS - OPEN EMBEDDED LAYER FOR ROS APPLICATIONS, [HTTPS://GITHUB.COM/BMWCarIT/META-ROS](https://github.com/BMWCarIT/meta-ros), 10.7.2018
- [32] QGROUNDCONTROL, [HTTP://WWW.QGROUNDCONTROL.COM](http://www.qgroundcontrol.com), 12.07.2018
- [33] FELZENSZWALB, PEDRO F. ; GIRSHICK, ROSS B. ; MCALLESTER, DAVID A. ; RAMANAN, DEVA: OBJECT DETECTION WITH DISCRIMINATIVELY TRAINED PART-BASED MODELS.. IN: IEEE TRANS. PATTERN ANAL. MACH. INTELL., 32 (2010), NR. 9, S. 1627-1645
- [34] GDAL/OGR CONTRIBUTORS (2018). GDAL/OGR GEOSPATIAL DATA ABSTRACTION SOFTWARE LIBRARY. OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION. URL [HTTP://GDAL.ORG](http://gdal.org)
- [35] CHRISTIAN FORSTER, MATIA PIZZOLI, AND DAVIDE SCARAMUZZA. "SVO: FAST SEMI-DIRECT MONOCULAR VISUAL ODOMETRY". IN: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA). 2014.
- [36] LSD-SLAM: LARGE-SCALE DIRECT MONOCULAR SLAM, J. ENGEL, T. SCHÖPS, D. CREMERS, ECCV '14 RAÚL MUR-ARTAL, J. M. M. MONTIEL UND JUAN D. TARDÓS. "ORB-SLAM: A VERSATILE AND ACCURATE MONOCULAR SLAM SYSTEM". IN: IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS 31.5 (2015), S. 1147-1163. DOI: 10.1109/TRO.2015.2463671.
- [37] RAÚL MUR-ARTAL, J. M. M. MONTIEL UND JUAN D. TARDÓS. "ORB-SLAM: A VERSATILE AND ACCURATE MONOCULAR SLAM SYSTEM". IN: IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS 31.5 (2015), S. 1147-1163. DOI: 10.1109/TRO.2015.2463671.
- [38] DR. SILVIA MARSMANN: CHEMRAD2017, AUSWERTUNG DER POPCORN-DRIFT UND DER VORHERSAGEN DER DRIFT- UND STRÖMUNGSMODELLE, BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (BSH), ABTEILUNG MEERESKUNDE REFERAT VORHERSAGEDIENSTE, SACHGEBIET OPERATIONELLE MODELLE (2018)
- [39] DJI MATRICE 200 SERIE, [HTTPS://WWW.DJI.COM/DE/MATRICE-200-SERIES/APPLICATIONS#M200S-APP-S1](https://www.dji.com/de/matrice-200-series/applications#M200S-APP-S1)
- [40] COPTING BOS-UAS, [HTTPS://COPTING.DE/INDEX.PHP?OPTION=COM_QUIX&VIEW=PAGE&ID=132&ITEMID=598&LANG=DE](https://copting.de/index.php?option=com_quix&view=page&id=132&Itemid=598&lang=de)
- [41] DUBÉ, RENAUD ; DUGAS, DANIEL ; STUMM, ELENA ; NIETO, JUAN I. ; SIEGWART, ROLAND ; CADENA, CESAR: SEGMATCH: SEGMENT BASED LOOP-CLOSURE FOR 3D POINT CLOUDS, CoRR, ABS/1609.07720, 2016
- [42] DUBÉ, RENAUD ; DUGAS, DANIEL ; STUMM, ELENA ; NIETO, JUAN I. ; SIEGWART, ROLAND ; CADENA, CESAR: SEGMATCH: SEGMENT BASED PLACE RECOGNITION IN 3D POINT CLOUDS, PROCEEDINGS OF IEEE ICRA, 2017
- [43] GAWEL, ABEL ; DUBÉ, RENAUD ; SURMANN, HARTMUT ; NIETO, JUAN I. ; SIEGWART, ROLAND ; CADENA, CESAR: 3D REGISTRATION OF AERIAL AND GROUND ROBOTS FOR DISASTER RESPONSE: AN EVALUATION OF FEATURES, DESCRIPTORS, AND TRANSFORMATION ESTIMATION, PROCEEDINGS OF IEEE SSRR, 2017

Verwandte Literaturquellen der AirRobot GmbH & Co. KG:

- [44] [HTTP://WWW.RTKLIB.COM](http://www.rtklib.com); ZUGRIFF AM 17.07.2018.
- [45] KIRZ, J.: STUDIENARBEIT - STEIGERUNG DER POSITIONSGENAUIGKEIT EINES MICROUAS. BRAUNSCHWEIG, 2015.
- [46] [HTTPS://WWW.SAPOS.DE](https://www.saPOS.de); ZUGRIFF AM 17.07.2018.
- [47] [HTTP://APPS.GDGPS.NET/INDEX.PHP](http://apps.gdgps.net/index.php); ZUGRIFF AM 17.07.2018.
- [48] BUNDESNETZAGENTUR, "FUNKANWENDUNGEN AUF DEN ISM-BÄNDERN", [HTTPS://EMF3.BUNDESNETZAGENTUR.DE/PDF/ISM-BNETZA.PDF](https://emf3.bundesnetzagentur.de/pdf/ISM-BNETZA.pdf), BUNDESNETZAGENTUR, 2015
- [49] MEINKE, H.H. AND LANGE, K. AND GUNDLACH, F.W. AND LÖCHERER, K.H., "TASCHENBUCH DER HOCHFREQUENZTECHNIK", SPRINGER 1992, ISBN 9783540547143
- [50] VIDEO LAN, A PROJECT AND A NON-PROFIT ORGANIZATION, "VLC MEDIA PLAYER", [HTTPS://WWW.VIDEOLAN.ORG/VLC/INDEX.HTML](https://www.videolan.org/vlc/index.html), JULY 2018

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Gesamtvorhaben ANKommEn war ein Verbundvorhaben. Neben der Technischen Universität Braunschweig war als Verbundpartner die

AirRobot® GmbH & Co. KG
Werler Straße 4-8
59755 Arnsberg

beteiligt (Förderkennzeichen 50 NA 1519).

Begleitet und unterstützt wurde das Vorhaben durch folgende assoziierte Partner:

- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) – Forschungsstelle Küste, Betriebsstelle Norden-Norderney
- Berufsfeuerwehr Braunschweig / Freiwillige Feuerwehr

Darüber hinaus wurden Tätigkeiten an die Gravionic GmbH aus Braunschweig als Unterauftrag vergeben. Diese umfassten sowohl Mitwirkung bei der Sensor- und Systemkonzeptionierung zur Berücksichtigung von Anforderungen aus geodätischer Sicht, als auch Vermessungsdienstleistungen/geodätischer Referenzierung von Test- und Erprobungsgeländen, die für die durchgeführten Feldtest genutzt wurden.

6 Erzielte Ergebnisse

Die im Folgenden beschriebenen erzielten Ergebnisse enthalten sowohl die Arbeiten des Teilprojektes TU Braunschweig (FKZ 50NA1518) als auch die Arbeiten des Teilprojektes der AirRobot GmbH & Co. KG (FKZ 50NA1519). Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Arbeiten in dem Verbundvorhaben ANKommEn in vielen Bereichen verzahnt durchgeführt wurden und auf diesem Weg eine zusammenhängende Darstellung des entwickelten und aufgebauten Gesamtsystems erfolgt.

6.1 Szenario und System

Vor dem Hintergrund der bereits im Antrag des Projektes ANKommEn adressierten realen Einsatzszenarien des zu entwickelnden Explorationssystems wurden diese in einer frühen Phase des Vorhabens mit Vertretern der assoziierten Partner diskutiert. Dieses erfolgte mit dem Ziel, seitens der Verbundpartner ein tieferes und detaillierteres Verständnis zu erlangen, in welchen Bereichen das im Projektantrag skizzierte System nutzbringend eingesetzt werden kann und so einen Mehrwert zu generieren. Dieser Mehrwert muss für einen realen, praktischen Einsatz einen erforderlichen Mehraufwand durch die Nutzung eines zusätzlichen Systems zur Steigerung der Akzeptanz entsprechend kompensieren.

Zu diesem Zweck wurden im Rahmen von Arbeitstreffen mit den assoziierten Partnern sowohl in Braunschweig (Feuerwehr Braunschweig) als auch in Norden (NLWKN) grundsätzliche Anforderungen, mögliche Einsatzszenarien und auch eine potentielle Einbindung des skizzierten Systems in typische Anwendungsfälle diskutiert.

6.1.1 Feuerwehr – Anforderungen und Szenarien

Bei der Feuerwehr Braunschweig waren in der Projektphase keine automatisiert einsetzbare, unbemannte Trägersysteme zur Situationserkundung im Einsatz. Die Diskussionen und Anforderungen bzw. Wünsche an ein Aufklärungssystem basieren auf Erfahrungen aus den regelmäßigen Einsätzen. Folgende übergeordnete Anforderungen für ein einsatzunterstützendes Aufklärungssystem existieren aus Sicht der Berufsfeuerwehr Braunschweig.

- **Aktuelle Lagedarstellung:**
Grundsätzlich stellt die Aktualität der Informationen den entscheidenden Faktor für möglichst optimale Entscheidungen dar. Bei einer Erkundung durch Einsatzkräfte besteht die Einschränkung, dass visuelle Informationen über Sprache (Funk) kommuniziert werden (potentieller Informationsverlust, Gefahr von Missverständnissen). Nachfragen können ein erneutes Aufsuchen einer Position zur Folge haben.
- **Darstellung der Eigenlage:**
Neben der Übersicht über eine Schadenslage ist die Kenntnis der Eigenlage von zentraler Bedeutung für einen effizienten Einsatz der zur Verfügung stehenden Einsatzkräfte und –mittel (Aufstellflächen, Einsatzstrategien). Dieses ist insbesondere bei Ankunft an einem Einsatzort von Interesse.
- **Einfache Bedienbarkeit & kurze Rüstzeiten am Einsatzort:**
Da Aufklärungsergebnisse bzw. die Übersicht über ein Schadensereignis Grundlage für die Einsatzplanung und –führung sind, sollten eingesetzte Systeme eine möglichst geringe Vorbereitungszeit am Einsatzort erfordern. Eine möglichst intuitive Bedienbarkeit minimiert die Bündelung von Kapazitäten, die dann nicht mehr für die Schadensbekämpfung/-abwehr zur Verfügung stehen.
- **Übersichtliche Darstellung von Informationen:**
Die Darstellung der ermittelten Sensordaten muss insofern aufbereitet/reduziert sein, dass sich "auf das Wesentliche" konzentriert werden kann.

- Autarkes System:
Für den lokalen Einsatz muss eine Unabhängigkeit von allgemein zugänglicher Kommunikationsinfrastruktur gegeben sein, da je nach Einsatz die Gefahr besteht, dass z. B. Schaulustige eine hohe Netzauslastung im Mobilfunk verursachen.

In folgenden, ausgewählten Einsatzszenarien ist seitens der Feuerwehr Braunschweig die Nutzung von unbemannten Aufklärungssystemen mit einem zu erwartendem Mehrwert vorstellbar.

1. Hochwasser (im Stadtgebiet)
Obwohl im Vorfeld durch bekannte Niederschlagsprognosen Pegelstände und überschwemmungsgefährdete Gebiet ungefähr abgeschätzt werden können, besteht die Problematik, dass häufig kein aktuelles Kartenmaterial vorhanden ist. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass gerade im urbanen Raum fortlaufend bauliche Veränderungen vorgenommen werden. Für einen effektiven Einsatz der zu errichtenden Schutzmaßnahmen sind daher aktuell zu erstellende Geländemodelle und Lagebilder im Einsatzfall von großem Interesse.
2. Personensuche (insbesondere in unwegsamen Gelände)
Häufig sind für Personensuchen große und unwegsame Gebiete systematisch zu durchsuchen, was einen hohen Personalaufwand erfordert. Mit Hilfe von UAVs, ausgerüstet mit Kamerasystemen (IR/RGB), wären somit auch größere Areale durch systematisch abgeflogenes Flugpattern zeit- und ressourceneffizienter abzusuchen. Dabei ist insbesondere ein von Einsatzkräften mitführbares HMI von Bedeutung, um diese gezielt auf Personen hinzuweisen und zu diesen zu führen.
3. größere Schadenslagen / Verkehrsunfälle
Gerade bei größeren Schadenslagen stellt sich die Herausforderung, dass eine Vielzahl ein Einsatzkräften zu koordinieren ist, welche über größere Gebiete verteilt sein können. Dabei ist eine genaue Verortung von Einsatzstellen in einer Karte wünschenswert, die wiederholt aktualisiert werden kann. Dies ermöglicht eine objektivere Beurteilung der Entwicklung der Einsatzlage.
Bezogen auf größere Verkehrsunfälle (z. B. Autobahnen) ist ebenfalls die Aufklärung der Schadenslage sowie die Eigenlage von hohem Interesse, da sich insbesondere den Einsatzkräften beim Eintreffen sehr unübersichtliche Unfallorte bieten und einzelne Unfallstellen verstreut sein können (Erstunfall kombiniert mit Folgeunfällen).

Die Erprobung und Demonstration anhand dieser Szenarien ist zum Teil recht komplex und im Rahmen von Forschungsvorhaben nur bedingt zu leisten. Dazu wurde vereinbart, dass zunächst am Vorhaben beteiligte Mitarbeiter als Zuschauer an Übungen der Feuerwehr Braunschweig teilnehmen können, um einen realeren Eindruck vom Ablauf dieser Art Einsätze zu bekommen. Für die praktische Durchführung von Tests konnte im weiteren Verlauf des Vorhabens an einer Übung teilgenommen werden, mit Einsatz des bis dahin aufgebauten Systems (vgl. Abschnitt 6.6.4).

Für den Anwendungsfall der Suche nach Personen oder Glutnestern sollten diese Situationen im Rahmen der begleitenden Feldtests nachgestellt werden (z. B. durch entsprechende Hitzequellen).

6.1.2 Küstenschutz – Anforderungen und Szenarien

Für den Einsatzbereich des Küstenschutzes wurde durch den assoziierten Partner NLWKN Gespräche unter Beteiligung des NLWKN, Havariekommando und eines Vertreters der Freien Hansestadt Bremen, zuständig in dem Bereich Küstenschutz, organisiert.

Folgende übergeordnete Anforderungen für ein einsatzunterstützendes Aufklärungssystem existieren für diesen Bereich:

- hinsichtlich folgender Aspekte sind die Anforderungen Deckungsgleich zur Feuerwehr Braunschweig:

- aktueller und übersichtlicher Lagedarstellung und
- einfache Bedienbarkeit & kurze Rüstzeiten am Einsatzort
- Mehrzwecknutzen
Systeme müssen sowohl für akute Schadenslagen eingesetzt werden können, allerdings auch im Alltagsbetrieb z. B. zur Dünen- oder Deichvermessung. Zu diesem Zweck muss ein modularer Austausch der Sensorik zur Erkundung gewährleistet sein.
- Kombinierbarkeit:
Bei größeren Schadenslagen müssen mehrere Systeme von verschiedenen Standorten im Verbund eingesetzt werden können. Dieses ist abgeleitet aus der Verwendung vorhandener Einsatzmittel zum Beispiel zur Ölabwehr. Hier werden die Einsatzmittel (Boote, Schiffe, Landfahrzeuge) für Alltagsaufgaben verteilt an der Küste stationiert und im Schadensfall entsprechend des akuten Bedarfs zusammengezogen und einsatzspezifische Zusatzausrüstung verwendet.
- Umweltrandbedingungen:
Für einen Einsatz an der Küste oder mittelfristig auf See müsste ein späteres Produkt entsprechend unter den vorherrschenden Umweltbedingungen einsetzbar sein, z. B.:
 - korrosive Umgebung (Salzwasser)
 - Einsatz bei Niederschlag
 - Windstabilität
 - große Reichweite zur Einhaltung von Sicherheitsabständen, z. B. bei Schadenslagen mit Gefahrgut (Bsp. Havarie der Purple Beach im Mai 2015)

Folgende Szenarien wurden definiert, die aus Sicht des NLWKN mittelfristig von Interesse sind und die Realisierung von Tests im Rahmen des Vorhabens ermöglichen:

1. Hochwasser/Küstenschutz
Schädigungen an Deichen und Dünen, die dem Schutz vor Hochwasser und Sturmfluten dienen, können akut durch Abspülungen und Abbrechen von Material gefährdet sein. Im akuten Fall gilt es, die schadhaften Stellen frühzeitig zu erkennen, um Gegenmaßnahmen (z. B. Einsatz von Sandsäcken) einleiten zu können. Langfristig kann aber auch eine Verlagerung der Küstenlinie ins Landesinnere erfolgen, und so zu Überschwemmungen von z. B. bewohntem Gebiet führen. Ein konkretes Beispiel ist die Gefährdung der Süßwasserlinse auf der Nordseeinsel Langeoog, die der Trinkwasserversorgung der Insel dient. Ein Durchbruch der Dünen birgt dann die Gefahr der Versalzung.
2. Ölverschmutzung (Strandgebiet)
Die Notwendigkeit der Detektion und Abschätzung des Ausmaßes von Ölverschmutzungen an lokal begrenzten Strandabschnitten ist ein vergleichsweise häufiges Einsatzszenario. Dabei besteht die Verschmutzung in der Regel nicht aus einem zusammenhängenden "Ölteppich" sondern in Form von Verklumpungen. Die optische Identifizierung und auch Quantifizierung stellt dabei eine Herausforderung dar.
3. Seeinsatzszenarien:
Für Seeinsatzszenarien ist eine unbemannte Vorklärung eines Havaristen von besonderem Interesse. Dabei geht es primär darum, z. B. Brände, Temperaturen, Schadstoffbelastungen und explosionsgefährdete Atmosphären zu detektieren, ebenso wie die Ausbreitung von Schadstoffwolken oder Wasserverschmutzungen (z. B. Öl auf See). Dabei sind durch einzusetzende unbemannte Systeme teils große Entfernungen von mehreren Kilometern zu überbrücken, aufgrund einzuhaltender Sicherheitsabstände bei vermuteten Gefährdungslagen.

Eine Umsetzung von Erprobungen anhand dieser Szenarien ist teilweise möglich und im Rahmen des Vorhabens zu leisten. Ein gut geeignetes Szenario ist die Bestandsaufnahme von Küstenlinien und der vorhandenen Schutzeinrichtungen (Dünen und Deiche), als konkretes Testgebiet werden im Verlauf des Vorhabens Erprobungen auf der Insel Langeoog in Zusammenarbeit mit dem NLWKN vorgesehen. Dieses soll mit dem Szenario Ölverschmutzung kombiniert werden. Dazu ist – abhängig von der Verfügbarkeit von Seetang – vorgesehen, an einem Küstenabschnitt Seetang zu verteilen. Dieser weist optisch ähnliche Eigenschaften zu einer Verschmutzung durch Ölverklumpungen auf. Eine Nachstellung der skizzierten Seeinsatzszenarien ist im Rahmen des Vorhabens nicht zu leisten aufgrund des logistischen und insbesondere finanziellen Aufwandes. In Teilbereichen sind diese Funktionalitäten allerdings durch die vorgesehenen Feldversuche zu Feuerwehreinsatzszenarien (z. B. Detektion von Bränden) abgedeckt und berücksichtigt.

6.1.3 Systemkonzeptionierung

Zur Umsetzung des Systems in Form eines Demonstrators ist ein übergeordnetes Systemkonzept erarbeitet worden innerhalb dessen die einzelnen Subsysteme konzeptioniert und implementiert wurden.

Die funktionale Gesamtsystemstruktur ist in Abbildung 6-1 dargestellt und an das Zwiebschalenmodell angelehnt. Im Zentrum stehen die Kernkomponenten des Systems – UAV/UGV, Leitstand, humane Einsatzkräfte bzw. das entsprechende mobile Gerät mit HMI zum System. Diese müssen mit Grundfunktionen, in der Abbildung nicht abschließend aufgelisteten, ausgestattet sein. Über die Kommunikationsfunktionalitäten sind die einzelnen Systeme zusammengeführt, um ein koordiniertes Agieren zu ermöglichen. Durch die Kommunikation wird das Generieren einer gemeinsamen Karte ermöglicht, auf die wiederum die übergeordnete Pfadplanung aufbaut, deren einhüllende wiederum zu definierende Aufgaben oder Missionen darstellt. Ein Informationsaustausch über alle Schalen des Modells hinweg ermöglicht zum einen das Zusammenfließen aller relevanten Informationen im Leitstand, zum anderen die Verteilung von Aufgaben.

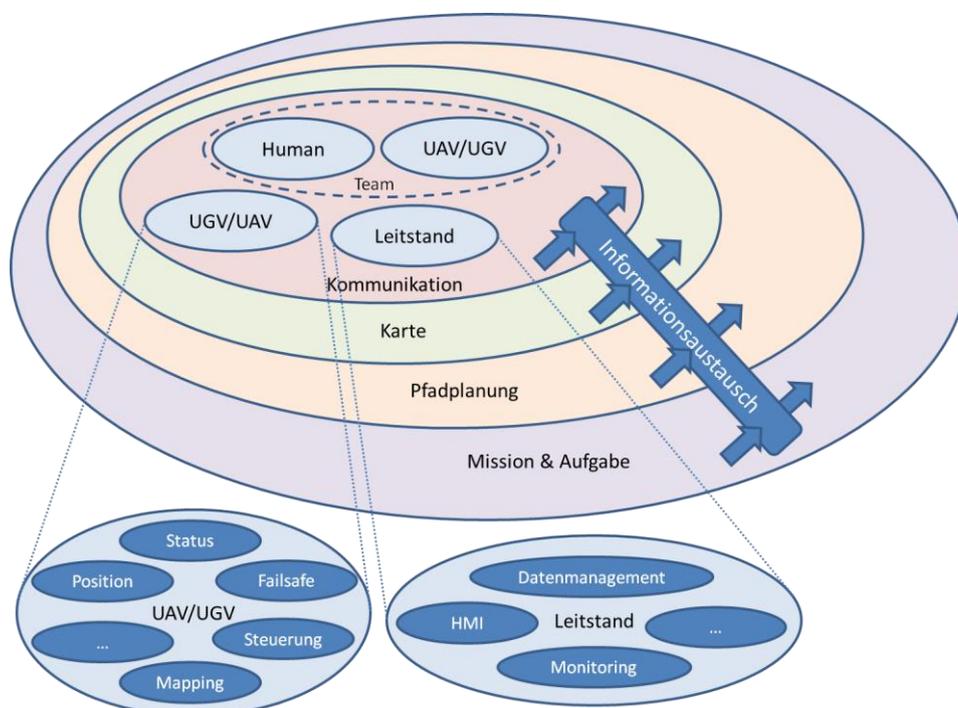


Abbildung 6-1: Gesamtsystemstruktur

Unabhängig von der mitzuführenden Payload zur Exploration, wie Kameras oder Laserscanner, wird zur Erfüllung jeglicher Aufgaben auf jedem Trägersystem, sei es ein UAV oder UGV, eine Basisausrüstung benötigt:

- Positionierung:
 - GNSS Empfänger (für Position, Geschwindigkeit, geringe Updaterate)
 - Inertialmesseinheit (für Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Lagewinkel, Drehraten, hohe Updaterate)
 - Prozessierungseinheit zur Prozessierung und Fusion der inertialen und GNSS Messdaten
- Kommunikation:
 - Datenlink 1: Austausch von GPS Positionierungsinformationen (in Fortführung der Themen aus NExt UAV soll das dort entwickelte XBee-basierte System eingesetzt werden)
 - Datenlink 2: Austausch größerer Datenmengen der Explorationssensorik, Missions- und Statusdaten

Aus praktischen Gründen wurde diese Basisausrüstung identisch für alle Trägersysteme beschafft, integriert und eingesetzt. Bei der Komponentenauswahl sind die Randbedingungen für die Integration auf den UAVs zu Grunde gelegt worden, da diese hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums, Masse und Energieversorgung stärkere Grenzen als die Bodenfahrzeuge aufweisen.

Über die Basisfunktionalitäten zur Positionierung und Kommunikation hinaus wird für die Explorationsaufgaben zusätzliche Sensorik in die Systeme integriert:

- RGB Kameras
- Thermalkameras
- Laserscanner
- pro Trägersystem eine Prozessierungseinheit zur Vorverarbeitung von Messdaten der Explorationssensorik

Die Integration der Umgebungssensorik für die UAVs erfolgt als modular austauschbare Payloadkomponente, so dass keine feste Zuordnung von einem Sensor zu einem spezifischen UAV besteht. Dies ermöglicht einen flexibleren Einsatz insbesondere während der Erprobung.

Die Bedienung des Systems erfolgt über einen zentralen Leitstand, der mit zum Einsatzgebiet mitgeführt wird und folgende Funktionalitäten aufweist:

- Definition von Aufgaben/Missionen in einem Zielgebiet
- Kontrolle/Überwachung der UAV/UGV während der Missionslaufzeit
- Darstellung der Explorationsergebnisse

Für die funktionale Integration der Komponenten wurden entsprechende übergeordnete Schnittstellen identifiziert bzw. definiert:

- Trägersystem ↔ Payload ↔ Leitstand:
 - Vorgabe von Wegpunkten: Leitstand → onboard Payload → UxV
 - Statusinformationen zum Austausch mit Leitstand
 - ggf. Sensordaten (z. B. Magnetometer bei UAV, Odometer bei UGV)
- Subsysteme:
 - Zeitstempel, einheitlich für alle Messdaten (Triggersignal, abs. Zeit)
 - GNSS-Rohdaten an Kommunikationsmodul zum Austausch im Gesamtsystem
 - Zustandsvektor des Trägersystems (Position, Lage, etc.) zur Referenzierung anderer Messdaten
- Kommunikation:
 - "Basisdatenlink" zum Austausch systemrelevanter Daten (Position, Status, ...)
 - "Payloaddatenlink" zum Austausch bandbreitenintensiverer Explorationsdaten

Um eine einheitliche Zeitinformation im Gesamtsystem sicherzustellen, wird systemweit die GPS-Systemzeit als Basis genutzt. Die Synchronisation aller Komponenten auf einem Trägersystem erfolgt durch Nutzung von NTP-Servern/-Clients, gespeist durch NMEA Nachrichten und einem Triggersignal (PPS) des eingesetzten GNSS Empfängers.

Bezüglich der Möglichkeiten der automatisierten Führung der UAVs wird durch den Verbundpartner AirRobot eine entsprechende Schnittstelle zur Maschinensteuerung bereitgestellt. Diese dient zum einen dazu entsprechende Kommandos an das UAV über die in ANKommEn entwickelte Payload zu senden. Zum anderen kann über diese Zustandsdaten (z. B. Akkuzustand, Betriebszustand, etc.) von dem UAV abgerufen werden und in das ANKommEn-Kommunikationsnetz eingespeist werden. Aus rechtlichen und Sicherheitsgründen muss beim Betrieb der UAVs jeweils ein Sicherheitspilot jederzeit in die Steuerung eingreifen können. Funktional wird dieses insofern sichergestellt werden, dass der Sicherheitspilot jederzeit die Steuerungseingaben, die durch die ANKommEn-Payload an die Maschine übersandt wird, übersteuern kann. Im Fall von Abrissen im Kommandolink zwischen Sicherheitspilot und UAV, werden entsprechende übergeordnete Fail-Save-Modi aktiv.

Zur Erfüllung der Messaufgaben erfolgt die in Abbildung 6-2 dargestellte Ausrüstung der Trägersysteme. Von diesen werden im Vorhaben ANKommEn drei UAVs und zwei UGVs aufgebaut und ausgerüstet.

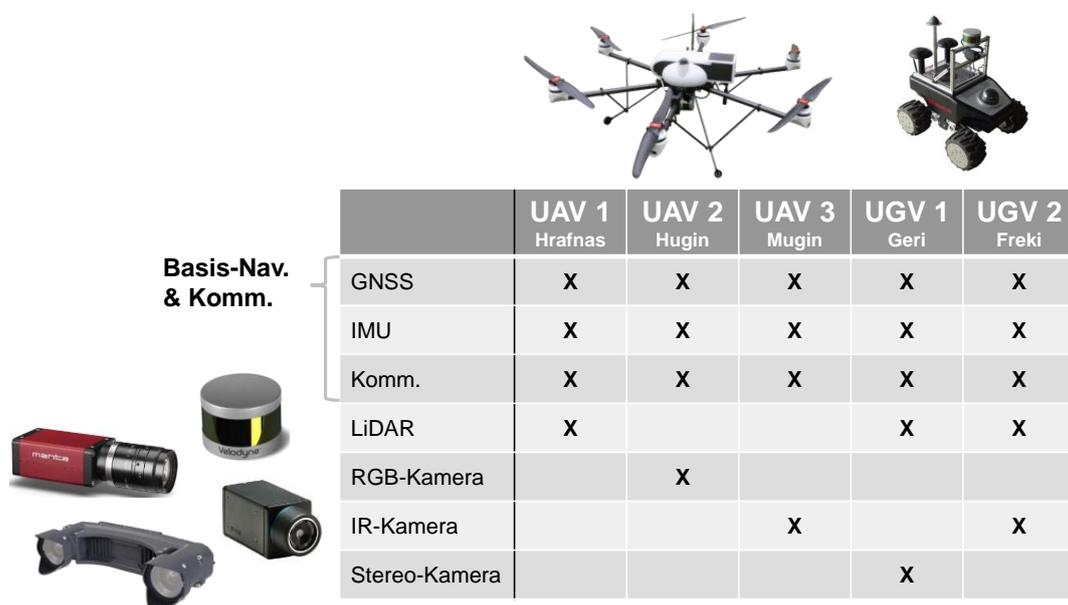


Abbildung 6-2: Systemkonzept –Sensorausstattung Trägersysteme

Aus dieser geht die allen Systemen identische Basisausrüstung zur Positionierung und Kommunikation hervor, die ebenfalls Bestandteil der Bodenstation und des mobilen Gerätes für eine Einsatzkraft ist. Die detaillierte Beschreibung der aufgebauten Hardware erfolgt in Abschnitt 6.6.

6.1.4 Testgelände

Dieser Abschnitt beschreibt die akquirierten und genutzten Testgelände, auf denen Feldversuche im Rahmen von ANKommEn durchgeführt wurden.

Mit fortlaufendem Projektfortschritt sind wachsende Anforderungen hinsichtlich der Eigenschaften an die Testgelände verbunden, welche auf der einen Seite aus rechtlichen Vorgaben hinsichtlich des Betriebs von unbemannten Flugsystemen bestehen, auf der anderen Seite projektspezifischen Anforderungen, z. B. hinsichtlich Geländestrukturen, Bebauung, Ausdehnung des Testgebiets und örtliche Lage, genügen muss. Insbesondere für entwicklungsbegleitende Tests wurden Testareale gesucht, die möglichst in der Nähe von Braunschweig bzw. des Verbundpartners AirRobot liegen.

Für anfängliche, grundsätzliche Integrationstests und Subsysteminbetriebnahmen konnte eine landwirtschaftliche Fläche in der Nähe zu Braunschweig genutzt werden Abbildung 6-3.



Abbildung 6-3: Landwirtschaftliche Fläche [Google Maps]

Dieses Gelände ist geeignet für:

- Inbetriebnahmetests für Subsysteme und Payloadkomponenten
- INS/GNSS Tests
- Basis Kommunikationstests

Im weiteren Projektverlauf wurde es erforderlich, größere Testareale nutzen zu können, die nicht öffentlich zugänglich sind und ein Mindestmaß an Bebauung oder Geländestruktur aufweisen. Dieses ist erforderlich, um zum einen die Kommunikationsstrukturen auch bei größeren Entfernungen (mehrere hundert Meter) zur Bodenstation testen zu können als auch Strukturen zu haben, die mittels Laserscanner und Kamerasysteme erfasst werden können. Im Vorgängervorhaben NExt UAV konnte dazu tageweise ein Teilgebiet eines Truppenübungsplatzes angemietet werden, der sowohl aus strukturierten Freiflächen als auch urbanen Bereichen (stillgelegte Kaserne) besteht – allerdings in ANKommEn wegen Eigennutzung nicht mehr zur Verfügung stand. Alternativ konnten zunächst ein Segelfluggelände (maximale Ausdehnung 800m x 180m, Abbildung 6-4) genutzt werden, im späteren Verlauf ein stillgelegter Flugplatz (Abbildung 6-5). In beiden Fällen waren entsprechend hindernisfreie Flächen vorhanden, Bebauung (Flugzeughallen und Betriebsgebäude) als auch Bewuchs in den Randbereichen der Gelände.



Abbildung 6-4: Segelfluggelände [TU Braunschweig]



Abbildung 6-5: stillgelegter Flugplatz [Google Maps]

Beide Gelände sind für erweiterte Tests geeignet, aufgrund Ihrer Größe auch für den sicheren parallelen Betrieb mit mehr als einem UAV:

- INS/GNSS Tests
- Kommunikationstests bei größeren Entfernungen
- Mapping
- Systemautomatisierungen (insbesondere auf stillgelegtem Flugplatz)

Für erweiterte Tests im Bereich des Mapping sowohl für Einzelmaschinen als auch in Kombination mit UAV und UGV, degradierten GNSS Empfang und Einschränkungen der Kommunikation durch Bebauung konnte durch den Verbundpartner AirRobot ein entsprechend geeignetes, öffentlich nicht zugängliches Testareal (Abbildung 6-6) akquiriert werden.

Dieses bietet die Möglichkeit mit den UGV sowohl in Abschattungsbereiche hinsichtlich GNSS Empfang und der systeminternen Datenlinks zu fahren, als auch in die stillgelegten Hallen. Letzteres ist insbesondere für die laserscannerbasierten SLAM Verfahren als auch für das Zusammenführen der entsprechenden Messdaten aus dem Parallelbetrieb von UAV und UGV (Abbildung 6-7) in einer gemeinsamen Karte von Interesse und bietet die Möglichkeit den Einsatzfall der Inspektion von z. B. einsturzgefährdeten Gebäudestrukturen zu demonstrieren.



Abbildung 6-6: Testgelände bei Verbundpartner AirRobot [Google Maps]



Abbildung 6-7: UAV und UGV im Versuch

Im Rahmen von Feuerwehreinsatzszenarien wurde die Möglichkeit gegeben an Übungen der Feuerwehr Braunschweig teilzunehmen, vgl. Abschnitt 6.6.4. Eine vorherige Akquise von Testgeländen war hierfür nicht möglich, sondern durch die Übungsplanung der Feuerwehr vorgegeben.

Zur Erprobung und Demonstration einer Anwendung im Küstenschutz wurden Versuche unterstützt vom NLWKN auf der Nordseeinsel Langeoog (Abbildung 6-8) durchgeführt.

Dieses ist von realem praktischen Interesse, da die Trinkwasserversorgung der Insel ausschließlich durch eine Süßwasserlinse im zentralen bis nördlichen Bereich der Insel erfolgt, die entsprechend vor Sturmfluten geschützt werden muss, um eine Versalzung des Trinkwassers zu vermeiden.

Ebenfalls wurden in der Planung Versuche zur Erkundung von Ölverschmutzungen – simuliert durch Seegras – im Strandbereich geplant, abhängig von der Verfügbarkeit von

angespültem Seegras. Von weiterem Interesse sind Deichbereiche rund um das Deichschart in der Nähe des Inselhafens.

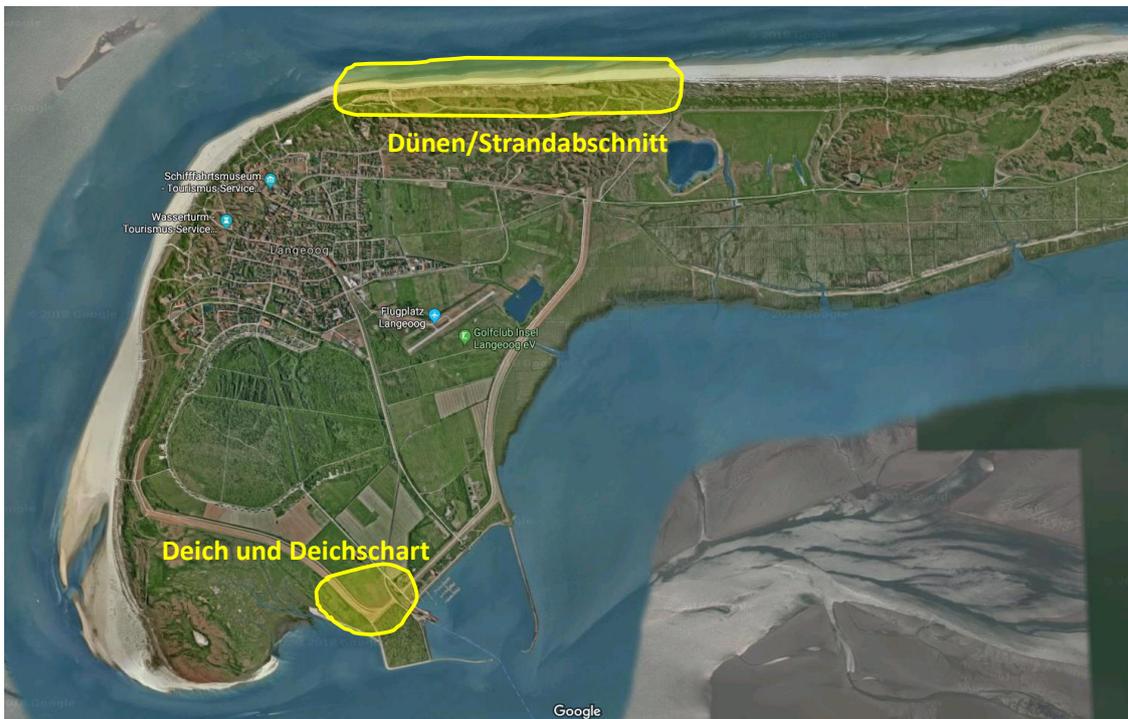


Abbildung 6-8: Langeoog-Testgebiete [Google Maps]

6.2 Positionierung und Lagebestimmung

6.2.1 Architektur

Resultierend aus den Anforderungen an das Gesamtsystem, welche auch mit Hilfe der assoziierten Projektpartner erarbeiten wurden, wurde ein Systemkonzept entwickelt und definiert, welches auch unter schwierigen GNSS-Empfangsbedingungen eine zuverlässige und robuste Positionierung und Lagebestimmung erlaubt. Daraus resultierte eine Architektur deren zentraler Ausgangspunkt die Fusion von Daten der Inertialmesseinheit (IMU) und GNSS-Daten ist. Dabei werden die komplementären Eigenschaften der beiden Messsysteme (INS/GNSS) genutzt und in einem Fusionsfilter verknüpft, um eine hochfrequente und stabile Lösung für Position und Lage gewährleisten zu können. Innerhalb dieser Kopplung werden die kurzzeitstabilen Messdaten (Drehraten und Beschleunigungen) der IMU mit den langzeitstabilen Daten des GNSS-System gestützt. Umgesetzt wurde dieses innerhalb eines Extended-Kalman-Filters, wobei zur Propagation des Vehikel-Zustandsvektors eine auf den gemessenen Drehraten und Beschleunigungen basierende Strap-Down-Rechnung mit zugehörigen Kovarianzmatrizen durchgeführt wird. Die Fusionierung erfolgt an Hand der GNSS-Daten in dem Update-Schritt des Kalman-Filters und stellt die Gewichtung (Kalman-Gain), die korrigierten Zustandsvektorewerte und Kovarianzmatrizen zu Verfügung, welche wiederum Ausgangspunkt für den nächsten Propagationsschritt sind. Die hochfrequent vorliegenden Daten des Zustandsvektors bilden wiederum ihrerseits die Grundlage für die weiteren Teilbereiche des INS/GNSS+X, des Mappings und der Führung&HMIs. (vgl. Abbildung 6-9)

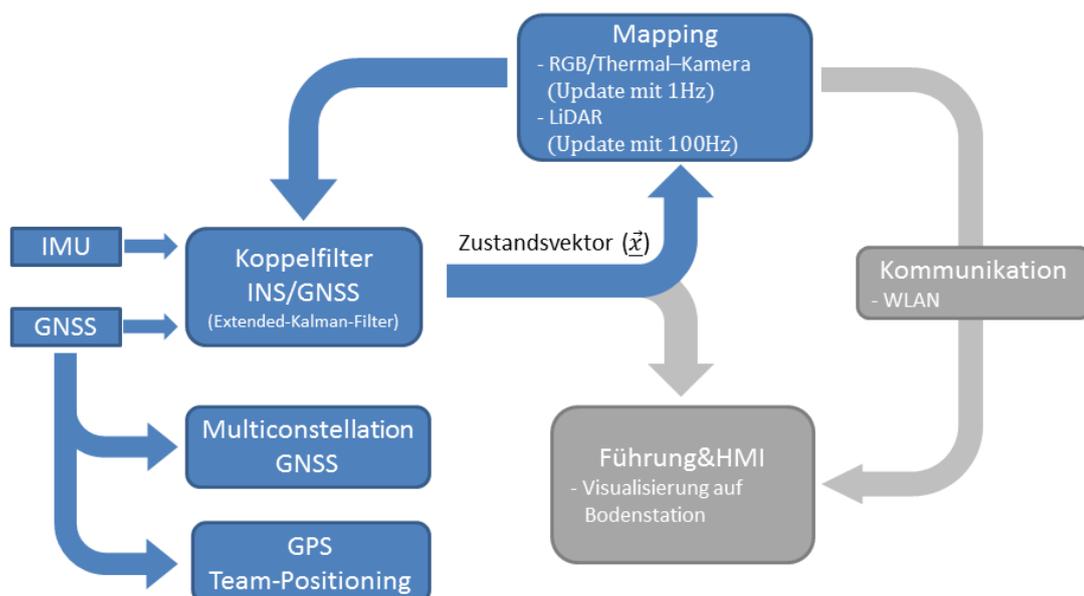


Abbildung 6-9: grundlegende Systemarchitektur der Positionierung und Lagebestimmung

Um Daten zwischen den Teilbereichen austauschen zu können, wurden Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen, verwendeten Software-Frameworks geschaffen. Bei den verwendeten Frameworks handelt es sich zum einem um das Navigations-Softwareframework des IFF und zum anderen um das Robot Operating System (ROS). Grundsätzlich lassen sich diese beiden Frameworks den unterschiedlichen Sensortypen und deren Verarbeitungsketten zuordnen. So arbeiten die optischen Sensoren, wie RGB, Thermal-Kamera und das LiDAR im ROS-Framework und der GNSS-Empfänger sowie die inertielle Messeinheit (IMU) im IFF-Navigationsframework. Da beide Frameworks mit Nachrichten arbeiten, in deren Header-Informationen eindeutige IDs enthalten sind, wird eine eindeutige Zuordnung von Nachrichtentypen in Bezug auf „Sender und Empfänger“ sicher gestellt, so dass eine sichere Kommunikation bzw. Datenaustausch gewährleistet ist.

Eine wichtige Grundlage für den Datenaustausch und -verarbeitung zwischen den Teilsystemen ist des Weiteren die Zeitsynchronisation, so dass nur Informationen mit dem gleichen Zeitstempel miteinander verarbeitet werden. Um dies sicher zu stellen, wurde ein GNSS-basierter NTP-Server, der systemweit eine einheitliche Zeitbasis bildet, aufgebaut. Hierbei wurde ein PPS-Signal des GNSS-Empfängers zur Triggerung des Setzens eines Zeitstempels für die Messdaten genutzt. Die eigentliche Zeitinformation wurde aus einem NMEA-Datenstrom vom GNSS-Empfänger realisiert. Dieses Konzept wurde bereits im Forschungsvorhaben NExt UAV genutzt und an die vorhandene Hardware in ANKommEn angepasst.

Neben dem zentralen Punkt des Koppelfilters und der sich daran anschließenden Verwendung des Zustandsvektors (\vec{x}), wurden ebenfalls Untersuchungen zur zeitgleichen Nutzung von mehreren GNSS-Systemen (multi-constellation) durchgeführt und eine Erweiterung der bereits bestehenden Algorithmen (Next UAV) zur Team-Positionierung unter Ausnutzung von GPS-Trägerphasen-Messungen vorgenommen. Die Rückführung bei Verlust von GNSS-Informationen von Ergebnissen aus den bildbasierten Teilarbeitsbereichen (z. B. Mapping) zur Stützung der Inertialen Messeinheit im zentralen Koppelfilter wurde ebenfalls implementiert und evaluiert.

6.2.1.1 Sensorauswahl

Zur Realisierung der beschriebenen Architektur wurden Sensoren ausgewählt, die nicht nur den Anforderungen resultierend aus der Architektur sondern auch insbesondere dem wichtigen Punkt des Gewichtes genügen, um dem maximal zulässigen Abfluggewichtes der UAVs zu entsprechen. Die Auswahl fiel dabei nach einer Marktrecherche auf den multi-constellation-fähigen GNSS-Empfänger ublox LEA-M8T. Dieser erfüllte alle gestellten Anforderungen hinsichtlich unterstützter GNSS-Systeme, Baugröße, Gewicht und der notwendigen Hardwareschnittstellen. Außerdem wurde als inertielle Messeinheit (IMU) eine ADIS16488 von Analog Devices ausgewählt, die eine Klassifizierung als „Tactical Grade“ besitzt und somit den wissenschaftlich-technischen Anforderungen in Hinblick auf Genauigkeit, Auflösung und Stabilität entspricht. Des Weiteren enthält diese IMU ein Magnetometer, mit dessen Messungen das Heading zum Alignment der IMU berechnet wird. Um die Messdaten dieses Sensors nutzen zu können, wurde vergleichbar der Trägerplatine für den GNSS-Empfänger ein Break-Out-Board für die IMU vom IFF designt und aufgebaut.

6.2.2 GNSS Multiconstellation

Generell erfordern automatisierte Operationen von UAVs und UGVs sowohl eine zuverlässige und valide Positionsbestimmung als auch sichere Informationen bzgl. der Lage und des Headings der Vehikel, letztere basierend auf inertialen Messdaten. Im Falle des Fliegens in der Nähe von Hindernissen oder Gebäuden kann der GNSS-Empfang reduziert oder auch gestört sein. Bei der Nutzung von nur einem GNSS-System z. B. GPS in einer solchen Umgebung kann es zu erhöhten Ungenauigkeiten in der Positionierung bis hin zu einem Verlust von Positionsinformationen kommen. (vgl. Abbildung 6-10)

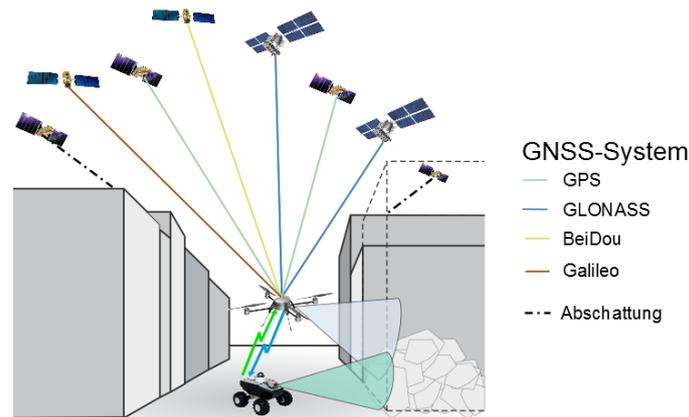


Abbildung 6-10: Signalabschattung durch Hindernisse und Nutzung von mehreren GNSS-Systemen

Um die Gefahr einer geringen Verfügbarkeit von GNSS-basierten Positionsinformationen zu reduzieren, kann die parallele Nutzung von mehreren unterschiedlichen GNSS-Systemen zu einer Erhöhung der Anzahl der empfangenen Satelliten-Signale führen. Aktuell existieren vier satellitengestützte Positionierungssysteme:

1. GPS mit aktuell 31 Satelliten [6]
2. GLONASS mit aktuell 24 Satelliten [7]
3. Galileo mit aktuell 14 Satelliten [8]
4. BeiDou mit aktuell 18 Satelliten [9]

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Systeme mit deren zugehörigen Sendefrequenzen und –bänder.

Tabelle 1: GNSS-Systeme und deren technischen Eigenschaften

GNSS-System	Satelliten-Anzahl/ Inklination	Frequenzen	Koordinaten-system
GPS	31 / 55°	L1: 1575,42 MHz L2: 1227,60 MHz L3: 1176,45 MHz	World Geodetic System 1984 (WGS84)
GLONASS	24 / 64,8°	L1F: 1602,0 MHz + $k \cdot 562,5$ kHz L1C: 1600,995 MHz L1CM: 1575,42 MHz L2F: 1246,0 MHz + $k \cdot 437,5$ kHz L2C: 1248,06 MHz L3C: 1202,025 MHz L5C: 1176,45 MHz	Parametry Zemli 1990 (PZ-90)
Galileo	14 / 56°	E1: 1575,42 MHz L6: 1278,75 MHz E5: 1191,795 MHz E5a: 1176,45 MHz E5b: 1207,14 MHz	Galileo Referenzrahmen (GTRF)
BeiDou	6 (GEO*) 6 (IGSO*) 3 (MEO*)	B1: 1561,098 MHz B1-2: 1589,742 MHz B1-BOC: 1575,42 MHz B2: 1207,14 MHz B3: 1268,52 MHz L5: 1176,45 MHz	China geodätisches Koordinaten-system 2000 (CGCS2000)

Da jeweils nur ein Subset von Satelliten-Signalen der jeweiligen Satelliten-Systeme empfangen werden kann, führt die zeitgleiche Verwendung von mehreren Satelliten-Systemen (multi-constellation) zu einer signifikanten Steigerung der Verfügbarkeit. Dabei gilt grundsätzlich, dass eine solche multi-constellation basierte Positionslösung mindestens der Genauigkeit einer single-constellation Lösung entspricht.

Um diesen Ansatz der multi-constellation Positionslösung folgen zu können, müssen unterschiedliche Aspekte berücksichtigt werden, welche im Navigationsframework des IFF umgesetzt wurden (vgl. Abbildung 6-11). Die Basis bildete dabei, die korrekte receiver-abhängige, multi-constellation-fähige Konfiguration und die softwareseitige Decodierung der Ausgabenachrichten (ubx-messages) des µblox M8T GNSS-Empfängers gemäß dessen ICD. In Abbildung 6-11 sind die umgesetzten Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten schematisch dargestellt. Ausgehend von einem GNSS-Receiver, der GNSS-Signale empfängt, werden in den Observation alle relevanten Informationen gesammelt und anderen Operationen zur Verfügung gestellt und in einem ObservationSet zusammengefasst. Um die Satelliten-Informationen einem GNSS-System richtig zuzuordnen zu können, wurden Strukturen geschaffen, die die Differenzierung anhand der Daten, welche sich in den Ephemeriden-Daten jedes einzelnen Satelliten befinden, erlaubt.

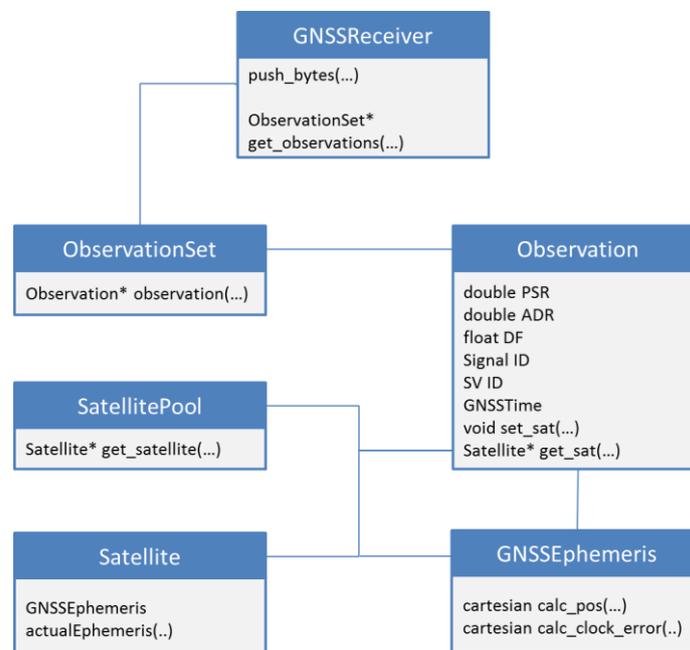


Abbildung 6-11: Übersicht der Umsetzung im IFF-Navigations-Softwareframework

Dabei wurde auch berücksichtigt, dass zum einen die einzelnen Navigationssysteme unterschiedliche geodätische Bezugsebenen nutzen und zum anderen eine unterschiedliche Zeitbasis aufweisen. Die Bezugsebenen sind in den entsprechenden GNSS-ICDs definiert und an den International Terrestrial Reference Frame (ITRF) angelehnt, welches eine Umrechnung mit den entsprechenden Parametern ermöglicht.

- GPS: World Geodetic System 1984 (WGS84) [2]
- GLONASS: Parametry Zemli 1990 (Parameter der Erde 1990 PZ90) [3]
- Galileo: Galileo Reference Frame (GTRF) [4]
- BeiDou: China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000) [5]

Neben den geodätischen Unterschieden müssen auch die zeitlichen Offsets zwischen den Systemen für eine verlässliche Positionsberechnung berücksichtigt werden. Um dies zu gewährleisten, wurde der Zustandsvektor innerhalb des Kopplungsfilters um entsprechende Uhrenfehler der jeweiligen Systeme erweitert.

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ c \cdot \Delta t_{GPS} \\ c \cdot \Delta t_{GLO} \\ c \cdot \Delta t_{GAL} \\ c \cdot \Delta t_{BDS} \end{pmatrix}$$

Mit

\vec{x} = Zustandsvektor

x, y, z = Position

$\Delta t_{GPS}, \Delta t_{GLO}, \Delta t_{GAL}, \Delta t_{BDS}$ = spezifischer Uhrenfehler (Offset)

c = Lichtgeschwindigkeit

Durch die Berücksichtigung der Uhrenfehler im Zustandsvektor steigt die Anzahl der unbekannt Variablen, welche bestimmt werden müssen, um die Gleichung lösen zu können. Sollten keine Messungen von einem der GNSS-Systeme vorliegen, vereinfacht sich diese Gleichung durch die Exklusion des entsprechenden Uhrenfehlers für die entsprechende Berechnungsperiode.

Ein anderer positiver Effekt der Anwendung des multi-constellation Ansatzes ist die bessere geometrische Verteilung der sichtbaren Satelliten, die zur Positionslösung genutzt werden. Dies spiegelt sich in einem niedrigeren Dilution of Precision (DOP) Wert wieder, was ein besseres Verhältnis zwischen den beobachteten Schrägentfernungen zur Positionslösung bedeutet.

6.2.2.1 Evaluation Multiconstellation

Das Navigationsframework des IFF ist sowohl für die online-Prozessierung von Messdaten als auch für eine Post-Prozessierung ausgelegt (vgl. Abbildung 6-12). Die Evaluation wurde mit aufgezeichneten Flugversuchsdaten im Post-Processing durchgeführt. Dabei werden gespeicherte Messdaten in das Softwareframework gestreamt und es besteht die Möglichkeit die Prozessierungsparameter zu verändern. Somit können die Algorithmen und deren Implementierungen analysiert und überprüft werden. Für den Teilbereich des GNSS-Multiconstellation wurde die Option die cut-of-elevation zu variieren, gewählt. Durch diese Option können gezielt Satelliten mit einer niedrigen Elevation von der Positionsberechnung ausgeschlossen werden. Dieser Parameter wurde in mehreren Schritten verändert, um unterschiedliche Umgebungsbedingungen wie z. B. Signalblockierung durch Gebäude zu simulieren und einen Vergleich zwischen der Anzahl der verfügbaren Satelliten zwischen einer multi-constellation und einer single-constellation basierten Positionslösung durchführen zu können. Die analysierten Daten stammen aus Feldversuchen, die während der Projektlaufzeit durchgeführt wurden.

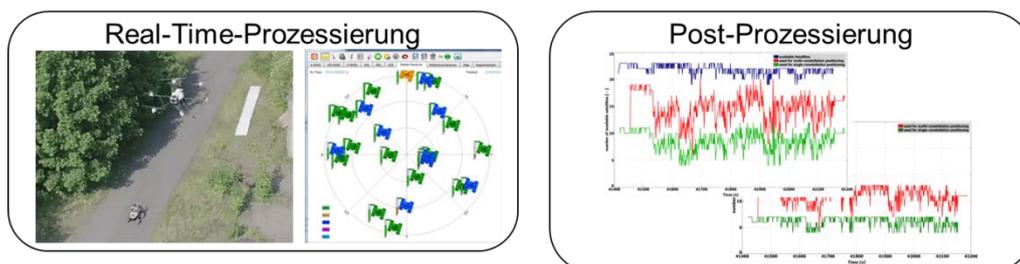


Abbildung 6-12: Navigationsframework des IFF für Real-Time- und Post-Prozessierung

Ausgangspunkt für den Vergleich der Auswirkung auf die Anzahl der verfügbaren Satelliten durch Simulation von Umgebungsbedingungen anhand des cut-of-elevation-Parameters ist eine cut-of-elevation von 5°. Dies ist für eine GNSS-Positionsrechnung ein üblicher Wert und exkludiert nur Satelliten von der Positionsrechnung deren Signale eine lange Wegstrecke durch die Troposphäre durchlaufen, was zu einem wachsenden, negativen Einfluss der

Troposphäre führt, die Positionslösung verschlechtert und eine Multipath-Ausbreitung begünstigt.

Das Ergebnis ist in Abbildung 6-13 dargestellt und zeigt, dass die Gesamtanzahl von verfügbaren Satelliten höher liegt als die Anzahl, die für eine Positionsrechnung genutzt wird. Dies wird durch die vordefinierte cut-of-elevation von 5° und durch weitere eingestellte Qualitätskriterien wie z. B. dem Signal-Rausch-Verhältnis verursacht. Das Kriterium des Signal-Rausch-Verhältnisses reduziert den Einfluss des modellbasierten Outputs des GNSS-Empfängers, welches einer Verfälschung der Messwerte gleich zu setzen ist. Dieser Schwellwert wurde für alle Auswertungen beibehalten.

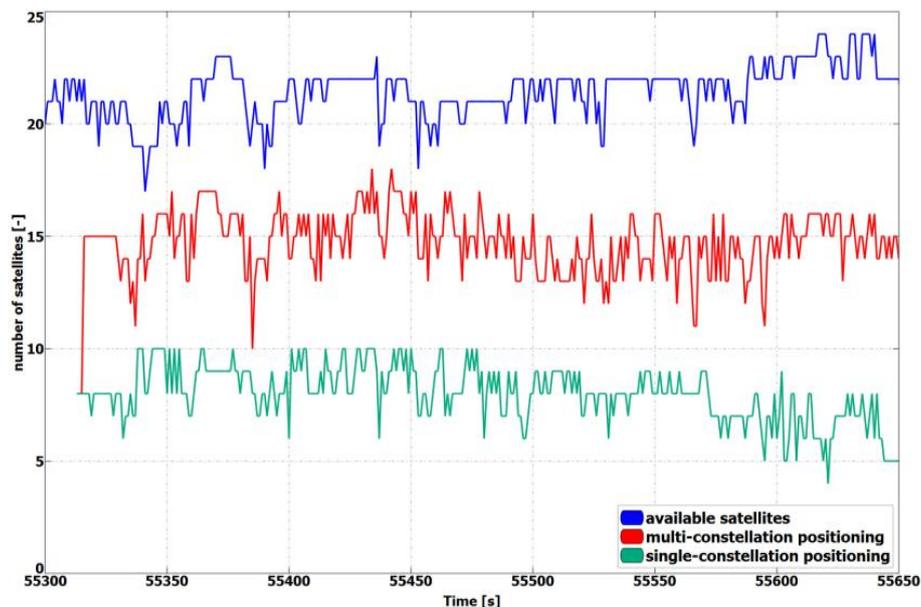


Abbildung 6-13: Anzahl von verfügbaren Satelliten im Vergleich zu verwandten Satelliten zur Positionsberechnung mit einer cut-of-elevation von 5°

Zu Beginn des Versuches liegen nach einer kurzen Initialisierungsphase, in welcher das Betriebssystem der Rechner und Basisprozesse für die Positionsrechnung gestartet werden, nach etwa 15 Sekunden alle Ephemeriden vor und die Gesamtanzahl von verfügbaren Satelliten beträgt etwa 21. Von diesen 21 werden 8 Satelliten für eine rein GPS-basierte (single-constellation) Positionslösung verwendet. Im Gegensatz hierzu werden etwa 15 Satelliten genutzt, um eine multi-constellation basierte Position zu bestimmen. Während des Fluges variiert die Anzahl von verfügbaren Satelliten, was durch die Bewegungen des UAVs beim automatisierten Abfliegen des vordefinierten Flugweges und Windbewegungen erklärt werden kann. Insgesamt steht aber über die gesamte Flugzeit nahezu die doppelte Anzahl von Satelliten für eine multi-constellation basierte Lösung zur Verfügung im Vergleich zu einer single-constellation basierte Lösung. (vgl. Abbildung 6-13)

Um einen degradierten GNSS-Empfang zu simulieren, wird die cut-of-elevation auf 20° gesteigert. Dies würde einem Flug in einem urbanen Szenario oder einem Gebiet mit Hindernissen wie z. B. Bäumen entsprechen. Hierbei ist eine Reduktion der Satellitenanzahl für eine single-constellation basierte Position auf 6 und weniger oder im Vergleich auf 10 oder weniger für eine multi-constellation basierte Position festzustellen. (vgl. Abbildung 6-14)

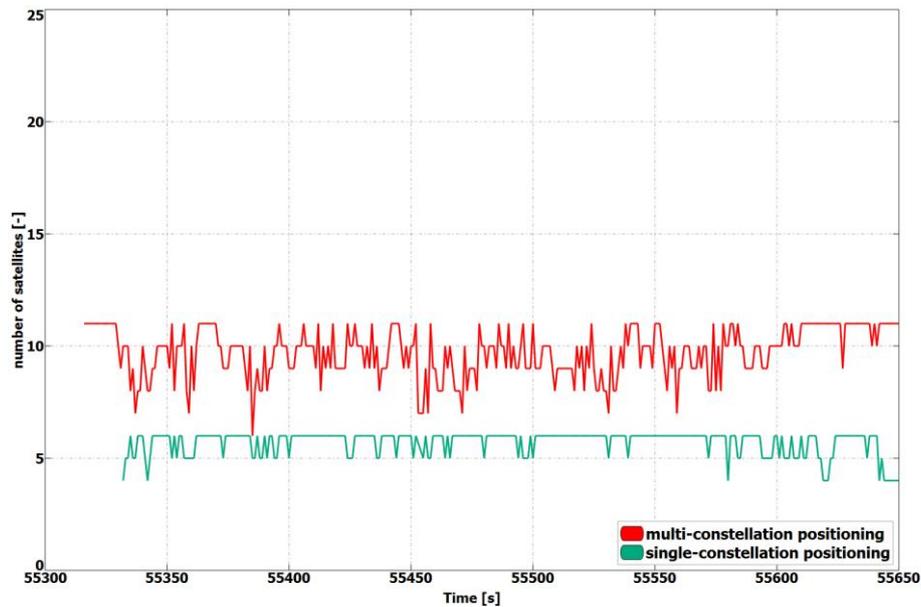


Abbildung 6-14: Anzahl von verfügbaren Satelliten im Vergleich zu verwandten Satelliten zur Positionsberechnung mit einer cut-of-elevation von 20°

Im Vergleich zu den Ergebnissen bei einer cut-of-elevation von 5° (Abbildung 6-13) variiert die Anzahl der Satelliten im geringeren Umfang, was bedeutet, dass der Effekt eines degradierten GNSS-Empfangs durch Eigenabschattung des UAV während Flugmanövern für Satelliten mit niedriger Elevation minimiert wird.

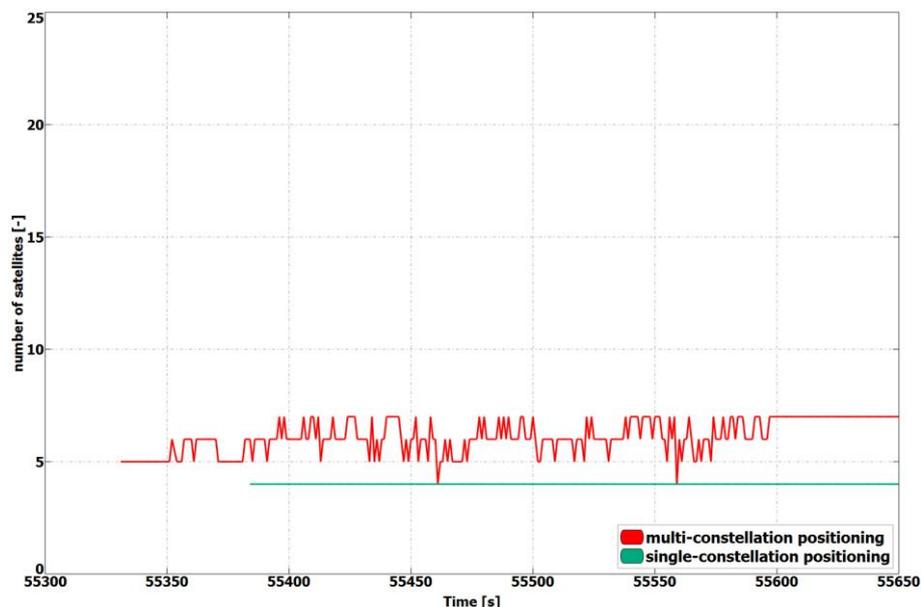


Abbildung 6-15: Anzahl von verfügbaren Satelliten im Vergleich zu verwandten Satelliten zur Positionsberechnung mit einer cut-of-elevation von 35°

Im letzten betrachteten Fall dieses Vergleichs werden lediglich Satelliten mit einer cut-of-elevation von größer als 35° für die Positionsbestimmung zugelassen (vgl. Abbildung 6-15). Dieser Fall simuliert ein Szenario, in dem ein UAV in der unmittelbaren Nähe von Hindernissen wie Gebäuden oder vergleichbar operiert, welches dem vorangegangenen Szenario mit einer cut-of-elevation von 20° ähnelt, das UAV allerdings in einer deutlich geringeren Höhe agiert, wodurch der GNSS-Empfang teilweise blockiert wird. Andererseits ist dies in vielen Fällen die Arbeitsumgebung für ein UGV, welche ein Gebiet erkunden. Die Graphen in Abbildung 6-15 zeigen, dass in einem solchen Fall eine Vielzahl von GNSS-Signalen von der Umgebung blockiert würde und eine single-constellation basierte Positionslösung erst mit einer Verzögerung von 50 Sekunden vorliegt im Vergleich zu einer

multi-constellation basierten Lösung. Außerdem wird nur die minimal benötigte Anzahl von vier Satelliten empfangen im Gegensatz zu einer multi-constellation basierten Position, die sich mit Hilfe von 5-7 Satelliten bestimmen lässt. Insbesondere dieser Fall verdeutlicht den positiven Effekt einer multi-constellation basierten Positionierung in Hinblick auf die Verfügbarkeit von GNSS-basierten Positionsinformationen.

6.2.3 GPS Trägerphasenauswertung im Team

Für die Auswertung von GPS Trägerphasenmessungen während des parallelen Betriebs mehrerer Trägersysteme ist es erforderlich, die entsprechenden Rohdaten innerhalb des Gesamtsystems über einen geeigneten Datenlink auszutauschen. Dafür wird auf dem im Vorgängervorhaben NExt UAV umgesetzten Kommunikationssystem, basierend auf dem XBee Funkstandard, aufgesetzt.



Abbildung 6-16: Prinzip Austausch GPS Messungen im Gesamtsystem

Die Datenaustauschstrategie basiert auf mobilen ad-hoc Netzwerken, um auf veränderte Netztopologien z. B. durch wegfallende oder neu hinzugekommene Kommunikationsteilnehmer zu reagieren. Dies erfordert im Vorfeld eines jeden Datenaustauschs eine Netzerkundung zur Bestimmung der aktuellen Netztopologie, gefolgt von Zeitslot-basierten Sendezyklen aller Teilnehmer im Netzwerk. Dadurch kann ein Datenaustausch mit einer Frequenz von 1 Hz ermöglicht werden. Da eine Regelung z. B. der UAVs nicht auf dieser Positionsinformation basiert, ist diese Updaterate als ausreichend einzustufen. Die dazu erforderliche Synchronisierung der XBee Module erfolgt durch ein Triggersignal, gespeist durch den GNSS Empfänger mit einer Frequenz von 1 Hz zu jeder vollen GPS-Sekunde. Für den Fall nicht vorhandener direkter Kommunikationsverbindungen, z. B. aufgrund von Abschattungen durch Infrastruktur oder der Entfernung zueinander, erfolgt der Datenaustausch durch Weiterleitung durch jeweils benachbarte Kommunikationspartner (Singlehop- oder Multihop-Verbindungen). Eine detaillierte Darstellung der Kommunikationsstrategie ist [1] zu entnehmen.

Abbildung 6-17 zeigt die entsprechende Hardwareintegration am Beispiel der eingesetzten UAV.

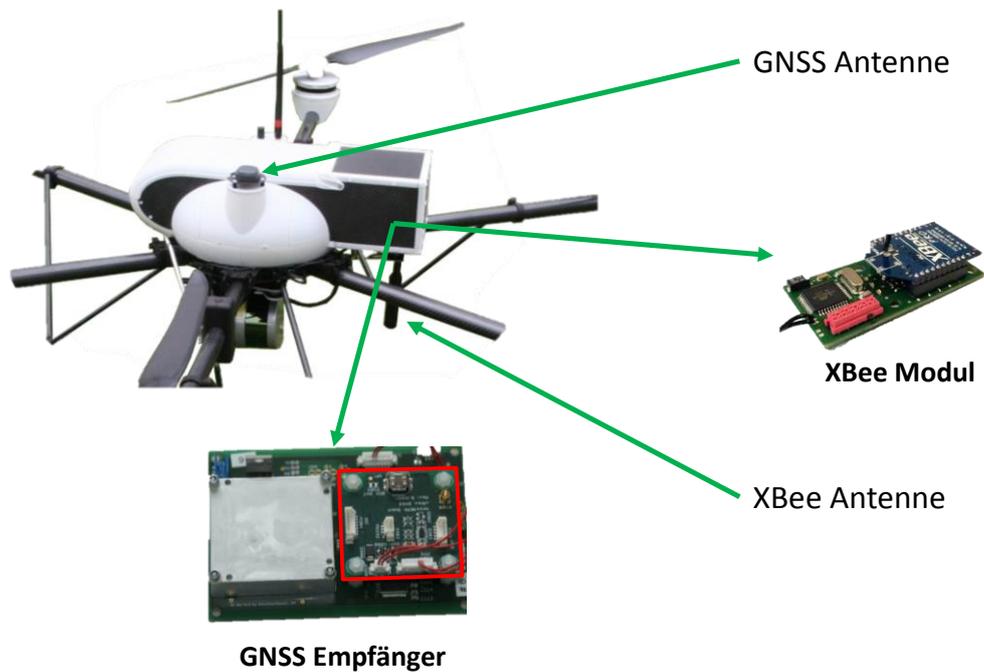


Abbildung 6-17: Hardware Team-Positioning

Dabei ist das XBee Modul, wie auch der GNSS Empfänger, im oberen Payloadcompartment des UAVs integriert, die Antenne an der Unterseite. Im Gegensatz zu NExt UAV kommen in ANKommEn Stabantennen mit größerem Antennengewinn zum Einsatz, während im Vorgängervorhaben XBee-Module mit integrierter Drahtantenne aufgrund der deutlich geringeren Nutzlastkapazität der dort eingesetzten UAV genutzt werden mussten. Dadurch und durch eine günstigere Payloadverteilung innerhalb der UAV Struktur (geringere Eigenabschattung) werden größere Entfernungen zwischen den Kommunikationspartnern bei einer stabileren Verbindung ermöglicht.

Für die GPS-trägerphasenbasierte Positionierung müssen unter den beteiligten Einheiten mindestens folgende Daten ausgetauscht werden:

- Maschinen-ID
- GPS-Codemessung, bestehend aus:
 - PRN
 - Pseudorange
 - Standardabweichung
- GPS-Trägerphasenmessung, bestehend aus:
 - PRN
 - Accumulated Doppler Range (ADR)
 - Standardabweichung
- Zeitstempel der Messungen

Da entsprechend des Systemkonzepts ständig eine Datenanbindung zur Bodenstation vorhanden ist (Systemkontrolle durch einen Operator), werden alle an einer Mission beteiligten Einheiten (UAV, UGV, Leitstand, mobile Einsatzkraft) an dem Datenaustausch beteiligt. Vor dem Austausch der Messdaten müssen die jeweiligen Messungen bestimmten Qualitätskriterien anhand definierter Parameter genügen, die standardmäßig im Positionierungssoftwareframework des IFF konfigurierbar sind. Zu diesen gehören z. B. eine ausreichend hohe Elevation (cut-off-elevation), ausreichendes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, eine Mindestempfangszeit der Signale des jeweiligen Satelliten.

Die Auswertung der Messungen beruht auf differentiellen Verfahren. Daher ist es erforderlich, dass für eine gemeinsame Auswertung der Messungen eine ausreichend große Schnittmenge von Messungen zu identischen Satelliten vorliegt. Des Weiteren muss nach

definierten Kriterien ein geeigneter Basissatellit ausgewählt werden, zu dem die Differenzen gebildet werden. Ein gängiges Kriterium ist, den Satelliten mit der höchsten Elevation zu nutzen, da hier eine ausreichend gute Sichtbarkeit erwartet werden kann. Der Ansatz beruht wie in NNext UAV auf der Bildung von Delta Doppeldifferenzen, die mit dem Standalone Gleichungssystem kombiniert werden. So findet eine kombinierte Berechnung der absoluten und relativen Positionen zueinander statt.

Abbildung 6-18 zeigt die zugrundeliegende Struktur und den Datenfluss für das GPS-basierte Team-Positioning. Auf der einen Seite fließen die Messungen des internen GNSS Empfängers in die weitere Verarbeitung ein. Nach einem Filter in dem die o. g. Qualitätskriterien angewandt werden, fließen die ausgewählten Messungen in die GPS Team-Positionierung ein und werden für den Datenaustausch bereitgestellt. Die empfangenen Daten der anderen Kommunikationspartner werden innerhalb eines Datenpuffers ggf. zwischengespeichert, verwaltet und fließen ebenfalls in den Block des Team-Positioning ein. In diesem Block werden diese entweder rein codebasiert ausgewertet oder es findet die Bestimmung der Fließkommamehrdeutigkeiten statt, mit nachfolgender Bestimmung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten. Auf dieser Grundlage wird dann die Trägerphasenlösung berechnet. Anschließend steht die Positionslösung für die weitere Verarbeitung zur Verfügung, z. B. Fusion mit inertialen Messdaten, Georeferenzierung von Messungen der bildgebenden Explorationssensorik. etc.

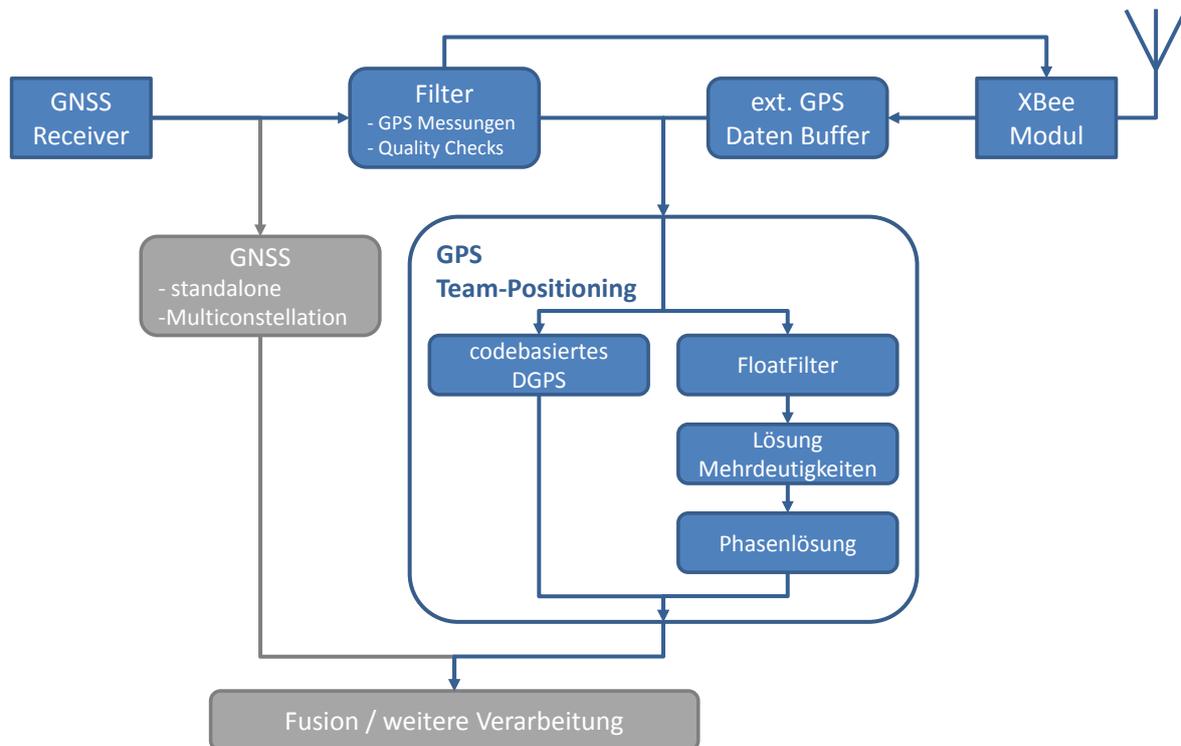


Abbildung 6-18: Struktur und Datenfluss GPS Team-Positioning

Abbildung 6-19 zeigt die Trajektorienplots basierend auf der Auswertung der Trägerphase beispielhaft anhand eines Tests auf dem Testgelände im Parallelbetrieb von zwei UGV und einem UAV (zwei aufeinanderfolgende Flüge im Surveymodus).

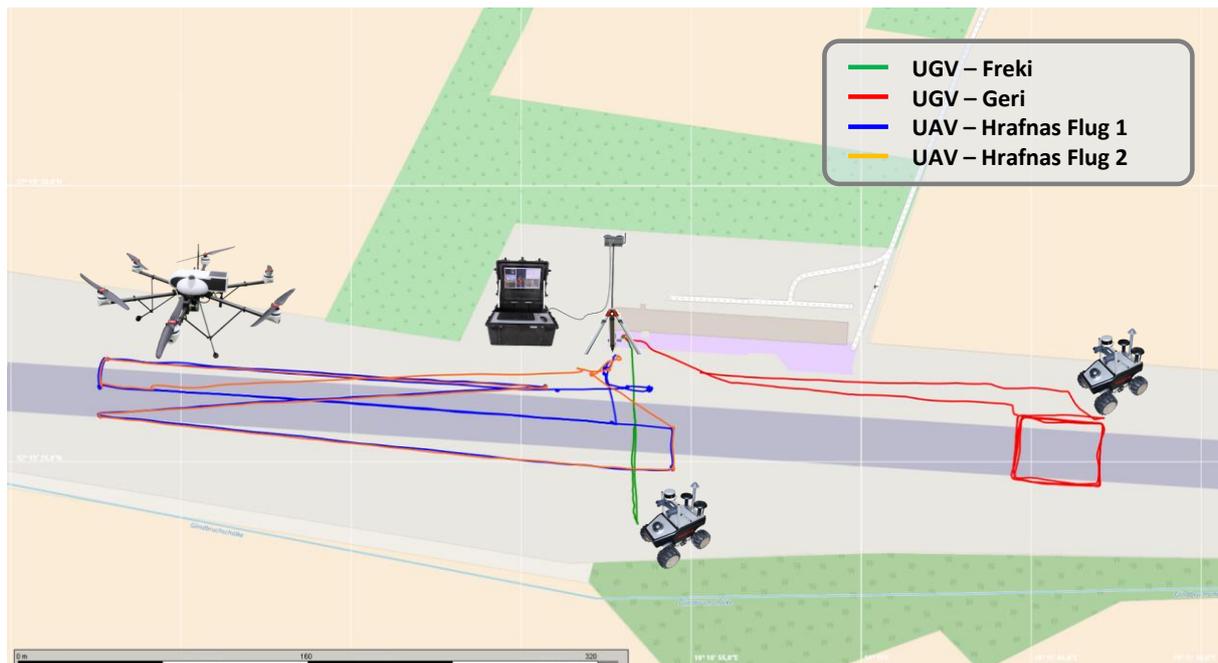


Abbildung 6-19: Team-Positioning mit GPS Trägerphase

Hinsichtlich des Rauschverhaltens zeigen sich Vorteile bei der Auswertung der Trägerphase gegenüber den codebasierten Lösungen. Dem gegenübergestellt steigen die Komplexität der Berechnungen und damit die benötigte Rechenkapazität. Negative Auswirkungen konnten dabei nicht festgestellt werden. Dieses ist auch auf das umgesetzte Payloadkonzept zurückzuführen, bei dem für den Bereich der Positionierung eine Prozessierungseinheit eingesetzt wird, die ausschließlich für die Erfassung und Verarbeitung der Daten vom GNSS-Empfänger und der Inertialmesseinheit zuständig ist, vgl. Abschnitt 6.6.2. Einschränkungen sind wiederum bei der Verfügbarkeit bei der Auswertung der Trägerphase zu verzeichnen. Dies ist zum einen bei herausfordernden Empfangsbedingungen auf die Notwendigkeit einer ausreichend großen Schnittmenge identischer beobachteter Satelliten zurückzuführen. Zum anderen ist die Mehrdeutigkeitssuche nicht trivial, insbesondere vor dem Hintergrund, dass mit dem verwendeten ublox-M8T GNSS Empfänger ein Einfrequenzempfänger zum Einsatz kommt und somit bei der Lösung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten keine Verfahren wie Widelaning durch GPS-L2-Phasenmessungen zur Anwendung kommen können. Ebenso wirkt sich bei Verlust der Phasenlösung ein dynamisches Fahr-/Flugverhalten negativ auf die Mehrdeutigkeitssuche während einer Mission aus. Bei kommandierten Manövern kann dieses beeinflusst werden, bei umgebungsinduzierten Ursachen, wie starke Lagewinkeländerungen aufgrund von Böen (UAV) oder anhaltend wechselnde Sichtbarkeit aufgrund Infrastruktur/Bewuchs (UGV), nur sehr bedingt.

Die in Abbildung 6-20 dargestellte Gegenüberstellung der codebasierten Lösung und der trägerphasenbasierten Lösung zeigt auch unter guten Empfangsbedingungen die Vorteile des reduzierten Rauschverhaltens der Lösung. Dieses wird im Höhenkanal erwartungsgemäß noch deutlicher (Abbildung 6-21).

Diese Eigenschaft wirkt sich positiv für die Bereiche der Georeferenzierung anderer Sensordaten aus, wie auch für das Monitoring der Trägersysteme während der Missionsdurchführung. Im Fall der UAV besonders der Höhenkanal, z. B. bei Missionen über Gebieten mit Infrastruktur/Bewuchs und im Parallelbetrieb zweier UAV hinsichtlich der Überwachung einer sicherheitsbedingten vertikalen Separation.

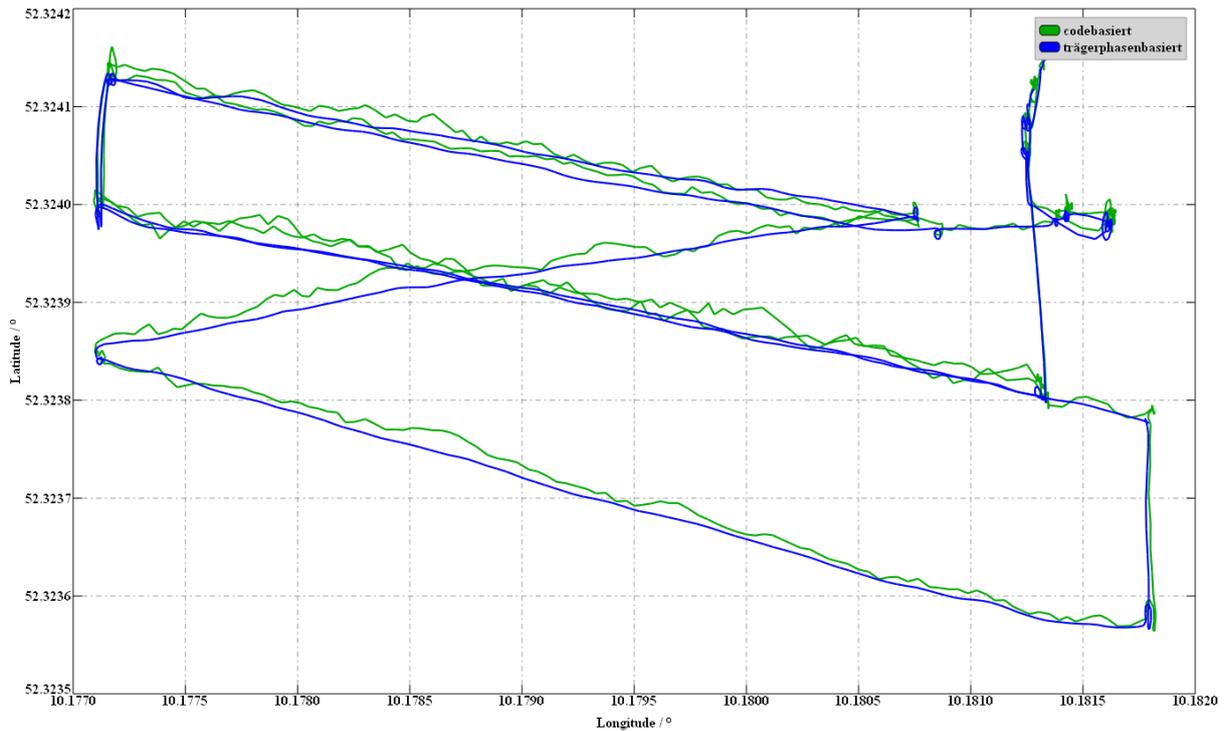


Abbildung 6-20: Bodentrajektorie UAV – codebasierte und trägerphasenbasierte Lösung

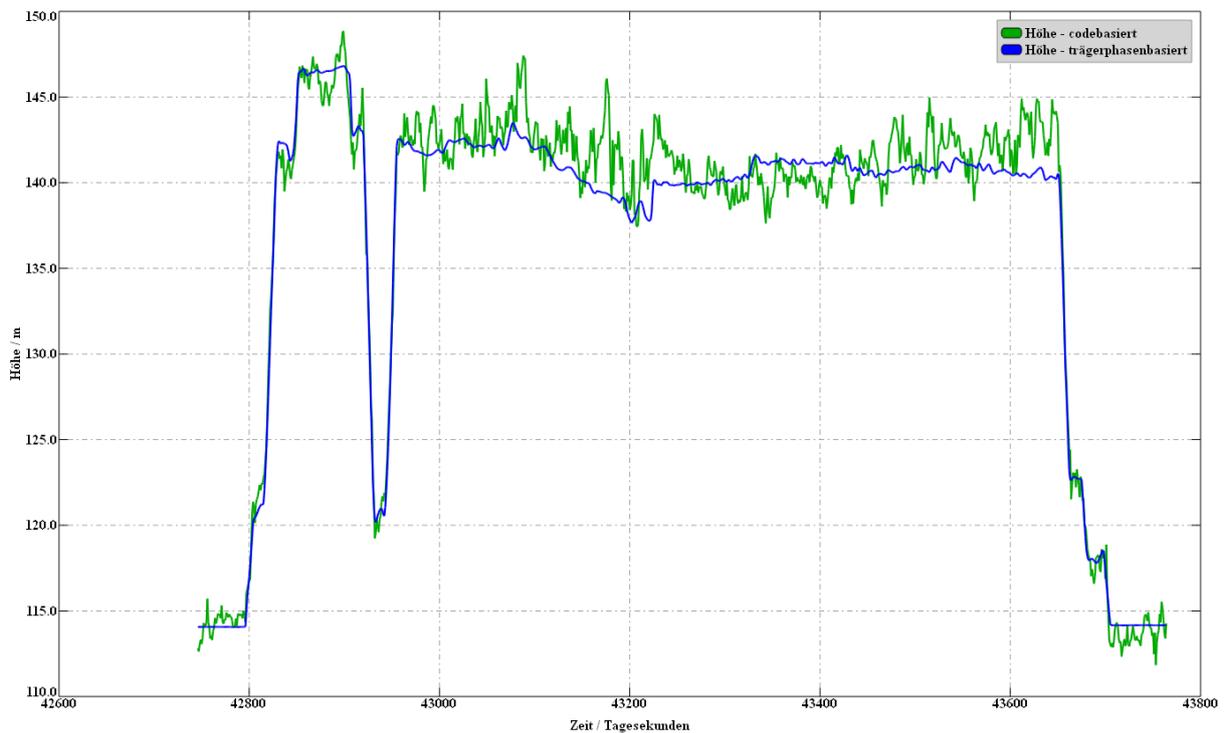


Abbildung 6-21: Flughöhe UAV – codebasierte und trägerphasenbasierte Lösung

Insofern konnten die im Vorgängervorhaben festgestellten Eigenschaften der codebasierten Auswertung sowie die Erwartungen an eine trägerphasenbasierten Auswertung bestätigt werden.

6.2.4 Fusion von INS/GNSS mit weiteren Sensoren

Der beschriebene GNSS multi-constellation Ansatz trägt zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Positionsinformationen bei. In dem beschriebenen Hardwaresetup liefert eine rein auf GNSS basierte Positionierung Informationen in einem Frequenzbereich von 1 Hz bis 5 Hz. Für eine zuverlässige Georeferenzierung der beschriebenen optischen Sensoren müssen diese Georeferenzierungsdaten eine wesentlich höhere Frequenz aufweisen und neben der Position ebenfalls Lage- und Headingdaten des UAV bzw. UGV beinhalten. Für die Bereitstellung dieser Informationen bedarf es zur hochfrequenten Bestimmung der Lage und des Headings der UAVs oder UGVs an sich zwingend einer inertialen Messeinheit (IMU).

Zur Stabilisierung der IMU wurden GNSS-Positionsdaten genutzt und mittels eines Extended Kalman Filters im Navigationssoftwareframework des IFF realisiert. Die eingesetzte ADIS IMU liefert dabei hochfrequente, dreidimensionale Messwerte von Beschleunigungen und Drehraten, die als Eingangsgrößen im Propagationsschritt des Filters für eine Strap-Down-Rechnung genutzt werden. Das Ergebnis dieser Rechnung liefert die Position, die Geschwindigkeit, die Lage und Heading-Informationen zusammenfasst als Zustandsvektor mit der benötigten Frequenz in Echtzeit.

Um während einer Phase der Nichtverfügbarkeit, auch im Falle des multi-constellation Ansatzes, von GNSS-Informationen trotzdem die IMU stützen zu können, wurde die Möglichkeit genutzt, diese mit Daten von den optischen Sensoren zu stabilisieren. Hierfür wurden die notwendigen Strukturen im Softwareframework des IFF geschaffen, um die Position und/oder Positions-/Lageinkremente der optischen Sensoren zur Stützung verwenden zu können. Der gestützte Zustandsvektor wird dann wiederum seinerseits für die Georeferenzierung der optischen Sensoren und deren weiteren Verarbeitungsketten wie z. B. der Photogrammetrie oder auch SLAM Anwendung verwandt. Eine Darstellung dieser Motivation ist in Abbildung 6-22 dargestellt. Zusätzlich zu der Option eine bilddatenbasierte Stützung durchführen zu können, wurden ebenfalls Strukturen geschaffen, die es erlauben auch Statusinformationen zu berücksichtigen. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei eine Information bzgl. des Bewegungszustandes der Vehikel. Im Falle des UAVs ist dies die Information, ob die Motoren/Rotoren rotieren und im Falle des UGVs ob sich das Vehikel bewegt. Für die UAVs wurde diese Information speziell für die Initialisierung des Messsystems am Boden bis um Abheben des UAVs und bei Zwischenlandungen verwendet, um einen Systemzustand zu identifizieren, der es erlaubt ein Driften der inertialen Lösung durch ein „Zero-Velocity-Update“ im Kalman Filter zu minimieren. Bei den UGVs kommt dieses Zero-Velocity-Update im Falle eines detektierten Stillstands des Vehikels zum Tragen und wird durch die Auswertung der Informationen der Radencoders festgestellt. Erst durch die Auswertung der Radencoders konnte zwischen dem Stillstand (weder translatorische noch rotatorische Bewegung) und durch den Einzelradantrieb mögliche reine rotatorische Bewegung (Drehen auf der Stelle) unterschieden werden.

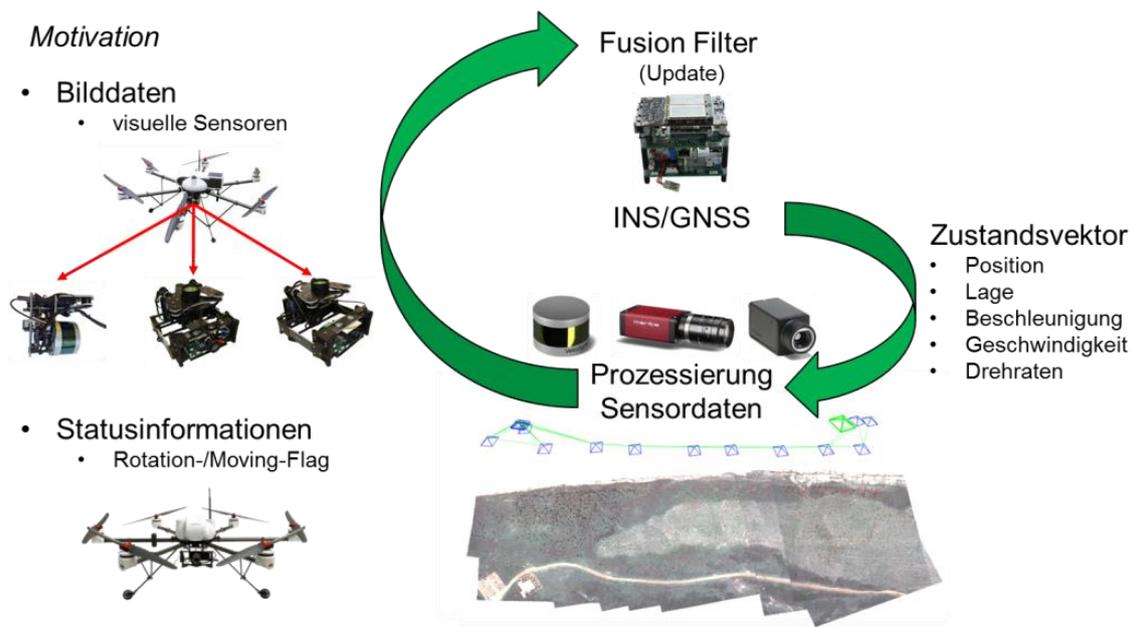


Abbildung 6-22: Motivation der IMU-Stützung durch optische Sensoren und weitere Vehikelinformationen

Eine detaillierte Darstellung des Ablaufes eines auf Bilddaten basierte IMU-Stützung gibt Abbildung 6-23 wieder. Die Informationen aus den Bilddaten wurden mit Hilfe eines ORBSLAM-Ansatzes gewonnen und wird in Abschnitt 6.4.1 beschrieben. Grundsätzlich kann der Prozess aber in die drei Teilbereiche Bildaufnahme, Feature-Detektion und Tracking gegliedert werden. Durch die Rückrechnung der Veränderung der getrackten Feature-Positionen in aufeinanderfolgenden Bildern auf die Vehikelposition wurden Stützinformationen für das inertielle Messsystem gewonnen, die in dem Fusionsfilter berücksichtigt wurden.

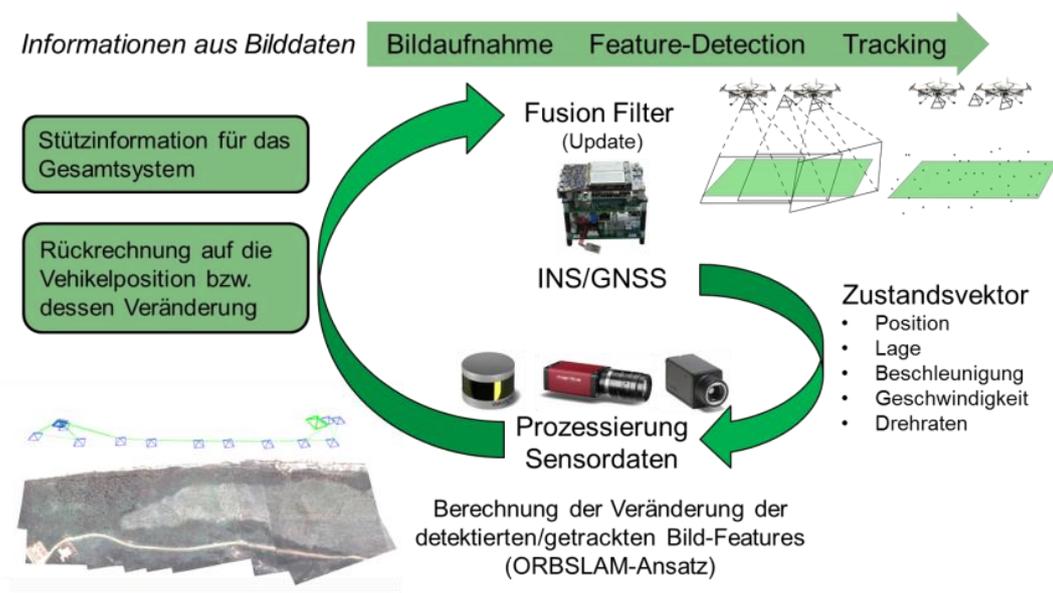


Abbildung 6-23: Ablauf der IMU-Stützung anhand von Bilddaten

Hierfür wurden im Filter entsprechende Strukturen geschaffen, die indiziert durch den Zeitstempel der Bildaufnahmen und deren jeweiligen Positionsinformation eine genaue zeitliche Synchronisation im Update-Schritt innerhalb des Filters ermöglichen. Zur Evaluation der Implementierung und Funktionsweise dieses Filter-Updates wurden aufgezeichnete Daten realer Flugversuche im Post-Processing analysiert. Exemplarisch ist das Ergebnis einer solchen Auswertungen in Abbildung 6-24 dargestellt. Die Graphik im Hintergrund zeigt die berechnete Trajektorie basierend auf einer reinen INS/GNSS basierten Fusion (blauer

Graph). Zu Beginn wurde das UAV manuell geflogen und an dem Punkt, der als „Initialisierung bildbasierte Lösung“ bezeichneten Stelle in den automatischen Waypointmodus überführt. Nach einem 20 Sekunden andauernden Hovern auf dieser Position, war der ORBSLAM-Algorithmus initialisiert. Prinzipbedingt liefert der ORBSLAM erst nach der Aufnahme und Verarbeitung von einigen Bildern, in denen Features getrackt werden und eine Berechnung erfolgt, robuste Ergebnisse. Die Ergebnisse werden anschließend im Filter-Update genutzt.

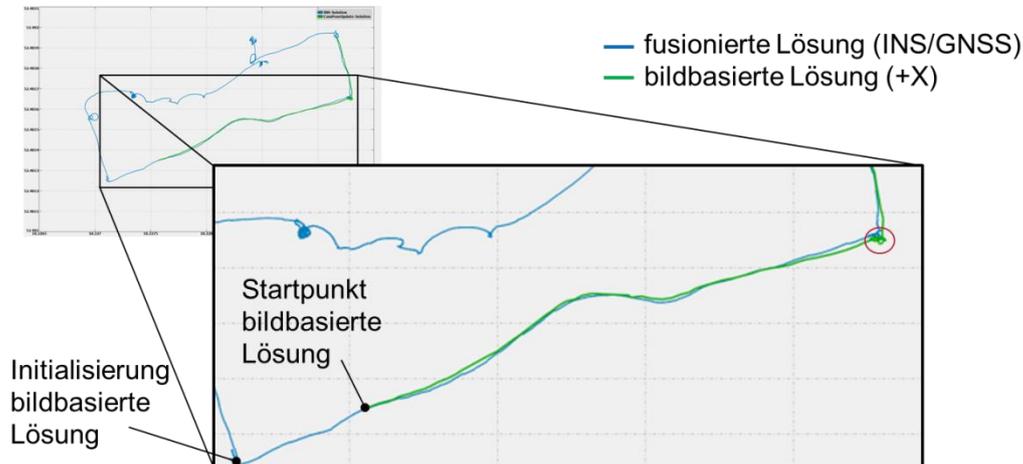


Abbildung 6-24: Trajektorie einer INS/GNSS+X-Kopplung

Um das Potential einer bildbasierten IMU-Stützung aufzeigen, wurde im Post-Processing ab dem „Startpunkt bildbasierte Lösung“ im Navigations-Softwareframework, die GNSS Positionsinformation zur Stützung vollständig deaktiviert, so dass eine Stützung ausschließlich auf Bilddatenbasis erfolgt (grüner Graph). Eine genauere Auswertung des Vergleichs zwischen der „fusionsbasierte Lösung (INS/GNSS)“ und der „bildbasierten Lösung (+X)“ erfolgte mittels des horizontalem Fehlers zwischen diesen beiden Lösungen. (vgl. Abbildung 6-25)

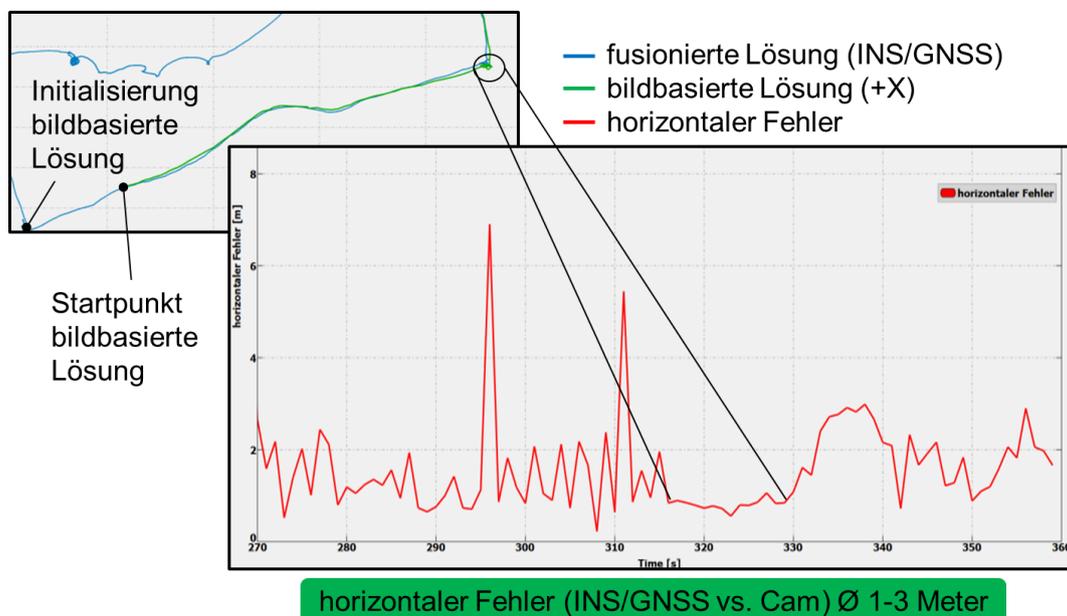


Abbildung 6-25: Horizontaler Fehler bei bildbasierter IMU-Stützung

Die resultierende Ablage zwischen den beiden Lösungen liegt im Mittel zwischen 1-3 Meter, was unter den gegebenen Bedingungen mit teilweise starkem und böigem Wind als sehr gut einzustufen ist. Größere punktuelle Abweichungen können durch Fehllassoziationen beim Feature-Tracking im ORBSLAM erklärt werden, welche durch sehr starke Böen verursacht wurden. Auf der anderen Seite konnte beim Erreichen des nächsten Eckpunktes und

dortigem Hovern, die erwartete, stetige Lösung und Reduzierung des Fehlers auf ein konstantes Offset beobachtet werden (kreisförmige Markierung).

Dieser Offset resultiert aus dem Prinzip des ORBSLAM, da dieser alle aufgenommenen Bilder in eine Referenzebene projiziert, die bei der Initialisierung des SLAM für alle weiteren Berechnungen gebildet wird und geländespezifische Abweichungen im weiteren Flugverlauf nicht berücksichtigt. Insgesamt ist festzustellen, dass die bildbasierte IMU-Stützung selbst im simulierten Fall der vollständigen GNSS-Signal-Blockierung sehr gut und robust arbeitet und die fusionierte Lösung über einen Zeitraum von mehr als einer Minute lediglich einen Fehler von 1-3 Metern aufweist.

6.2.5 GNSS Position & Lage für UAV-Steuerung

6.2.5.1 Einführung RTK

Die Genauigkeit der satellitenbasierten Positionsbestimmung sollte mindestens in den Dezimeterbereich verbessert werden. Dazu sollte ein Real Time Kinematic (RTK) Global Navigation Satellite System (GNSS) Verfahren verwendet werden. Dabei handelt es sich um die Echtzeitvariante einer differenziellen Positionsbestimmung, bei der Korrekturdaten verwendet werden um die Relativ-Position einer Mobilstation zu einer feststehenden Basisstation präzise zu bestimmen.

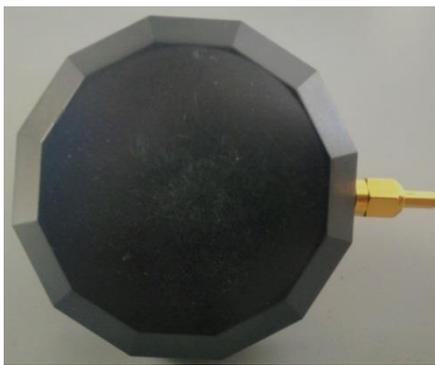
Das System sollte zudem auf einem Multi-Constellation sowie Multi-Frequency Receiver basieren. Durch den Empfang mehrerer Satellitensysteme (GPS, GLONASS und evtl. Beidou und Galileo) kann ein GNSS-Empfänger eine größere Anzahl von Satelliten zur Positionsbestimmung nutzen, wodurch sich auch die Resistenz gegenüber Empfangsstörungen durch Hindernisse sowie Multipatheffekte erhöhen sollte. Der Empfang mehrerer Frequenzen (L1, L2) jedes Satelliten erlaubt dem Receiver die selbstständige Korrektur bestimmter atmosphärischer Störungen und dadurch bereits einen Genauigkeitsgewinn. Im RTK-Betrieb kann eine weitere Steigerung der Positionsgenauigkeit in den angestrebten Bereich erfolgen.

6.2.5.2 Komponenten und Testkonfiguration

Um eine RTK Positionsbestimmung zu realisieren stehen sowohl Open-Source Softwarebibliotheken wie RTKLIB [44] als auch komplett RTK fähige GNSS-Empfänger verschiedener Hersteller zur Verfügung. Da für RTKLIB in einer vorrangegangenen Studienarbeit [45] eine sehr lange durchschnittliche Zeit bis zur Verfügbarkeit der ersten Positionslösung (time to first fix) festgestellt wurde, sollte in diesem Projekt ein RTK System eines namhaften Herstellers evaluiert werden. Die Wahl fiel auf das AsteRx-m Modul von Septentrio, da es sich unter anderem durch eine kleine Bauform und eine vergleichsweise geringe Stromaufnahme auszeichnet.

Die essentiellen Hardware-Komponenten des RTK Systems bestehen aus dem GNSS-Modul welches die empfangenen Satellitensignale verarbeiten kann, sowie einer Antenne von AeroAntenna Technology, die die gewünschten GNSS Frequenzen empfangen kann. Es folgt eine kurze Übersicht, über deren Parameter:

Tabelle 2: Testkomponenten

		
Subsystem	GNSS-Modul	Multi-Frequency Antenne
Bezeichnung	<i>Septentrio AsteRx-m</i>	<i>AeroAntenna Technology AT1675-504</i>
Dimensionen	70 x 47.5 x 3.5 mm	67 x 73 x 22 mm
Gewicht	47g	125g
Leistung / Frequenzen	350-600mW bei 3,3V auf L1, L2 Frequenzen	36dB Gain auf L1, L2, G1 und G2 Frequenzen

Das linke Bild in Tabelle 2 zeigt das Septentrio Modul auf einem Evaluationsboard. Das eigentliche Modul ist rot hervorgehoben.

Bei der Antenne fällt hauptsächlich auf, dass sie mit 125 Gramm eine große Gewichtskomponente mitbringt. Sie zeigte jedoch in einem Vergleich mit anderen Antennen eine überlegene Empfangscharakteristik.

Die für die Funktionsweise von RTK unerlässlichen Korrekturdaten werden entweder von einem GNSS-Receiver in der statischen Basisstation oder dem, per Internet verfügbaren, Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) [46] erzeugt. Sie gelangen dann über eine Datenfunkstrecke oder einen Mobilfunkzugang zum RTK-Receiver des Rovers. Dieser verarbeitet sie zusammen mit den von der Antenne empfangenen Satellitensignalen zu einer RTK Lösung. In einem ersten Schritt sollen diese Lösungen nur gespeichert und ausgewertet werden. Im nächsten Schritt müssen sie dem Flugboard der Drohne zugeführt werden, damit sie für die Navigation genutzt werden können.

Die Konfiguration des Testaufbaus zur Untersuchung des RTK-Systems ist in Abbildung 6-26 dargestellt:

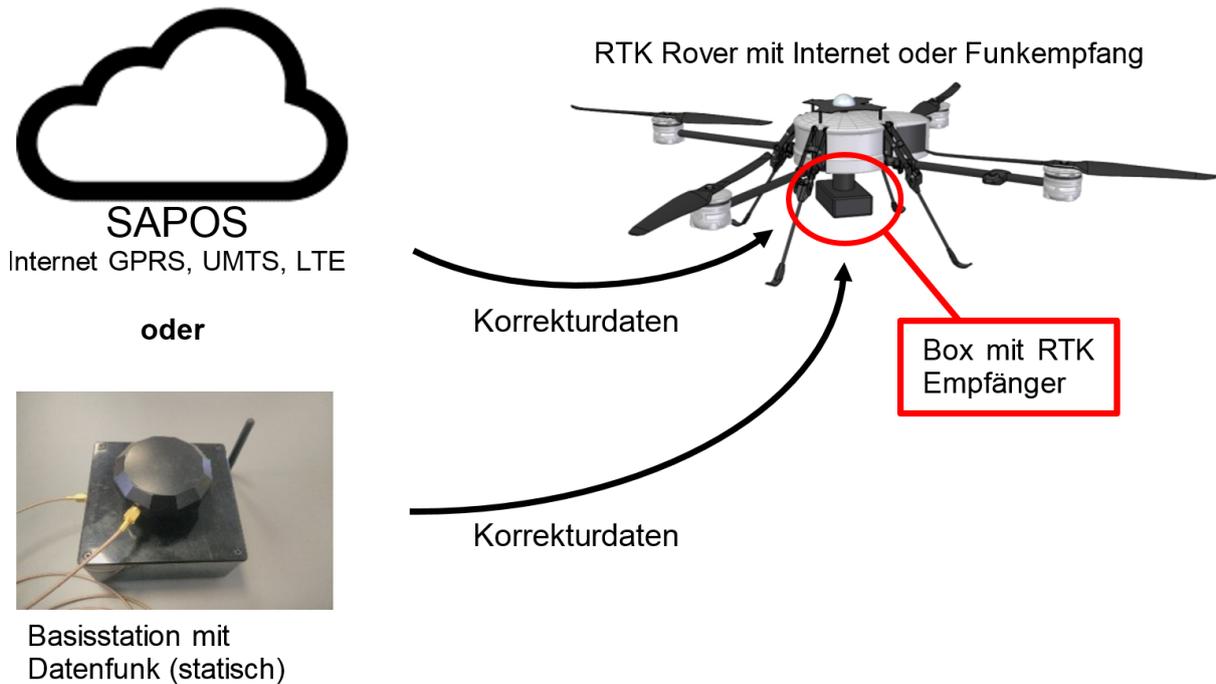


Abbildung 6-26: Testaufbau

6.2.5.3 Protokollauswahl

Zur Auswahl eines Datenformats für die Übertragung der Korrekturdaten von der Basis zum Rover wurden die gebräuchlichen Protokolle evaluiert. Das RTCMv3 Format wird von den meisten modernen RTK-GNSS-Receiver unterstützt und ist gegenüber seinem Vorgänger RTCMv2 hinsichtlich der Dateneffizienz optimiert und auch kompakter als das CMR Protokoll. Da die Korrekturdaten per Funk an die Drohne übertragen werden müssen, ist die benötigte Übertragungsrate das ausschlaggebende Kriterium für die Wahl des RTCMv3 Formats.

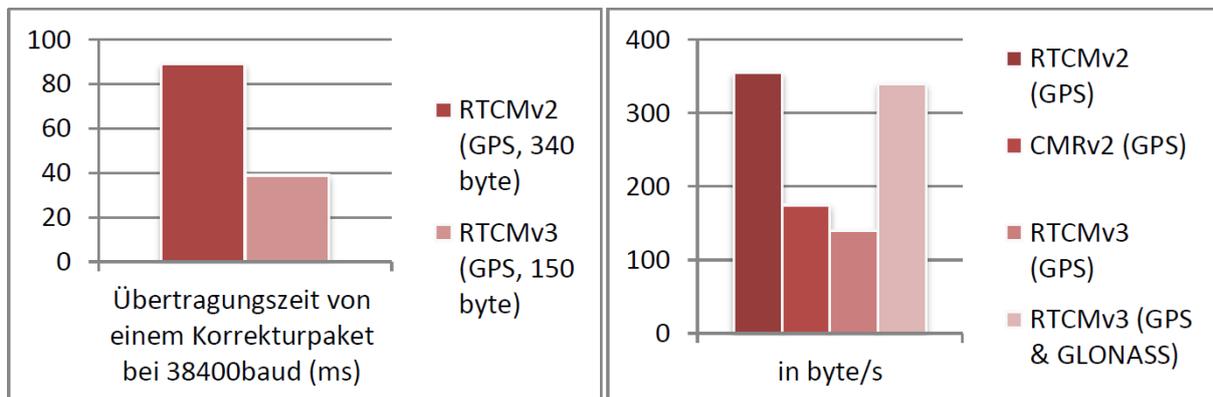


Abbildung 6-27: Vergleich von RTK Korrekturdaten-Protokollen

6.2.5.4 Statische Tests mit mobiler Bodenplattform (relative Genauigkeit)

Das Ziel dieser Tests war die Messung der Punktgenauigkeit der RTK GNSS Daten gegenüber einer bekannten Struktur, mit einem gemeinsamen Referenzpunkt. Die Bodentests fanden auf einem alten Kasernengelände (siehe Abbildung 6-28) statt und dienen zur Messung der relativen Genauigkeit des Systems.



Abbildung 6-28: Testgelände für Bodentests

Um die Punkte zu vermessen, wurde anstelle einer Drohne eine mobile Bodenplattform konzipiert und gebaut (siehe Abbildung 6-29 links), welche sowohl eine Möglichkeit zum Ausrichten eines Lots, sowie einen Platz für die RTK GNSS Antenne hat, als auch die nötige Messtechnik verstauen kann. Dabei findet die Antenne am höchsten Punkt Platz, damit deren Empfang ungestört ist.

Mit der Plattform wurde ein Rechteck (30 m x 8 m) vermessen, indem an den Eckpunkten und den Mittelpunkten der langen Seitenlinien Markierungen, wie in Abbildung 6-29 rechts gezeigt, angebracht wurden. Diese wurden anschließend abgefahren und an jedem Punkt wurde das System lotrecht genau auf der Markierung platziert. An jedem der sechs Punkte wurde zwei Minuten verweilt und Positionsdaten wurden gesammelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-30 dargestellt. Exemplarisch ist der erste Punkt vergrößert dargestellt. Bei einem ersten Test kamen die RCTM Korrekturen von der Basisstation und beim zweiten Test vom SAPOS Internetdienst.

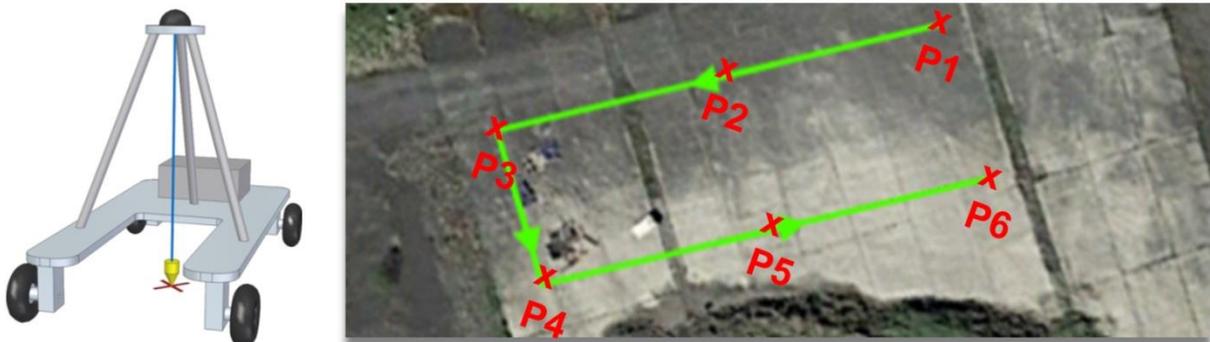


Abbildung 6-29: Mobile Bodenplattform und Messpunkte

Die jeweils gemessenen Positionen an den einzelnen Punkten wurden auf ihre Abweichung zum Vermessungspunkt und ihre Streuung hin ausgewertet. Die Ergebnisse sind als Differenzen bzw. Standardabweichungen in X- und Y-Richtung in Tabelle 3 und Tabelle 4 angegeben.

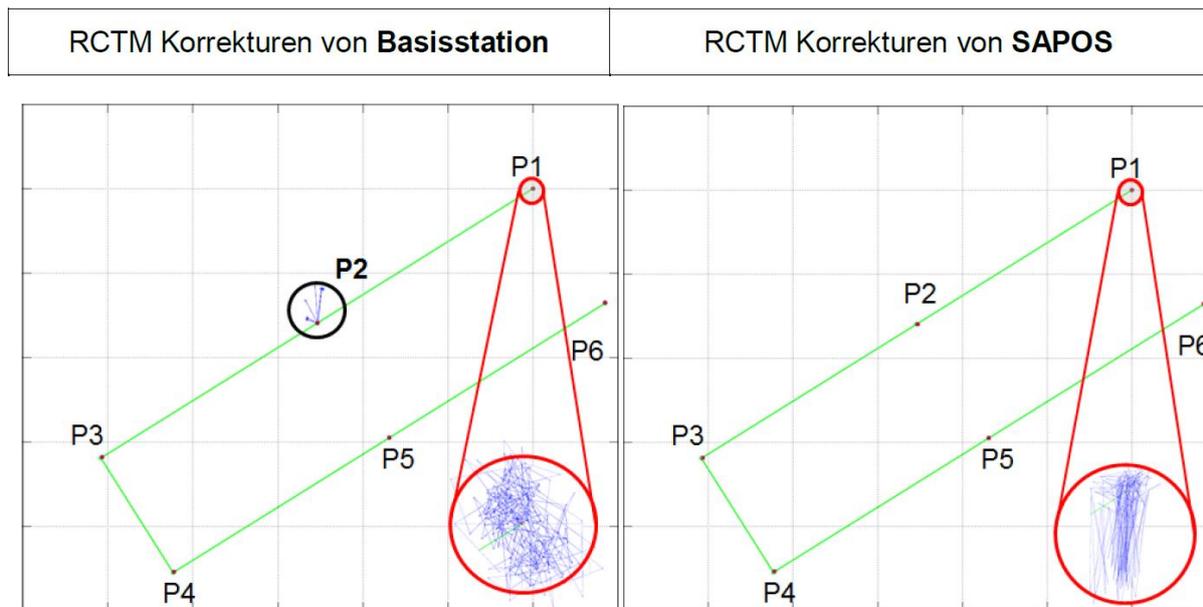


Abbildung 6-30: Verteilung der Messergebnisse

Tabelle 3

<u>Differenzen zum Vermessungspunkt (relativ)</u>					
Test 1 (Basisstation)			Test 2 (SAPOS)		
	X [m]	Y [m]		X [m]	Y [m]
P1 – Ø	0.0111	0.0125	P1 – Ø	0.0119	0.0254
P2 – Ø	1.0346	2.3358	P2 – Ø	0.0214	0.0175
P3 – Ø	0.0093	0.0127	P3 – Ø	0.0198	0.0217
P4 – Ø	0.0082	0.0114	P4 – Ø	0.0085	0.0145
P5 – Ø	0.0339	0.0380	P5 – Ø	0.0098	0.0148
P6 – Ø	0.0163	0.0162	P6 – Ø	0.0117	0.0177

Tabelle 4

<u>Standardabweichung zum Vermessungspunkt (relativ)</u>					
Test 1 (Basisstation)			Test 2 (SAPOS)		
	X [m]	Y [m]		X [m]	Y [m]
P1 – STD	0.00190	0.00253	P1 – STD	0.00226	0.00645
P2 – STD	0.08804	0.28194	P2 – STD	0.00432	0.00430
P3 – STD	0.00207	0.00245	P3 – STD	0.00432	0.00501
P4 – STD	0.00155	0.00219	P4 – STD	0.00152	0.00249
P5 – STD	0.00307	0.00490	P5 – STD	0.00242	0.00313
P6 – STD	0.00323	0.00324	P6 – STD	0.00198	0.00339

Es zeigt sich, dass mittels RTK-GNSS eine Positionierung relativ zur Basisstation mit einer Genauigkeit von <5 cm möglich ist. Zwischen lokaler Basisstation und SAPOS gibt es dabei keinen deutlichen Unterschied. Die Werte der Standardabweichung belegen eine gute Stabilität der Positionslösung im Subzentimeterbereich an statischen Messpunkten.

Auffällig sind die großen Abweichungen, die an Punkt 2 im ersten Test beobachtet wurden und fett hervorgehoben sind. Bei dieser Messung ging die optimale RTK fix Lösung verloren und es stand nur ein minderwertigerer Lösungstyp zur Verfügung. Die Möglichkeit solcher Qualitätswechsel stellt eine potentielle Herausforderung bei der Nutzung der RTK Technologie dar. Dies wird in Kapitel 6.2.5.7 näher behandelt.

6.2.5.5 Dynamische Tests im Flug mit anschließendem Postprocessing

RTK-System und Datenlogging wurden im nächsten Schritt in einen Nutzlastcontainer integriert (rot markiert in Abbildung 6-31). Die GNSS Antenne wurde auf einer Plattform auf der Oberseite der Drohne angeordnet, um einen guten Empfang zu ermöglichen. Um unabhängig von Mobilfunkinfrastruktur und einem Dienst wie SAPOS zu sein, wurde ausschließlich die lokale Basisstation verwendet, die ebenfalls mit einem AsteRx-m Modul ausgerüstet ist.



Abbildung 6-31: Flugplattform mit RTK Testaufbau

Bei Flügen mit der GPS-gestützten Wegpunktnavigation wurden sowohl die RTK Lösung als auch Rohdaten für ein späteres Postprocessing aufgezeichnet. Ein anschließender Vergleich der Positionslösungen des AsteRx-m mit der als „Ground Truth“ angenommenen Postprocessing Lösung soll die Qualität des RTK Systems aufzeigen.

Das Postprocessing selbst wird über den Automatic Precise Positioning Service (APPS) [47] des Jet Propulsion Laboratory der NASA errechnet. Dieser kostenlose Online-Service gibt an, eine Genauigkeit von bis zu 3 cm RMS im Post Processing erreichen zu können. Somit können Vergleiche mit dieser Referenztrajektorie ohne großen Fehler zur Bewertung der absoluten Genauigkeit genutzt werden.

Da das RTK System jedoch, anders als APPS, auf der lokalen Referenzstation basiert, welche ihre Position als herkömmliche GNSS Positionslösung bestimmt, ist die absolute Genauigkeit des RTK Systems begrenzt. Dies wird als Offset zwischen APPS und AsteRx Lösung im gesamten Datensatz sichtbar. In Abbildung 6-32 wurde der Mittelwert dieses Offsets bereits entfernt, um die Ähnlichkeit der beiden Lösungen zu verdeutlichen. Auffällig ist der anfängliche Abstand der beiden Trajektorien im ersten Teil des Fluges (im unteren Teil des Diagramms). Dieser tritt nur in der Höhe deutlich auf und ist darauf zurückzuführen, dass das RTK System hier noch keine RTK fix Lösung erreicht hatte.

Um den konstanten Fehler durch die Ungenauigkeit der RTK-Basis Position herauszurechnen wurde die Standardabweichung der Länge des Vektors zwischen zeitlich zusammengehörigen Punkten der beiden Positionslösungen herangezogen.

Über den gesamten Datensatz ist dieser Wert aufgrund der anfangs noch nicht optimalen RTK Lösung sehr groß (ca. 1,17 m), betrachtet man jedoch nur den Teil des Fluges mit RTK

Fix Lösung so zeigt sich eine Standardabweichung zwischen Echtzeit und Post Processing Lösung von etwa 7,5 cm. Untersucht man darüber hinaus nur die horizontale Genauigkeit, so reduziert sich die Standardabweichung auf nur ca. 4,9 cm. Damit liegen die Ergebnisse der dynamischen Tests im angestrebten Genauigkeitsbereich, erreichen jedoch nicht die Qualität der in den statischen Messungen beobachteten Resultate.

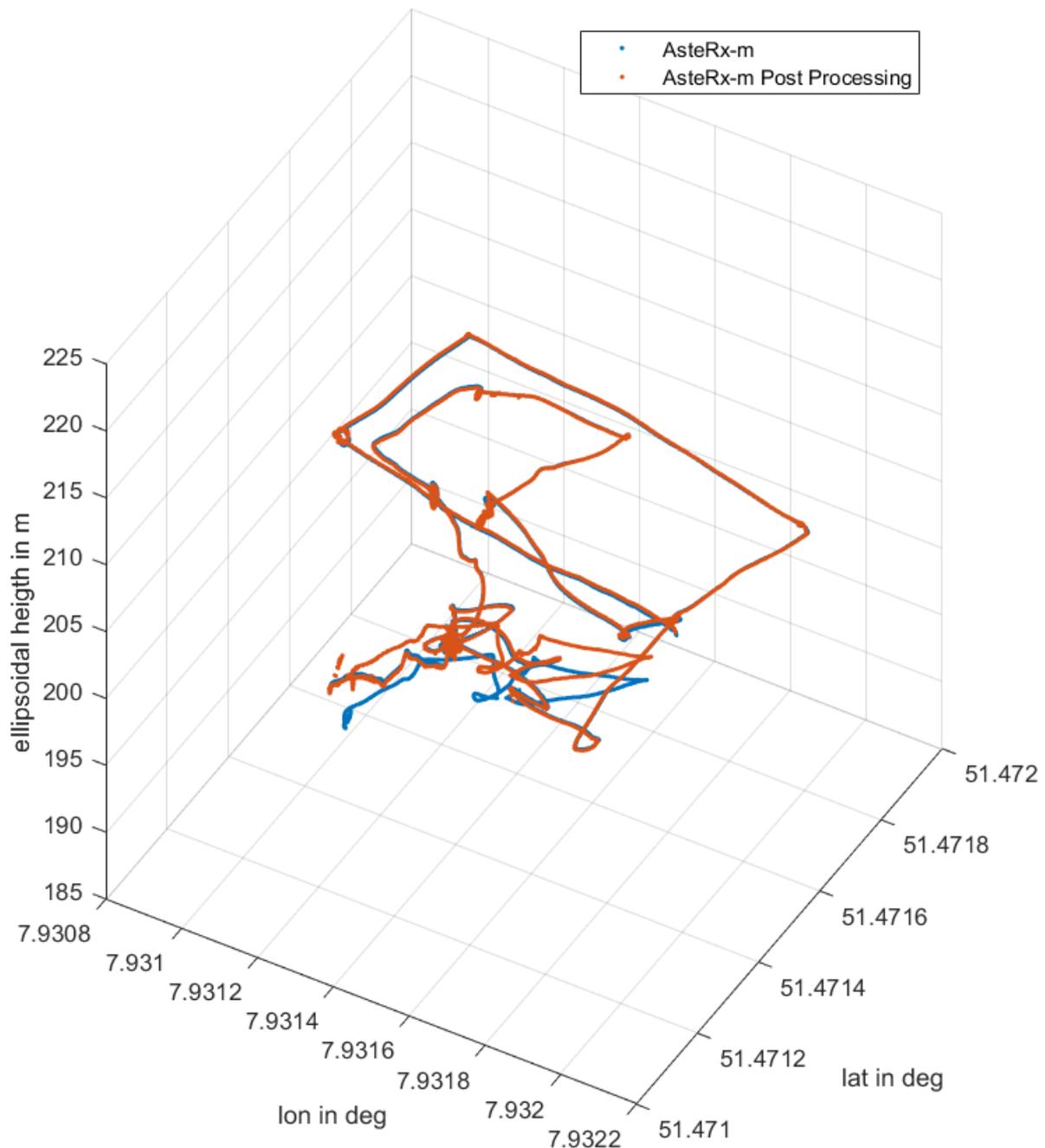


Abbildung 6-32: Trajektorie eines Testfluges gegenüber der Post Processing Referenz

6.2.5.6 Flugsoftwareintegration

In den anfänglichen Tests wurden die Daten vom RTK-GNSS-Empfänger mit einem handelsüblichen Einplatinencomputer geloggt. Der nächste Schritt sah eine direkte Datenübertragung zur Drohne durch eine AirRobot Nutzlastplatine mit einem Mikrokontroller vor. Es wurde eine Übersetzungssoftware erstellt, mit der die Daten des vom AsteRx-m unterstützten Ausgabe-Protokolls direkt an das Flugboard des UAVs kommuniziert werden können.

Das aktuelle Flugboard wurde darauf programmiert, das proprietäre *ubx* Protokoll des verwendeten GPS Moduls von ublox zu verarbeiten. Der AsteRx-m Empfänger verwendet allerdings das *sbx* Protokoll. Um also im Flug die RTK Lösung nutzen zu können, sollen die *sbx* Daten in *ubx* Daten umgewandelt werden. Dadurch wird eine direkte Kompatibilität zur Drohne ohne Änderungen am Flugboard hergestellt. Sollte später ein anderer GNSS-Empfänger mit einem anderen Datenformat zum Einsatz kommen, muss lediglich die Konvertierungssoftware modifiziert werden. Das Nutzlastboard stellt zudem einen pinkompatiblen Konnektor zur Verfügung, sodass es anstelle des ublox GPS Moduls direkt angeschlossen werden kann. Das Blockschaltbild des Systems erweitert sich dann gemäß Abbildung 6-33.

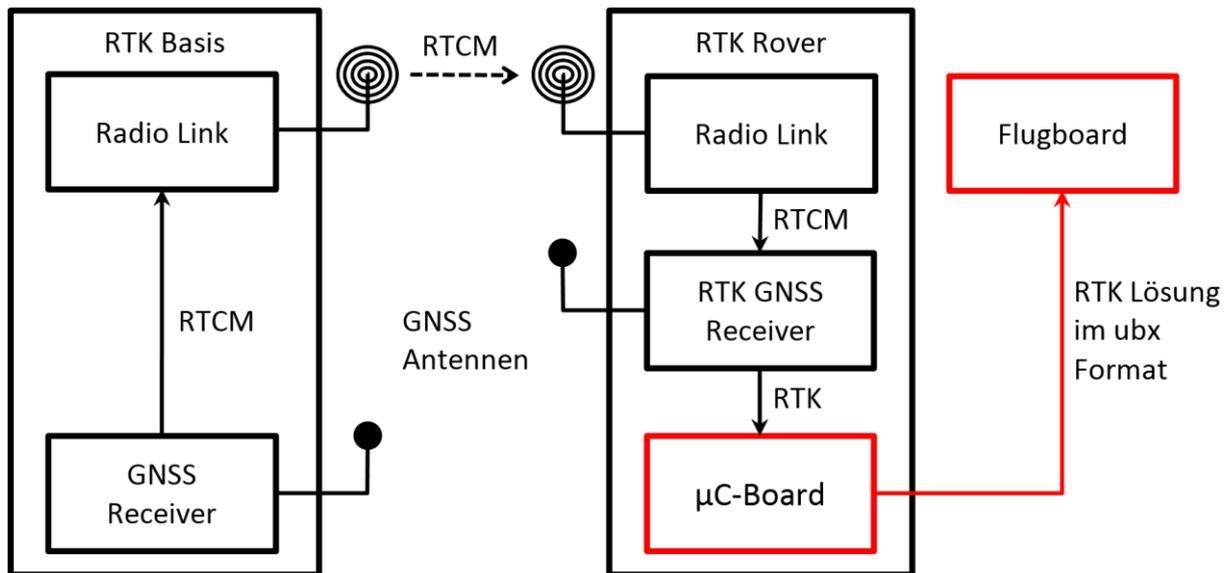


Abbildung 6-33: Integration des RTK-Systems in das UAV

6.2.5.7 Fail-Safe-Funktionalität bei Sprung durch Wechseln der RTK-Lösung

Beim Wechsel zwischen RTK fix und RTK float Lösung kommt es häufig zu Sprüngen der Position, die mehrere Meter betragen können. Diese Sprünge müssen als Messfehler vom Positionsregler der Drohne ferngehalten werden, damit das UAV nicht versucht diese vermeintlichen Positionsänderungen zu korrigieren. Ein einfacher Tiefpassfilter wäre hier nicht zufriedenstellend und würde auch die normale Dynamik stark beeinträchtigen.

Das eingesetzte Verfahren zur Sprungkorrektur nutzt die vom RTK Receiver bestimmten Geschwindigkeiten, um Positionssprünge zu detektieren und zu korrigieren. Dies ist möglich, da die Geschwindigkeit anhand von Dopplermessungen unabhängig von der Positionslösung bestimmt wird und somit nicht von Sprüngen in der RTK Lösung betroffen ist. Der gesamte Algorithmus arbeitet mit kartesischen Earth-Centered, Earth-Fixed (ECEF) Koordinaten, die zusammen mit den Geschwindigkeiten vom RTK-Receiver bezogen werden. Um eine WGS84 Position in Längen- und Breitengrad zu erhalten, wird anschließend eine Transformation durchgeführt.

Um Positionssprünge zu detektieren, werden die drei XYZ-Koordinaten der Position differenziert und mit den drei Geschwindigkeiten verglichen. Übersteigt eine der Abweichungen einen festen Grenzwert, so wird ein Sprung angenommen. In diesem Fall wird die Position zunächst durch Integration der Geschwindigkeit extrapoliert. Die durch den Sprung entstandenen Offsets in den drei Achsen werden ermittelt und fortan genutzt, um die Position zu korrigieren. Bei einem späteren Rücksprung werden die Offsets nach demselben Verfahren wieder verringert. Wenn Sprünge und Rücksprünge sich nicht exakt ausgleichen, könnten anwachsende Offsets zurückbleiben, welche die Position allmählich verfälschen. Dies wird durch ein zeitliches Abklingen der Offsets verhindert: Da RTK fix als bestmögliche Lösung angenommen wird, verringern sich die Offsets unter RTK fix mit einer festen Maximalgeschwindigkeit (zunächst linear, dann asymptotisch) auf Null.

Die Sprungkorrektur wird ebenfalls von dem Mikrokontroller auf der AirRobot-Nutzlastplatine durchgeführt. In Abbildung 6-34 ist ein Beispiel der besonders stark betroffenen Höhenkomponente vor und nach der Sprungkorrektur dargestellt.

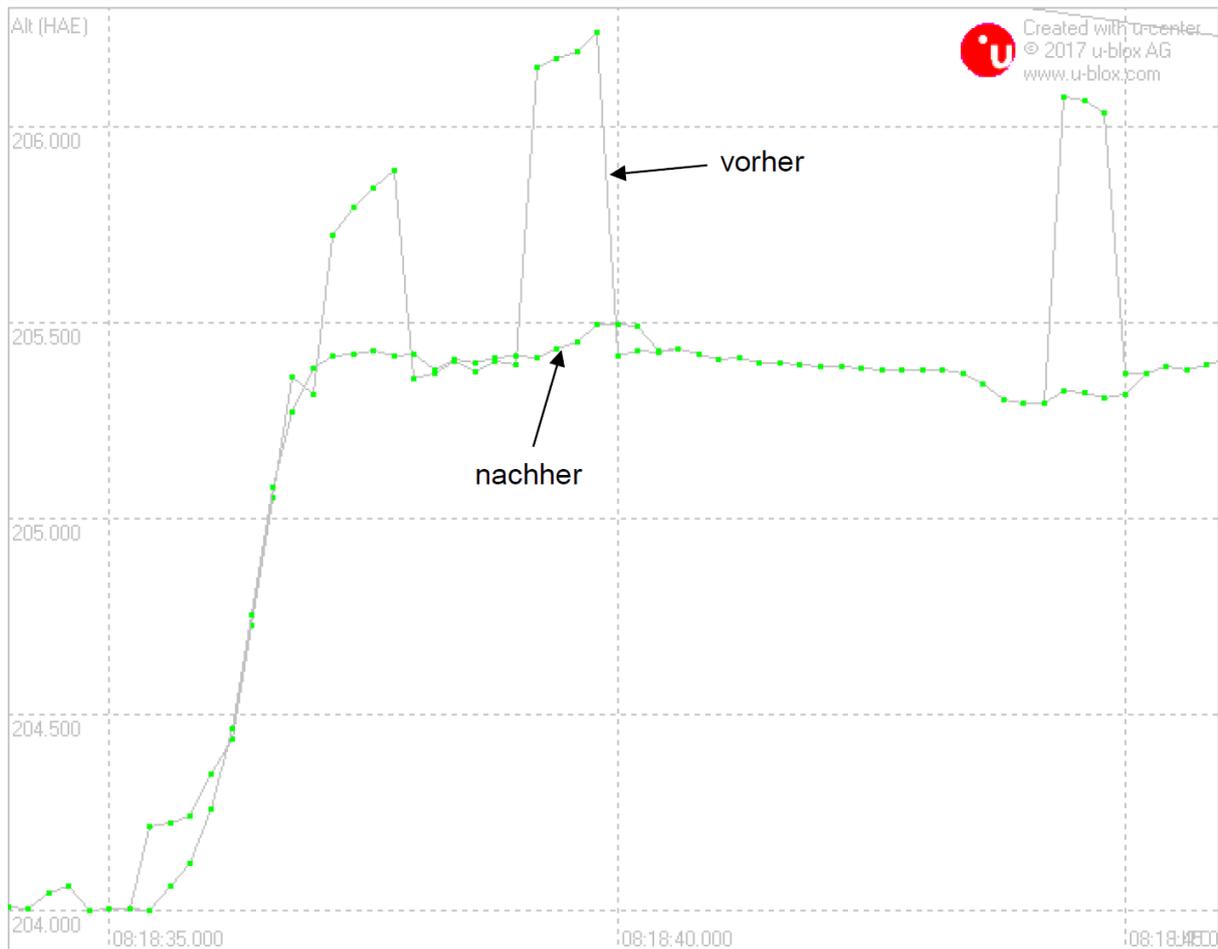


Abbildung 6-34: Höhenkomponente vor und nach der Sprungkorrektur
(Visualisierung per ublox Software nach der Protokoll-Konvertierung)

6.2.5.8 Fazit der Evaluation

Nach den diversen Testkampagnen und der prototypischen Implementierung kann nun ein Fazit der neu einzusetzenden Technik RTK GNSS gegeben werden. Davor wird nochmal in Kürze auf die Vor- und Nachteile des getesteten Septentrio AsteRx-m Empfängers eingegangen:

Vorteile:

- (+) Hohe Genauigkeit
- (+) Geringe Time To Fix
- (+) Kleine Bauform
- (+) Niedriger Stromverbrauch (im Vergleich mit anderen RTK GNSS Receivern)

Nachteile:

- (-) großer Kostenfaktor
- (-) keine Auswertung des Heading (zukünftig interessant)

Von den rein technischen Charakteristika hat das Septentrio Modul viele Vorteile zu bieten. Diese schlagen sich jedoch in den Anschaffungskosten nieder. Vor allem in Hinblick auf den

Weiterverkauf des Systems als Teil der Flugplattformen müssten diese an den Kunden weitergegeben werden – was eine Systempreiserhöhung mit sich bringen würde.

Aufgrund der technischen Weiterentwicklung der RTK GNSS Technologie innerhalb des Projektzeitraumes sind eine Vielzahl neuer Anbieter und Systeme entstanden. Daher wäre eine interessante zukünftige Untersuchung inwieweit eine Kostenoptimierung des RTK Systems möglich ist und die Nutzung eines am Markt befindlichen Systems zielführend ist. Viele der neuen Receiver können, zusätzlich mit einer weiteren Antenne, das Heading der Flugplattform bestimmen, was ebenfalls einen interessanten Mehrwert darstellt. Durch die Verfügbarkeit von neuen GNSS-Empfangsantennen, welche durch ihre Leichtbauweise eine erhebliche Gewichtsreduktion ermöglichen, wäre hier eine weitere Evaluation sinnvoll.

6.3 Kommunikation

6.3.1 Konzept & Architektur

Ziel von AP 3100 war die Erarbeitung eines Konzeptes für den Datenaustausch innerhalb des Maschinenschwarms.

Dabei sind sowohl Daten zwischen Prozessen auszutauschen, die auf demselben Endgerät ausgeführt werden, als auch Daten zwischen Prozessen, die innerhalb des Schwarms verteilt sind und über ein WLAN Netzwerk kommunizieren. Hierfür sind je nach Szenario unterschiedliche Datenströme mit variierenden Anforderungen zu berücksichtigen, die sich in folgende Klassen gliedern lassen:

- Statusdaten (Position, Batteriestatus, aktuelle Mission, Wegpunkte)
Größenordnung: wenige kB pro Nachricht
- Videostreams zur Lageeinschätzung und Steuerung der Systeme
Größenordnung: 1 MB/s pro Stream
- 3D-Sensordaten Livestreams zur Lageeinschätzung und Steuerung der Systeme
Größenordnung: 3 MB/s pro Stream
- 2D/3D-Mapping Daten zur Lageeinschätzung
Größenordnung: einige MB – mehrere GB, je nach Kartengröße

Um flexibel auf die Anwendungsszenarien zu reagieren bietet sich der Aufbau eines mobilen ad-hoc Netzwerkes an, da bei dieser Klasse von Netzen keine zentrale Verwaltung nötig ist und eine Kommunikation über mehrere Stationen (Hops) erfolgen kann. Der Netzwerkaufbau wird in Abschnitt 6.3.2 beschrieben. Für eine Vernetzung der Applikation wird eine Middleware benötigt, die eine Schnittstelle für den Datenaustausch bereitstellt und Nachrichtenformate definiert. Zusätzlich muss der Datenaustausch für die Randbedingungen eines mobilen ad-hoc Netzwerkes, z. B. Verbindungsabbrüche und wechselnde Routingpfade, ausgelegt werden. Diese Arbeitsinhalte werden in Abschnitt 6.3.3 beschrieben.

6.3.2 Netzwerkaufbau, Routing & Kommunikationsalgorithmen

Jeder Schwarmteilnehmer ist mit einer Kommunikationsboard (Gateworks GW 5520, 800 MHz i.MX 6) ausgestattet, welches mit einem Prozessierungsboard (Intel NUC Core i5) und einer Navigationseinheit (i.MX 6) verbunden ist, wie in Abbildung 6-35 schematisch dargestellt, vgl. Abschnitt 6.6.2.

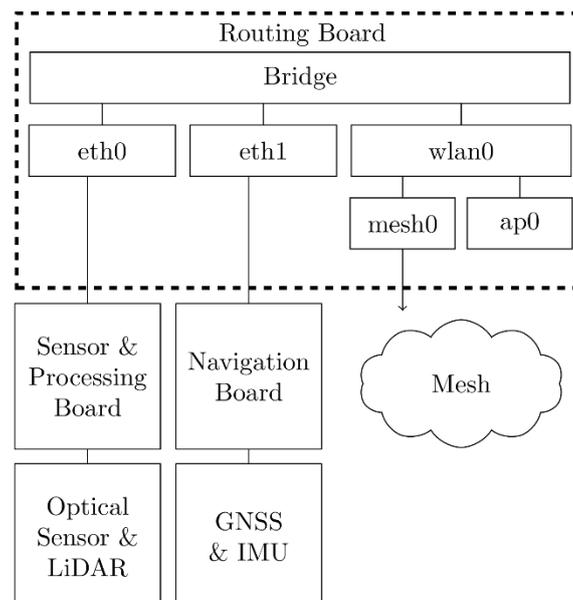


Abbildung 6-35: Netzwerkaufbau

Der Hauptsensor (Kamera/LiDAR) ist an das Prozessierungsboard angeschlossen. GNSS-Empfänger und Inertialmesseinheit sind mit dem Navigationsboard verbunden. Das WLAN

Modul (WLE900VX) arbeitet im Bereich von 5,5 GHz (80 MHz Kanalbreite) um Interferenzen mit weiteren Funkssystemen, z. B. dem aus dem Vorgängervorhaben NextUAV vorhandenem Xbee (2,4 GHz) und analogen Videosystemen (2,4GHz) der UAVs zu vermeiden.

Als Betriebssystem wird auf dem Kommunikationsboard yocto (Version Pyro 2.3) mit dem Linux-Kernel 4.16. eingesetzt. Als WLAN Treiber des WLE900VX Moduls wird der ath10k Treiber des Linux-Kernels verwendet. Der Treiber muss dabei im sogenannten *raw-mode* betrieben werden, um Unterstützung für mobile ad-hoc Netzwerke bereitzustellen. Das Betriebssystem wurde um den yocto-Layer meta-ros [31] erweitert, sodass die eingesetzte Middleware ROS auch hierfür zur Verfügung steht.

Für die Netzwerkkonfiguration wurden verschiedene Ansätze in Betracht gezogen. Eine Möglichkeit ist der Aufbau eines mobilen ad-hoc-Netzwerks im 802.11 Infrastrukturmodus, wie von Wirtz et al. [29] beschrieben. Ein weiterer gängiger Ansatz ist die Einrichtung des ad-hoc Netzwerks im *IBSS* Modus (Independent Basic Service Set). Außerdem gibt es den 2012 verabschiedeten herstellerunabhängigen Standard 802.11s. Dieser bietet den Vorteil, dass dort das Routing bereits in der MAC-Schicht stattfindet.

Im Projektverlauf wurde sowohl eine Netzwerkkonfiguration nach *IBSS* mit dem Routingprotokoll *BATMAN* untersucht, als auch der Standard 802.11s getestet. Abschließend wurde der Standard 802.11s ausgewählt, da hier zum einen eine zu *IBSS* vergleichbare Performance festgestellt wurde und zum anderen die Firmware der WLAN Module die Möglichkeit bietet neben dem 802.11s Mesh-Netzwerk zusätzlich ein Infrastrukturnetzwerk im gleichen Frequenzband zu erzeugen.

Die 802.11s -WLAN Schnittstelle (mesh0) wird über folgenden Befehlssatz erzeugt/aktiviert:

```
iw mesh0 set freq 5500 80 5530  
ip link set dev mesh0 up  
iw mesh0 mesh join ankommen_mesh beacon-interval 100  
iw dev mesh0 set txpower fixed 2700  
iw dev mesh0 set mcast_rate 54
```

Die beiden Ethernet-Adapter (eth0, eth1) sowie die Mesh-Schnittstelle mesh0 werden softwareseitig zu einer Gesamtnetzwerkschnittstelle (Bridge) zusammengeschaltet. Abschließend wird die Netzwerkbrücke mit einer IP-Adresse versehen. Das Kommunikationsboard ist daher über alle Zugangsmöglichkeiten (WLAN/LAN) unter derselben IP-Adresse erreichbar.

Des Weiteren wird eine virtuelle Netzwerkschnittstelle *ap0* erzeugt die als Access Point dient. Über den Access Point (ap0) können mobile Endgeräte Zugriff auf den Maschinenschwarm erlangen, ohne dass der 802.11s Standard beherrscht werden muss. Die Konfiguration der Schnittstelle ap0 erfolgt in folgender Form über *hostapd*:

```
interface=ap0  
driver=nl80211  
hw_mode=a  
channel=100  
ht_capab=[HT40+]  
ieee80211n=1  
ieee80211ac=1  
vht_oper_chwidth=1  
vht_oper_centrfreq_seg0_idx=106
```

bridge=mesh-bridge

ssid=ankommen

Im Projektverlauf wurde außerdem auch der parallele Betrieb von zwei WLAN Schnittstellen im 5,2 und 5,8 GHz Bereich untersucht. Allerdings wurden hier insbesondere Störungen auf den UAV Systemen festgestellt, da der nötige Antennenabstand durch den begrenzten Bauraum nicht eingehalten werden konnte. Insofern wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

6.3.3 Kommunikationsmanager

6.3.3.1 Middleware Systeme

Für die Auswahl einer geeigneten Middleware wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, die im Folgenden kurz zusammengefasst wird:

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Kommunikations-Frameworks für die Robotik entwickelt. Sie lassen sich in verbindungsorientierte und verbindungslose Kommunikationsmethoden untergliedern. So ist etwa das Player/Stage-Framework eines der ersten verbindungsorientierten Middlewaresysteme, das speziell für den Einsatz in der Robotik entwickelt wurde. Das Player/Stage-Framework basiert auf einer Client-Server-Architektur und hat damit den Nachteil eines möglichen Datenverlusts, wenn ein Verbindungsaufbau fehlschlägt.

Verbindungslose Frameworks verwenden dagegen häufig einen Publisher/Subscriber-Mechanismus, um Nachrichten zwischen Komponenten weiterzugeben. Wie auch in Eugster et al. [21] erwähnt kann durch das Publisher-Subscriber-Konzept eine Entkopplung von Sender und Empfänger erfolgen, sodass die Fehlertoleranz insbesondere für ein Multi-Roboter-System erhöht wird.

Eines der am häufigsten eingesetzten Frameworks, welches ein Publisher/Subscriber Konzept für den Nachrichtentransport Austausch verwendet, ist ROS (Robot Operating System) [22]. ROS ermöglicht die Verwendung von TCP oder UDP für den Nachrichtentransport und bietet eine umfangreiche Sensor- und Visualisierungsunterstützung. Einer der größten Nachteile von ROS ist allerdings der zentralisierte Ansatz über den sogenannten *roscore*, welcher für die Verwaltung der Subscriber und Publisher genutzt wird. ROS wurde ursprünglich nicht für den Einsatz in verteilten Systemen konzipiert und insbesondere drahtlose Verbindungen mit hoher Paketverlustrate und instabiler Verbindungen können nicht auf die nötige Weise berücksichtigt werden.

Ein weiteres Framework ist LCM (Lightweight Communication and Marshalling) [23], das ebenfalls auf einem Publisher/Subscriber-Konzept aufbaut. Da jedoch im Gegensatz zu ROS ein dezentraler Ansatz verfolgt wird, weist LCM eine höhere Fehlertoleranz für den Einsatz in verteilten Systemen auf. Der dezentrale Ansatz von LCM wird durch das Versenden aller Nachrichten als UDP-Multicast erreicht. Somit ist LCM auch in der Lage, Nachrichten in weicher Echtzeit zu übertragen. Allerdings sind UDP-Multicast Nachrichten für das Streaming großer Datenmengen, insbesondere in mobilen ad-hoc-Netzwerken, ungeeignet, da ein sehr großer Datenoverhead im Netzwerk entstehen würde.

Um die angesprochenen Nachteile von ROS zu verbessern wird derzeit ROS2 entwickelt, das auf dem Standard DDS (Data Distribution Service) aufbauen wird. ROS2 soll es ermöglichen die Einstellung verschiedener QoS-Profile für Topics vorzunehmen. So kann z. B. eine zuverlässige oder verlustbehaftete Verbindung aufgebaut werden. Des Weiteren ist es möglich Zustellfristen und verschiedene Ebenen für die Lebensdauer von Daten zu konfigurieren [24]. Zum Berichtszeitpunkt fehlen ROS2 unter anderem noch Funktionen zum Daten Logging (*rosviz*) und Teile der Visualisierungsumgebung (*rviz*), die einen Einsatz im produktiven Umfeld verhindern.

Die Auswahl von **ROS** als Middleware wurde dann aufgrund folgender Aspekte getroffen:

- Zuverlässige & einfache Vernetzung lokaler Prozesse
- Möglichkeiten zur Visualisierung der Sensordaten
- Verfügbare Treiber der eingesetzten Sensorik

6.3.3.2 Kommunikationskonzept

Um die angesprochen Nachteile von ROS zu umgehen, wurde das nachfolgende Kommunikationskonzept erarbeitet:

Der vorgestellte Ansatz beruht darauf, dass jeder Schwarmteilnehmer einen unabhängigen ROS Master ausführt. Prozesse, die demselben ROS Master angehören, nutzen die herkömmlichen ROS Verbindungen. Wie in Abbildung 6-36 dargestellt, wird damit eine direkte Verbindung von Publisher und Subscriber hergestellt.



Abbildung 6-36: ROS Topic Transport

Für die Übertragung von ROS-Topics über das WLAN Netzwerk wird der Publisher- und Subscriber-Mechanismus von ROS um weitere Komponenten erweitert, wie in Abbildung 6-37 verdeutlicht. Ein ähnlicher Ansatz wurde auch schon von Schwarz et al. [5] verfolgt.

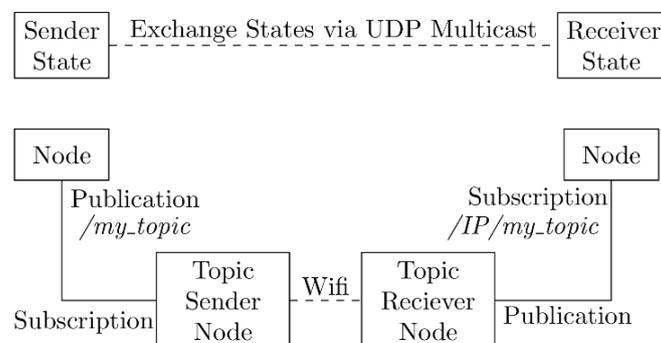


Abbildung 6-37: Konzept zur Erweiterung des ROS Topic Transports

Der *Topic Sender* überträgt im skizzierten Beispiel das Topic */my_topic*, welches auf der Empfängerseite unter dem neuen Namen */IP/my_topic* gepubliert wird. *Topic Sender* und *Receiver* beinhalten Mechanismen zum Datenstreaming über instabile WLAN-Verbindungen. Diese werden weitergehend in Abschnitt 6.3.3 erläutert.

Topic Streaming

Zusätzlich zu den Komponenten *Topic Sender* und *Topic Receiver* wird ein Satz von Status-Nodes eingeführt (*Sender State/Receiver State*)(Abbildung 6-38). Diese werden verwendet, um die lokal verfügbaren Topics eines einzelnen ROS Masters an alle anderen Schwarmnachbarn zu verteilen, ähnlich der von Tiderko et al. [26] entwickelten ROS-Masterdiscovery.

Um Nachrichten zwischen den Netzwerkteilnehmern auszutauschen fragt der *Sender State* Node den aktuellen Status des ROS Masters ab und verschickt eine Statusnachricht mit einer Liste aller verfügbaren Topics und Services. Der *Topic Sender* abonniert die

Senderstatusnachrichten und versendet die Nachricht regelmäßig an alle anderen Netzwerkteilnehmer per UDP-Multicast. Um eine Endlosschleife von Übertragungen zu vermeiden, berücksichtigt der *Sender State Node* auch die bereits empfangenen Statusmeldungen von anderen Schwarmteilnehmern. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Absenderstatusmeldung nur die ursprünglichen Topics und Services des lokalen ROS Masters enthält und eine erneute Übertragung von externen Topics vermieden wird.

Basierend auf der Statusmeldung ist der *Topic Sender* in der Lage für jeden angeforderten Datenkanal eine eindeutige Verbindung über TCP oder UDP aufzubauen.

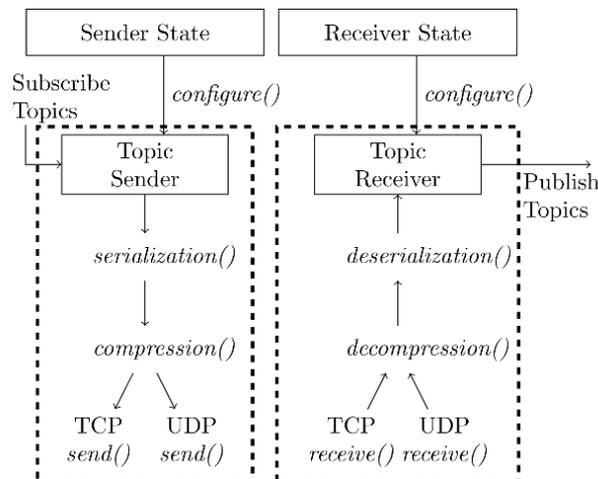


Abbildung 6-38: Layout des umgesetzten Topic Transports

Wie in Abbildung 6-38 dargestellt kann der Transportprozess in einige Teilschritte gegliedert werden. Zunächst wird die Nachricht serialisiert und bei Bedarf kann die Nachricht zusätzlich komprimiert werden. Als Komprimierungsverfahren wird zstd [27] eingesetzt, da das Verfahren eine sehr gute Kompressionsrate bei geringer Rechenlast besitzt. Optische Sensordaten, wie Luft- oder Wärmebilder können entweder als Rohdaten oder mit einer JPEG-Komprimierung übertragen werden, um auch hier die Datenmenge zu reduzieren.

Nach der Komprimierung wird die Nachricht über das WLAN Netzwerk versendet und vom *Topic Receiver* empfangen. Vor der erneuten Veröffentlichung der Nachricht auf der Empfängerseite muss die ursprüngliche Nachricht durch Dekomprimierung und Deserialisierung des eingehenden Bytestroms wiederhergestellt werden.

Jede Verbindung zwischen Sender und Empfänger wird über einen eindeutigen Socket abgewickelt und kann mit einer benutzerdefinierten Datenrate konfiguriert werden, um das Gesamtdatenaufkommen im Netzwerk zu steuern. Darüber hinaus kann jede Verbindung mit einer individuellen Puffergröße auf der Senderseite angepasst werden. Diese Eigenschaften werden im Folgenden als Quality of Service (QoS) Optionen bezeichnet. Die Einstellungen können über ein Userinterface (Abschnitt 6.5.1) angepasst werden.

QoS – Zuverlässigkeit (Reliability)

Bei einem Verbindungsabbruch können die Daten für einen bestimmten Zeitraum zwischengespeichert werden. Wird die Verbindung wiederhergestellt, werden die gepufferten Daten mit einer angemessenen Rate gesendet, um einen Kompromiss zwischen der konfigurierten Übertragungsfrequenz und der verfügbaren Netzwerkkapazität einzugehen. Die Anzahl der maximal zu puffernden Nachrichten kann für jedes Topic individuell konfiguriert werden.

QoS - Daten Priorisierung (Priority)

Jeder Socket kann senderseitig innerhalb von drei Prioritätsstufen operieren, die den drei Bändern der *pfifo fast*[28] Queuing-Disziplinen des Linux-Kernels entsprechen. Darüber hinaus ist im *Topic Sender* ein zusätzliches Threading-Modell implementiert, um Topics mit höherer Priorität zu bevorzugen. Nachrichten sind in Blöcke (Chunks) von 0,1 MB aufgeteilt.

Wenn eine Nachricht mit höherer Priorität zur Übertragung bereitsteht, werden Nachrichten mit niedrigerer Priorität nach Beendigung des aktuellen Chunks pausiert.

QoS - Daten Komprimierung (Compression)

Für die Nachrichtenkompression wird zstd (Kompressionsstufe 6) genutzt. Abbildung 6-39 und Abbildung 6-40 zeigen die Kompressionszeit, sowie die Kompressionsrate für drei typische Datentypen, die in Roboteranwendungen ausgetauscht werden: Eine Statusnachricht (Größe 3 KB), eine kleinere Punktwolke (Größe 0,9 MB) und eine größere Punktwolke (Größe 3,3 MB). In allen Fällen bietet zstd eine deutlich bessere Komprimierungszeit, während das Komprimierungsverhältnis auf einem ähnlichen Niveau wie bei Bzip2 liegt. Daher scheint zstd insbesondere für Echtzeitanwendungen besser geeignet zu sein.

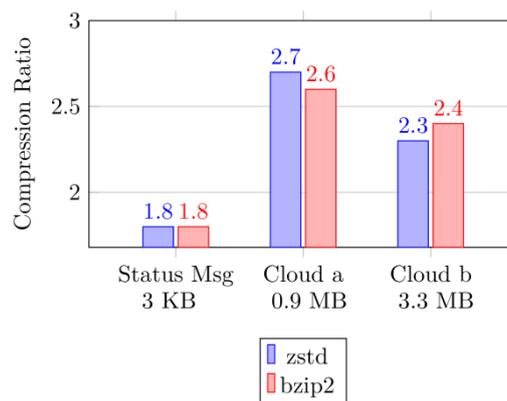


Abbildung 6-39: Kompressionsrate zstd/bzip2 im Vergleich

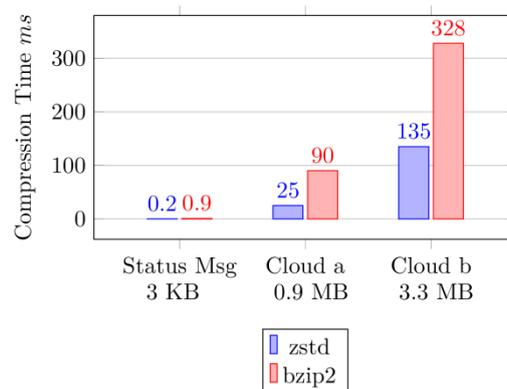


Abbildung 6-40: Kompressionszeit zstd/bzip2 im Vergleich

Videostreaming

Um die benötigte Bandbreite zusätzlich zu reduzieren können Bilder auch als h.264-kodierter Videostream übertragen werden. Das hierfür implementierte Softwarelayout ist in Abbildung 6-41 dargestellt. Ähnlich wie beim zuvor erläuterten *Topic Streaming* wird eine Statusnachricht vom *Sender State* an den *Video Server* übermittelt, der das entsprechende Topic abonniert. Der *Video Server* fügt die eingehenden Bilder in ein Gstreamer-Appsrc-Element einer Gstreamer-Pipeline ein. Anschließenden werden die h.264 kodierten Videoströme mit dem RTP-Protokoll (Real-Time Transport) von dem UAV/UGV zur Bodenstation übertragen.

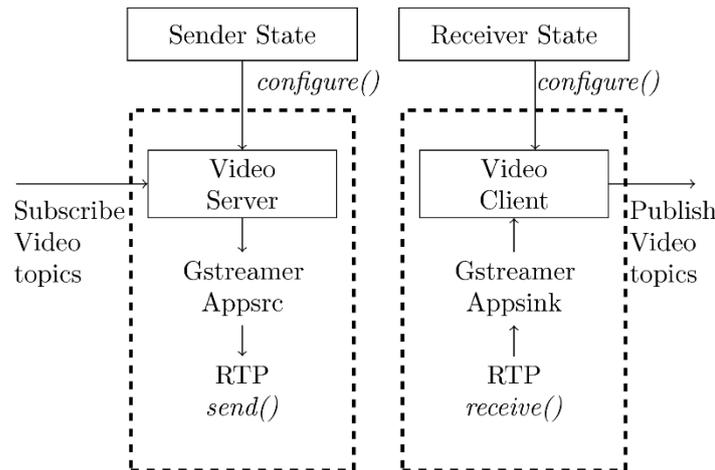


Abbildung 6-41: Layout des umgesetzten Video Transports

Um die h.264 Encodierung/Decodierung zu beschleunigen kann die Hardwarebeschleunigung der eingesetzten Intel Core i5 CPUs genutzt werden. Die Gstreamer Pipeline des *Video Servers* sieht damit wie folgt aus:

```

appsrc name=src format=3 is-live=true do-timestamp=true min-latency=-1 max-latency=1 !
videoconvert !
vaapipostproc !
vaapih264enc tune=low-latency keyframe-period=5 num-slices=1 !
rtph264pay config-interval=2 !
multiudpsink name=sink
    
```

Die entsprechende Gstreamer Pipeline des Empfängers (*Video Client*) schließt mit dem *appsrc* Element ab, welches in den *Video Clienten* eingebettet ist. Über das *appsrc* Element erfolgt der Zugriff auf die dekodierten Frames, die dann als Image-Nachricht des zugehörigen ROS-Topics gepubliziert werden.

```

udpsrc name=src caps="application/x-rtp, media=(string)video, clock-rate=(int)90000,
encoding-name=(string)H264" !
identity name=ident !
rtph264depay !
h264parse !
decodebin !
videoconvert !
capsfilter caps=video/x-raw,format=RGB !
appsink name=sink sync=false
    
```

6.3.4 Datenstreaming

Ziel des Arbeitspaktes war der Austausch von Sensordaten mit einer hohen Datenrate, sowie der Austausch der Daten über mehrere Relaisstationen um die Einsatzreichweite zu vergrößern (Multihop-Kommunikation). Um diese Ziele zu erreichen sei an dieser Stelle auf die beschriebene Netzwerkstruktur (6.3.2) und auf die in der Middleware implementierten QoS-Optionen (6.3.3) verwiesen. Über ein Userinterface (s. Abschnitt 6.5.1) kann neben den

QoS-Optionen auch die Datenrate eingestellt werden, um etwa auf die Multihop-Szenarien besser eingestellt zu sein.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Datenstreamings wurde eine Reihe von praktischen Erprobungen durchgeführt, die im Folgenden kurz erläutert werden:

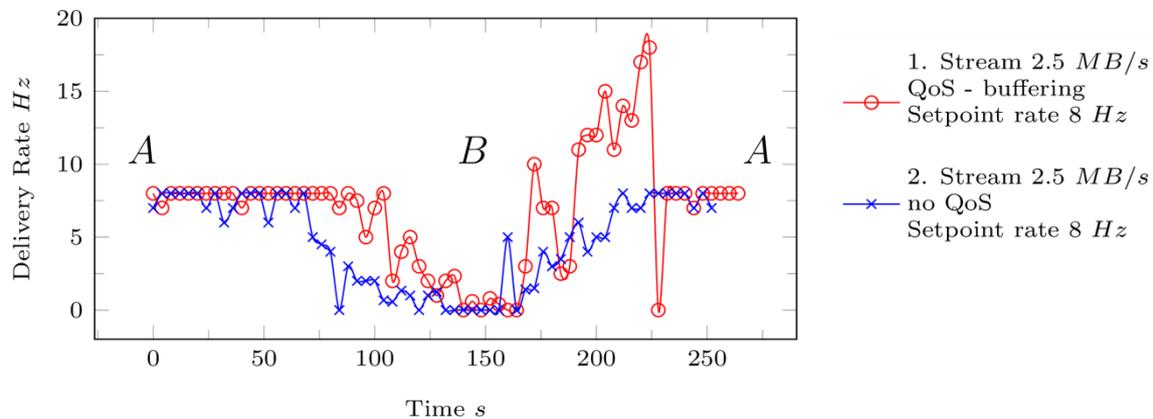


Abbildung 6-42: Datenstreaming ohne/mit QoS- Option Reliability

Abbildung 6-42 zeigt die Übertragung eines Datenstreams beim Durchlaufen eines Funkabbrisses, d. h. der Sender entfernt sich immer weiter vom Empfänger und kehrt anschließend wieder dorthin zurück (es wird die Strecke A-B-A zurückgelegt).

Die eingestellte Solldatenrate kann nur etwa bis zur Hälfte der Strecke zwischen Punkt A und B eingehalten werden. Anschließend sinkt die Übertragungsrate und entsprechende Nachrichten gehen verloren. Mit der aktivierten QoS-Option *Reliability* kann dagegen gezeigt werden, dass ausstehende Nachrichten zu einem späteren Zeitpunkt übertragen werden, wenn sich der Sender wieder dem Empfänger angenähert hat. Die Übertragungsrate steigt dann über die zuvor eingestellte Solldatenrate bis der Puffer abgebaut ist.

Für Untersuchungen zum Multihop-Datenstreaming wurde das in Abbildung 6-43 skizzierte Versuchsgelände verwendet. Im Bereich A liegt eine direkte Verbindung, im Bereich B keine Verbindung und im Bereich C eine Multihop-Verbindung (2-Hops) zwischen Bodenstation und UGV vor.

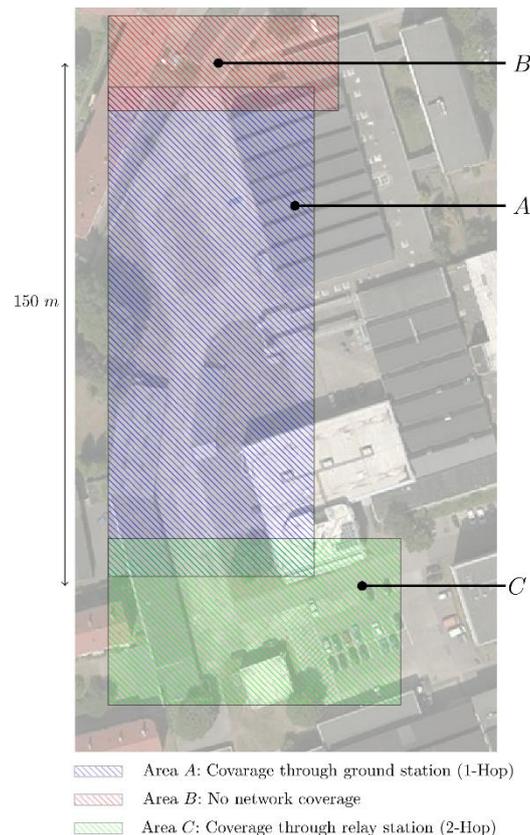


Abbildung 6-43: Versuchsgelände Multihop-Datenstreaming

In dem beschriebenen Mapping-Szenario werden folgende Topics vom UGV zur Bodenstation übertragen:

- State Topic, 1 Hz, höchste Priorität
- Camera Topic, 10 Hz, mittlere Priorität
- Map Updates, unregelmäßiger Abstand, niedrigste Priorität

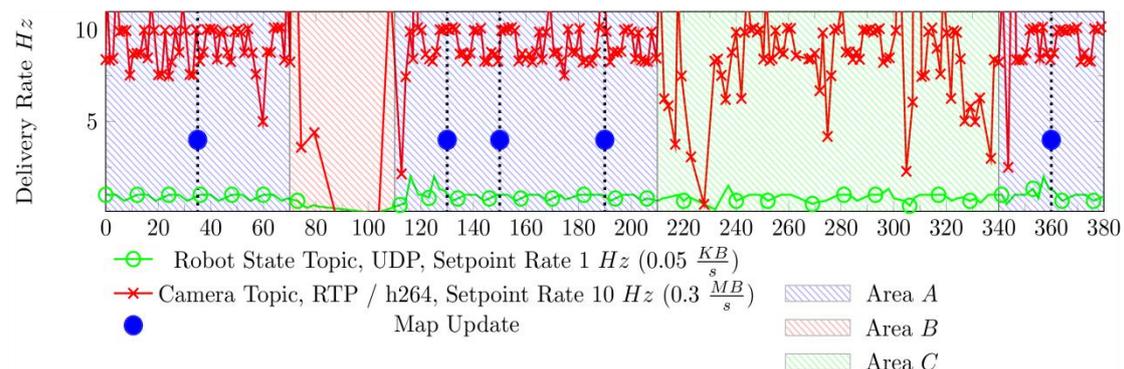


Abbildung 6-44: Zustellrate mit optimierten QoS-Optionen

Abbildung 6-44 zeigt die Zustellrate (Delivery Rate) der genannten Topics vom UGV zur Bodenstation über die gesamte Versuchsdauer. Die Größe des Kartenupdates variiert zwischen 1,5 MB für das erste Update und ca. 100 MB für das letzte Update (unkomprimierte Größe). In dem Versuch wird deutlich, dass im Multihop-Bereich das *State Topic* (hohe Priorität) durchgehend übertragen werden kann. Das *Camera Topic* (mittlere Priorität) weist dagegen eine schwankende Übertragungsrates auf. Die *Map Updates* (niedrige Priorität) werden ausschließlich im Singlehop-Bereich übertragen, da nur dort der entsprechende Datendurchsatz erreicht werden kann, ohne die Topics mit höherer Priorität negativ zu beeinflussen.

Fazit

Insgesamt lagen die Herausforderungen des Gesamtpaketes 3000 in der Schaffung einer flexiblen und leistungsfähigen Netzwerkstruktur, sowie in der Implementierung von Middleware-Strukturen für den Einsatz in mobilen WLAN-Netzwerken.

Mit der Verwendung von 802.11s und der gleichzeitigen Erzeugung eines Access Points auf jedem System konnten die Vorteile mobiler ad-hoc Netzwerke mit der besseren Zugänglichkeit klassischer WLAN-Netzwerke kombiniert werden. Durch die Auswahl von ROS ergaben sich große Vorteile für die Anbindung der Sensorik und die Erstellung des Userinterfaces. Die angesprochenen Nachteile der Middleware innerhalb mobiler ad-hoc Netzwerke konnten durch die beschriebenen QoS-Optionen umgangen werden.

Abbildung 6-45 zeigt zusammenfassend die implementierten Softwarekomponenten im Bereich der Kommunikation.

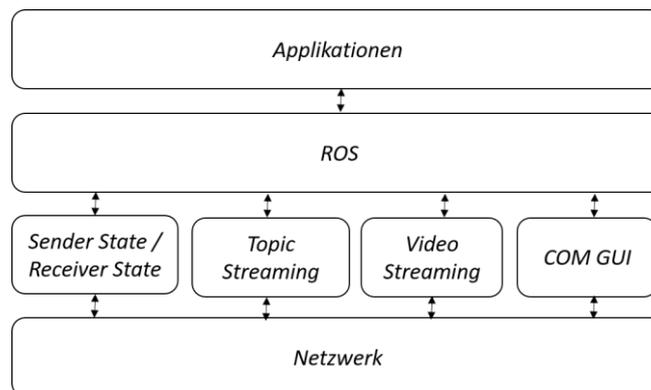


Abbildung 6-45: Übersicht Softwarekomponenten Kommunikation

6.3.4.1 HD-Videostrecke – Anwendungsfall und Anforderungen

Um es einem Beobachter zu ermöglichen, unabhängig vom Piloten, die Szenarien zu überblicken und sich vollends auf eine bessere Vorgangskoordination durch die Analyse des ihm vorliegenden Videostreams zu konzentrieren, war das Ziel dieses Arbeitspaketes, eine hochauflösende Echtzeitvideoübertragung zu entwickeln. Dabei sind in der Spezifikationsphase folgende Mindestanforderungen gemeinsam mit den Projektpartnern ermittelt worden:

- Video, HD ready (mind. 720p) @30 FPS
- 500m Reichweite
- minimale Latenz

In Zusammenarbeit mit einem externen Entwicklungspartner wurde während des Projektes ein entsprechendes System erarbeitet, welches aus einer Sende-, sowie aus einer Empfangseinheit besteht, siehe Abbildung 6-46.



Abbildung 6-46: HD-Videomodule

Der Fokus seitens AirRobot lag dementsprechend innerhalb dieses Arbeitspaketes darauf, die spezifischen Parameter des Entwicklungsprototyps zu evaluieren und eine optimale Konfiguration bestehend aus Übertragungseinheit, Antennen sowie Darstellungseinheit herauszuarbeiten.

6.3.4.2 Spezifikation der HD-Übertragungsstrecke

Aufgrund von Telekommunikationsrichtlinien war die grundsätzliche Zielstellung, eine Übertragung im ISM Band zu ermöglichen. Um einen optimalen Kompromiss zwischen Übertragungsbandbreite und frequenzabhängiger Reichweite zu finden, wurde das 2,4 GHz ISM Band als Basisfrequenz gewählt. Eine weitere Bedingung neben dem ISM Band stellt auch die erlaubte maximale äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP, engl.: equivalent isotropically radiated power) des Sendesystems dar, welche 100 mW nicht übersteigen darf [48].

Um dem Nutzer ein schnelles und aktuelles Lagebild zu liefern, ist ebenfalls die systemeigene Latenz zwischen aufgenommenem und dargestelltem Bild ein wichtiges Merkmal. Sämtliche erarbeiteten Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Parameter

Bezeichnung	Wert
RF-Ausgangsleistung Sender:	55 mW
Frequenzbereich:	2,4 GHz ISM
Frequenz:	2391,5 und 2450,0 MHz
Bandbreite:	8,5 bis 20MHz
Leistungsaufnahme:	8 W
Reichweite	>1000 m
Latenz	~500 ms
Gewicht Bodeneinheit	80 g
Gewicht Flugeinheit	51 g
Qualität	HD @60 (50) FPS

6.3.4.3 Konzepte und Evaluierung des Antennensystems

Es wurden Antennen unterschiedlicher Bauform, nämlich eine lineare Stabantenne (Helixantenne), eine weitere zirkular polarisierende Antenne in Form einer Cloverleaf-Konfiguration sowie eine Patchantenne untersucht. Diese sind in Abbildung 6-47 dargestellt. Eine Diskussion der Funktionsweise und Unterschiede der hier zu untersuchenden Antennen soll an dieser Stelle nicht vorgenommen werden. Es wird dazu auf [49] verwiesen.

Im ersten Schritt ist ein Testsetup unter Laborbedingungen entworfen worden. Hierbei sind der Antennengewinn sowie die Sende- und Empfangscharakteristik unter vorgegebenen Bedingungen untersucht worden. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Helixantenne aufgrund ihrer Empfangscharakteristik als alleinige Empfangsantenne für die angestrebte Reichweite nicht ausreichend sein wird. Aufgrund dessen wurde zusätzlich eine Richtantenne in Form einer Patchantenne in die Empfangseinheit integriert. Die mit der Diversity-Technik ausgestattete Empfängereinheit, mit zwei Antenneneingängen, wählt zwischen den beiden Antennensignalen das Signal mit dem besseren Signal-Rausch-Verhältnis aus.

Bei den Untersuchungen zur Antennenkonfiguration für die Sendereinheit trat im Besonderen die Cloverleaf-Antenne hervor. Mit ihrem spezifischen Strahlungsdiagramm und dem daraus hervorgehenden Strahlungsmaximum in der horizontalen Ebene weist dieser Antennentyp ein optimales und weitgehend richtungsunabhängiges Strahlungsbild auf.



Abbildung 6-47: Verschiedene Antennenbauformen

6.3.4.4 Implementierung und Schirmung im Gesamtsystem:

Für die Integration in die Bodenkontrollstation sind für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und um dementsprechend Interferenzen zu vermeiden weitere Maßnahmen getroffen worden. Hierzu gehörte die Schirmung der Sende/Empfangseinheit zur Steuerung des UAV sowie die zusätzliche Integration eines frequenzspezifischen Bandpasses zur Entkopplung der unterschiedlichen Trägerfrequenzen des jeweiligen Funkübertragungssystems.

6.3.4.5 Dekodierung und Videodarstellung:

Wie eingangs dargestellt, ist die Latenz des Gesamtsystems ein ausschlaggebender Faktor, welcher besonders bei der Videodekodierung und -darstellung mitbetrachtet werden muss. Aus diesem Grund sind verschiedene softwarebasierte Videodecoder evaluiert und auf Tauglichkeit für den hier gesetzten Anwendungsfall untersucht worden. Dabei stellte sich der frei verfügbare und quelloffene VLC Media Player [49] als optimaler Kompromiss zwischen Entwicklungszeit und Dekodierungseffizienz für den ersten Funktionsprototyp dar. Aufgrund des verfügbaren Quellcodes und der Möglichkeit den Funktionsumfang des VLC Media

Players ebenfalls als Bibliothek zu benutzen, ist im weiteren Verlauf dieses Projektes eine Implementierung in das AirRobot Geo-Informationssystem (GIS) umgesetzt worden.

6.3.4.6 Bandbreiten- und Reichweitenuntersuchungen

Zur quantitativen Bewertung der Güte des Übertragungssystems ist ein weiteres Testsetup konzipiert worden. Mit diesem ist es möglich, sowohl die Bandbreite als auch die Überreichweite parallel zu analysieren. Um die erzielten Ergebnisse in einen quantitativen Kontext setzen zu können, sind parallel zum entwickelten Übertragungsmodul zwei aktuelle, kommerziell verfügbare Systeme untersucht worden. In diesem Testsetup sollte bewusst auf den Einsatz eines UAV verzichtet werden, um den Fokus auf der Übertragungstrecke zu behalten. Damit terrainbedingt ein systemtypischer Line-of-Sight-Test durchgeführt werden konnte, wurde die Empfangseinheit auf einen bis zu fünf Meter ausfahrbaren Antennenmast installiert. Die Sendeeinheit ist dagegen auf ein mobiles Setup aufgebaut worden, damit verschiedene Testpunkte angefahren werden können. Der grundsätzliche Aufbau ist in Abbildung 6-48 dargestellt:



Abbildung 6-48: Aufbau des Bandbreiten- und Reichweitentests

Wie zuvor beschrieben, sind bei diesem Test die Bandbreite im Vergleich zur erzielbaren Reichweite von drei verschiedenen Übertragungssystemen untersucht worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-49 dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass das Kaufsystem2 (in orange) einen sehr stabilen Übertragungskanal bei jedoch reduzierter Bandbreite von lediglich 5 Megabit/sec zur Verfügung stellt. Im Gegensatz dazu steht das Kaufsystem1, welches eine viermal höhere Bandbreite bereitstellen kann, wobei die effektiv nutzbare Bandbreite sehr deutlich von strukturellen Umgebungsbedingungen sowie der Entfernung abhängig ist und, wie in Abbildung 6-49 zu sehen, deutliche Einbrüche aufweist. Einen optimalen Kompromiss zwischen beiden Kaufsystemen stellt das in diesem Projekt entwickelte Übertragungssystem mit einer stabilen und dennoch sehr hohen Bandbreite von 14 Megabit/sec bei höchstmöglichen Überreichweiten bis zu 1000 Meter dar.

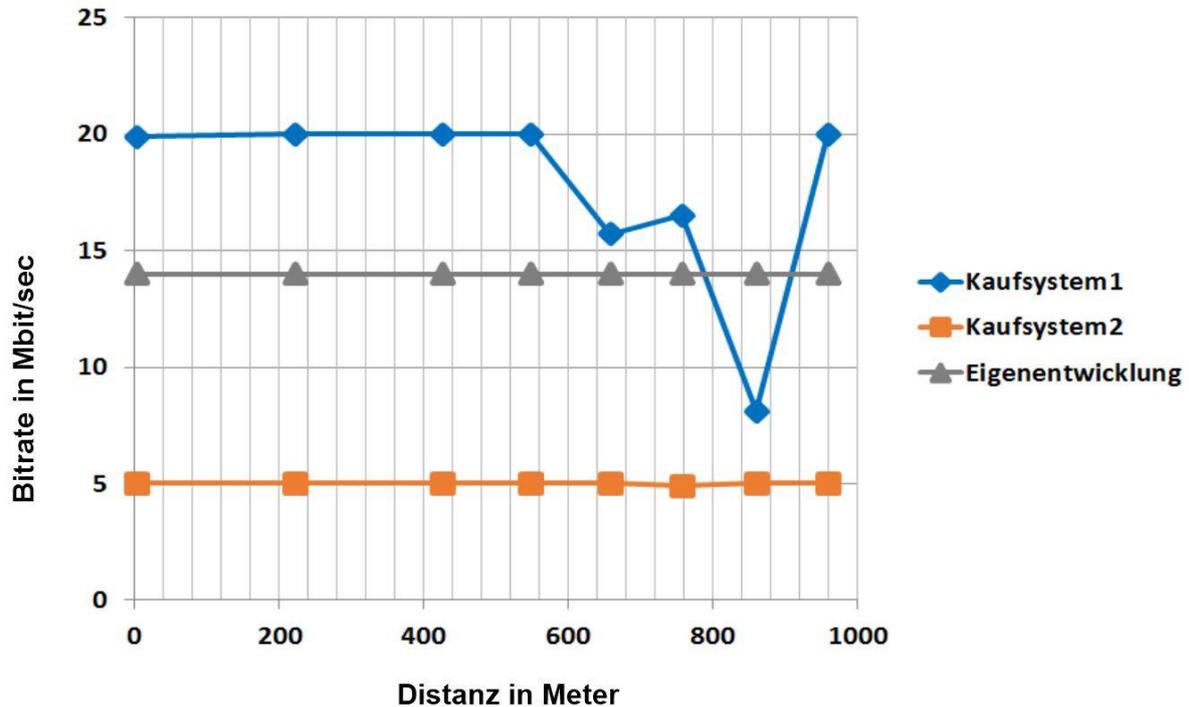


Abbildung 6-49: Messwertvergleich der Übertragungssysteme

6.3.4.7 Integration und Gesamtsystemtest

Mit den zuvor erarbeiteten Ergebnissen folgte im nächsten Schritt die Integration der Übertragungsstrecke in das UAS. Hierbei wurde beim Meilensteintreffen das Gesamtsystem im Verbundvorhaben ANKommEn getestet. Exemplarisch ist das UAS, bestehend aus UAV, der Bodenkontrollstation in den Händen des Piloten, sowie einem mobilen Anzeigegerät für den Empfang und die Visualisierung des HD-Videostreams, in Abbildung 6-50 (oben) dargestellt. Beim Treffen wurde die HD-Live-Strecke erfolgreich erprobt. Hierbei konnte unter anderem eines der UGV beim Anfahren einer Stelle mit Gefahrenpotential (Abbildung 6-50 rechts unten) beobachtet, sowie ein reales Szenario einer Überschwemmung überwacht werden (Abbildung 6-50 links unten)



Abbildung 6-50: Gesamtssystemtest (oben), Überschwemmung (links unten), UGV Anwendungsfall (rechts unten)

6.3.4.8 Zusammenfassung:

Um in Katastrophen-, Rettungs- und sicherheitsrelevanten Szenarien richtige Entscheidungen zu treffen, ist es wichtig, mittels aktueller, hochauflösender Livevideo-Daten einen guten Situationsüberblick zu erhalten. Um dies zu ermöglichen, wurde in diesem Arbeitspaket ein HD-Videoübertragungssystem entwickelt. Dieses wurde EMV-konform in das Gesamtsystem integriert und durch den Einsatz einer Kombination sich ergänzender Antennenbauformen die Empfangscharakteristik optimiert. Untersuchungen zeigten, dass die Funkstrecke im Vergleich mit Kaufsystemen bei der höchsten Reichweite sogar die höchste, durchgängig stabile Bandbreite erreicht. Nicht nur die Reichweite, sondern auch die angestrebte Videoqualität konnte mit einer HD-Auflösung erreicht werden. Mit der Nutzung quelloffener Funktionsbibliotheken zur Dekodierung und Visualisierung innerhalb des firmeneigenen Geoinformationssystems konnte außerdem eine akzeptable Latenz erreicht werden. Ein erfolgreicher Systemtest demonstrierte die Kooperation im Verbund mit den UAV und UGV des Projektpartners.

6.4 Mapping

Unter Mapping wird die Erfassung der Umgebung durch bildgebende Sensorik und die anschließende Überführung in ein einheitliches Bezugssystem verstanden. Im Verbundprojekt „ANKommEn“ sollten zum einen passive Kamerasensorsysteme, im RGB- sowie IR-Spektrum, als auch aktive, dreidimensionale LiDAR-Sensorsysteme zur Kartierung verwendet werden. Da sich die verschiedenen eingesetzten Sensorsysteme bereits in der Art der Messwertakquise grundlegend unterscheiden, werden die umgesetzten Konzepte und Verfahren getrennt nach Sensorart beschrieben.

6.4.1 Kamera-basiertes Mapping

6.4.1.1 Kamera-Mappingkonzept

Im Rahmen von ANKommEn sollten Verfahren entwickelt werden, die eine Kartierung des Zielgebietes mittels RGB- und IR-Kameras ermöglichen. Die entwickelten Verfahren sollen dabei hochwertige georeferenzierte 2D und 3D Repräsentationen des Zielgebietes erzeugen können. Der Prozess soll automatisiert ablaufen, um die Arbeitsbelastung des Operators und die Anforderungen bzgl. des notwendigen Expertenwissens zu minimieren, um so einen Einsatz der Technologie in der Praxis zu ermöglichen. Ferner sollen die Verfahren an den folgenden Kriterien gemessen werden:

- **Genauigkeit**
Die erzeugten Kartendaten müssen eine relative und absolute Genauigkeit im geringen Meterbereich aufweisen, um sie später effektiv zur Koordination der Rettungsmaßnahmen nutzen zu können.
- **Robustheit**
Die automatisierten Kartierungsprozesse müssen unabhängig von Randbedingungen wie der Beschaffenheit des Zielgebiets funktionieren. Ein Abbruch des Prozesses muss verhindert werden.
- **Echtzeit**
In vielen Gefahrenlagen ist die Schnelligkeit der Rettungskräfte fundamental mit ihren Erfolgsaussichten verknüpft. Die Kartierungsprozesse sollen daher möglichst in Echtzeit bzw mit einem minimalen Verzug von wenigen Minuten erfolgen.

Die Durchführung der im Folgenden beschriebenen Verfahren setzt die Generierung von qualitativ hochwertigen Luftbildern (siehe Kapitel Systemdesign) an geeigneten Positionen (siehe Kapitel Missionsplanung) voraus. Da die Verfahren in der Regel rechenintensiv sind und die Kartierungsergebnisse letztlich auf der Ground Control Station (GCS) vorliegen sollen, werden Luftbilder direkt nach der Generierung mittels drahtloser Kommunikation (siehe Kommunikation) an die Bodenstation übermittelt und dort verarbeitet. Auf dem Fluggerät findet nur eine Vorauswertung (i.d.R. Georeferenzierung, Komprimierung und Filter relevanter Bilder) statt. Der Systemaufbau ist exemplarisch in Abbildung 6-51 dargestellt.

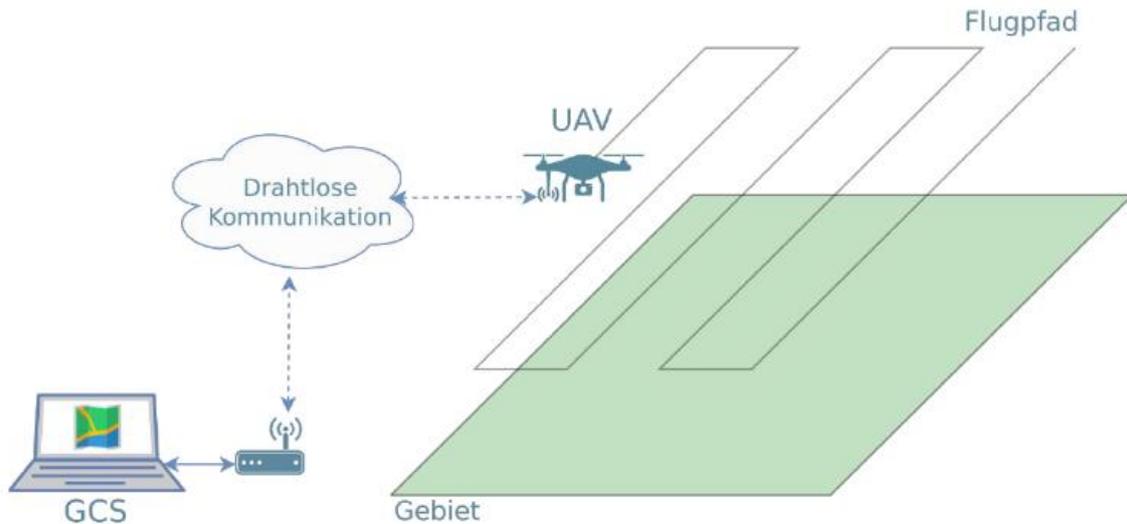


Abbildung 6-51: Aufbau Gesamtsystem auf Systemebene bestehend aus UAV und GCS

In Abbildung 6-52 ist der Aufbau auf der Softwareebene dargestellt. Auf der linken Seite sind dort die Sensoren (Kamera, Navigationskomponenten und der Flugregler) dargestellt. Diese werden jeweils von einem dedizierten Node auf dem onboard PC ausgelesen. Anschließend werden alle relevanten Informationen gebündelt und über den Geo Image Flight Node zur Bodenstation übertragen, wo die Bilder von den jeweiligen Nodes der unterschiedlichen Kartierungsverfahren entgegengenommen werden.

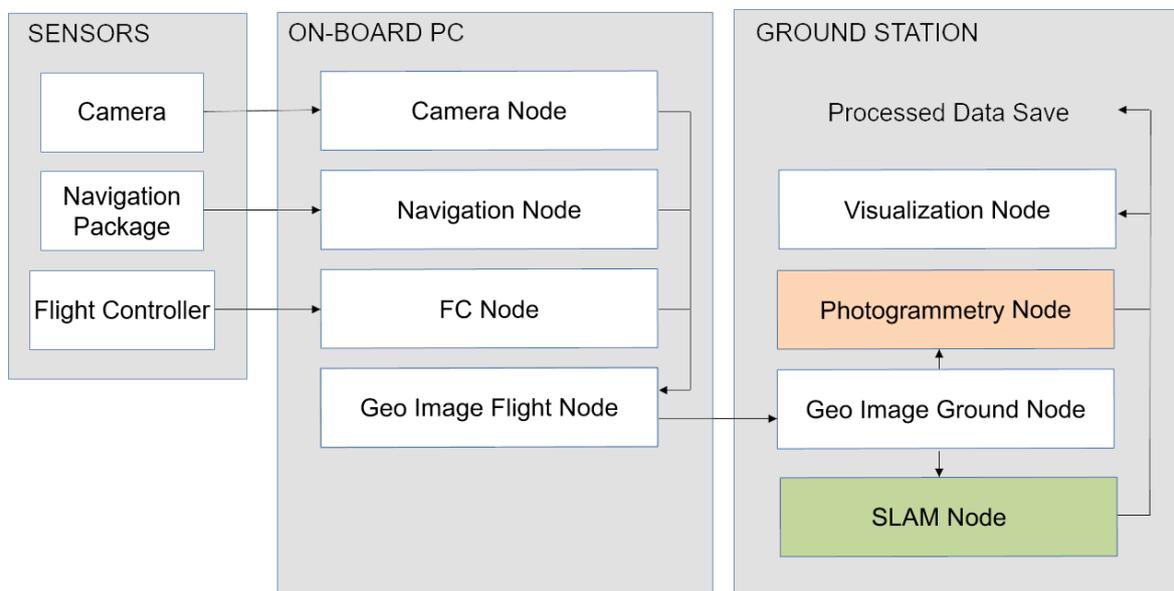


Abbildung 6-52: Aufbau Gesamtsystem auf Softwareebene (ROS-Nodes)

Die meisten bildbasierten Kartierungsverfahren basieren auf der Identifikation und Zuordnung identischer Bildmerkmale (Features). Nach der Identifikation identischer Features können zwei oder mehr Bilder z. B. über einen Bündelblockausgleich relativ zueinander orientiert werden, was die Grundlage zur anschließenden Modellbildung darstellt. Um das Beobachten identischer Features zu ermöglichen, braucht es stark überlappende Bilder (siehe Abbildung 6-53). Daher wird bei der Missionsplanung ein Overlap zwischen einzelnen Bildern von mindestens 50% verlangt. Die so erzeugten und auf die Bodenstation übertragenen Luftbilder sind zur Verarbeitung durch diverse Kartierungsverfahren geeignet.

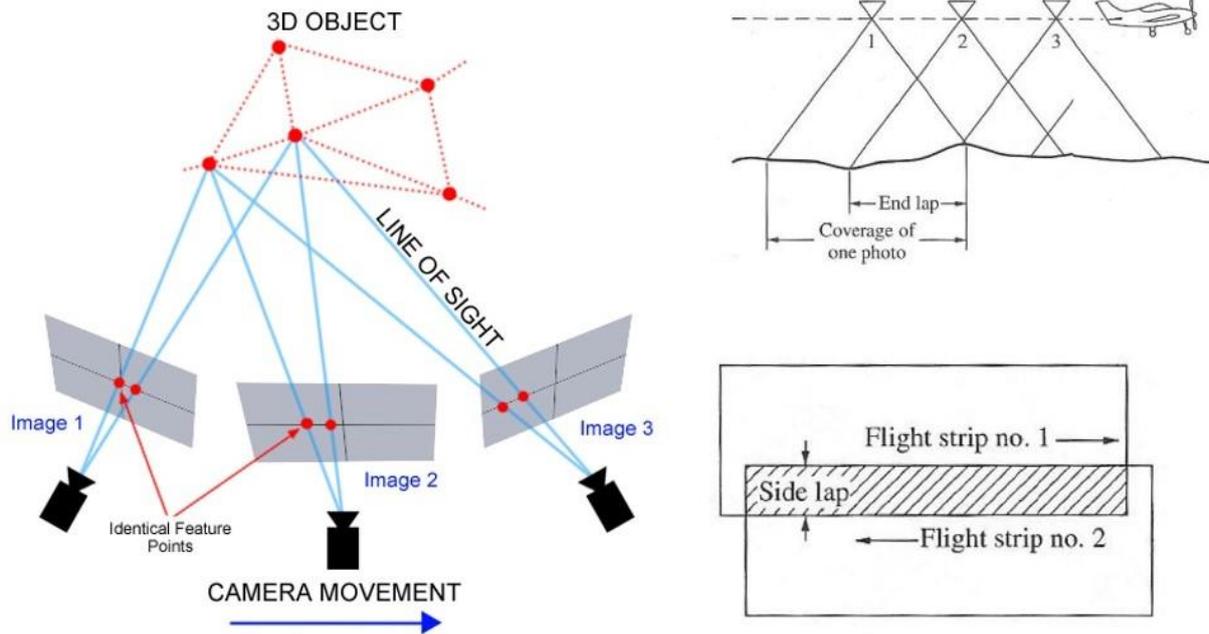


Abbildung 6-53: Feature detection bei Luftbildkartierung [10][11]

Von den bereits genannten Kriterien ist in Hinblick auf den aktuellen Forschungsstand die Einhaltung der Echtzeitfähigkeit die anspruchsvollste Aufgabe. Zur optimalen Lösung des Problems wurden in ANKommEn mehrere Verfahren entwickelt, implementiert und getestet. In Abbildung 6-54 sind die im Verlauf des Vorhabens vollständig implementierten Verfahren dargestellt. Die Lösungen unterscheiden sich grundlegend in der Anzahl der freien Modellparameter, welche einen direkten Einfluss auf die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens haben. Das rechnerisch einfachste Verfahren ist somit die Projektion, bei der komplett auf das Tracking von Features verzichtet wird und Luftbilder anhand der per IMU und GNSS gemessenen Pose (Position und Ausrichtung) der Kamera in die Ebene projiziert werden. Optische SLAM-Verfahren hingegen tracken Features in aufeinander folgenden Bildern und sind dabei aufwendig auf einen echtzeitfähigen Betrieb hin optimiert worden. In der Photogrammetrie werden zum Berechnen der Modellparameter alle Bilder einer Mission benötigt und kann somit erst nach der Mission ausgeführt werden. Eine genaue Beschreibung der jeweiligen Implementierungen sowie eine Evaluation erfolgt in Abschnitt 6.4.1.2.

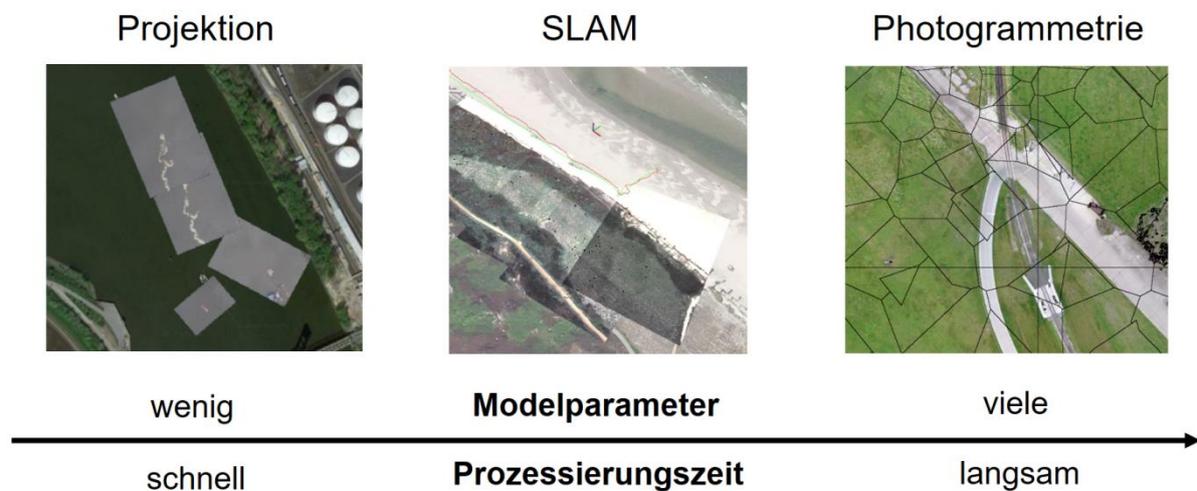


Abbildung 6-54: Implementierte Verfahren in Bezug auf die nötige Prozessierungszeit

6.4.1.2 Kamera-basiertes Mapping – Verfahren

Im Folgenden werden die in Kapitel 6.4.1.1 genannten Verfahren vorgestellt. Neben Details zur technischen Implementierung werden diese jeweils evaluiert und abschließend hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

Projektion

Die Kartierung durch die Projektion von Luftbildern nutzt keinerlei optischen Features zum Optimieren der Karte sondern allein die Pose der Kamera zum Auslösezeitpunkt des Bildes, um dieses in eine idealisierte Ebene zu projizieren. Die Messung der Pose ist wie jede Messung fehlerbehaftet was zu einer entsprechend fehlerbehafteten Projektion führt. Das Prinzip des Verfahrens ist in Abbildung 6-55 dargestellt. Einzelne Bilder werden jeweils in eine gemeinsame Ebene projiziert, wobei neuere Bilder ältere überdecken. Zur Projektion der Bilder sind die Position im Raum (Latitude, Longtitude, Höhe über Grund) sowie der Gierwinkel notwendig.

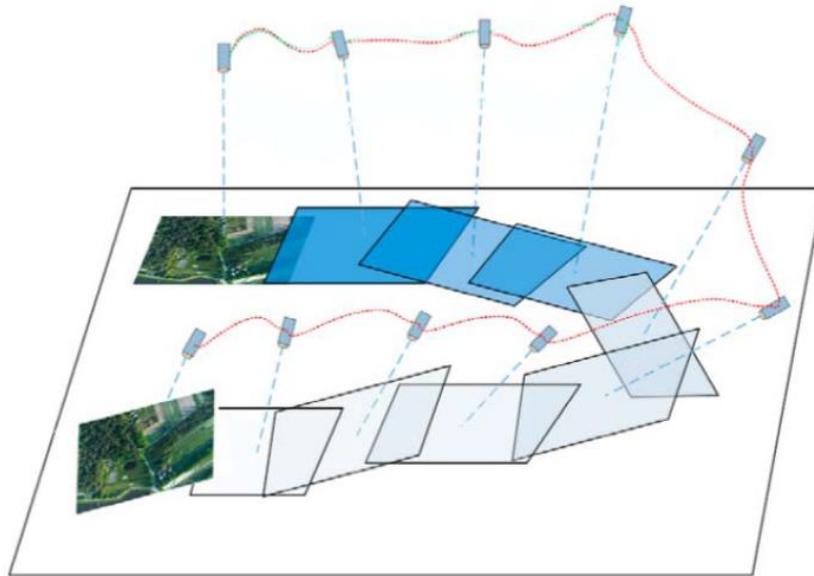


Abbildung 6-55: Konzeptionelle Abbildung von Kameras und ihrer Projektionen

Die benötigten Informationen zur Pose werden von den Algorithmen der Zustandsschätzung bereitgestellt. Da die Höhe über Grund in der Regel nicht direkt gemessen werden kann, wird die Höhe über den Startpunkt verwendet. Roll- und Nickwinkel werden vom Gimbal während des Kartierungsflugs konstant gehalten (orthogonale Kamera). Die zur Implementierung notwendigen Transformationen sind in geographischen Libraries wie GDAL (Geospatial Data Abstraction Library, [34]) bereits enthalten.

Die erzielbaren Ergebnisse sind beispielhaft in Abbildung 6-56 dargestellt.

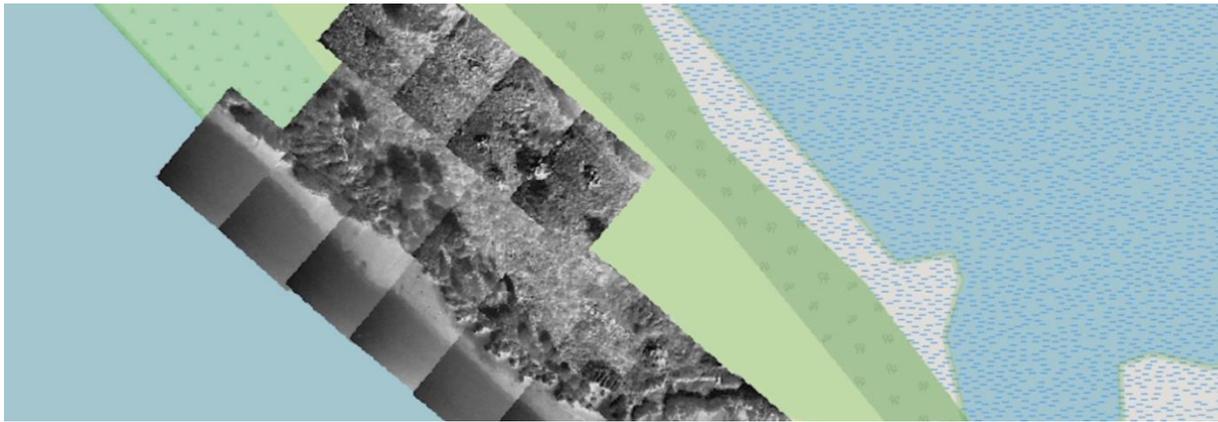


Abbildung 6-56: Projektion von IR-Bildern während Vermisstensuche

Obwohl zwischen den Bildern ein deutlicher Versatz von mehreren Metern erkennbar ist, lässt sich eine konsistente Karte aufbauen. Die erkennbaren Fehler resultieren aus einer fehlerbehafteten Messung der Pose. So führt in einer Flughöhe von 100m bereits ein Lagefehler von 1° zu einer Verschiebung von 1,7m in der Ebene. Das Verfahren ist jedoch nicht auf Features angewiesen und funktioniert daher auch über reflektierenden Flächen wie Wasser oder über Flächen mit mangelnden Features wie sandige Äcker auf denen Feature-basierte Verfahren nicht funktionieren können. Es eignet sich daher als eine Rückfallebene falls andere Verfahren scheitern. Die genannten Eigenschaften lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Vorteile:
Funktion auch bei Nichtexistenz von beobachtbaren Features (Wasser, IR-Bilder)
Notwendige Ressourcen minimal
- Nachteile:
Fehler in Georeferenzierung z.T. mehrere Meter
Durch Überlappung können Informationen verdeckt werden

SLAM

SLAM steht für „Simultaneous Localization And Mapping“ und beschreibt eine Problemstellung aus der Robotik, bei dem sich ein meist autonomes System in einem unbekanntem Terrain bewegt und durch die gleichzeitige Erstellung und Ortung in einer Karte sicher in seiner Umgebung navigieren soll. Der Bereich wird zurzeit stark erforscht und nicht zuletzt durch Investitionen im Bereich des „hochautomatisierten Fahrens“ ist der Fortschritt signifikant. Bis heute finden sich vielfältigste Implementierungen für eine breite Facette von Sensoren, die dabei die Aufgabe der relativen oder globalen Ortung übernehmen. Da optische SLAM Verfahren das größte Potential zum Lösen der gestellten Aufgabe haben, wurde die Implementierung einer praxistauglichen Lösung schwerpunktmäßig vorangetrieben.

Die meisten monokularen, visuellen SLAM-Algorithmen folgen zur Bewältigung der zuvor beschriebenen Aufgaben einer ähnlichen Struktur. Diese besteht grob aus den folgenden fünf Modulen:

1. Initialisierung
2. Tracking
3. Mapping
4. Relocalization (optional)
5. Loop Closing (optional)

Da monokulare Kameras keine direkte Entfernungsmessung zulassen, sind zur Initialisierung mindestens zwei Aufnahmen notwendig, um die Umgebung und Pose zu rekonstruieren. Dies geschieht durch Lösen des Perspective-n-Point-Problems (PnP) aus den gemeinsamen Korrespondenzen zwischen den Bildern. Während dieser Phase wird zudem das globale

Koordinatensystem definiert. Im Verlauf des Tracking und Mapping wird kontinuierlich die Pose der Kamera berechnet und die Karte erweitert, falls ausreichend neue Informationen im aktuellen Bild enthalten sind.

Die Relocalization und das Loop Closing beschreiben ähnliche Herausforderungen. Bei ersterem soll nach Abbruch der Positionsbestimmung der Kamera bspw. auf Grund abrupter Bewegungen eine Wiederaufnahme des SLAM-Prozesses in bekannter Umgebung möglich sein. Beim Loop Closing wird das Wiedererkennen bereits kartierter Orte genutzt um eine global konsistente Karte zu erhalten. Diese beiden Module sind für eine vollständige Lösung des SLAM-Problems, sowie den Praxiseinsatz wichtig, bei aktuellen Implementierungen jedoch nicht immer enthalten.

Da visuelle SLAM Verfahren komplex sind wurde auf bereits erprobte Verfahren aufgebaut. Die Zahl der existierenden, potentiell geeigneteren Implementierungen für visuelle SLAM Verfahren ist zahlreich. Diesem Umstand geschuldet wird die Betrachtung zur Auswahl eines Verfahrens zur nachfolgenden Anpassung für das beschriebene Mapping-Szenarios hier auf drei Möglichkeiten begrenzt, die von Taketomi et al. [12] bereits umfangreich analysiert wurden. In Tabelle 6 ist eine Übersicht über die Auswahlkriterien und die jeweiligen Vertreter dargestellt.

Tabelle 6: Vergleich relevanter visueller SLAM-Verfahren

Visueller SLAM	Lizenz	Art	Relocalization	Loop Closing
LSD SLAM	Open Source	Direkt	Ja	Ja
SVO	Closed Source	Hybrid	Ja	Nein
ORB SLAM 2	Open Source	Merkmals-basiert	Ja	Ja

Der in der Tabelle genannte visuelle SLAM SVO ([35]) bildet einen Kompromiss aus merkmalsbasierten und direkten Verfahren, was potentiell die Vorteile beider Prinzipien vereinen könnte. Zum einen können geometrische Eigenschaften von Merkmalen genutzt werden, um hohe Genauigkeiten zu erreichen, zum anderen wäre die direkte, Pixel-basierte Auswertung in homogenen Bildbereichen nützlich. Da der Quellcode nicht offen zugänglich ist, sind notwendige Modifikationen kaum bis nicht möglich. Zudem beinhaltet es keine Algorithmen zum Loop Closing, um dauerhaft global konsistente Karten zu generieren.

Der LSD SLAM wiederum weist beide dieser Eigenschaften auf. Er ist sowohl quelloffen als auch mit einem Loop Closing ausgestattet [36]. Jedoch könnten die Randbedingungen der Kartographierung problematisch für ausschließlich direkte Verfahren sein. Tendenziell werden Kameras im vorliegenden Anwendungsszenario eher hohe Bildauflösungen besitzen, um auch aus großen Flughöhen eine gute Bodenauflösung zu erzielen. Damit die zu verarbeitende Datenrate für den mitgeführten onboard Computer nicht zu hoch ist, bedeutet das aber gleichzeitig eher eine kleine Bildrate (fps). Zudem werden bei einem realen Einsatz im Feld wechselnde Lichtbedingungen zu erwarten sein, was sich negativ auf direkte Verfahren auswirkt.

ORB SLAM 2 erfüllt alle grundlegenden Anforderungen [37]. Das Framework beinhaltet alle notwendigen Module und erreicht durch parallel prozessierte Optimierung mittels Bündelblockausgleich hohe Genauigkeiten. Der merkmalsbasierte Ansatz ist sehr ähnlich zu der seit Jahrzehnten praktizierten Offline-Kartographierung mit Hilfe von photogrammetrischen Verfahren. Es wird daher für die vorliegende Implementierung als visueller SLAM verwendet.

Abbildung 6-57 zeigt den konzeptionellen Aufbau der finalen Implementierung. Die Arbeitsschritte zur Pose-Estimation laufen hier auf dem Flugsystem, um die errechnete Pose als zusätzliche Stützgröße im Koppelfilter des Navigations-Softwareframeworks des IFF nutzen zu können. Die Bilder, die zum Aufbau der Karte benötigt werden (Keyframes), werden anschließend zusammen mit der errechneten Pose auf die Bodenstation übertragen, um das Stitching (zusammennähen) der Bilder auf der Bodenstation durchzuführen. Die

Dateigröße der dabei generierten globalen Karte ist verhältnismäßig groß, weshalb eine Generierung auf dem Flugsystem und anschließende Übertragung szenarienabhängig nicht immer sinnvoll ist.

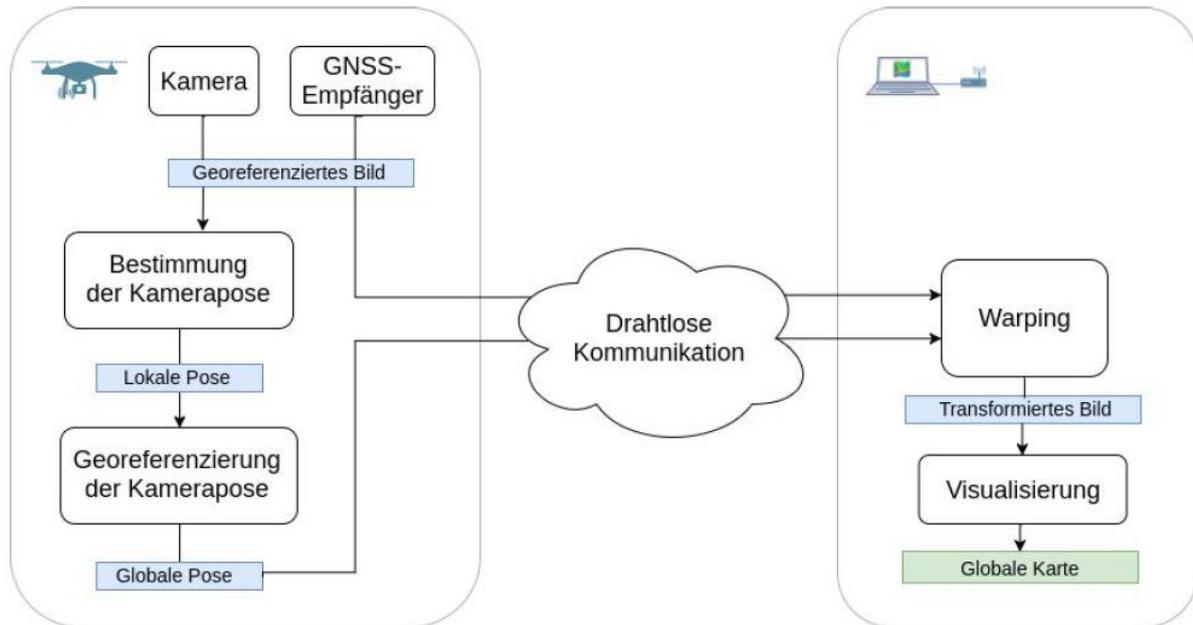


Abbildung 6-57: Verteilung der SLAM-Bestandteile auf den Systemkomponenten

Während für das Tracking größtenteils die im ORB SLAM 2 verwendeten Funktionen genutzt werden können, muss das Stitching für den Anwendungsfall "Luftbildkartierung" angepasst werden. Der konzeptionelle Ablauf ist in Abbildung 6-58 dargestellt. Zunächst werden in der Initialisierungsphase (A, rote Box) alle eintreffenden Messungen bestehend aus Bild und visueller Pose zwischengespeichert. Wurde vom UAV eine ausreichend große Distanz zurückgelegt und dabei die minimale Anzahl von Messungen erreicht, erfolgt im Anschluss die Erstellung des Referenzkoordinatensystems. Um dieses bestimmen zu können, wird zum einen die gemeinsame Referenzebene aller Kameras benötigt, zum anderen die Georeferenzierung. Ist die Referenzebene sowie ihre Transformation in ein geographisches Koordinatensystem erfolgreich ermittelt, wird anschließend mit der Kartographierung aus den Messungen im Zwischenspeicher begonnen (B, violette Box).

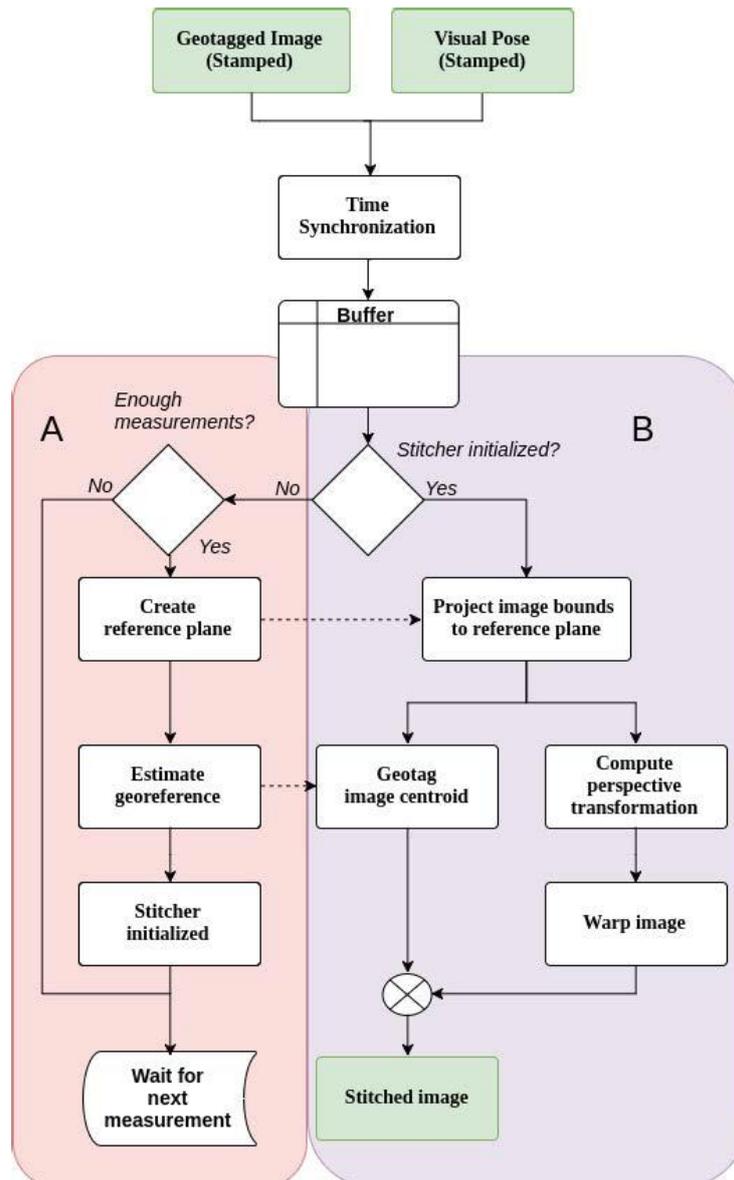


Abbildung 6-58: Konzeptioneller Aufbau des Stitcher Nodes

Der folgende Absatz beschreibt die Evaluation des Verfahrens anhand eines Flugversuchs. Das Gelände umfasst ein Areal von etwa 250m x 200m, welches von dem Flugsystem in 100m Höhe in vier Serpentinbahnen in etwa 3 Minuten überflogen wurde. Die Kamera nahm dabei mit 4 Hz insgesamt 864 Bilder bei einer maximalen Auflösung von 3384 x 2710 Pixel (~9,1 MPixel) auf, was einer frontalen Überlappung von 99% und einer seitlichen von 70% entspricht.

Da der visuelle SLAM zahlreiche, rechenintensive Operationen auf die eintreffenden Bilder anwendet, wurde für den Pose Estimation Node die Höhe und Breite der Bilder auf 35% der Originalgröße reduziert. Daraus folgt für die Arbeitsauflösung 1184 x 948 Pixel (~1,1 MPix). Es ist außerdem hinzuzufügen, dass dem Pose Estimation Node die Aufnahmen zwar mit einer Bildrate von 4 Hz zugeführt wurden, dieser jedoch je nach Berechnungsdauer automatisch eine geringere Verarbeitungsrate aufweist. Im Durchschnitt wurde unter den gegebenen Randbedingungen eine Verarbeitungsrate von 1-2 Hz erreicht. In jedem Bild wurden dabei zudem maximal 4000 Merkmale extrahiert. Die dargestellten prozessrelevanten Parameter sind in Tabelle 7 dargestellt. Auf Grund der Tatsache, dass die Transformation der Bilder (Warping) von der Positionsbestimmung entkoppelt ist, kann die Auflösung für den Stitcher Node frei bis zum Maximum von 9,1 MPix gewählt werden. In der Geodäsie ist es üblich, diesen Wert indirekt in Form der Bodenauflösung (Ground Sample

Distance, GSD) anzugeben. Für den vorliegenden Datensatz wurde eine GSD von 0,05 (max: 0,037) [m/Pix] festgelegt.

Tabelle 7: Gewählte technische SLAM Parameter während Flugversuch

	Rohdaten (Kamera)	Pose Estimation Node	Stitcher Node
Verarbeitungsrate	4 Hz	0 - 4 Hz	0 - 4 Hz
Arbeitsauflösung	3384 x 2710 [Pixel]	1184 x 948 [Pixel]	0,05 [m/Pixel]
		1,1 [MPix]	
Maximale Auflösung	9,1 [MPix]	9,1 [MPix]	0,0368 [m/Pixel]

Das Ergebnis der Kartographierung ist in Abbildung 6-59 dargestellt. Der Pose Estimation Node hat im Verlauf der 846 Bilder insgesamt 29 Bilder als Keyframes identifiziert. Nur diese wurden ihrerseits veröffentlicht, vom Stitcher Node empfangen und der globalen Karte hinzugefügt.



Abbildung 6-59: Erzeugte Photokarte des SLAM-Verfahrens

Das Resultat ist in sich konsistent und weist keine groben Fehler auf. In der Detaildarstellung A, B kann jedoch eine leichte Fehlanordnung der transformierten Bilder erkannt werden. Da der implementierte Stitcher vereinfacht von einem planarem Untergrund ausgeht, sind solche Fragmente allerdings zu erwarten. Im letzten Schritt der Projektion in die als "gemeinsam" definierte Referenzebene, wird diese Vereinfachung erneut angewendet.

Hier wäre es nötig, dass vor der Erstellung der Karte eine vollständige 3D-Rekonstruktion der Oberfläche durchgeführt wird, wie es bei der klassischen Photogrammetrie üblich ist. Anschließend kann über geeignete Methoden eine "echte" Orthogonalität der Karte erreicht werden. Da diese Verfahren jedoch sehr rechenintensiv sind, gibt es derzeit keinen ausgereiften Ansatz diese Problematik in einem Echtzeitsystem zu lösen.

Neben der optischen Gestalt der Karte ist vor allem die Echtzeitfähigkeit eine wichtige Anforderung an die vorgestellte Implementierung. Dabei ist es weniger entscheidend, ob die Bilder unmittelbar im Moment des Überflugs visualisiert werden, sondern dass die Dauer der

einzelnen Prozessschritte auch für große Karten innerhalb eines konstanten Zeitintervalls bleiben.

Für den bereits beschriebenen Datensatz ist in Abbildung 6-60 die Dauer der Berechnungen des Pose Estimation Node für jeden verarbeiteten Keyframe in blau dargestellt. In Orange wiederum finden sich jene für den Stitcher Node, bezogen auf dieselben Keyframes.

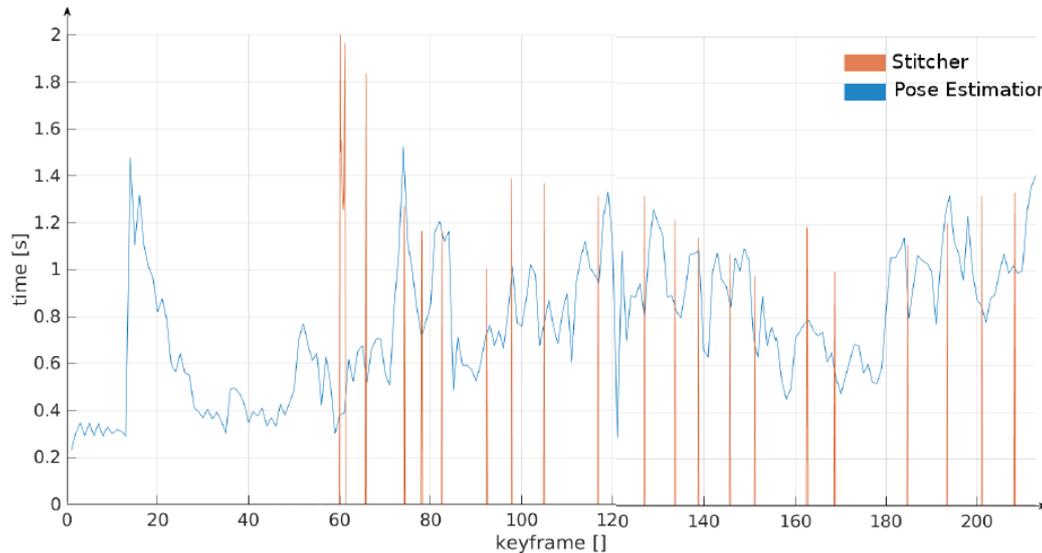


Abbildung 6-60: Berechnungsdauer der jeweiligen Frames während Flugversuch

Zunächst können einige grundlegende Informationen im Graphen erkannt werden. Zum einen findet ab Keyframe #12 die Initialisierung des ORBSLAM statt und die Georeferenzierung im Stitcher ab #60. Die durchschnittliche Berechnungsdauer des Pose Estimation Node liegt zwischen 0,6 und 1,0 Sekunden, also etwa bei 1-2 Hz. Obwohl die Rohdaten mit 4 Hz von der Kamera aufgenommen werden, können diese nicht mit derselben Geschwindigkeit in Posen umgesetzt werden. Es werden lediglich die aktuellsten Bilddaten prozessiert, was wiederum auch die maximale Anzahl von 217 Frames erklärt, von denen 29 als Keyframes identifiziert wurden. Die Spitzen in der Berechnungsdauer des Stitchers deuten jedoch nur auf 21 Bilder hin. Dies lässt sich dadurch erklären, dass nach Berechnung der Georeferenzierung ab #60 alle Bilder des Zwischenspeichers schnellstmöglich verarbeitet werden und so zu einer kurzzeitig anhaltenden Rechenlast führen.

Eine Evaluierung hinsichtlich der erreichten Genauigkeit im Vergleich zu ebenfalls implementierten photogrammetriebasierten Verfahren findet sich im folgenden Abschnitt. Zusammenfassend lassen sich die Vor- und Nachteile wie folgt beschreiben:

- Vorteile:
 - Höhere Genauigkeit durch featurebasierte Ausgleichrechnung
 - Auf Echtzeitfähigkeit optimiertes Verfahren
 - Verwendung der errechneten Pose zur Stützung der Navigation möglich
- Nachteile:
 - Fehlende Robustheit bei Kartierung von Flächen mit wenig Features
 - Nutzung vieler Systemressourcen

Photogrammetrie

Die Photogrammetrie bezeichnet eine Gruppe von Messmethoden und Auswerteverfahren der Fernerkundung, um aus Fotografien eines Objektes seine räumliche Lage oder dreidimensionale Form zu bestimmen. Die wichtigste Abgrenzung zu den zuvor beschriebenen visuellen SLAM-Verfahren ist der fehlende Anspruch der Echtzeitfähigkeit und eine deutlich stärkere Gewichtung der Genauigkeit. Gängige photogrammetrische Verfahren setzen die Präsenz aller Bilder voraus und Prozessierungszeiten von mehreren Stunden sind die Regel. Obwohl die Entwicklungen auf dem Gebiet bereits seit über 150

Jahren voranschreiten, hat insbesondere die Digitalisierung in den 1990ern die finanzielle Hürde zur Durchführung der Verfahren um ein Vielfaches gesenkt.

Aktuell gibt es eine Vielzahl von kommerziellen Softwarepaketen, die die photogrammetrische Verarbeitung und verwandte Arbeitsschritte wie Export in verschiedene Formate und fundamentale Auswerteschritte durchführen (z. B. Agisoft Photoscan, Pix4D, Trimble Inpho). Die unterschiedlichen Lösungen sind hier ähnlich ausgereift und die generierten Modelle unterscheiden sich meist nur im Detail. Zum Zeitpunkt des Projektstarts war jedoch die Software von Agisoft die einzige mit einer zur Automatisierung geeigneten API, weshalb die Software im Rahmen des Vorhabens beschafft und in das System integriert wurde.

Das Ziel der hier beschriebenen Implementierung ist die Automatisierung des gesamten Prozesses inkl. Bildübertragung, Prozessstart, Auswahl der geeigneten Parameter und Export der benötigten Formate. Die folgenden Formate wurden dabei als jeweils notwendig identifiziert: 2D Orthophoto, 2D Höhenkarte und 3D texturiertes Mesh. Der photogrammetrische Prozess zur Erzeugung dieser Endprodukte lässt sich in die folgenden Prozessschritte unterteilen deren Zwischenergebnisse beispielhaft in Abbildung 6-61 visualisiert sind.

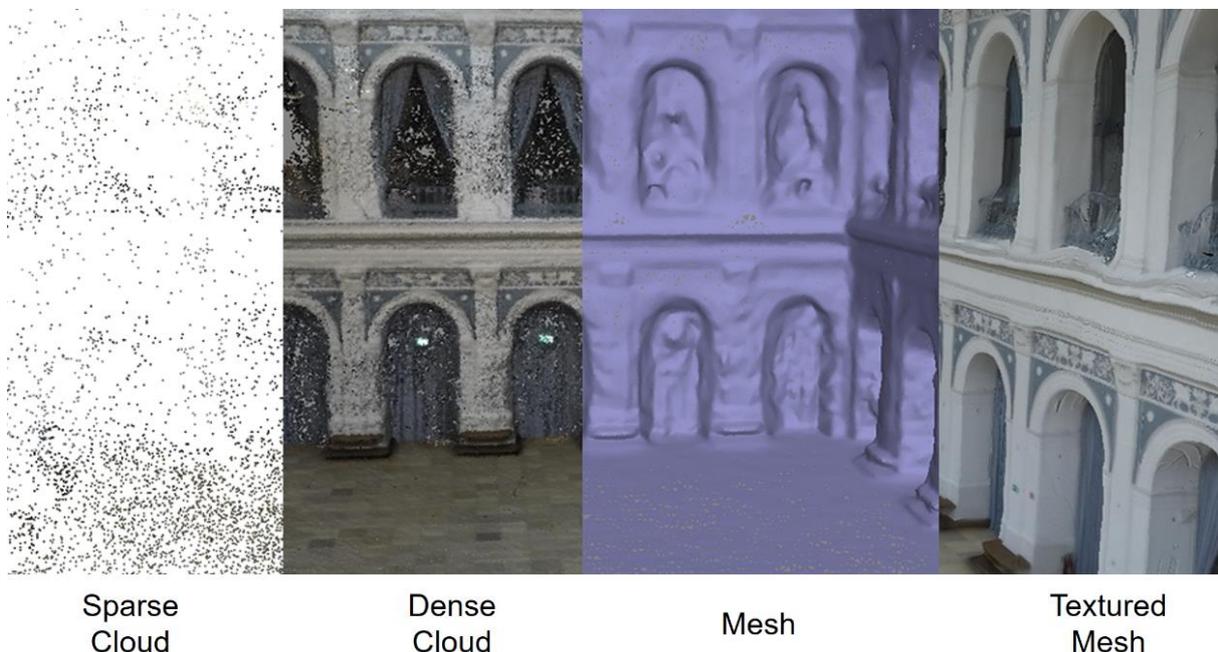


Abbildung 6-61: Visuelles Beispiel der Prozessierungsschritte der Photogrammetrie

Align Photos

In diesem Arbeitsschritt werden anhand der Luftbildaufnahmen die Positionen und die Ausrichtungen der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme berechnet. Es werden in jeder Aufnahme Features identifiziert. Diese werden mit den identifizierten Features aller anderen Aufnahmen verglichen. Wenn es eine Übereinstimmung gibt, wird davon ausgegangen, dass beide Punkte denselben geografischen Punkt repräsentieren und sich somit die Aufnahmen wahrscheinlich überlappen. Ergebnis ist eine errechnete Pose zu jedem Bild. Die erkannten Features werden als *Sparse Cloud* bezeichnet.

Build Dense Cloud

Der zeitaufwändigste Prozessschritt ist das Berechnen einer *Dense Point Cloud*. Mithilfe der implementierten Densification-Algorithmen wird anhand von zwei oder mehr Aufnahmen mit bekannter relativer Position die Tiefe der abgebildeten Punkte rekonstruiert. Hierfür werden auf jeder Aufnahme Korrespondenzen gesucht und für diese dann mittels Triangulation die Tiefe berechnet. Umso mehr Korrespondenzpunkte gefunden und berechnet werden, desto rechenaufwändiger ist die Prozedur.

Build Model

In diesem Schritt wird wahlweise ein 2,5D-Modell oder ein 3D-Modell erzeugt. In 2,5D-Modellen existiert nur eine Höheninformation pro XY-Koordinate. So ist es zum Beispiel unmöglich in einem 2,5D-Modell Überhänge zu modellieren. Aus Rechenkapazitätsgründen wird trotzdem empfohlen, für Aerophotogrammetrie lediglich 2,5D-Modelle zu berechnen. Für die Modellerstellung wird zwischen den zuvor berechneten Punkten ein Netz (*Mesh*) gespannt, welches dann die Oberfläche für das Modell ergibt.

Build Texture

Durch das Auflegen einer Textur auf das Modell, welches vorher farblos ist, ist es möglich Objekte farblich auf dem Modell darzustellen. Durch eine hochauflösende Textur kann die Informationsdichte deutlich gesteigert werden obwohl die Komplexität der Geometrie unverändert bleibt.

Build DEM

Das Digitale Höhenmodell (Digital elevation model, DEM) gibt das kartographierte Gebiet wieder, indem es für jede x-y-Koordinate den zugehörigen Höhenwert durch unterschiedliche Farbgebung darstellt. Die nötige Information bezieht es entweder aus der dichten Punktwolke (Dense Cloud), oder aus dem Modell. Die besten Ergebnisse werden erhalten, wenn die Dichtepunkt-Wolke als Quelle genutzt wird.

Build Orthomosaic

In diesem letzten Schritt wird ein Orthomosaik aus den einzelnen Orthophotos gestiched. So entsteht eine Karte von dem überflogenen Gebiet, welche verzerrungsfrei ist und einen gleichbleibenden Maßstab hat. Die optische Achse der Perspektive eines Orthomosaiks ist an jedem Punkt orthogonal zur Erdoberfläche.

Obwohl Agisoft Photoscan klar hinsichtlich der Bedienung per GUI optimiert ist, lassen sich alle Funktionen auch über die Python API nutzen. Die dazu erstellten Python-Scripte enthalten die Trigger für die genannten Prozessierungsschritte sowie ihrer Parameter. Die Einbindung der API in das Gesamtsystem ist in Abbildung 6-62 dargestellt.

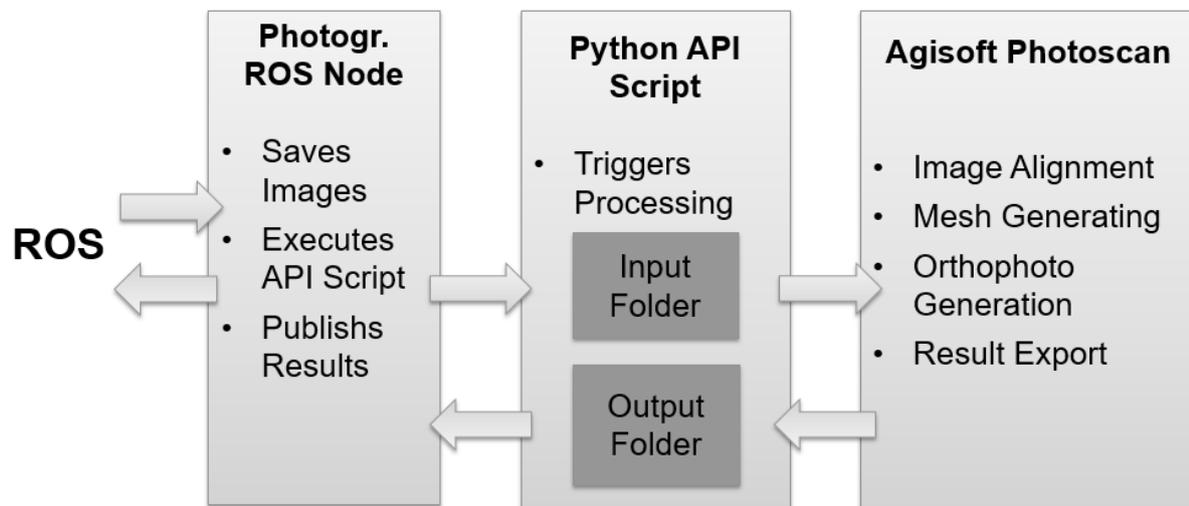


Abbildung 6-62: Einbindung der Photogrammetriesoftware in das Gesamtsystem

Der Photogrammetrie ROS Node auf der Bodenstation speichert alle übertragenen Luftbilder einer Mission im "Input Folder" und startet das API Script sobald die Mission abgeschlossen ist. Die aufgrund der initiierten Berechnungen exportierten Outputformate werden im "Output Folder" gespeichert, von wo sie vom Photogrammetrie ROS Node eingelesen und published werden.

Die in den einzelnen Prozessierungsschritten gewählten Parameter haben erheblichen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse und der benötigten Prozessierungszeit. Durch

Versuchsreihen wurden vier Profile mit unterschiedlichen Parametern entwickelt, die jeweils einen anders gewichteten Kompromiss zwischen Qualität und Prozessierungszeit darstellen. Der Einfluss der verwendeten Profile auf die Kartierungsergebnisse sind in Abbildung 6-63 exemplarisch dargestellt.

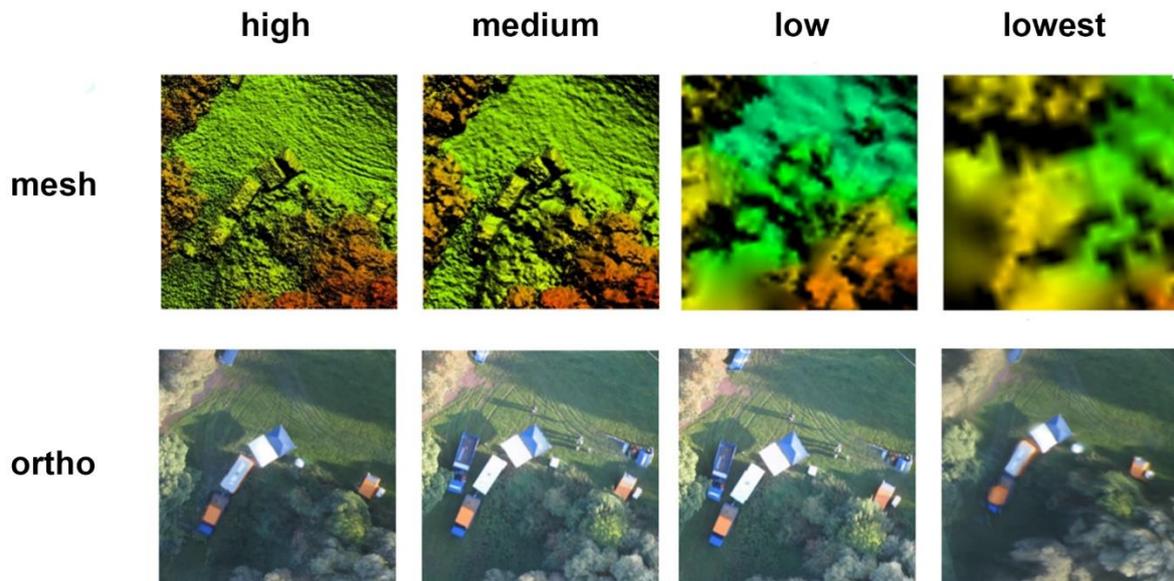


Abbildung 6-63: Einfluss der Profile auf DEM und Orthophoto

Um fundierte Aussagen hinsichtlich der jeweiligen Prozessierungszeit, Genauigkeit auch im Vergleich zu der zuvor beschriebenen SLAM Implementierung treffen zu können, wurden Flugversuche auf dem in Abbildung 6-64 dargestellten Testgelände durchgeführt. Auf dem Gelände wurden acht Referenzpunkte gleichmäßig verteilt und mittels RTK-GNSS (horizontal RMSE unter 2cm) vermessen. Während der drei Minuten Flugzeit wurden dem SLAM Node Bilder mit 4Hz (864 Bilder, 99% Overlap) und dem Photogrammetrie Node Bilder mit 0.3Hz (47 Bilder, 85% Overlap) bereitgestellt, jeweils bewusst beschränkt um die Prozessierungszeit zu minimieren. Beide Prozesse konnten erfolgreich im Feld getestet werden. Die Photogrammetrie Profile wurden automatisch nacheinander prozessiert und die generierten Orthophotos anschließend anhand der Referenzpunkte verglichen.



Abbildung 6-64: Flugfad über Testgelände (A->B) und Referenzpunkte

In Abbildung 6-65 ist das generierte Orthophoto, welches durch das Profil "Agi lowest" erzeugt wurde, dargestellt. Die Ergebnisse der anderen Profile sind visuell nicht unterscheidbar. Das visuelle Ergebnis des SLAMs ist im Abschnitt über das implementierte SLAM-Verfahrens bereits dargestellt worden.



Abbildung 6-65: Orthophoto mit schnellsten Profil mit Referenzpunkte und Fehler Ausgleichsrechnung

In Abbildung 6-66 ist eine Auswertung relevanter Parameter dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die benötigte Prozessierungszeit zwischen 0 (Echtzeit) und 190 Sekunden (nach Ende Mission) beträgt. Das schnellste Profil ist hier mit 60 Sekunden fast 300% schneller verglichen mit dem Langsamsten. Der horizontale Fehler an den Referenzpunkten liegt zwischen 2 und 12 Meter. Der vergleichsweise hohe Fehler bei Verwendung des SLAM-Verfahrens ist hier durch eine nicht optimal durchgeführte Überführung in das globale Koordinatensystem zu erklären und kann in zukünftiger Arbeit verbessert werden. Der Fehler des langsamsten Profils ist 71% über dem des schnellsten Profils. Die Anzahl der errechneten "Tie Points" (sparse point cloud) zeigt, dass das schnellste Profil und das SLAM-Verfahren signifikant weniger Punkte errechnet haben. Der errechnete "reprojection error" liegt beim SLAM-Verfahren ca. 250% über dem des Photogrammetrie-Profiles.

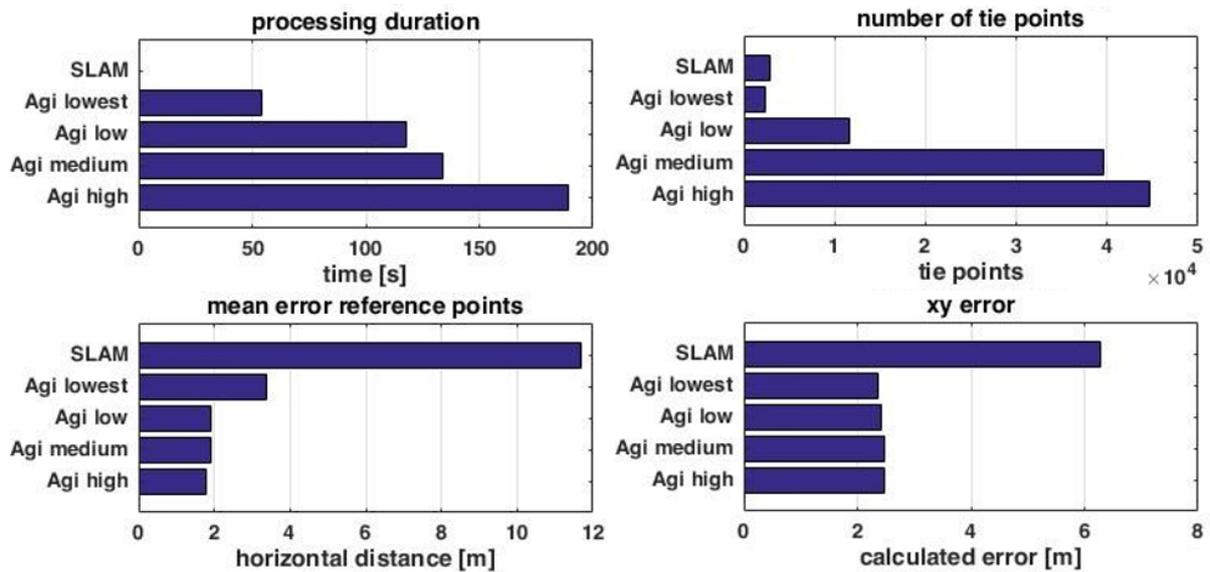


Abbildung 6-66: Auswertung Vergleich Photogrammetrieprofile und SLAM

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Güte der errechneten Photogrammetrie-Ergebnisse noch deutlich über denen der SLAM-Ergebnisse liegt. Bei der Wahl des Photogrammetrie-Profiles sind die Genauigkeitssteigerungen durch die Profile medium und high unbedeutend im Verhältnis zu den höheren Prozessierungszeiten. Es wurde ferner festgestellt, dass die Orthophotogenerierung die meiste Zeit in Anspruch nimmt. Durch die Reduzierung der GSD (Bodenauflösung) lässt sich diese noch erheblich reduzieren (siehe Abbildung 6-67).

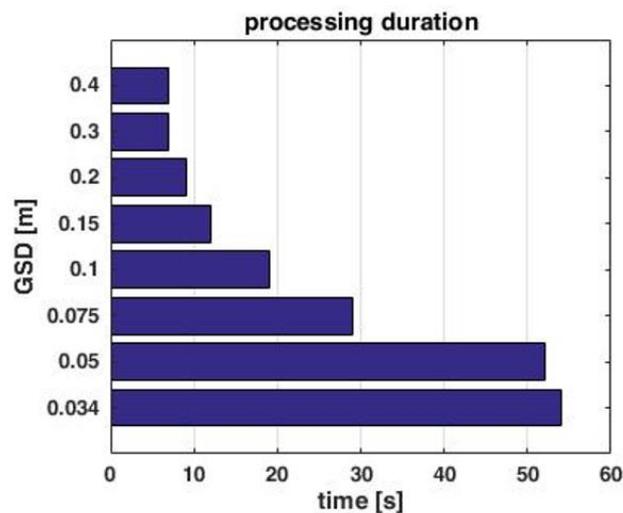


Abbildung 6-67: Prozessierungszeit bei variabler GSD

Sofern das Szenario eine geringere Bodenauflösung zulässt, lassen sich Gebiete dieser Größe mit vertretbarer Genauigkeit in deutlich unter einer Minute prozessieren. Bei größeren Gebieten steigt diese Dauer jedoch exponentiell an. Zusammengefasst gilt somit für die photogrammetriebasierten Verfahren:

- Vorteile:
bestes Prozessierungsergebnis hinsichtlich Genauigkeit
verarbeitet auch anspruchsvolle Untergründe
- Nachteil:
nicht Echtzeitfähig

Ein Vergleich der unterschiedlichen Verfahren mit den anfangs definierten Gütekriterien ist in Tabelle 8 dargestellt. In dieser ist ersichtlich, dass keines der implementierten Verfahren alle Kriterien zufriedenstellend erfüllt.

Tabelle 8: Bewertung Kartierungsverfahren

	Projektion	SLAM	Photogrammetrie
Echtzeitfähigkeit	Green	Green	Red
Robustheit	Green	Red	Green
Genauigkeit	Red	Green	Green

Das Projektionsverfahren ist derzeit am vielseitigsten einsetzbar, erfüllt aber nicht mehr die heutigen hohen Anforderungen an moderne Kartierungsverfahren hinsichtlich der Genauigkeit. Der SLAM kann dieses leisten, funktioniert aber zurzeit noch nicht robust auf allen Oberflächen. Dies leistet wiederum die Photogrammetrie, sie ist jedoch nicht echtzeitfähig. Hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen scheint somit das größte Potential in der weiteren Optimierung der SLAM-Verfahren zu liegen. Durch die anhaltende Entwicklung auf das gegebene Szenario, können die Herausforderungen hinsichtlich der Robustheit sehr wahrscheinlich gelöst werden. Für Auswertungen die eine hohe Genauigkeit erfordern, jedoch nicht zweitkritisch sind bleibt die Photogrammetrie das Mittel der Wahl.

6.4.2 LiDAR-basiertes Mapping

6.4.2.1 LiDAR-Mappingkonzept

Das System besteht aus heterogenen Trägersystemen mit zum Teil gleichartiger Sensorik. So verfügen bspw. beide Bodenträgersysteme jeweils über einen LiDAR-Sensor, sowie eines der Lufträgersysteme. Da je nach Einsatzszenario einzelne, sowie eine beliebige Kombination von Trägersystemen zur Kartierung eingesetzt werden können soll, erscheint ein dezentraler Ansatz, welcher die Kartierung „onboard“ – alle benötigten Berechnung sollen direkt auf dem Trägersystem durchgeführt werden – vorsieht sinnvoll.

Weiterhin ist eine zentrale Instanz notwendig, welche die Datenverwaltung innehat. Die zentrale Verwaltung aller gesammelten Teilkarten, sowie die konsistente Verknüpfung dieser und die Bereitstellung einer Gesamtkarte für die einzelnen Trägersysteme soll auf der Bodenstation durchgeführt werden. Eine schematische Darstellung des Konzepts ist in Abbildung 6-68 zu sehen.

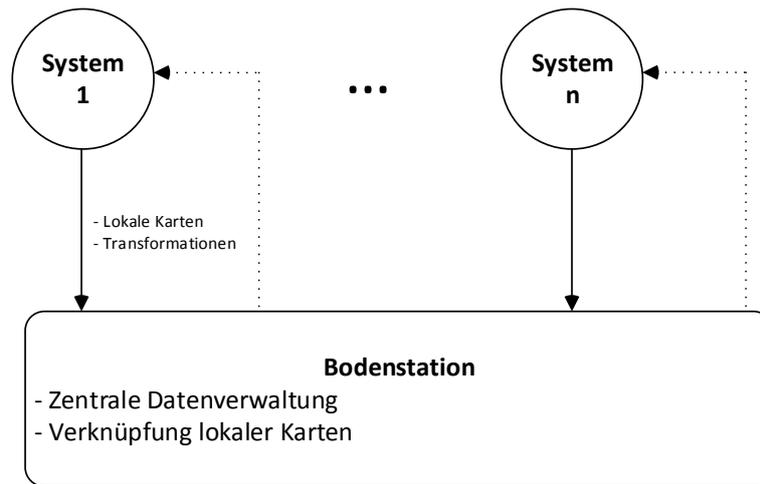


Abbildung 6-68: Schematische Darstellung des LiDAR-Mapping-Konzepts

Mittels der dynamischen Routingfunktionen verfügen die einzelnen Trägersysteme über eine Datenverbindung zur Bodenstation, selbst wenn sie selbst außerhalb der Reichweite sind, solange ein weiteres Trägersystem in Reichweite sowohl der Bodenstation, als auch des betreffenden Trägersystems ist. Auf Grund dieser Tatsache, ist eine ständige Verfügbarkeit einer Datenübertragung in nahezu allen Szenarien sichergestellt (siehe Abschnitt 6.3). Diese Datenverbindung soll genutzt werden, um alle vorprozessierten Karten der einzelnen Kartierungseinheiten in inkrementellen Updates an die Bodenstation zu schicken. Eine Erreichbarkeit der Bodenstation ist dennoch nicht zwingend erforderlich. Auch der Einsatz eines einzelnen Systems ohne Bodenstation ist möglich, da es sich bei dem gewählten Mapping-Konzept um ein dezentrales Verfahren handelt.

6.4.2.2 LiDAR-basiertes Mapping – Verfahren

Durch die Präsenz von massivem Rauschen bei der Messung mittels LiDAR-Sensoren und durch die vorhandenen Messunsicherheiten bei der Lokalisierung, sind probabilistische Ansätze für das SLAM-Problem (Simultaneous Localization and Mapping) Standard in der Literatur [14].

Hierbei wird die Trajektorie des Sensors als Sequenz der Zufallsvariablen $x_{0:T} = \{x_0, \dots, x_T\}$ modelliert. Wobei x_i die sechsdimensionale Pose des Sensors zum Zeitpunkt i darstellt. Zwischen den einzelnen Posen bewegt sich der Sensor, bzw. die robotische Plattform auf welcher der Sensor montiert ist. Diese Bewegungen können beispielsweise mittels Radencodern oder mittels Trägheitsnavigationssystemen gemessen werden und werden als Steuereingänge $u_{0:T} = \{u_0, \dots, u_T\}$ modelliert. Unter Annahme, dass es sich um einen Markow-Prozess handelt, kann die Wahrscheinlichkeitsfunktion $P(x_i|x_{i-1}, u_i)$ gebildet werden, wobei die Prozessfunktion (Gl. 1) typischerweise als normalverteilt modelliert wird. Dabei repräsentiert f_i das Prozessmodell und w_i die Lokalisierungsunsicherheit.

$$x_i = f_i(x_{i-1}, u_i) + w_i \quad 1$$

Mit Messunsicherheiten behaftete Beobachtungen von Landmarken (Erläuterung folgt im weiteren Verlauf) l der Umgebung wiederum werden mittels der Zufallsvariablen $z_{0:T} = \{z_0, \dots, z_T\}$ modelliert. Daraus ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(z_k|x_{i_k}, l_{j_k})$. Hierbei werden die einzelnen Beobachtungen wiederum mittels der Beobachtungsfunktion (Gl. 2) ebenfalls als normalverteilt modelliert. Wobei h_k die Messfunktion und v_k das Messrauschen widerspiegelt.

$$z_k = h_k(x_{i_k}, l_{j_k}) + v_k \quad 2$$

Ziel des SLAM-Algorithmus soll es nun sein, die a-posteriori Wahrscheinlichkeit $p(x_{0:T}, m|z_{1:T}, u_{0:T}, x_0)$, bei beliebiger Startpose x_0 zu schätzen. Zu beachten ist, dass diese sowohl aus der Trajektorie des Sensors $x_{0:T}$, sowie der Karte m , welche die Gesamtheit der

beobachteten Landmarken l widerspiegelt, besteht. Die kombinierte Wahrscheinlichkeitsfunktion, ergibt sich somit zu Gleichung 3.

$$P(X, L, Z) = P(x_0) \prod_{i=1}^M P(x_i | x_{i-1}, u_i) \prod_{j=0}^K P(z_j | x_{i_k}, l_{j_k}) \quad 3$$

Durch nichtlineare Optimierung, beispielweise mittels Gauß-Newton- oder Levenberg-Marquardt-Verfahren, lässt sich der wahrscheinlichste Zustand approximieren. Hierzu muss die Wahrscheinlichkeit maximiert werden. Aus Gründen der numerischen Stabilität wird dieses Problem zumeist in eine Minimierung des negativen Logarithmus überführt (Gl. 4).

$$\theta^* \triangleq \operatorname{argmax}_{\theta} P(X, L, Z) = \operatorname{argmin}_{\theta} -\log P(X, L, Z) \quad 4$$

In der Praxis werden zwei grundlegend verschiedene Ansätze zum Lösen des SLAM-Problems eingesetzt. Zum einen werden Filtertechniken verwendet. Hierzu zählen Verfahren wie Kalman-Filter oder Partikel-Filter. Diese Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass lediglich die aktuelle Pose und Karte zur Berechnung herangezogen werden. Aufgrund ihrer Natur, wird diese Art der Verfahren auch oftmals als „online“ Verfahren bezeichnet.

Auf der anderen Seite gibt es sogenannte „Smoothing“ Ansätze. Diese Verfahren unterscheiden sich grundlegend zu den Filtertechniken darin, dass zu jedem Berechnungsschritt nicht ausschließlich auf die aktuelle Schätzung der Pose und Karte zurückgegriffen wird, sondern stets die komplette Trajektorie im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate approximiert wird.

Abbildung 6-69 zeigt verschiedene Darstellungsformen der SLAM Formulierung. Im oberen Teil der Abbildung ist die Darstellung als Bayessches Netz zu sehen. Bei dieser Art der Darstellung kennzeichnen Knoten innerhalb des gerichteten Graphen Zufallsvariablen, welche durch bedingte Abhängigkeiten (Kanten des Graphen) mit einander in Beziehung stehen. Bspw. wird an der Pose x_0 befindlich, die fehlerbehaftete Beobachtung z_0 von der Landmarke l_0 gemacht. Danach bewegt sich der Sensor weiter durch die Umgebung und macht an Pose x_1 weitere Beobachtungen. Zum einen wird die Landmarke l_0 erneut beobachtet (z_1). Weiterhin wird die Landmarke l_1 , durch Beobachtung z_3 , sowie die Landmarke l_2 , durch Beobachtung z_5 , in der Umgebung erkannt usw.

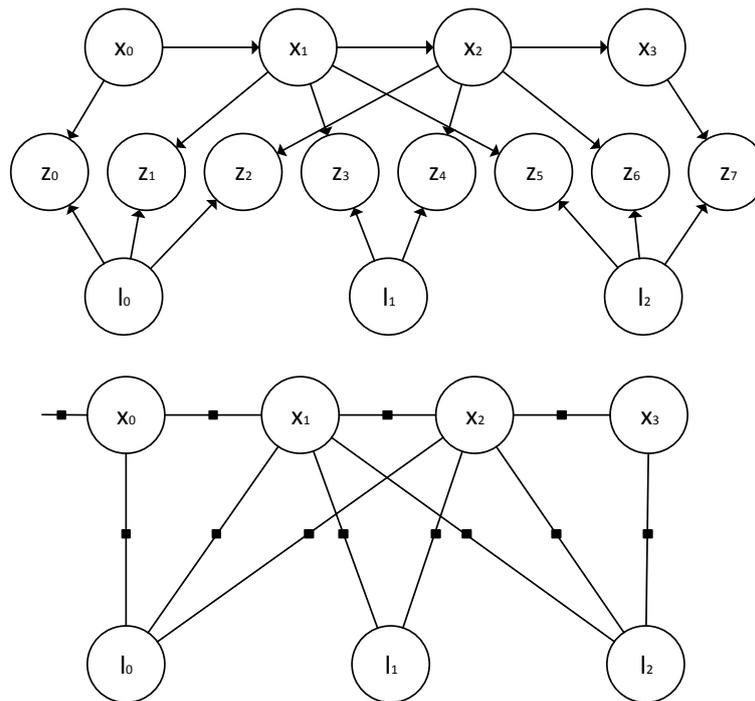


Abbildung 6-69.: Verschiedene Darstellungen des SLAM-Problems bestehend aus 4 Posen und 3 Landmarken, welche unterschiedlich oft beobachtet werden. Oben: Darstellung als Bayessches Netz. Unten: Darstellung als Faktorgraph

Im unteren Teil der Abbildung 6-69 ist derselbe Sachverhalt in Form eines Faktorgraphen dargestellt. Bei dieser Darstellungsform wird die faktorielle Zerlegung einer Funktion in Form eines bipartiten Graphen abgebildet. In Bezug auf das SLAM-Problem ist insbesondere die faktorielle Zerlegung der Gleichung 3 von Interesse. In Abbildung 6-69 sind die einzelnen Faktoren, welche entweder durch die Prozessfunktion (Gl. 1) oder durch die Beobachtungsfunktion (Gl. 2) modelliert werden, als ausgefüllte Quadrate dargestellt.

Eine Implementierung für das Generieren von Faktorgraphen, sowie für das echtzeitfähige Lösen des daraus resultierenden SLAM-Problems, welche im Rahmen von ANKommEn verwendet wurde, beruht auf „Square Root Smoothing and Mapping“ von [15].

Die grundlegende Struktur des LiDAR-Mapping-Systems ist innerhalb des Software-Frameworks „iSAM“ [16] implementiert.

Dabei wird ein sogenannter Pose-Graph aufgebaut. Hierzu werden aufeinanderfolgende Scans (eine volle Umdrehung der Messeinheit) des Velodyne LiDAR-Sensors miteinander registriert. Hierzu wird der sogenannte „Iterative Closest Point“ Algorithmus verwendet. Dieser Algorithmus beruht darauf, eine geeignete Fehlermetrik zwischen zwei Punktwolken zu minimieren, wobei ein alternierendes zweistufiges Verfahren iterativ angewendet wird, bis ein zu definierendes Abbruchkriterium erreicht ist. Der erste Schritt einer jeder Iteration bildet Punktkorrespondenzen, während im zweiten Schritt eine Starrkörpertransformation ermittelt wird, welche die Fehlermetrik minimiert und auf die entsprechende Punktwolke angewendet wird. Zu den am häufigsten genutzten Fehlermetriken zählen die L2-Norm der einzelnen Punktkorrespondenzen (Punkt-zu-Punkt-Abstand) sowie die L2-Norm projiziert auf die Oberflächennormale, approximiert auf der lokalen Nachbarschaft (Punkt-zu-Ebene-Abstand).

Um eine robuste Konvergenz des Verfahrens zu erreichen, ist sicherzustellen, dass sowohl die zu registrierende Punktwolke (der aktuelle Scan), als auch die Punktwolke zu der registriert werden soll (die Referenz), eine ausreichend große Anzahl an Punkten aufweist, welche „überlappen“. In welcher Form die entsprechenden Punktwolken überlappen müssen, hängt in einem großen Maße davon ab, welche Fehlermetrik verwendet wird. Wird die Punkt-zu-Punkt Fehlermetrik verwendet, ist es notwendig, dass entsprechende Punkte tatsächlich in beiden Punktwolken vorhanden sind. Dies kann, insbesondere bei der Verwendung eines

LiDAR-Sensors, nicht sichergestellt werden, da die Auflösung vor allem in Richtung der Hochachse des Sensors spärlich ist und im Fall des verwendeten Sensors lediglich aus 16 Scan-Ebenen besteht.

Für einen derartigen Sensor deutlich besser geeignet ist die Punkt-zu-Ebene Fehlermetrik, da es in diesem Fall ausreichend ist, wenn beide Punktwolken Punkte beinhalten, welche von denselben physikalischen Oberflächen aufgenommen worden sind. Allerdings ist es in diesem Fall notwendig, dass beide Punktwolken Elemente beinhalten, die von orthogonalen Ebenen stammen.

Im einfachsten Fall wird der aktuelle Scan sequenziell mit dem vorherigen registriert. Um die Robustheit des Verfahrens zu steigern und ein entsprechendes Überlappen wahrscheinlicher zu gestalten, wird der aktuelle Scan gegen eine Karte der unmittelbaren Umgebung des Sensors registriert, welche aus einer Vielzahl von vorherigen Scans besteht.

Für die Implementierung der ICP-Verfahren ist auf das Software-Framework „libpointmatcher“ zurückgegriffen worden [17].

Ein essenzieller Nachteil dieses Verfahren ist die Drift, welcher über lange Trajektorien erheblich sein kann. Um den daraus resultierenden Fehler zu begrenzen sieht das Mappingkonzept vor, dass lokale Karten, mit beschränkter Ausdehnung generiert werden. Bewegt sich das Trägersystem eine gewisse Distanz, so wird die aktuelle Kartierung abgeschlossen, die resultierende Karte gespeichert und umgehend eine neue Kartierung begonnen. Gleichzeitig wird dem Pose-Graph eine Pose hinzugefügt, welche sequenziell mit der vorherigen durch Einführen einer neuen Kante verbunden wird. Die zurückzulegende Distanz ist dabei so zu wählen, dass die Drift entsprechend vernachlässigt werden kann.

Um die Drift über mehrere lokale Karten hinweg zu reduzieren ist ein Loop-Closing Algorithmus implementiert worden. Dieser besteht aus drei Schritten. Zuerst werden potentielle lokale Karten gesucht, welche in derselben physikalischen Szene aufgenommen sein könnten. Hierbei wird die Annahme getätigt, dass Aufnahmen des LiDAR-Sensors von Posen, welche eine geringe Distanz – bezogen auf die Messreichweite des Sensors – zueinander aufweisen, potentiell dieselbe physikalische Szene repräsentieren. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Lokalisierungsunsicherheit mit der Länge der Trajektorie ansteigt, muss der Suchradius für potentielle überlappende Posen proportional zur zurückgelegten Länge innerhalb der entsprechenden Schleife gewählt werden. Hierzu wird der Loop-Closing-Gewinn g_{min} modelliert (Gl. 5), welcher den kürzesten Weg zwischen beiden betreffenden Posen entlang der Trajektorie (ermittelt durch den Dijkstra-Algorithmus) in Relation zum transversalen Versatz beider Posen setzt.

$$d_{dijkstra}^{pq} / d_{translation}^{pq} = g_{min} \quad 5$$

Weiterhin müssen beide Posen einen Mindestabstand (in Indizes) zueinander aufweisen, da sonst nicht sichergestellt werden kann, dass entlang einer geraden Trajektorie ständig potentiell überlappende lokale Karten detektiert werden. Wurden potentiell überlappende Posen gefunden, werden Hypothesen gebildet, indem die lokalen Karten, welche sich auf den entsprechenden Teilen der Trajektorien in unmittelbarer zeitlicher Nähe zu den betreffenden Posen befinden, mit Hilfe des ICP-Algorithmus registriert werden. Wird bspw. jeweils die zeitlich davor und dahinter liegende Pose zur Hypothesengenerierung genutzt, so können $3^3 = 9$ Hypothesen generiert werden.

Wurde eine genügend große Anzahl an Loop-Closing-Hypothesen gefunden, so werden diese im zweiten Schritt einer paarweisen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Dieser Schritt hat sich in praktischen Versuchen als essenziell wichtig herausgestellt, da die Einführung von positiv falschen Hypothesen in den Graphen zu einer direkten Divergenz sowohl der Trajektorie, als auch der Karte führt. Eine schematische Darstellung des implementierten Verfahrens ist in Abbildung 6-70 dargestellt.

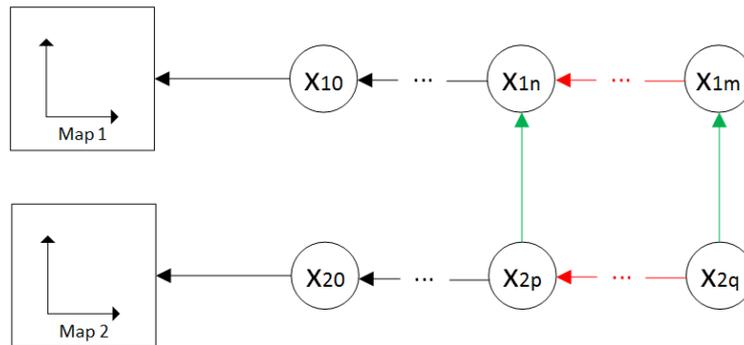


Abbildung 6-70: Zwei Trajektorien zwischen denen Loop-Closing-Hypothesen gefunden worden sind (grün) und die Abschnitte auf den betreffenden Trajektorien (rot), welche zusammen eine Schleife darstellen

Zum Hypothesentest werden alle Kombinationen der verschiedenen Hypothesen gegeneinander getestet. Hierzu wird für jedes Hypothesenpaar eine zusammengesetzte Starrkörpertransformation Φ gebildet, sowie die dazugehörige Kovarianz Σ . Dabei sind Φ_{np}^{ij} und Φ_{qm}^{ij} die entsprechenden Hypothesen (grün) und die dazugehörigen Abschnitte auf den entsprechenden Trajektorien Φ_{pq}^{jj} und Φ_{mn}^{ii} sind in Rot dargestellt. Die zusammengesetzte Starrkörpertransformation ergibt sich zu Gleichung 6.

$$\Phi = \Phi_{np}^{ij} \Phi_{pq}^{jj} \Phi_{qm}^{ij} \Phi_{mn}^{ii} \quad 6$$

Der Term für die zusammengesetzte Kovarianz hingegen ergibt sich durch die Multiplikation der einzelnen Anteile mit der Jakobimatrix (Gl. 7).

$$\Sigma = J_{np}^{ij} \Sigma_{np}^{ij} J_{np}^{ij T} J_{pq}^{jj} \Sigma_{pq}^{jj} J_{pq}^{jj T} J_{qm}^{ij} \Sigma_{qm}^{ij} J_{qm}^{ij T} J_{mn}^{ii} \Sigma_{mn}^{ii} J_{mn}^{ii T} \quad 7$$

Aus der Kreistransformation und der dazugehörigen Kovarianz kann dann die paarweise Konsistenz der betreffenden Hypothesen $A_{i,j}$ gebildet werden (Gl. 8).

$$A_{i,j} = e^{\Phi \Sigma^{-1} \Phi^T} \quad 8$$

Der Term aus Gleichung 8 verhält sich proportional zur Wahrscheinlichkeit, dass Φ die Einheitstransformation darstellt und ist somit ein Maß dafür, dass beide Hypothesen und die entsprechenden Strecken entlang der Trajektorien tatsächlich eine konsistente Schleife bilden. Da die Wahrscheinlichkeit dafür, dass beide Hypothesen einen Fehler aufweisen, der sich gegenseitig aufhebt verschwindend gering ist, kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass beide Hypothesen zutreffend sind.

Mittels aller Hypothesen wird anschließend eine Konsistenz-Matrix gebildet. Mit Hilfe des Verfahrens der „Single-Cluster Spectral Graph Partitioning“ [18] wird derjenige Anteil an Hypothesen übernommen, welcher in sich die größte Konsistenz aufweist. Als Grundlage für das implementierte Verfahren wurde auf der Arbeit von [19] aufgebaut.

Im letzten Schritt werden alle akzeptierten Hypothesen als zusätzliche Faktoren in den Pose-Graph übernommen. Durch diesen Schritt besteht der Graph nunmehr nicht ausschließlich aus Kanten, die nachfolgende Knoten verbinden, vielmehr sind so Kanten zwischen beliebigen Knoten möglich.

Mit Hilfe der dargestellten Verfahren ist es möglich konsistente Karten einzelner Teilnehmer zu erstellen. Zur zweckmäßigen Darstellung der Karten im Fall eines Einsatzszenarios, ist eine Verortung der erstellten Karten notwendig. Weiterhin war eine Erstellung von Karten über mehrere Teilnehmer im Schwarm Ziel des Projekts. Für diese Anwendungen ist ebenfalls eine Georeferenzierung der Karten notwendig.

Externe Positionsinformationen basierend auf GNSS können nicht ohne weiteres integriert werden, da eine Transformation zwischen dem globalen (WGS84, UTM, ...) und dem lokalen (frei zu wählendem) Bezugssystem nicht bekannt ist. Aus dem Grund, dass einzelne GNSS-Messwerte stark fehlerbehaftet sein können, scheinen triviale Annahmen, wie das Gleichsetzen von Posen aus globalem und lokalem Referenzsystem nicht sinnvoll.

Weiterhin ist es möglich, dass Teile von Trajektorien von bodengebundenen Trägersystemen durch Bereiche führen, in denen der GNSS-Empfang stark eingeschränkt ist. Deshalb ist ein möglichst flexibles System zur Georeferenzierung implementiert worden. Das Verfahren ist schematisch in Abbildung 6-71 dargestellt.

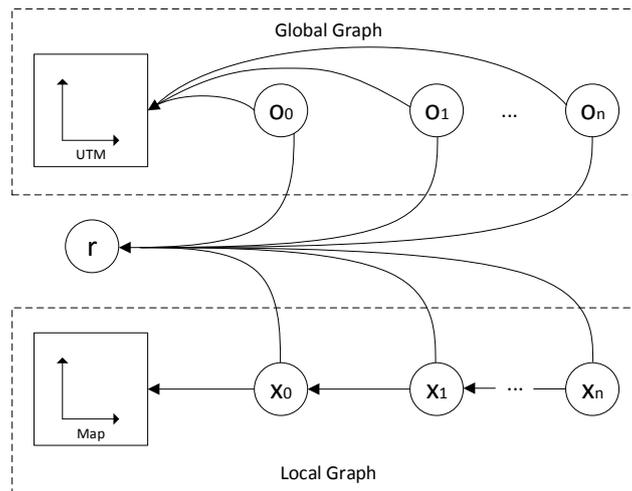


Abbildung 6-71: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Georeferenzierung. Oben: Der globale Graph, welcher aus dem Kalman-Filter (siehe Abschnitt 6.2) generiert wird. Unten: Der lokale Graph, welcher mittels Methoden der relativen Positionierung bestimmt wird.

Neben einem lokalen Graphen, welcher in erster Linie aus Kanten zwischen sequenziellen Posen besteht (zusätzlich Kanten eingeführt durch Loop Closing), wird ein zusätzlicher Graph erstellt. Dieser enthält jedoch ausschließlich Kanten, welche zwischen der jeweiligen Pose und dem Ursprung des gewählten Referenzsystems bestehen. Diese Kanten entsprechen bspw. den UTM-Koordinaten und sollen fortan als global bezeichnet werden.

Wird dem lokalen Graphen eine Pose hinzugefügt, so wird die zeitlich nächstgelegene Positions- und Lageinformation von dem INS/GNSS System (siehe Abschnitt 6.2) aus einem Zwischenspeicher zugeordnet und als Kante dem globalen Graphen hinzugefügt. Zusätzlich wird dem Faktorgraphen ein weiterer Faktor hinzugefügt, der die jeweilige Pose aus dem lokalen, mit dem globalen Graphen verknüpft. Dieser sogenannte Referenzsystem-Faktor beinhaltet neben der lokalen Pose x_i und der globalen Pose o_i zusätzlich einen weiteren Knoten r . Ein entsprechender Faktor ist in Gleichung 9 dargestellt. Mittels nicht linearer Optimierung kann so die Starrkörpertransformation zwischen beiden Bezugssystemen ermittelt werden. Die Zuordnungsunsicherheit q_i kann abhängig von der zeitlichen Differenz der Posen modelliert werden.

$$r_m = g_m(x_m, o_m, r) + q_m \quad 9$$

Da nicht zwingend zu jedem Knoten im lokalen Graphen ein entsprechender Knoten im globalen Graphen bestehen muss (Abschattung des GNSS bspw. in Indoor-Szenarien), werden beide Graphen durch m Kanten verbunden. Wird der Startpunkt des lokalen Graphen bspw. zu Null gewählt (x_0 ist frei wählbar, siehe Gl. 3), entspricht diese Transformation genau der Lage des lokalen Referenzsystems im globalen (bspw. UTM) Koordinatensystem.

Mit Hilfe der beschriebenen Verfahren ist das Mapping-System in der Lage konsistente Karten in großem Maßstab zu erstellen. Möglich ist dies in Bereichen in denen eine

ausreichende GNSS Verfügbarkeit sichergestellt werden kann, jedoch auch in solchen, in denen GNSS nicht verfügbar ist. Abbildung 6-72 zeigt exemplarisch eine Karte eines Gebietes mit der Ausdehnung von etwa 200m x 50m (1 ha). Bei der Kartierung hat das Bodenfahrzeug in einer Zeit von 415 Sekunden eine Strecke von 466 Meter zurückgelegt und dabei 961 lokale Karten erstellt. Die farbliche Kodierung stellt die Höhe der Kartenpunkte dar.



Abbildung 6-72: Zusammengesetzte Karte bestehend aus LiDAR-Scans eines UAVs (rote Trajektorie) und eines UGVs (blaue Trajektorie)

In blau ist die Trajektorie eines bodengebundenen Trägersystems dargestellt, welches sich von der linken Seite kommend entlang eines Feldwegs zuerst an einer schmalen Halle vorbei bewegt, bevor es dann längs an der Seite der größeren Halle entlang bis zu deren Eingang fährt. Innerhalb der Halle fährt das Trägersystem eine Schleife, bei der die ersten Loop-Closings gefunden werden. Auf der Längsseite verlässt das Bodenfahrzeug die Halle wieder und fährt in entgegengesetzter Richtung auf demselben Feldweg wie auf dem Hinweg. Hier kommt es erneut zu weiteren Loop-Closings. Bevor das Bodenfahrzeug wieder zum Ausgangspunkt fährt, wird auch die kleinere Halle von innen kartiert. Nachdem diese wieder verlassen wird, kommt es zum letzten Mal zum erfolgreichen Finden und Einführen von Loop-Closings.

Weiterhin ist in Rot die Trajektorie eines UAV dargestellt, welches denselben Bereich kartiert. Das UAV hat eine Strecke von 200 Meter in einer Zeit von 76 Sekunden zurückgelegt und dabei 249 lokale Karten erstellt. Mit Hilfe der Georeferenzierung beider Trajektorien, können diese erfolgreich in ein gemeinsames Referenzsystem überführt und zusammen dargestellt werden.

6.4.3 A priori Informationen

Im Laufe des Projekts hat sich im Gespräch mit den beteiligten Projektpartnern ergeben, dass dreidimensionale a priori Informationen nur sehr spärlich vorliegen. Falls es tatsächlich derartige Daten gibt, liegen diese meist ausschließlich lokal vor und können somit nicht mit vertretbarem Aufwand im Einsatzfall zur Verfügung gestellt werden. Aus diesem Grund wurde sich bei der Nutzung von a-priori Daten in erster Linie auf zweidimensionale Daten beschränkt. Abbildung 6-73 zeigt exemplarisch die kombinierte Darstellung von 2D- und 3D-Daten. Hierbei können Kartendaten von verschiedenen Anbietern genutzt werden (siehe Abschnitt 6.5.1).

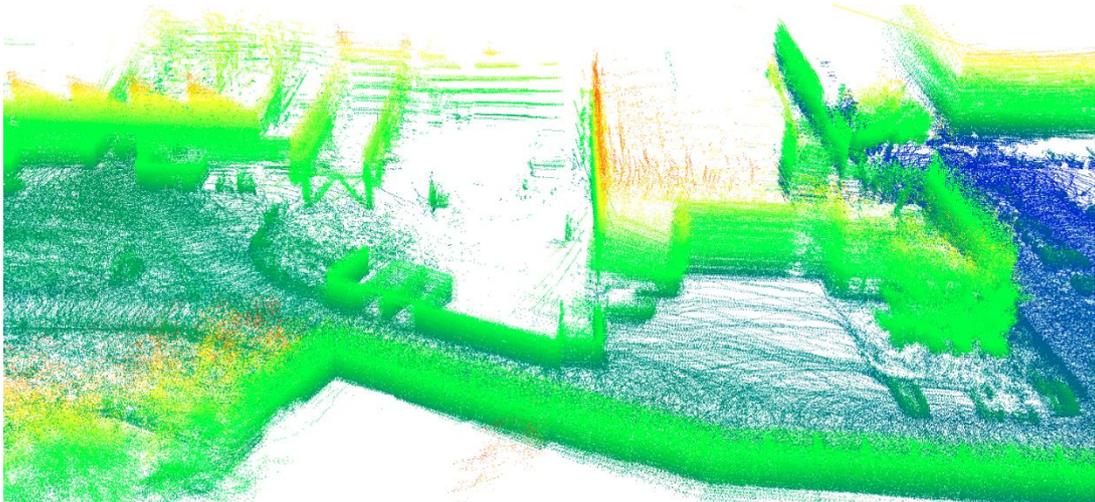


Abbildung 6-73: 2D Satellitenbild in der Überblendung mit einer 3D Punktwolke. Die Höhe ist farblich kodiert dargestellt. Im unteren Teil ist die Punktwolke in der Seitenansicht.

6.4.4 Merkmalerkennung

Um die Arbeitsbelastung bei der Auswertung der Bilddaten zu reduzieren wurde die Machbarkeit untersucht und wo möglich eine automatisierte Vorauswertung implementiert. Deses erfolgte beispielhaft basierend auf dem Einsatz der Thermalkamera für folgende Applikationen, resultierend aus Feuerwehreinsatzszenarien:

Glutnesterkennung

Zur Glutnesterkennung wurde ein Workflow zur automatisierten Erkennung und Markierung des heißesten Punktes in IR-Bilderstream implementiert. Zusätzlich wird auf Wusch ein Overlay mit einer Markierung und der gemessenen Temperatur über das Bild gelegt. Damit nur relevante Punkte markiert werden, kann der Temperaturbereich in dem die Markierung erfolgen soll konfiguriert werden (z. B. „markiere Punkte ab 50°C).

Zur Verifikation wurde ein simuliertes Glutnest im Versuchsgelände ausgebracht. Der Aufbau, bestehend aus zwei Gaskochern die eine Metallplatte erhitzen, konnte zuverlässig in allen Aufklärungsflügen detektiert werden. Abbildung 6-74 zeigt einen Auszug aus dem IR-

Bilddatenstream wie er auf der Bodenstation angezeigt wird. Die erkannte Hitzequelle wird korrekt markiert und mit einer Temperatur von 96°C angegeben.

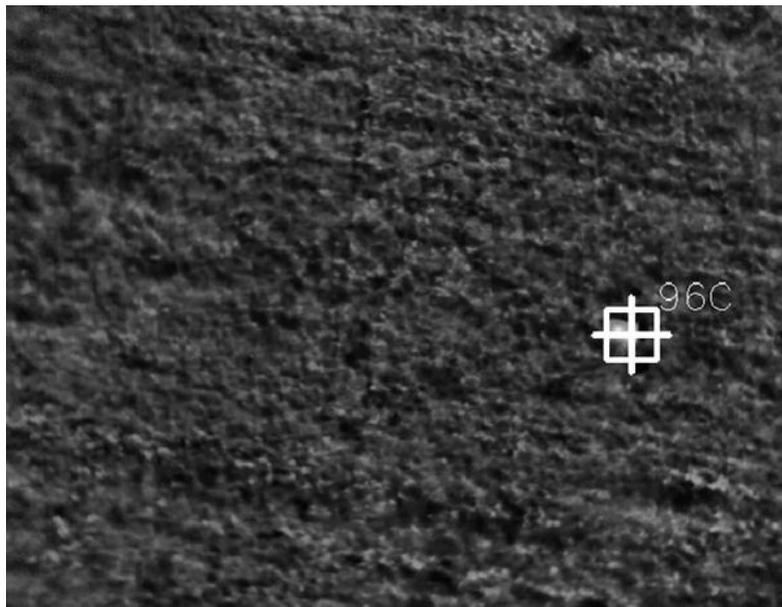


Abbildung 6-74: automatisierte Glutnestererkennung

Detektion Menschen

Die durchgeführten Versuche zur Erkennung von Menschen zeigten, dass das Identifizieren vom Menschen auf IR-Bildern mit der eingesetzten Thermalkamera nicht immer möglich ist. Abhängig von den vorherrschenden Umweltbedingungen führt die im Vergleich zu Glutnestern deutlich geringere Temperaturdifferenz zur Umgebung bei automatischer Erkennung durch die Analyse der Temperatur oft zu False-Positive Meldungen. Insbesondere durch starken Sonnenschein erhitzt sich die Umgebung z.T. auf ähnliche Temperaturen oder die Messung wird durch Reflexionen auf glatten Oberflächen stark verfälscht.

Abbildung 6-75 zeigt ein Bild aus einer Übung mit der DLRG, in welcher die Suche bei bedeckten Himmel stattfand und die vermisste Person so identifiziert werden konnte.

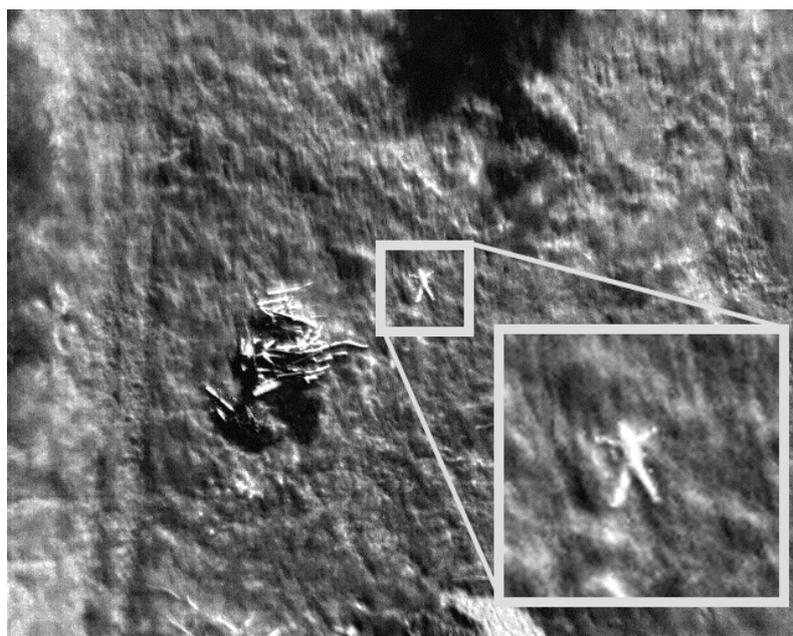


Abbildung 6-75: Erfolgreich identifiziertes Kind während einer Übung

Automatisierte Modellbasierte Detektion

Neben der Detektion mittels Temperatur, sind weiterhin Versuche durchgeführt worden um Personen automatisiert in RGB, sowie IR-Bildern zu detektieren. Hierzu wurden Verfahren nach [33] verwendet. Diese Verfahren beruhen darauf eine Support-Vektor-Maschine (SVM) derart zu trainieren, dass diese in der Lage ist verformbare Modelle für verschiedene Objektklassen zu abstrahieren und in Bildern wiederzuerkennen.

In einem ersten Schritt werden hierzu „Histogram of Oriented Gradients“ (HOG) Feature berechnet. Hierzu werden die Intensitätsgradienten im Bild sowohl in horizontaler, wie in vertikaler Richtung berechnet. Danach wird das Bild in gleichförmige, sich nicht überschneidende Regionen unterteilt. Die Autoren [33] nutzen Regionen von 8x8 Pixeln. Innerhalb der einzelnen Regionen werden dann Histogramme der Gradienten berechnet. Hierzu wird die Richtung der Gradienten in 9 Stufen diskretisiert (0° - 20° , 20° - 40° , ...). Die Norm des Gradienten dient zusätzlich als Wichtung.

Jede Region wird abschließend mit der Norm einer 2x2 Pixel großen Subregion normalisiert. Als Ergebnis erhält man somit für jede Region einen Vektor der Größe 9x4, welcher jeweils die lokale Struktur des Bildes charakterisiert. Die Feature-Vektoren werden dann mit Hilfe einer Image-Pyramide für verschiedene Auflösungen des Ausgangsbildes berechnet und ergeben mehrere dichte Feature-Maps.

Nach Berechnung der Feature-Maps, werden diese gefiltert. Hierbei hat ein Filter $w \times h \times 9 \times 4$ Parameter, wobei die Breite w und Höhe des Filters h beliebig zu wählen sind. Je nach lokaler Struktur des Bildes und Wahl der Filterparameter können so charakteristische Filterantworten generiert werden. Die Filterparameter können innerhalb eines Trainingsprozesses für entsprechende Objektkategorien angelernt werden.

Grundgedanke des in [33] vorgestellten Verfahren ist das Anlernen verschiedener Teilmodelle, welche in bestimmter, nicht fester Anordnung (verformbar) auftreten und so charakteristisch für eine bestimmte Objektkategorie sind. Ausgehend von dem sogenannten „Root-Filter“, welcher die Bounding-Box des Objekts festlegt, werden „Part-Filter“ platziert und die Score für die zu ermittelnde Kategorie berechnet. Ein Beispiel für ein derartiges mehrstufiges Modell eines Menschen ist in Abbildung 6-76 dargestellt. Auf der linken Seite ist die Energie für jede Region im „Root-Filter“ zu sehen. In der Mitte sind die entsprechenden Energien für alle „Part-Filter“ abgebildet und auf der rechten Seite sind die Kosten für die Platzierung der einzelnen Teilmodelle abgebildet.

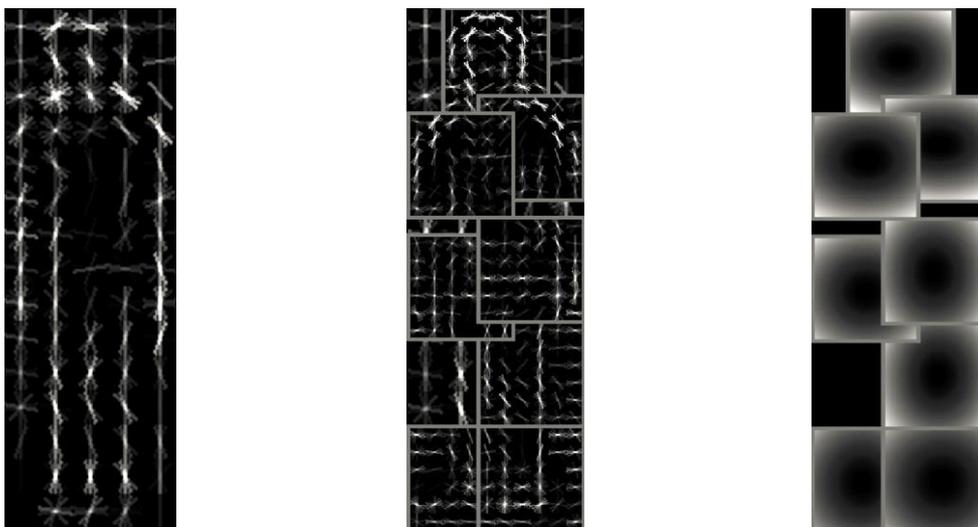


Abbildung 6-76: Mehrstufiges Modell einer Person.

Abbildung 6-77 zeigt das experimentelle Ergebnis anhand eines RGB-Bildes (links) und eines IR-Bildes (rechts) aufgenommen mit einem Bodenträgerfahrzeug. Beide Bilder wurden synchron aufgenommen und spiegeln somit exakt dieselbe Szene wieder. Zu erkennen ist die korrekt platzierte Bounding-Box (rot, der „Root-Filter“) und die entsprechenden „Part-Filter“, welche jeweils in blau dargestellt sind. Anzumerken ist, dass für beide Bilder das gleiche Modell verwendet wird.

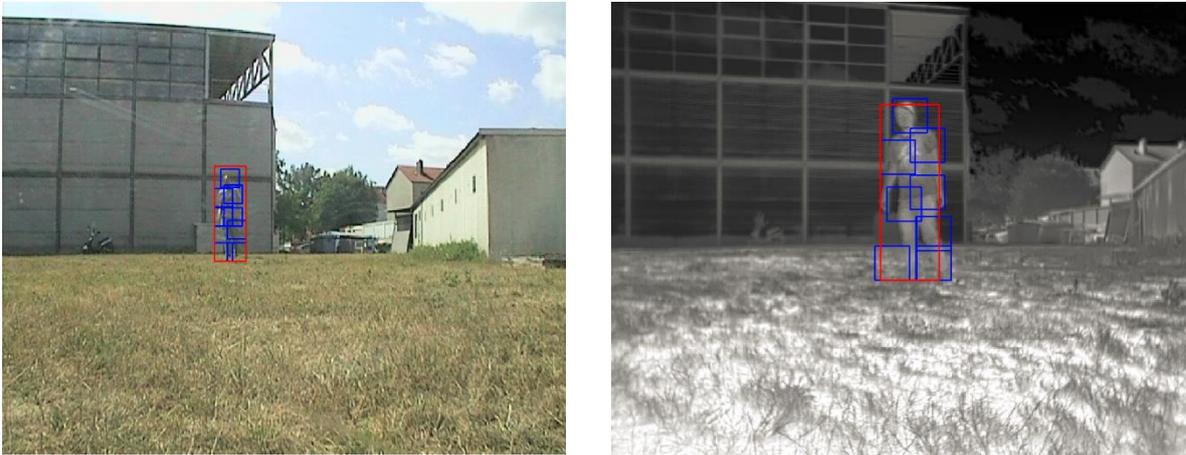


Abbildung 6-77: Automatisch erkannte Person im RGB- (links) sowie IR-Bild (rechts). Die ermittelte Position für den Root-Filter sind in rot dargestellt, während die Part-Filter in blau abgebildet sind

6.5 Führung & HMI

6.5.1 User-Interface

Abbildung 6-78 zeigt die Hauptansicht der in ANKommEn entwickelten Benutzerschnittstelle. Neben der Anzeige von 3D-Daten in der Mitte des Bildschirms besteht das Interface aus den folgenden Subkomponenten:

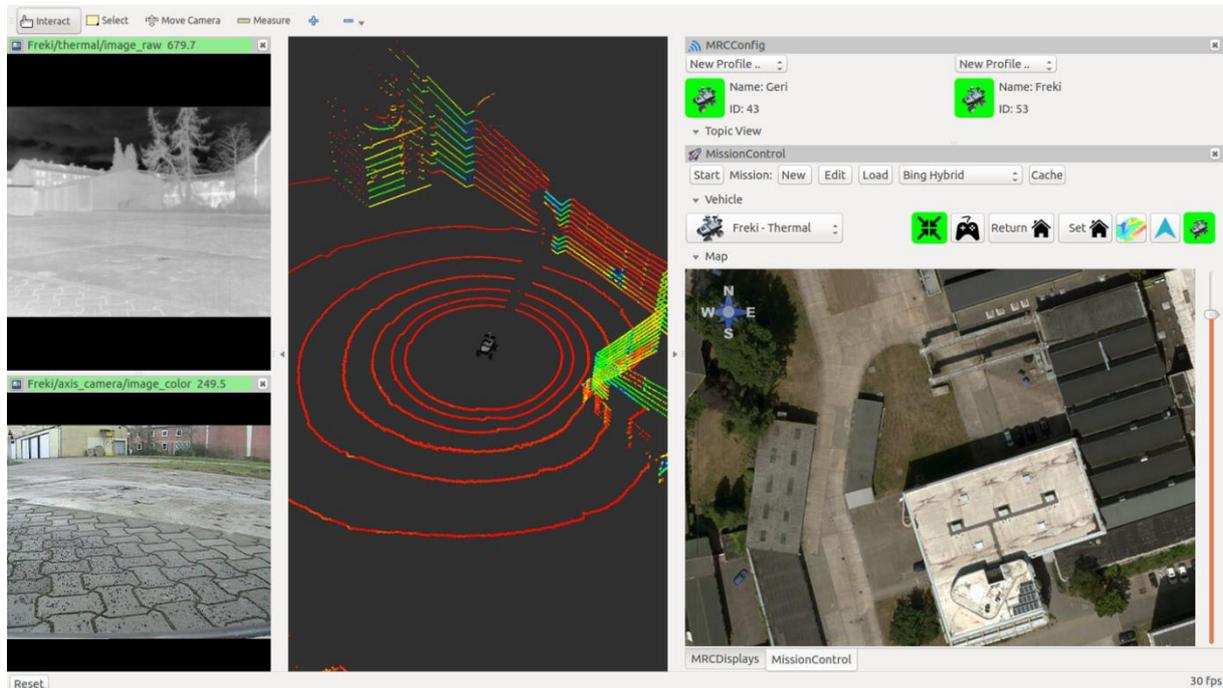


Abbildung 6-78: Zentrales Userinterface zur Visualisierung der Sensordaten im Schwarm

StampedImage Plugin:

Dieses Plugin dient zur Anzeige von Videostreams der Roboter (Optische Kamera, Thermal-Kamera, PTZ-Kamera) mit zusätzlichem Zeitstempel und Namen des Roboters.

MissionControl Plugin:

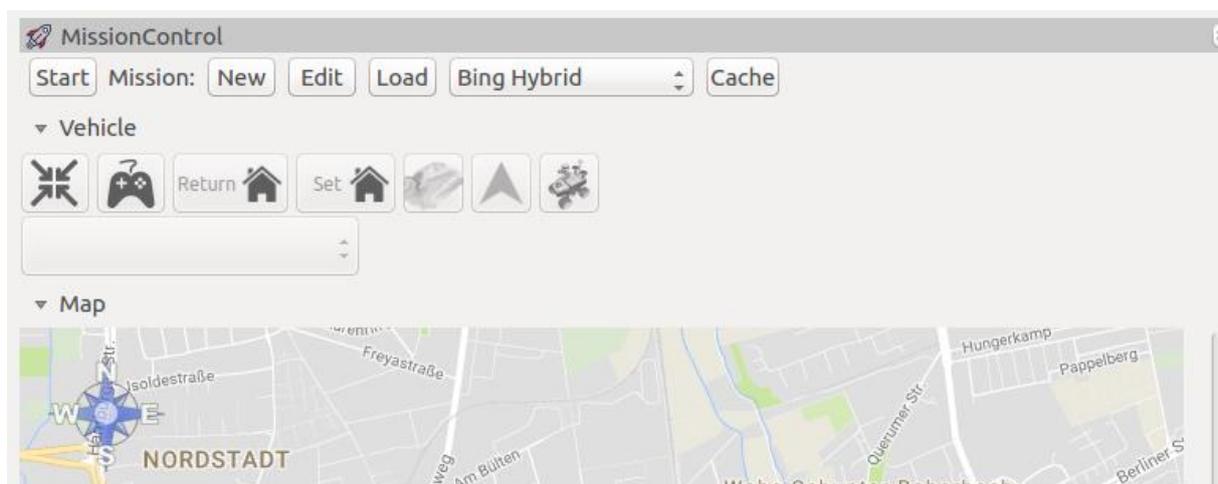


Abbildung 6-79: Mission Control Plugin

Über das MissionControl Plugin (Abbildung 6-79) wird das Starten und Stoppen von Missionen gesteuert. Außerdem ist die Erstellung neuer Missionen, das Umschalten zwischen verschiedenen Kartenanbietern (Bing, Google, OpenStreetMap), sowie der

Wechsel zwischen verschiedenen Steuerungsmodi (Wegpunktmission, Teleoperation, Direct Approach) implementiert worden. Das Speichern/Laden der Missionen erfolgt über ein ROS-Bag File. Des Weiteren wird das Plugin genutzt um die Position der Systeme auf der gewählten Karte zu markieren und Statusdaten anzuzeigen, z. B. den Ladezustand der Batterie (Abbildung 6-80).

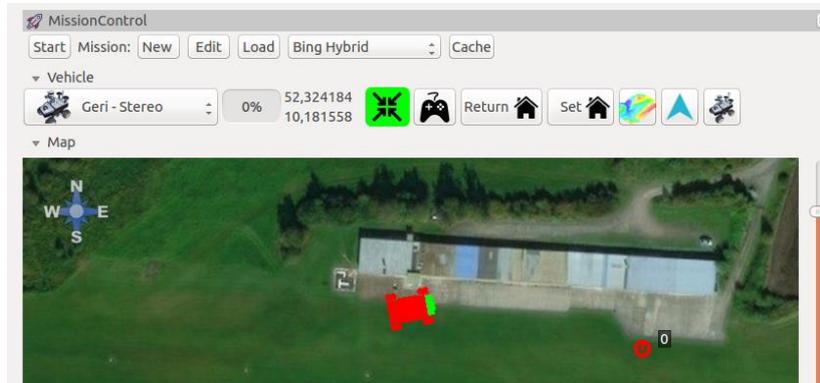


Abbildung 6-80: Anzeige der Live Position von Schwarmteilnehmern

MRCConfig Plugin:

Das MRCConfig Plugin (MRC: Multi-Robot-Communication) dient zur Steuerung der Kommunikationsparameter (Abbildung 6-81). Je nach Szenario können einzelne Topics der Schwarmteilnehmer zu- oder abgeschaltet werden. Darüber hinaus kann die Übertragungsrate, das Protokoll und die Puffergröße festgelegt werden (s. QoS-Optionen Abschnitt 6.3.3). Die gewählten Einstellungen können unter einem Szenariomen gespeichert werden. Somit ist es möglich zu einem späteren Zeitpunkt durch Wechsel der Szenarien die jeweils getroffenen Kommunikationseinstellungen wiederherzustellen.

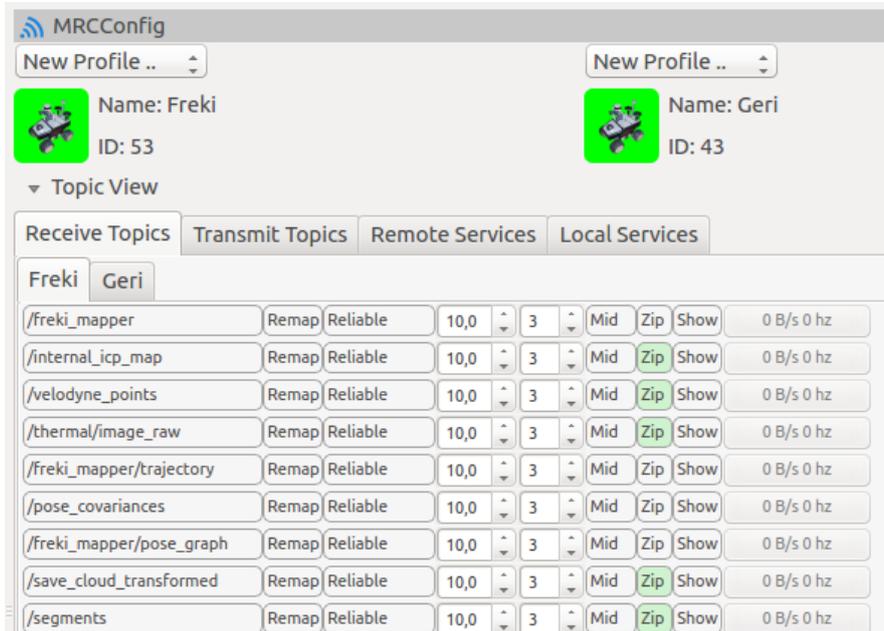


Abbildung 6-81: Userinterface für Kommunikationsparameter

Um die Verwendung des Plugins zu vereinfachen können die angesprochenen Optionen ausgeblendet werden. Denkbar ist hier, dass nach einmaliger Definition der optimalen Kommunikationsparameter für ein bestimmtes Szenario, dem Endanwender nur die vereinfachte Ansicht, wie in Abbildung 6-82 zu sehen, zur Verfügung gestellt wird.

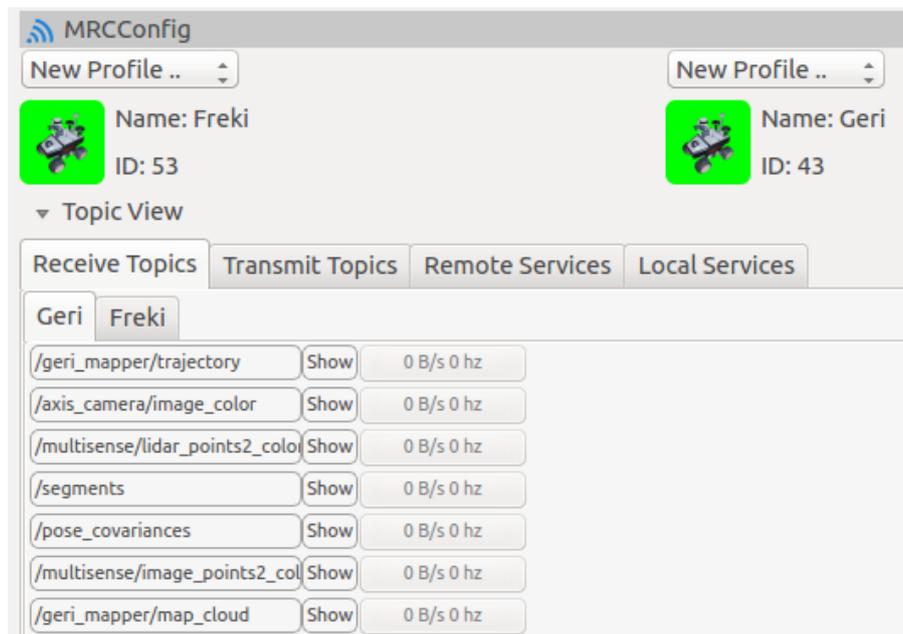


Abbildung 6-82: Vereinfachtes Userinterface für Kommunikationsparameter

Zusätzlich wird über das MRCConfig Plugin ein Interface zum Aufruf von Services geboten, wie in Abbildung 6-83 dargestellt. Über das Service Menü können bestimmte Aktionen direkt getriggert werden, z. B. das Starten/Stoppen von Mappingverfahren.

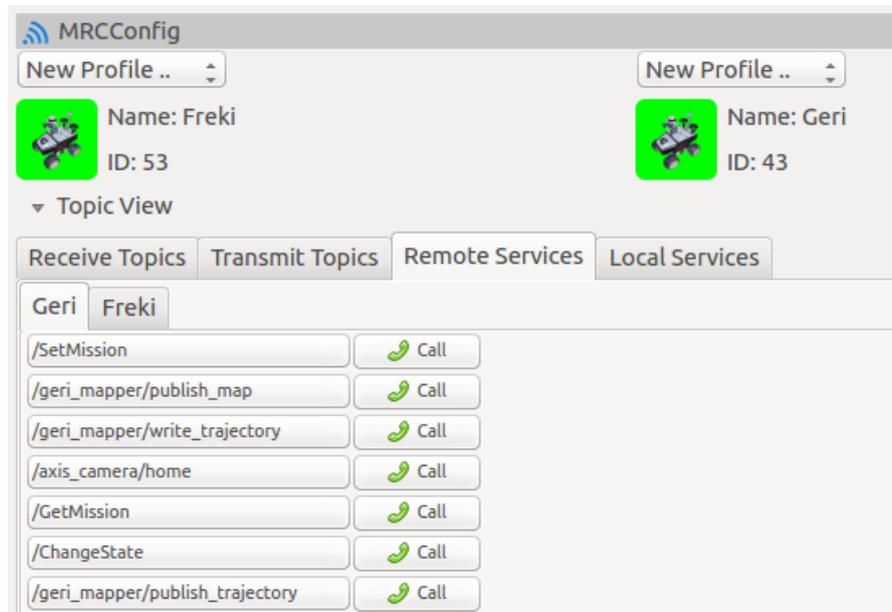


Abbildung 6-83: Userinterface zum Aufruf von Services

MRCDDisplays Plugin:

Dieses Plugin dient im Zusammenspiel mit dem MRCConfig Plugin zum Ein- und Ausblenden der Sensordatenstreams. Außerdem werden alle visualisierbaren Topics in einer Übersicht des jeweiligen Schwarmteilnehmers angezeigt, wie in Abbildung 6-84 dargestellt. Auf diese Weise können z. B. einfach alle visualisierbaren Datenströme eines bestimmten Roboters ein- oder ausgeblendet werden. Die getroffenen Visualisierungseinstellungen können zusammen mit den Kommunikationseinstellungen ebenfalls gespeichert werden.

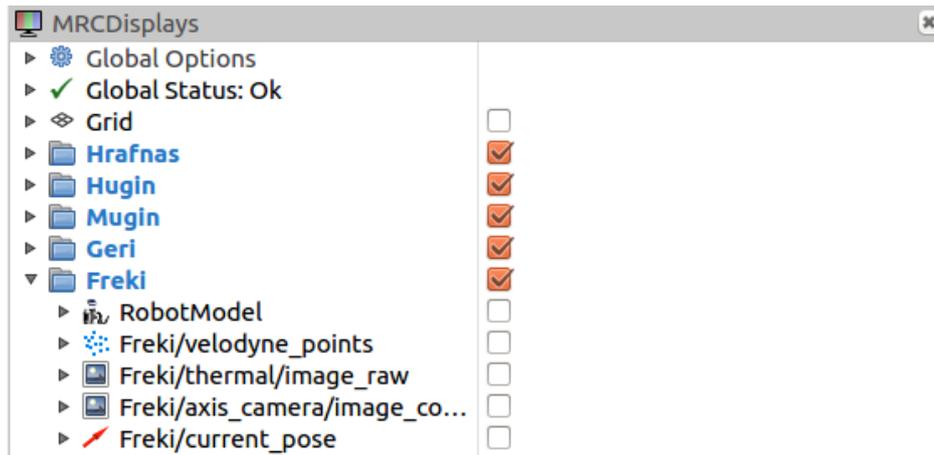


Abbildung 6-84: MRCDisplays Plugin

6.5.2 Missions- & Pfadplanung

Im Rahmen des Projekts sollte eine automatisierte Missionsplanung entwickelt werden um die Arbeitsbelastung des Operators so gering wie möglich zu halten. Nach der Auswahl des Zielgebietes und der geplanten Mission soll diese eigenständig geplant und anschließend abgeflogen werden. Im Folgenden werden die Arbeiten hinsichtlich der Pfadplanung vorgestellt.

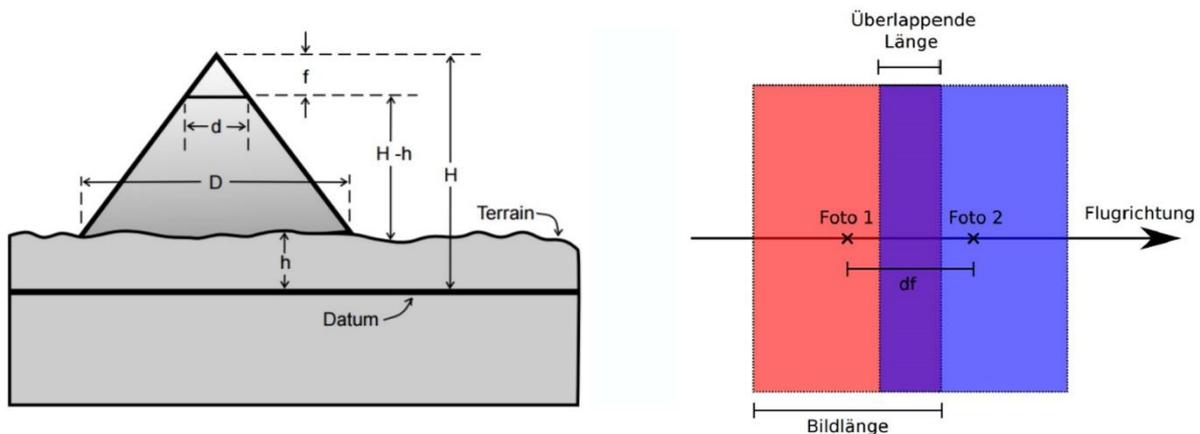


Abbildung 6-85: Einfluss verschiedener Parameter auf Luftbildabdeckung und Overlap

Generierung geeigneter Luftbilder

Zur erfolgreichen Durchführung von luftgestützten kamerabasierter Mapping-Missionen müssen die generierten Luftbilder gewissen Ansprüchen genügen. Die für die Pfadplanung relevanteste ist die Einhaltung der notwendigen Überlappung zwischen den Bildern. Abbildung 6-85 veranschaulicht auf der linken Seite den Einfluss der Kameraparameter (Brennweite f , Sensorgröße d) und der Flughöhe H auf den abgedeckten Bereich jedes Bildes (Bildlänge D). Auf der rechten Seite der Abbildung wird die Überlappung zweier Bilder dargestellt. Die Überlappung zwischen Bildern zweier benachbarter Flugbahnen gilt analog und wird Sidelap genannt. Der formelmäßige Zusammenhang ist in [13] ausführlich dargestellt. Der gewünschte Overlap ist abhängig von dem gewählten Kartierungsverfahren. In Tabelle 9 sind die in dem Projekt erarbeiteten und in Versuchen validierten Anforderungen für die jeweiligen Verfahren angegeben. Das Projektionsverfahren ist funktional nicht auf Overlap angewiesen, jedoch hat sich zur lückenlosen Abdeckung eines Areals ein Overlap von 5% zum Ausgleich von Projektionsfehlern bewährt. Die Feature-Tracker des SLAM-Verfahren arbeiten auf der verwendeten Hardware mit 2-4Hz, was einen Overlap von 99%

entspricht. Die Photogrammetrie kommt aufgrund globaler Optimierung mit einem Overlap von 70% aus.

Tabelle 9: Notwendige Überlappung für erarbeitete Kartierungsverfahren

Mappingverfahren	Overlap	Sidelap
Projektion	5%	5%
SLAM	99%	50%
Photogrammetrie	70%	30%

Missionstyp

Neben dem Overlap entscheidet das Ziel der Mission über den genauen Verlauf der Flugroute. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Typen identifiziert.

Die sogenannte „Survey“ Mission, trägt ihren Namen nach dem englischen Wort für „Überblick“. Ihr Ziel ist die Informationsbeschaffung über ein bestimmtes Gebiet, mittels einer vollständigen Erfassung, bzw. Vermessung. Neben der Survey Mission ist des Weiteren die „Search and Rescue“ Mission von Relevanz. Das primäre Ziel dieser Mission ist das Auffinden von vermissten Personen.

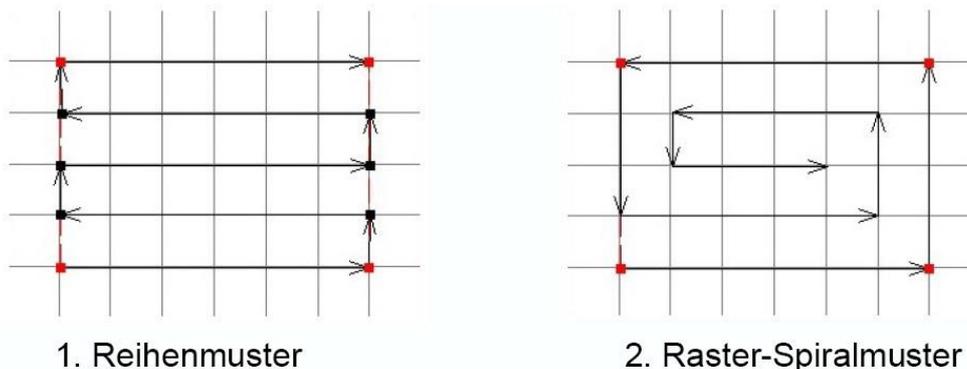


Abbildung 6-86: Darstellung relevanter Wegplanungsstrategien

Abbildung 6-86 zeigt die konzipierten Planungsansätze. Für die Survey-Missionen wurde das klassische Reihenmuster als am geeignetsten ausgewählt, da es die Abdeckung des gesamten Gebiets sicherstellt und dabei eine minimale Weglänge benötigt. Zur Durchführung von "Search and Rescue"-Missionen kann das Raster-Spiralmuster eine sinnvolle Alternative darstellen sofern der letzte bekannte Aufenthaltsort der Person bei der Planung vorliegt. In diesem Fall beginnt das System die Kartierung an diesem Punkt und fliegt immer größer werdende Rechtecke um ein immer größeres Areal abzudecken.

Umsetzung

In Abbildung 6-87 ist das Prinzip eines erarbeiteten Verfahrens zur Erstellung von Survey-Missionen dargestellt. Ausgehend von einem beliebigen Polygon (ausgewähltes Missionsgebiet) werden Linien parallel zum längsten Schenkel des Polygons erstellt und anschließend die Schnittpunkte mit dem Polygon errechnet. Der Abstand der Linien ergibt sich aus den Kameraparametern und dem geforderten Overlap. Die errechneten Schnittpunkte stellen die Wegpunkte der Mission dar. Die erarbeiteten Verfahren wurden implementiert und erfolgreich getestet (siehe Abbildung 6-88) und werden im folgenden vorgestellt.

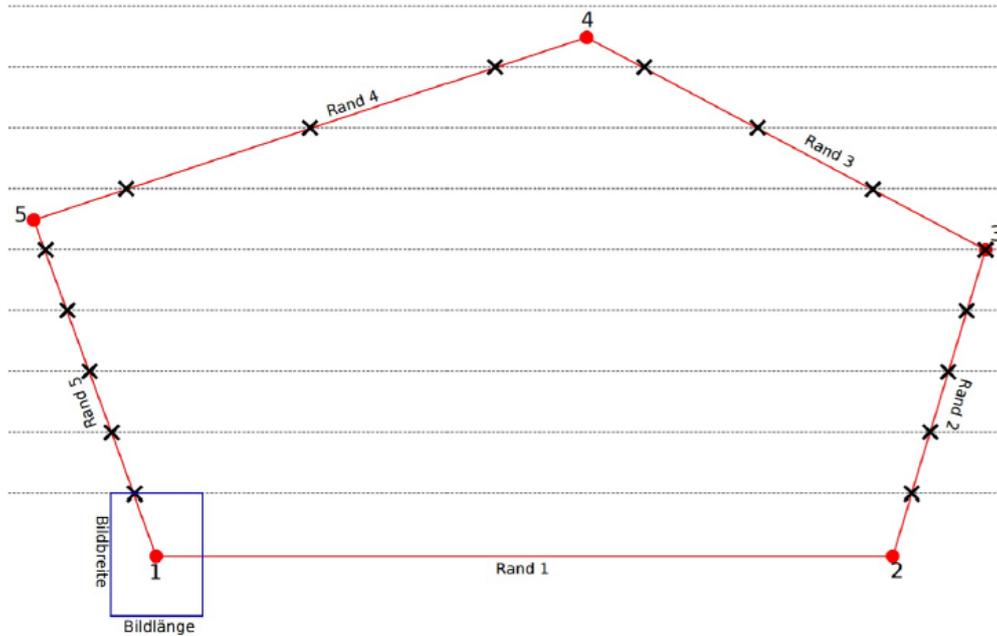


Abbildung 6-87: Zwischenschritt zur Erstellung einer Survey-Mission



Abbildung 6-88: Geplante Survey-Mission (links) und geflogene Survey-Mission (rechts)

Implementierung

Die Missionsplanung wurde mittels Qt/C++ als rviz Plugin implementiert, sodass eine direkte Integration in das zentrale Userinterface möglich war. Als Basis wurde die Bibliothek QGroundControl [32] verwendet und entsprechend den Anforderungen modifiziert. Für die UGVs können einzelne GPS-Wegpunkte gesetzt werden. Für die UAVs umfasst die Missionsplanung in jedem Fall das Setzen der Flugbereichsgrenzen und Sicherheitsgrenzen. Neben dem Anflug einzelner Wegpunkte kann auch automatisch ein Wegpunktnetz innerhalb der gesetzten Grenzen erzeugt werden, wie es in Abbildung 6-89 dargestellt ist.

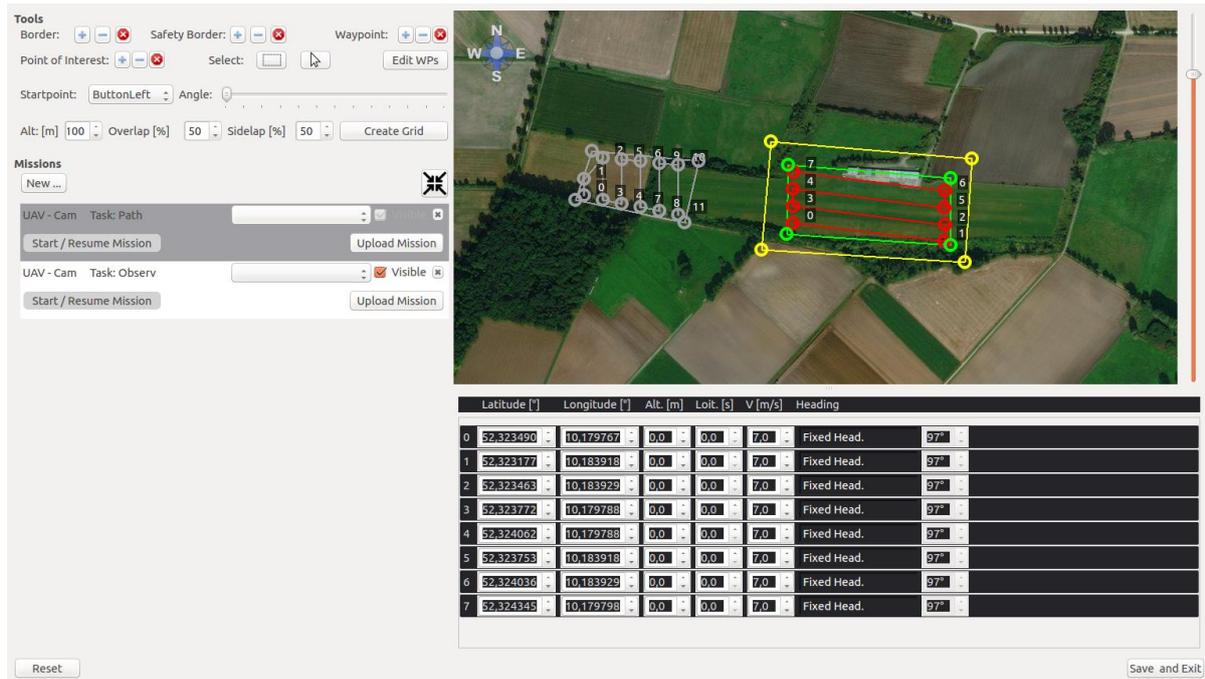


Abbildung 6-89: Wegpunktplanung UAV

Diese Möglichkeit ist vor allem für Surveymissionen relevant. Die Wegpunktplanung für Surveymissionen umfasst zudem die Möglichkeit den Abstand der Wegpunkte abhängig von der gewählten Flughöhe automatisch anzupassen, sowie die Ausrichtung der Wegpunkte manuell zu editieren. Über die Option Sidelap/Overlap (Abbildung 6-90) wird festgelegt wie groß der Überlappungsbereich der aufgenommenen Bilder während der Mission sein soll. Hierfür sind die Kameraparameter Fokusslänge, Sensorbreite und Sensorhöhe in der Anwendung hinterlegt.



Abbildung 6-90: Menü zur Planung von Surveymissionen

Die Missionsplanung kann für mehrere Systeme gleichzeitig durchgeführt werden. Über ein Auswahlménü kann der Operator zwischen den erstellten Missionen wechseln und diese einem Zielsystem zuordnen. Die jeweils aktive Mission kann auch in der Kartenansicht über die Maus editiert werden. Inaktive Missionen werden in Grau dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen und sind nicht editierbar.

Zusätzlich zur Ausrichtung (Heading) können Geschwindigkeit und relative Höhe für jeden Wegpunkt über das in Abbildung 6-91 gezeigte Menü eingestellt werden. Die Verweildauer an jedem Wegpunkt wird über die die Option *Loiter* gesteuert.

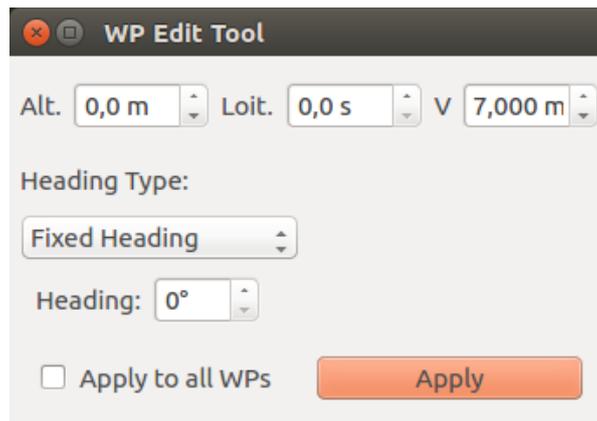


Abbildung 6-91: Wegpunkt Editierung

UGV Führung und Pfadhaltung

Da für die Bodenträgersysteme das Typs „Summit XL“ der Fa. Robotnik keine automatische Routenplanung und -verfolgung implementiert ist, sind diese im Rahmen von ANKommEn implementiert worden. Um die Steuerung für den Nutzer zu vereinfachen ist die Routengenerierung stark an die Führungskonzepte für das UAV angelehnt.

Innerhalb des User-Interfaces ist es möglich eine Wegpunktliste zu generieren. Diese kann entweder durch manuelles Setzen einzelner Wegpunkte geschehen, oder aber durch automatisierte Funktionen wie die Erzeugung eines Grids. Nachdem die Wegpunktliste zu dem entsprechenden Teilnehmer übermittelt worden ist, wird diese sequentiell abgearbeitet.

Hierzu wird in festen Zeitintervallen aus der aktuellen Position des Trägersystems und der Zielposition der Kurs berechnet, den das Fahrzeug steuern muss, um am Ziel anzukommen. Um eine Verfolgung des entsprechenden Kurses gewährleisten zu können, ist eine Regelung nach [20] implementiert worden. Die Längsgeschwindigkeit wird mit v (Gl. 10) und die Rotationsgeschwindigkeit mit ω (Gl. 11) vorgegeben.

$$v = \cos \theta_d + K_x x_d \quad 10$$

$$\omega = K_y y_d + K_\theta \sin \theta_d \quad 11$$

Maßgebliche Regelgrößen ist der Winkel zwischen Heading und Kurs θ_d , sowie die Längsabweichung x_d von aktueller Position zu Endposition und die Querabweichung y_d von der aktuellen Position zur Bahn. Weiterhin sind die Regelparameter K_x , K_y und K_θ zu konfigurieren, um eine möglichst gleichmäßige Verfolgung der Bahn zu ermöglichen.

6.5.3 Monitoring UAV/UGV Systemzustand

Für die Überwachung des Systemzustands der UAV/UGVs werden die bereits herstellerseitig vorgesehenen Schnittstellen genutzt. Im Fall der UAVs können über eine serielle Schnittstelle die aktuelle Position, der Batteriezustand (Spannung und Prozent), die relative Flughöhe, das Heading, sowie der jeweils aktuelle Wegpunkt abgefragt werden. Diese Informationen werden permanent als ROS-Topic gepublisiert, sodass weitere Anwendungen darauf aufbauen können. Auch für die UGVs werden die aktuelle Position, der Batteriezustand und die aktuelle Geschwindigkeit ausgegeben. Wie in Abschnitt 6.5.1 beschrieben werden diese Informationen im User-Interface zur Anzeige gebracht.

Des Weiteren erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der Eingabedaten für die Missionsplanung. Wegpunkte können beispielsweise erst gesetzt werden, wenn die Planung der Wegpunktgrenzen und Sicherheitsgrenzen abgeschlossen ist. Um eine Mission auf dem UAV zu starten wird die derzeitige Position mit den Koordinaten der Sicherheitsgrenzen verglichen. Liegt der Abstand über einem Schwellwert, wird die Annahme der Mission verweigert.

Eine Überwachung der Signalstärke der WLAN-Kommunikation zu Erkennung von Funkabbrissen hat sich als nicht zielführend herausgestellt, da die Signalstärke immer nur die Verbindung zum jeweils nächsten Nachbarn angibt, aber keine Rückschlüsse darüber zulässt, ob eine Route zu dem gewünschten Zielsystem eventuelle über mehrere Hops zu Verfügung steht. Stattdessen ist die Überwachung der Latenz oder des Datendurchsatzes einer Route möglich.

Die in Abschnitt 6.3.4 beschriebene Priorisierung von Datenströmen führt allerdings Prinzip bedingt dazu, dass wichtige Statusdaten auch noch ausgetauscht werden können, wenn etwa Sensordaten bereits nicht mehr zu Verfügung stehen. Somit wird ein drohender Funkabbriss im User-Interface erkennbar, sodass eine Umplanung oder die Positionierung einer Relaisstation erfolgen kann.

6.6 Demonstrator & Verifikation

Für die Entwicklung, Tests und abschließende Demonstration des im Rahmen von ANKommEn entwickelten und aufgebauten Gesamtsystems wurden sowohl die unbemannten Trägersysteme beschafft bzw. aufgebaut, als auch die für die wissenschaftlich/technischen Aufgaben erforderliche Sensorik beschafft und in die Trägersysteme integriert.

Im Folgenden werden die einzelnen aufgebauten Komponenten beschrieben. Im Anschluss daran erfolgt eine Beschreibung ausgewählter Feldversuche, Teilnahmen an Übungen und Demonstrationen. Die wissenschaftlich/technischen Ergebnisse wurden in den vorherigen Abschnitten beschrieben.

6.6.1 Trägersysteme

6.6.1.1 UAV – AR200

Für das fliegende Trägersystem sollte die Fa. AirRobot ursprünglich ein UAV des Typs AR180 einsetzen. Während der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete kristallisierte sich heraus, dass die Nutzlastmassen die Kapazität des AR180 um mehrere hundert Gramm übersteigen würden. Untersuchungen zeigten außerdem, dass mit den festgelegten Nutzlasten kein sicherer Flugbetrieb mit dem AR180 gewährleistet werden konnte, sodass in Übereinstimmung mit Projektpartnern und dem Fördergeber der Wechsel der Flugplattform zu einem UAV des Typs AR200 (siehe Abbildung 6-92 links) beschlossen wurde.



Abbildung 6-92: AR200 aufgebaut (links), AR200 geklappt (rechts)

Der AR200 ist die größte Flugplattform im Portfolio der Fa. AirRobot mit einer Spannweite von 2,20 Meter, welches zusätzlich über ein klappbares Design verfügt und damit ein viel kleineres Transportvolumen einnimmt (siehe Abbildung 6-92 rechts). Es handelt sich hierbei um einen sogenannten Hexakopter, einem Multikopter-Design mit sechs Motoren. Die Nutzlastkapazität des AR200 ist mit 3 kg doppelt so groß wie die des AR180. Das System ist witterungsbeständig gegen Niederschläge, was für die im Verbundvorhaben ANKommEn veranschlagten Anwendungsfälle hilfreich ist. Weiterhin verfügt es über eine Schnellwechselkupplung für Nutzlasten, die dem Anwender den Tausch der modularen Sensorpayload (siehe Kapitel 6.6.2.2) erleichtert. Wie alle Systeme der Fa. AirRobot verfügt auch der AR200 über mehrere systeminterne Sicherheitsfunktionen, wie z. B. die automatische Heimkehr bei Funkverlust sowie die Notlandung bei zu geringem Akkustand.

Für die Steuerung und Missionsplanung kann das AirRobot Geoinformationssystem (GIS), welches in der Bodenkontrollstation (BKS) integriert ist, genutzt werden (siehe Abbildung 6-93). Die GIS zeigt auf einer Karte den zurückgelegten Weg des UAV sowie seine aktuelle Position an. Diese bietet auch verschiedene Möglichkeiten zur GPS-gestützten Wegpunktnavigation und Vorgabe von Flugbegrenzungsgrenzen, der sogenannten GPS Border.



Abbildung 6-93: Tablet-Bodenkontrollstation (links), Geo-Informationssystem (rechts)

Um als finales Trägersystem für die modulare Sensorpayload eingesetzt werden zu können, musste der AR200 umfangreich modifiziert werden. Die bereits beim AR180 getätigten Überlegungen zu einer frontlastigen Payloadbay durch eine Erweiterung des Akkuaufnahmeraums (sog. Haube) wurden auf den AR200 übertragen und zu einem Gesamtkonzept weiterentwickelt (siehe Abbildung 6-94 und Abbildung 6-95 links). Die Aufnahme des Basis-Nav/Com-Stacks wurde so konstruiert, dass eine direkte Kopplung zur größten Einzelmasse, dem Akku, vorhanden ist. Dies bewirkt eine direkte Verbindung der IMU im Stack zur Lage des UAV. Des Weiteren wurde eine Erweiterung der Haube für den Schutz des Stacks gegen mäßige Niederschläge konstruiert, ohne den Verlust der Möglichkeit, den Akku schnell ein- und ausbauen zu können. Um einen einfachen Zugang zum Stack zu ermöglichen, wurde die Haube mit einer eingeschobenen Abdeckplatte realisiert. Diese strukturellen Umbaumaßnahmen wurden unter der Nebenbedingung vorgenommen, dass diese als zukaufbare Option des AR200, eine wirtschaftliche Konstruktion darstellen.

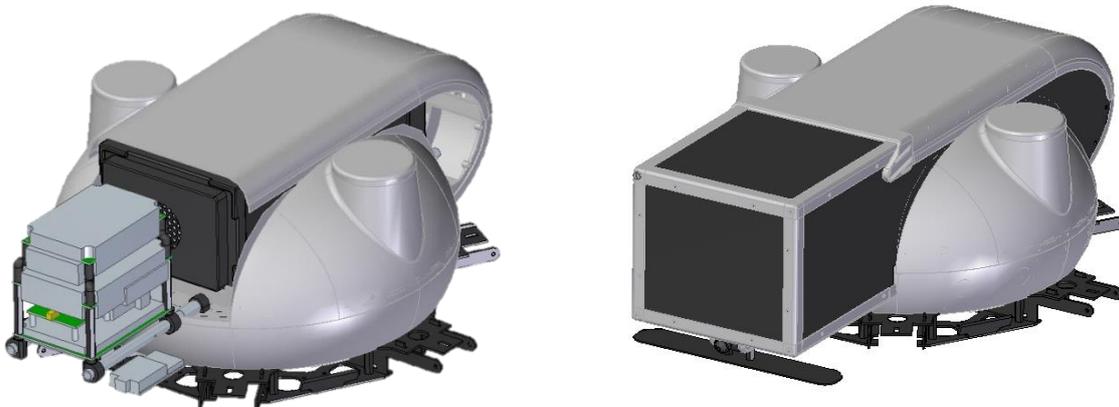


Abbildung 6-94: Nav/Com-Stack-Erweiterung (links), geschlossene Haube (rechts)

Um den Stack mit dem UAV zu verbinden, also die Energieversorgung und Datenübertragung zu ermöglichen, wurde an der Unterseite der Haube eine Konsole mit einer arretierenden AirRobot-Steckverbindung realisiert (siehe Abbildung 6-95 rechts). Damit im eingebauten Zustand eine optische Statusanzeige des Stacks zu erkennen ist, wurden zusätzlich drei LEDs verbaut. Zudem wurde die Konsole um eine FPV-Kamera zur Orientierungsunterstützung des Piloten erweitert, welche um die Nickachse in verschiedenen Winkeln fixierbar ist. Die Kamera ist hilfreich, weil das Bildmaterial der Sensorpayload je nach Szenario nur für die Datenerhebung von z. B. Kartenerstellung nutzbar ist, oder weil beim Laserscanner kein Bild aufgenommen wird. Die Konsole beinhaltet zudem eine Durchführung der Ethernet- und Triggerverbindungen von der Sensorpayload zum Stack. Um der GNSS Antenne der Projektpartner einen besseren Empfang zu ermöglichen, wurde diese an der Haube des UAV, auf einer erhöht angebrachten Ebene, befestigt. Nicht zuletzt musste für die größere AR200 Version das Tragegestell modifiziert werden.

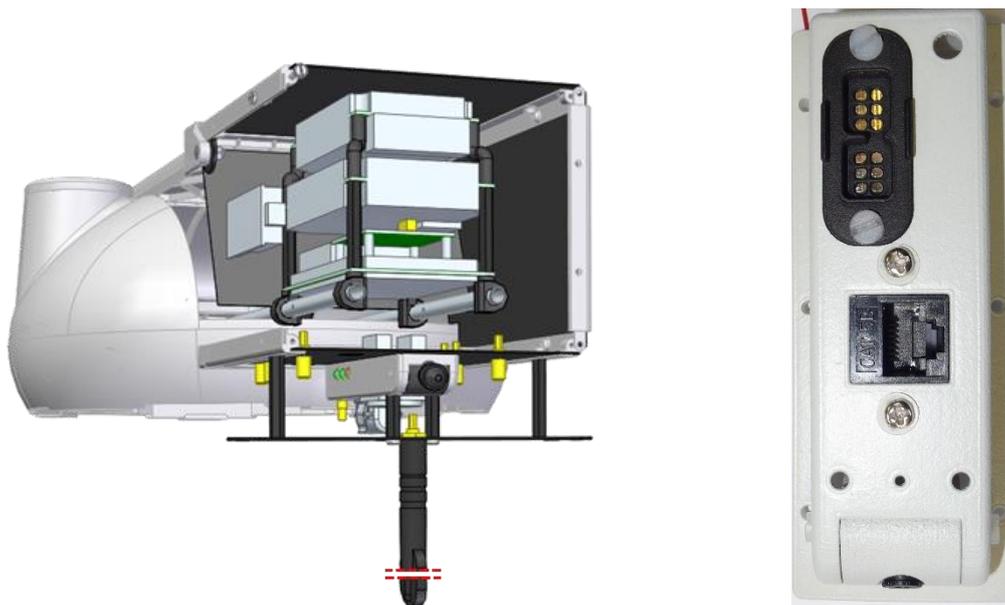


Abbildung 6-95: Schnitt durch die Haube zeigt Stack und Konsole (links), Ansicht von unten: Konsole (rechts)

Abbildung 6-96 zeigt das aufgebaute UAV vom Typ AR200 in der beschriebenen Modifikation. Die unten beschriebene Basispayload, die in jedem Trägersystem identisch ist, wurde in den oberen Payloadcontainer integriert, die XBee Kommunikationsantenne an dessen Unterseite und die GNSS Antenne auf der Oberseite der Mittelstruktur. Die drei Antennen für den eingesetzten WLAN-Datenlink wurden an den drei Beinen des Landegestells montiert. Zentral in der Mitte an der Unterseite befindet sich der proprietäre Anschluss für die untere Payload, in die jeweils die Umfeldsensorik integriert wurde.

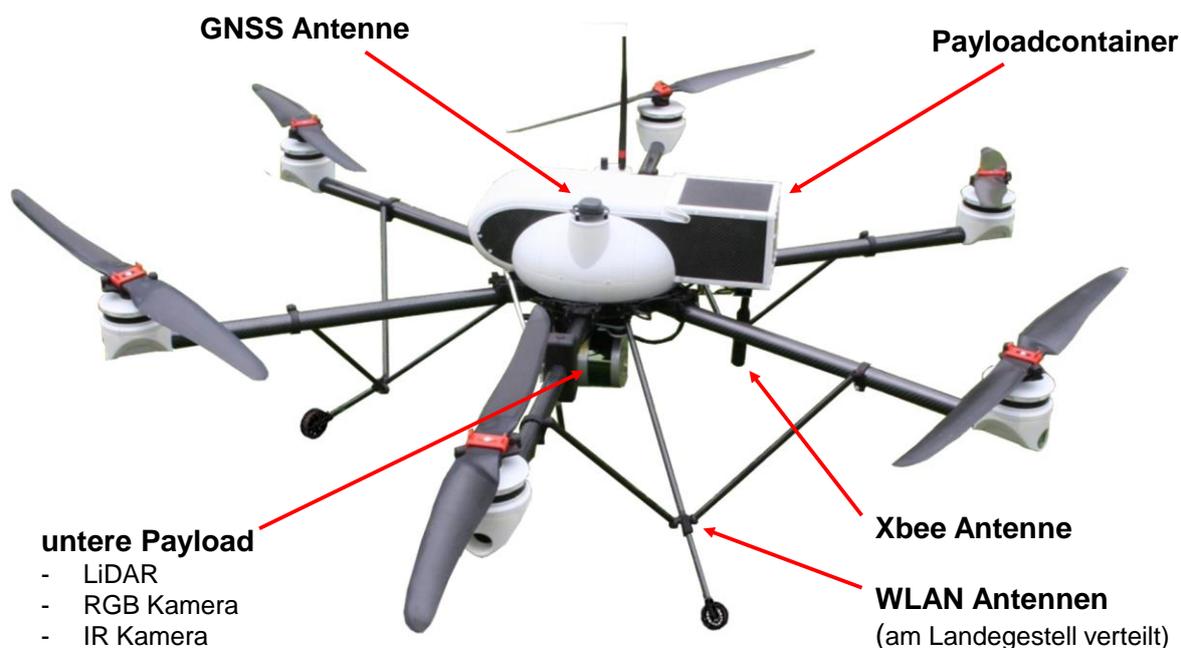


Abbildung 6-96: Aufgebaute AR200 (Modifikation ANKommEn)

6.6.1.2 UGV – Summit XL



Abbildung 6-97: UGV (Summit XL, ANKommEn)

Als bodengebundener Versuchsträger wurden zwei UGV vom Typ Summit XL (Hersteller Robotnik) beschafft (Abbildung 6-97). Die Auswahl basierte im Wesentlichen auf den gemachten Erfahrungen im Vorgängervorhaben NExt UAV und einer Marktrecherche im Anschluss an die Erarbeitung grundsätzlicher Anforderungen durch die avisierten Testszenarien. Insbesondere standen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Geländegängigkeit
- Energieversorgung zum Betrieb des UGV und der integrierten Payload (Betriebszeit > 2 Stunden)
- Nutzlastkapazität
- Chassisstruktur (Eignung zur mechanischen Integration der Payload)
- Manövrierfähigkeit

Des Weiteren bestand am IMN der TU Braunschweig positive Erfahrungen mit der kleineren Version dieses UGV (Summit), welches jedoch nicht genügend Bauraum zur Integration der Payload bietet.

Der Summit XL hat Außenmaße vom ca. 0,75m Länge und 0,54m Breite bei einem Leergewicht von knapp 30kg. Bei einer Betriebsdauer von ca. 3 Stunden (lt. Datenblatt). Eine Zuladung von bis zu 20kg ist möglich, die projektspezifischen Integrationen liegen weit darunter, so dass in jedem Fall ein stabiles Fahrverhalten gewährleistet ist. Der Antrieb erfolgt als Einzelradantrieb mit vier Radnabenmotoren, was eine hohe Wendigkeit ermöglicht. Eine nominelle Höchstgeschwindigkeit (Geradeausfahrt) von bis zu 3 m/s ist als ausreichend einzustufen, je nach Messaufgabe und Terrain wurde diese entsprechend reduziert.

Die Steuerung beider UGV (werkseitig erfolgt diese im 2,4GHz Band) wurde so umgerüstet, dass dieselben Funkmodule wie beim Kommandolink der eingesetzten UAV (868MHz) vom Projektpartner AirRobot verwendet werden. Dadurch wird erreicht, dass sämtliche Kommandolinks das 868MHz Band nutzen und die eingesetzten Datenlinks im 2,4GHz und 5GHz Band liegen.

Die Umfoldsensorik sowie erforderlichen Antennen der aufgebauten Payload sind auf einem Sensorrahmen aus Aluminiumprofil auf dem Chassis des UGV montiert, die übrige Payload innerhalb des Chassis, so dass diese in gewissem Maße vor direkten Umwelteinflüssen geschützt ist.

6.6.2 Payload

6.6.2.1 Basis Nav/Com-Stack

Unabhängig von der Art des Trägersystems ist jedes mit einer einheitlichen Payloadkomponente ausgerüstet, die der Positionierung und der Kommunikation dient. Abbildung 6-98 zeigt den aus den entsprechenden Komponenten aufgebauten Stack.

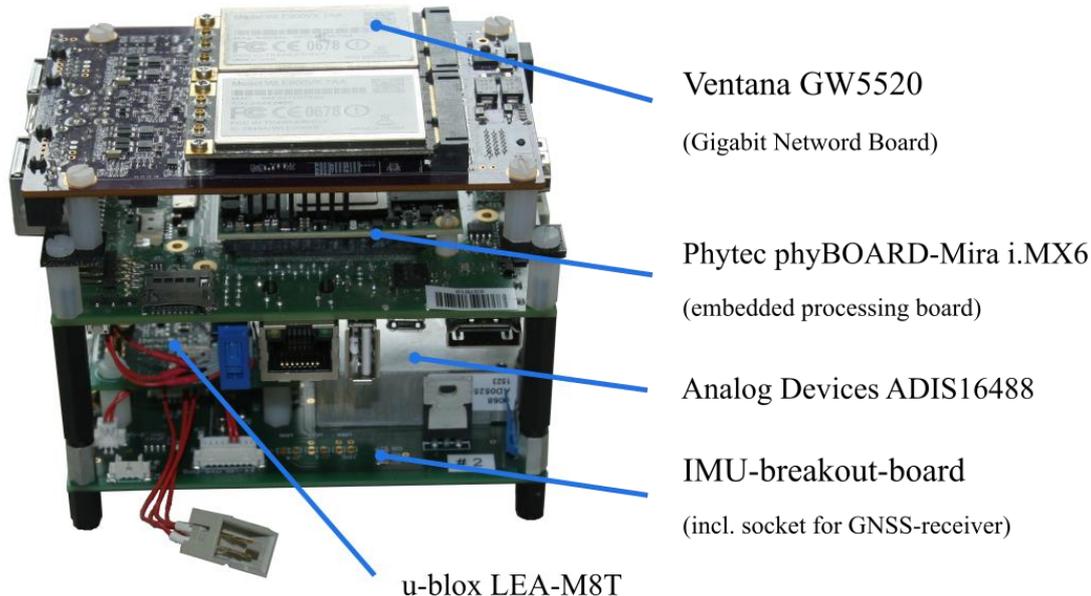


Abbildung 6-98: Basis Nav/Com-Stack (UAV & UGV)

Diese Art des Aufbaus ist maßgeblich durch die Bauraumverhältnisse auf den UAVs bedingt. In der untersten Ebene befindet sich das durch das IFF entwickelte IMU-Board inkl. Inertialmesseinheit (Analog Devices ADIS16488). Auf dem Board befindet sich des Weiteren ein Microcontroller zum Auslesen der Messdaten, Uhrenregelung, Triggerung und Ansteuerung der entsprechenden Schnittstellen. Die Datenausgabe erfolgt wahlweise über USB oder serieller Schnittstelle. Der Status wird über drei herausführbare LEDs signalisiert. Um weitere Triggersignale, z. B. für andere Sensoren bereitstellen zu können, werden diese, frei konfigurierbar, ebenfalls herausgeführt. Die Uhrenregelung selbst wird durch eines der beiden Triggersignale des auf der IMU Platine montierten GNSS Empfängers gespeist. Durch die Uhrenregelung kann auch bei Fehlen des GNSS basierten Triggersignals für eine gewisse Zeit ein Triggersignal ausgegeben werden, z. B. während ein Trägersystem in einer GNSS-Signalabschattung operiert. Als GNSS Empfänger kommt ein ublox LEA-M8T zum Einsatz.

Eine Ebene darüber ist für die Erfassung und Verarbeitung der Messdaten der Inertialmesseinheit und des GNSS Empfängers ein Embedded Board ("Nav-Board", Phytec phyBoard-Mira i.MX6) platziert. Auf diesem erfolgt mit dem IFF Navigations-Softwareframework die Positionierung mit den in ANKommEn entwickelten Verfahren. Des Weiteren dient das Nav-Board als NTP Server, um eine einheitliche Zeitbasis aller Komponenten zu gewährleisten. Dieser basiert auf der GPS-Zeit, ausgegeben vom darunter liegenden GNSS-Empfänger. Durch die Nutzung der GPS-Zeit ist ebenfalls gewährleistet, dass alle Komponenten des Gesamtsystems (UAV, UGV, Leitstand, mobiles Gerät für Einsatzkräfte) synchron laufen und die verteilt erfassten Messdaten eindeutig zugeordnet werden können.

Oberhalb des Nav-Boards ist das Kommunikationsboard ("Com-Board", GateWorks Ventana GW5520) angeordnet. Auf diesem sind die beschriebenen Kommunikationsverfahren implementiert, sowie die für die Kommunikation erforderlichen WLAN-Module installiert. Ebenso verfügt es über zwei Gigabit LAN Schnittstellen, zur trägersysteminternen Datenkommunikation (Sensorpayload – Nav-Board – Com-Board). Über eine serielle

Schnittstelle ist im Fall der UAVs die Kommunikation mit dem UAV realisiert, um z. B. Steuerkommandos an dieses zu senden oder Statusinformationen abzufragen.

Im Leitstand sind ebenfalls GNSS-Empfänger, Nav-Board und Com-Board integriert. Die ersten beiden typgleich zu den Trägersystemen, als Com-Board wird eine leistungsstärkere Variante eingesetzt.

In dem mobilen Gerät für Einsatzkräfte sind ebenfalls ein GNSS-Empfänger und ein Com-Board integriert, die Prozessierung der GNSS-Messungen erfolgt direkt auf dem als HMI eingesetzten Convertible-Tablet.

6.6.2.2 modulare Sensorpayload (UAV)

Auf Basis der Schnellwechselladung von AirRobot, durch die Nutzlasten einhändig am UAV angebracht werden können, wurden in Zusammenarbeit von der TU-Braunschweig und der Firma AirRobot drei Sensorsysteme für die Exploration aufgebaut.

Diese enthalten folgende Sensoren:

1. Laserscanner Velodyne VLP-16
2. RGB-Kamera AlliedVision Manta G-917C
3. Thermalkamera FlirA65

Bei allen drei Sensoren wurden diese jeweils maßgeblich als Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit/technischen Eigenschaften und Gewicht ausgewählt

Zur Datenerfassung und – je nach Sensor – Vorverarbeitung der Messdaten auf dem UAV mit anschließender Weiterleitung zum Com-Board, ist auf jeder Sensorpayload eine Prozessierungseinheit (Intel NUC5i5) integriert.

Sensorpayload Laserscanner

Die Laserscanner-Sensorpayload ist als starre Verbindung zwischen Laserscanner und UAV ausgeführt. Sie wurde speziell für das Projekt entworfen und produziert. Der Laserscanner wird mit einer zentralen Schraube befestigt und mit 2 Bolzen formschlüssig in Position gehalten. Zwischen den rückseitigen Streben der Laserscannerkonsole ist der Sensorrechner und die Anschlussklemme des Laserscanners geschützt montiert, Abbildung 6-99 und Abbildung 6-100.

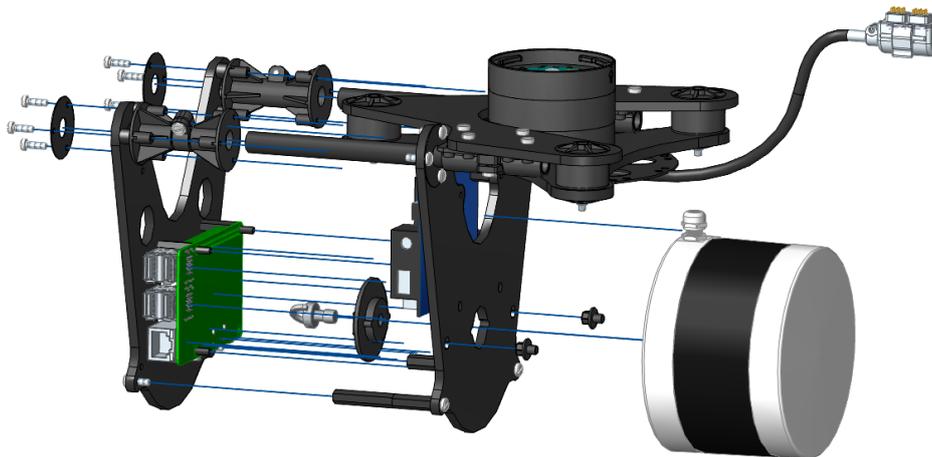


Abbildung 6-99: Sensorpayload mit Laserscanner, Explosionsdarstellung

Durch die starre Ausführung der Verbindung zum UAV folgt der Scanner jeder Lageänderungen des UAV und der IMU des Basis Nav/Com-Stacks (Kapitel 6.6.2.1). Die Berücksichtigung der absoluten Ausrichtung erfolgt bei der Datenprozessierung über die Lagewinkel, basierend auf den Messwerten der IMU.

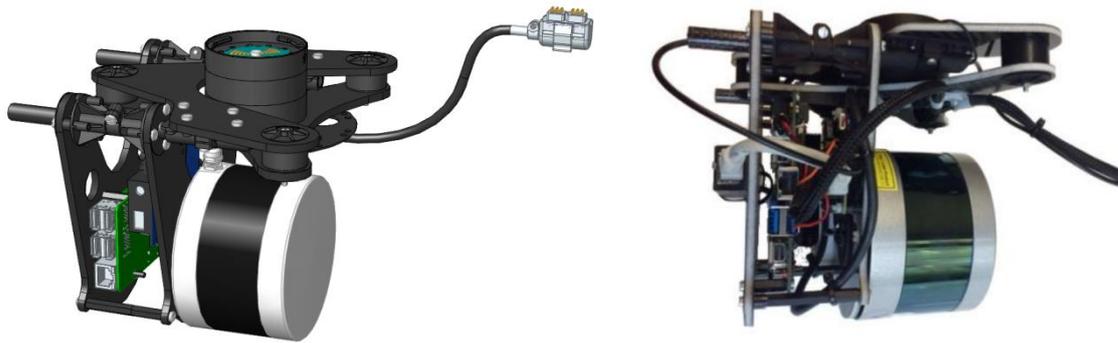


Abbildung 6-100: Sensorpayload mit Laserscanner, CAD-Modell (links), Prototyp (rechts)

Sensorpayload RGB-Kamera AlliedVision Manta G-917C

Für die RGB-Sensorpayload wurde ein vibrationsgedämpftes 2-Achsen Gimbal der Fa. AirRobot modifiziert. Es gleicht Lageänderungen des UAV um die Roll- und die Nickachse durch Gegenbewegungen aus. Die Rollachse wird dabei immer parallel zur waagerechten gehalten. Der Winkel der Nickachse kann über die Steuerung des UAV frei gewählt werden und wird dann in der gewählten Lage stabilisiert. Die Recheneinheit dieser Sensorpayload ist mit zusätzlichen Streben auf der Rückseite der Rollachse befestigt. Eine Kohlefaserplatte schützt sie dort vor mechanischen Außeneinwirkungen, Abbildung 6-101 und Abbildung 6-102.

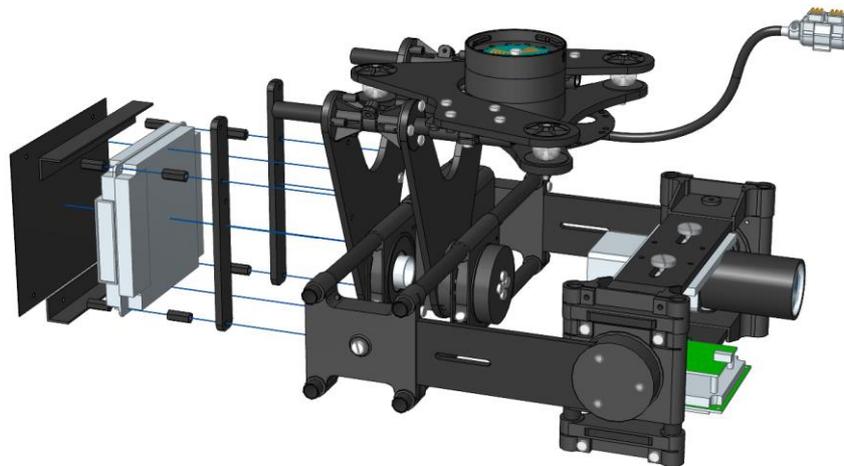


Abbildung 6-101: Sensorpayload mit RGB-Kamera, Explosionsdarstellung

Der durch diese Anordnung zur Rückseite verschobene Gesamtschwerpunkt wurde durch die für die Laserscannerpayload entworfene Dämpferaufnahme zurück in das Zentrum der Payload gebracht. Eine neutrale Schwerpunktlage von Kamera und IMU um die Nickachse, wurde durch eine hängende Kamerabefestigung an einer zusätzlichen Traverse erreicht.

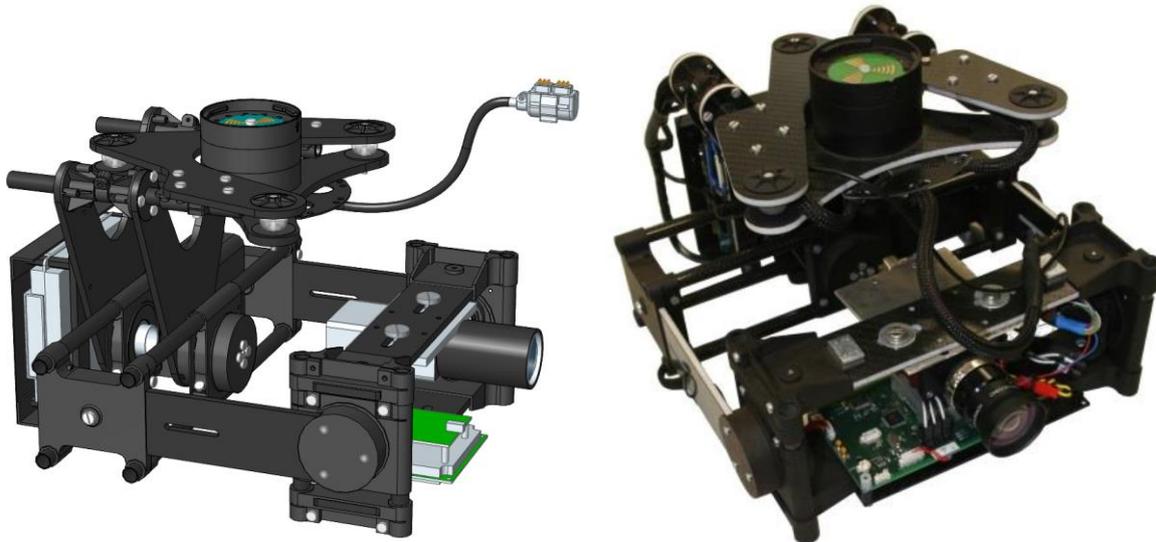


Abbildung 6-102: Sensorpayload mit RGB-Kamera, CAD-Modell (links), Prototyp (rechts)

Sensorpayload Thermalkamera FlirA65

Der mechanische Aufbau der Thermalkamera-Sensorpayload entspricht dem Aufbau der RGB-Sensorpayload. Hier wurde ebenfalls ein um die Roll- und Nickachse stabilisiertes Gimbal modifiziert, Abbildung 6-103.

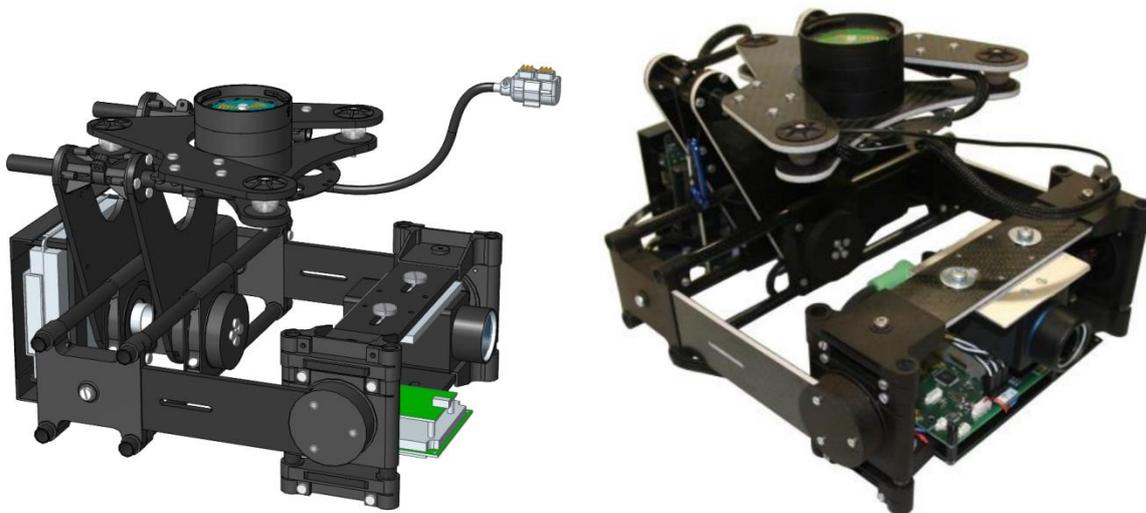


Abbildung 6-103: Sensorpayload mit Thermalkamera, CAD-Modell (links), Prototyp (rechts)

6.6.2.3 Sensorpayload UGV

Die Payload, die auf den UGVs integriert ist, ist grundsätzlich vergleichbar zu denen auf den UAVs. Wie beschrieben, ist der Basis-Nav/Com-Stack innerhalb des Chassis verbaut. Ebenso ist, wie bei den Sensorpayloadmodulen der UAV, jeweils ein Intel NUC5i5 innerhalb des Chassis integriert. Die Umfeldsensoren sind starr auf den UGV montiert und in Abbildung 6-104 dargestellt.

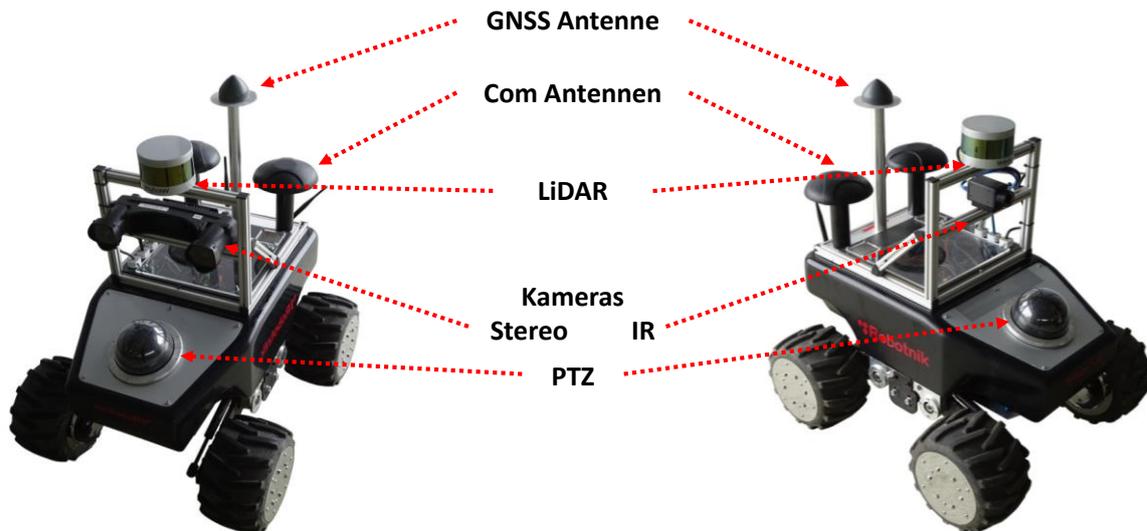


Abbildung 6-104: UGVs mit Sensorpayload und Antennenaufbauten

Auf dem oberen Aufbau vorne sind jeweils die bildgebenden Sensoren integriert:

1. Laserscanner Velodyne VLP-16 und RGB Stereokamerasystem Carnegie Robotics MultiSense S21
2. Laserscanner Velodyne VLP-16 und Thermalkamera Flir A65

Ergänzend ist werkseitig im vorderen Bereich des Chassis jeweils eine Pan-Tilt-Zoom (PTZ) Kamera integriert, ebenfalls über Ethernet mit der ANKommEn Hardware verbunden. Diese ermöglicht die Übertragung eines Live-Video-Streams zum Leitstand und kann vom Operator in ihrer Neigung und Ausrichtung angesteuert werden.

Im Heckbereich sind wiederum die Antennen zur WLAN und XBee Kommunikation integriert, sowie die GNSS Antenne. Im Fall der Antennen werden, im Vergleich zu den UAV, qualitativ höherwertigere und leistungsstärkere Antennen eingesetzt, da die Nutzlastkapazität der UGV deutlich höher ist und mehr Bauraum zur Verfügung steht.

6.6.3 Bodenstation/Leitstand

Für den Aufbau der zentralen Bodenstation, die als Gesamtsystemleitstand fungiert, wurde ein bestehendes Pelicase modifiziert, siehe Abbildung 6-105. In das Case wurde ein lüfterloser Industrie-PC (ARBOR BT-7802) integriert, auf dem die entwickelte Software für die Bodenstation inkl. Nutzeroberfläche installiert ist. Neben der Visualisierung der Messdaten, können diese ebenfalls im Feld auf dieser Prozessierungseinheit weiterverarbeitet werden. Zwecks Anzeige ist in den Deckel ein entsprechend dimensionierter Monitor integriert, Tastatur und Maus stehen einem Operator ebenfalls zur Verfügung. Die Energieversorgung dieser Teilkomponente basiert auf 230V AC und wird durch den Einsatz eines mobilen Stromerzeugers realisiert.



Abbildung 6-105: zentrale Bodenstation / Leitstand

Zur Positionierung des Leitstandes und Einbindung in das Kommunikationsnetzwerk ist per Ethernet eine Nav/Com-Box angebunden, die im Sinne einer guten Sende-/Empfangsleistung auf einem Stativ montiert wird. In dieser sind neben einem Com-Board, ein GNSS Empfänger und für die GNSS-basierte Positionsbestimmung ein Nav-Board verbaut. Obligatorisch sind die zur Kommunikation und Empfang von GNSS Signalen erforderlichen Antennen.

Als mobiles Gerät für Einsatzkräfte wird ein Convertible-Tablet (Lenovo ThinkPad® Yoga-260) eingesetzt, um entsprechend die Explorationsinformationen im Feld zur Anzeige bringen zu können (Abbildung 6-106). Auf diesem läuft das gleiche Nutzerinterface, wie auf der zentralen Bodenstation.



Abbildung 6-106: mobiles Gerät für Einsatzkraft vor Ort

Auch dieses wurde – durch einen entsprechenden Unterbau – um einen GNSS Empfänger sowie ein Com-Board und XBee Modul ergänzt.

6.6.4 Feldtests & Demonstrationen

Während des Vorhabens wurden diverse Tests und Demonstrationen durchgeführt. Eine Vielzahl an Tests, insbesondere entwicklungsbegleitende wurden auf den in Abschnitt 6.1.4 vorgestellten, ortsnahen Testgebieten durchgeführt. Weitere erfolgten teilweise mit den assoziierten Partnern, teilweise mit neuen – während der Vorhabenslaufzeit gewonnenen - Partnern, die aufgrund von Veröffentlichungen auf das Vorhaben ANKommEn aufmerksam geworden sind.

Ölabwehrübung Weser – Oktober 2015

Relativ frühzeitig im Vorhaben bestand das Angebot an einer Ölabwehrübung an/auf der Weser teilzunehmen. Diese wurde von vom Senat für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien und Hansestadt Bremen initiiert und geleitet. Übungsteilnehmer waren mehrere THW Ortsverbände, Feuerwehren, NLWKN und Reedereien. Gegenstand war grob zusammengefasst das Ausbringen von Ölsperren auf der Weser, sowie Dekontamination verunreinigter Strand-/Uferabschnitte.

Die Teilnahme des Vorhabens ANKommEn erfolgte auf Einladung und diente vornehmlich dem Zweck des Erfahrungsaustausches mit den Einsatzkräften. Da zu diesem Zeitpunkt im Vorhaben ANKommEn noch keine einsatzfähige Hardware aufgebaut war, wurde ein kleineres, vorhandenes UAV zur Aufnahme von Luftbildern mit einer kommerziellen Kompaktkamera mit angepasster Firmware eingesetzt. Auf diesem Weg konnte mit einer rudimentären Auswertung im Nachgang der Flüge zum einen ein erster Eindruck vermittelt werden, wie das spätere System eingesetzt werden kann, zum anderen waren so erste Daten eines realen Einsatzes für die Entwicklung der einzusetzenden Verfahren verfügbar. Abbildung 6-107 zeigt einen Ausschnitt des erstellten Lagebildes, sowie das eingesetzte UAV mit einem der eingesetzten Schlepper während des Ausbringens von Ölsperren auf der Weser.



Abbildung 6-107: Ausschnitt des erstellten Lagebildes (links), eingesetztes UAV vor Schlepper beim Ausbringen von Ölsperren (rechts)

Dargestellt ist der Ausschnitt, der den Standort der Übungsleitung, sowie einen Teil der eingesetzten Einsatzmittel inkl. Reinigungs-/Dekontaminationsbereich für Einsatzkräfte und –mittel, zeigt. Das während der Übung erzeugte komplette Orthophoto ist in Abbildung 6-108 dargestellt, der blaue Rahmen markiert den in Abbildung 6-107 gezeigten Ausschnitt.

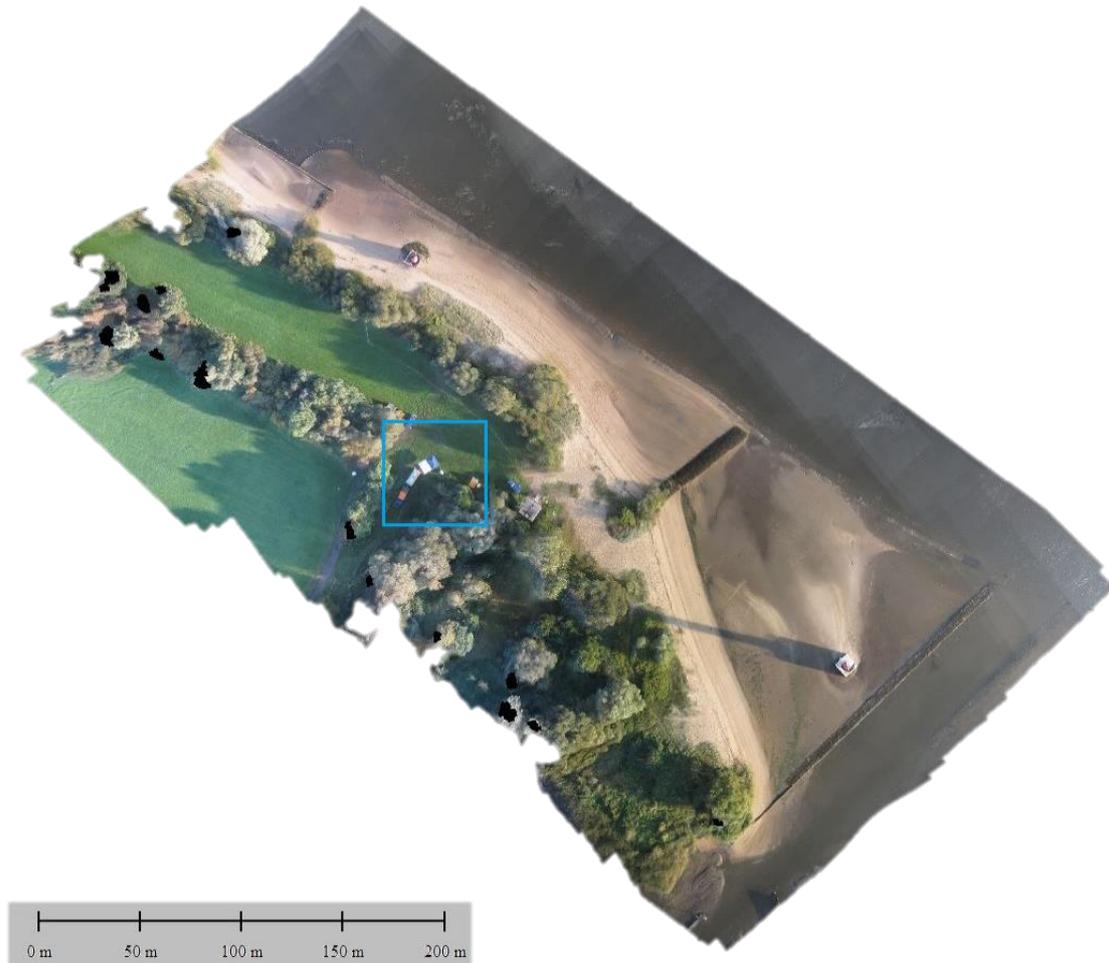


Abbildung 6-108: Während der Übung erzeugtes Orthophoto

Das Feedback war durchweg positiv, insbesondere die Möglichkeit der Einsatzbeobachtung aus der Luft wurde als sehr sinnvoll eingestuft, vor dem Hintergrund der Koordination von Einsatzkräften und -mitteln.

Ölabwehrübung Hamburger Hafen – Mai 2017

Aufgrund der gewonnenen Kontakte bei der Übung auf der Weser, bestand die Möglichkeit an einer weiteren Ölabwehrübung auf der Süderelbe der Freien und Hansestadt Hamburg (Behörde für Umwelt und Energie, BUE) teilzunehmen. In dem Übungsteil, an dem Teilkomponenten aus ANKommEn eingesetzt werden konnten, war die Beobachtung des Ausbreitungsverhaltens von Öl (simuliert durch Popcorn), nach einem simulierten Tankerunfall. Dazu wurden von einem Festmacherboot mehrere Kubikmeter Popcorn auf der Süderelbe ausgebracht. Ebenfalls von einem Festmacherboot aus wurde ein UAV mit RGB Kamera betrieben, um Luftbildaufnahmen des "Ölteppichs" zu machen. Dazu wurde dieser über einen Zeitraum von ca. drei Stunden mit dem Festmacherboot verfolgt und per UAV Einzelbilder gemacht, die zusammen mit Positionsinformationen zu zusammenhängenden Bildern größerer Areale projiziert wurden. Abbildung 6-109 zeigt das Ausbringen des Popcorns zur Simulation eines Ölteppichs und dessen anfängliche Ausbreitung.



Abbildung 6-109: simulierter Ölteppich

Die so erstellten Daten und Bilder wurden dem an der Übung beteiligten Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie zur Verfügung gestellt. Unter anderem auf Basis dieser Informationen wurden Strömungsmodelle (Abbildung 6-110) verifiziert und verfeinert, mit denen im Falle einer realen Havarie und Austritt von Gefahrstoffen, deren Ausbreitung abgeschätzt werden kann, um so die Koordinierung von Abwehrmaßnahmen effizient durchführen zu können.

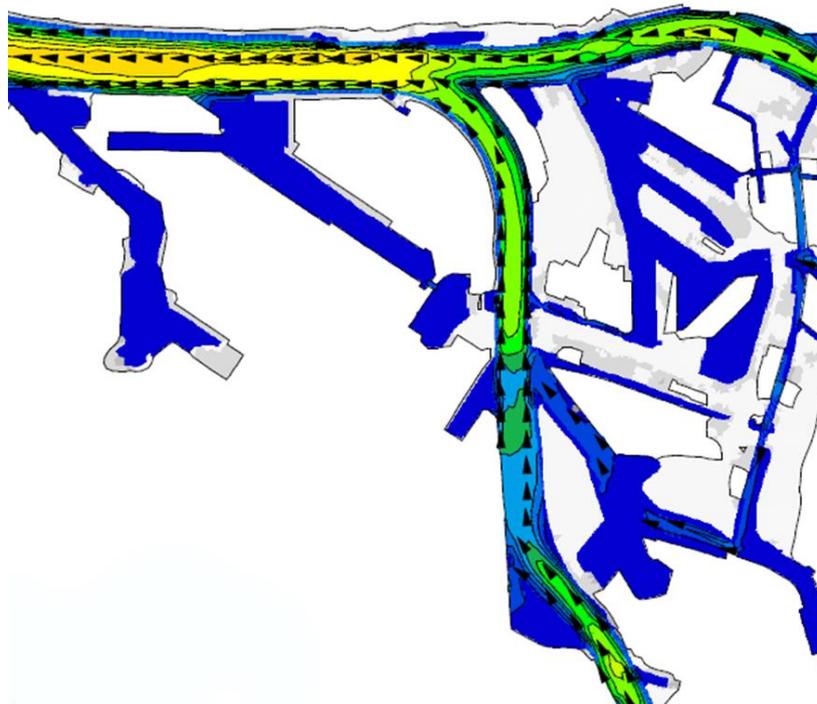


Abbildung 6-110: Ausschnitt des Anhand der Luftbilder generiertes Strömungsmodells [38]

Demonstration Vermisstensuche – Oktober 2017

Durch eine erfolgte Veröffentlichung des IFF ([Pub3]) wurde die Telekom Deutschland GmbH auf das Vorhaben ANKommEn, im speziellen auf die in der Veröffentlichung präsentierten Verfahren zum Live-Stitching von Luftbildern, aufmerksam. Durch die Telekom Deutschland GmbH werden im Verbund mit weiteren Partnern, Systeme entwickelt, um UAVs in den Luftraum integrieren zu können, bei denen Mobilfunkdatenverbindungen als Datenlink genutzt werden sollen. In diesem Zuge wurde das o.g. Verfahren in eine Demonstration integriert, die in Zusammenarbeit mit der DLRG durchgeführt wurde. Dabei sollte eine vermisste Person auf einer Elbinsel gesucht und "gerettet" werden, unter Einsatz eines UAV, ausgerüstet mit einer Thermalkamera. Dazu wurde die Toolchain, entwickelt im Rahmen von

ANKommEn, entsprechend adaptiert und erfolgreich eingesetzt. Abbildung 6-111 zeigt den georeferenzierten Overlay der Einzelbilder der Thermalkamera über eine digitale Karte.

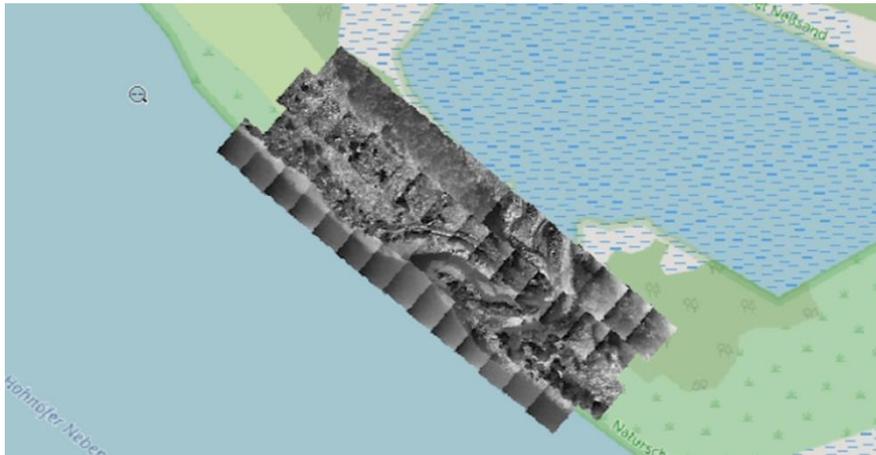


Abbildung 6-111: Live-Stitching von IR-Bildern und Overlay über eine digitale Karte

Hochwasser Braunschweig – Juli 2017

Im Rahmen der laufenden Einsätze während des Hochwassers im Juli 2017 in Braunschweig erfolgte die Anfrage durch den assoziierten Partner Feuerwehr Braunschweig und Stadtentwässerung Braunschweig GmbH zwecks Unterstützung mit dem in ANKommEn aufgebauten System. Das Ziel war, entlang des Verlaufs der Oker in einem Zeitbereich um die Scheitelwelle ein zusammenhängendes Lagebild der Überflutungsgebiete zu erstellen. Diese wurden zum Erreichen einer aussagekräftigen Bildqualität im Postprocessing im Nachgang der Mission erstellt. Abbildung 6-112 zeigt einen Ausschnitt aus dem erstellten Orthofoto. Überflogen wurde dazu ein Gebiet entlang der Oker südlich vom Innenstadtbereich von Braunschweig, über eine Länge von ca. drei Kilometer, in mehreren einzelnen Flügen.



Abbildung 6-112: Ausschnitt aus Orthofoto überfluteter Bereiche, Julihochwasser 2017 in Braunschweig

Basierend auf den zur Verfügung gestellten Informationen erfolgte im Nachgang des Einsatzes die Auswertung durch die Stadtentwässerung Braunschweig GmbH. Im Fokus stand dabei u.a. die Evaluation der in den Jahren zuvor getroffenen Schutzmaßnahmen

(Baulich, Einsatz von Pumpen, Schließung von Wehren, etc.) auf die Ausbreitung des Wassers in den überfluteten Bereichen.

Nach diesem Einsatz wurde dieser und das Vorhaben ANKommEn in regionalen (Braunschweiger Zeitung und Peiner Allgemeiner Zeitung, [Pub11] und [Pub12]) und überregionalen Medien inklusive Fernsehberichterstattung im Norddeutschen Rundfunk ([Pub13], [Pub14]) aufgegriffen und so in der Öffentlichkeit publiziert. Positiv bewertet wurde der Einsatz ebenfalls in einem Bericht der Stadt Braunschweig zum Hochwasser ([Pub15], Seite 10) mit einer Empfehlung, solche Systeme auch zukünftig einzusetzen.

Teilnahme an Übung der Feuerwehr Braunschweig – September 2017

Eine weitere Einbindung in eine Übung erfolgte im September 2017 in Osterode am Fallstein. Dabei war die Feuerwehr Braunschweig mit 40 Fahrzeugen beteiligt, zusammen mit ortsansässigen Feuerwehren. Abbildung 6-113 zeigt ein UAV und UGV während des Einsatzes, im Umfeld eines simulierten Scheunenbrandes nach einer Gasexplosion. Dieses war ein Teilbereich der angelegten Großübung. Dazu wurde ein Trümmerfeld aufgebaut mit verstreuten, simulierten Verletzten, sowie einer verqualmten Scheune, in denen nach mutmaßlich Verletzten gesucht wurde, um diese zu bergen.



Abbildung 6-113: UAV (links) und UGV (rechts) im Einsatz während einer Übung der Feuerwehr Braunschweig

Dabei wurden mit dem UAV Luftbilder des Einsatzbereiches gemacht, die unter anderem auf dem mobilen Gerät dem Einsatzleiter vor Ort zur Verfügung gestellt werden konnten, Abbildung 6-114.



Abbildung 6-114: mobiles Anzeigegerät im Einsatz während Feuerwehr Großübung

Mit dem UGV konnte in die Scheune gefahren werden, um so live Bilder der Thermalkamera und 3D-Umgebungskonturen durch Messungen des Laserscanners auf dem mobilen Gerät zur Anzeige zu bringen.

Feldversuch/Demonstration Langeoog – Oktober 2017

Im Oktober 2017 erfolgte ein Feldversuch in Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner NLWKN auf der Nordseeinsel Langeoog. Im Fokus stand die beispielhafte Exploration von Küstenschutzmaßnahmen im Norden der Insel als auch in der Umgebung des Inselhafens im Süden der Insel. Wie in Abschnitt 6.1.4 beschrieben, liegt im nördlichen Bereich eine Süßwasserlinse, die durch Dünen vor Sturmfluten geschützt wird. Zu diesem Zweck wurden bereits Jahre zuvor künstliche Dünen errichtet und in die Natur integriert. Aktuell fanden direkt vor und während der Versuchskampagne Sandaufspülungen statt. Diese haben den Zweck den Strand zu erhöhen und zu verbreitern, um so Auslaufzonen für Wellen zu generieren, wodurch wiederum die Dünen geschützt werden.

Abbildung 6-115 zeigt ein UAV des Vorhabens ANKommEn während des Einsatzes in einem Küstenabschnitt von Langeoog



Abbildung 6-115: ANKommEn UAV im Einsatz am Strand von Langeoog [Klaus Kremer]

Während der Versuchskampagne gab es eine (leichtere) Sturmflut, bei der Teile des aufgespülten Sandes wieder abgetragen wurden, vgl. Abbildung 6-116.



Abbildung 6-116: Erosion von Sandaufspülungen durch Sturmflut

Die Darstellung basiert auf Daten von Befliegungen jeweils vor und nach der Sturmflut und deren photogrammetrischen Auswertung. Aus dem direkten Vergleich ist eine teils deutliche Erosion des aufgespülten Sandes erkennbar.

6.6.5 Feedback & Fazit

Im Rahmen des Verbundvorhabens ANKommEn wurde ein Gesamtsystem konzeptioniert, entwickelt und umgesetzt, das unterstützend für Einsatzkräfte in den skizzierten Einsatzszenarien nutzbringend eingesetzt werden kann. Dieses wurde mit dem aufgebauten Demonstrator praxisrelevant erprobt und erfolgreich demonstriert.

Die entwickelten und eingesetzten Verfahren umfassen dabei sämtliche Teilkomponenten, von der Positionierung über Datenaustauschstrategien bis hin zu den beschriebenen Mappingverfahren, die den zentralen Kernaspekt bei der Exploration repräsentieren. Dabei wird ein paralleler und/oder gestaffelter Einsatz multipler Trägersysteme ermöglicht.

Das erhaltene Feedback im Rahmen der Teilnahme an realen Einsätzen, durchgeführten Feldversuchen und Demonstrationen war grundsätzlich durchweg positiv in Hinblick auf einen nutzbringenden Einsatz.

Im Hinblick auf eine Nutzung als reguläres Einsatzmittel gab es ebenfalls konstruktives Feedback. So ist, insbesondere aus Sicht der Feuerwehr, ein Gesamtsystem bestehend aus einer größeren Anzahl von Trägersystemen und dessen Integration in bestehende Konzepte schwierig aufgrund des Platzbedarfs. Diesem wurde in ANKommEn bereits insofern begegnet, als dass das Gesamtsystem modular aufgebaut ist, also entsprechend reduziert werden kann, als auch erweitert, wenn Ausrüstungen bei größeren Einsätzen von mehreren Standorten zusammengeführt wird. Ein paralleler Einsatz mehrerer UAV bedeutet aktuell ebenfalls, dass pro UAV aus rechtlichen Gründen eine Einsatzkraft als Sicherheitspilot fest eingebunden ist, und somit keine anderen Aufgaben übernehmen kann.

Explizit wurden Anregungen für funktionale Erweiterungen gegeben:

Auf Sensorebene ist dies der gleichzeitige Betrieb von RGB und IR Kamera auf einem UAV für Feuerwehreinsatzszenarien, um ohne Wechsel der Payload Situationen in beiden Spektren analysieren zu können.

Hinsichtlich der Mobilität eines Erkundungssystems sollte eine Fokussierung auf tragbare Geräte zur Bedienung und Datenanalyse stattfinden, die ausschließlich über Akkus betrieben können werden.

Hinsichtlich des Nutzdatenhandlings sei eine Anbindung über Mobilfunk als sinnvoll zu erachten, um so während oder im direkten Nachgang einer Mission die Daten verteilt und in Datenbanken abgelegt werden können. Gerade bei größeren Einsatzlagen kann die übergeordnete Einsatzzentrale mehrere Kilometer entfernt sein. Mit entsprechendem Datenzugriff könnte so ohne größeren Zeitverlust entsprechend weitere übergeordnete Aufgaben oder Explorationsziele definiert und in das System eingebracht werden.

Für Vermessungsaufgaben wie im Bereich des Küstenschutzes wären die in einer geeigneten Datenbank abgelegten Informationen, bei wiederholten Vermessungen ebenfalls leichter in ihrer zeitlichen Entwicklung zu beurteilen. Darauf basierend können Folgeaufgaben z. B. in Form von POIs (Einzelpunkte oder Gebiete) in der Datenbank abgelegt werden, die anschließend direkt in eine Missionsplanung umgesetzt werden.

Die genannten exemplarischen Aspekte fließen neben weiteren Aspekten hinsichtlich der Weiterentwicklung, z. B. der Robustheit der umgesetzten Mappingverfahren, in das – zum Berichtszeitpunkt laufende – Anschlussvorhaben ANKommEn 2 ein.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Aus den bewilligten Mitteln wurden an der TU Braunschweig knapp viereinhalb Stellen für wissenschaftliche Mitarbeiter (TV-L E13) parallel über die gesamte Laufzeit finanziert, verteilt auf bis zu fünf Personen. Diese waren zur Bearbeitung der Themen erforderlich, da diese neben einer akademischen Ausbildung, Kenntnisse u.a. im Bereich GNSS-basierter Positionierung, Inertialnavigation, bildgebender Sensorik, Sensorintegration, Datenaustauschstrategien und -technologien und Signalverarbeitung haben mussten. Weiteres Personal wurde in Form von studentischen Hilfskräften über die komplette Laufzeit des Vorhabens eingesetzt. Deren Tätigkeiten umfassten im Wesentlichen Bereiche der Hard- und Softwareintegration sowie Unterstützung bei Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Erprobungen und Feldversuchen von Teilsystemen als auch des Gesamtsystems.

Darüber hinaus wurden Investitionen getätigt. Diese umfassten als größte Posten die Beschaffung der im Vorhaben als bodengebundene Versuchsträger eingesetzten Bodenfahrzeuge (Robotnik Summit XL), sowie die bildgebende Sensorik, Sensoren zur Positionierung, Kommunikationsmodulen und Prozessierungseinheiten zur Datenerfassung, -austausch und -auswertung. Aus diesen Komponenten wurde das beschriebene Explorationssystem zur Entwicklung und Untersuchung der beschriebenen Technologien aufgebaut und eingesetzt.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Als Universitätsinstitute sind das IFF und IMN auf Förderungen im Rahmen von öffentlichen Förderprogrammen angewiesen, da eine Finanzierung von Forschungsvorhaben aus Eigenmitteln nicht möglich ist. Die Arbeiten wurden sorgsam geplant und im Sinne eines wirtschaftlichen Umgangs mit Fördermitteln bearbeitet.

Mit den in ANKommEn entwickelten Technologien und dem aufgebauten Gesamtsystem wurde ein wesentlicher Beitrag erarbeitet, der den Einsatz von UAV und UGV zur Exploration von Gebieten und Einsatzszenarien bei gleichzeitigem Austausch erzielter Explorationsergebnisse (Sensordaten) mit einem systeminternen Leitstand und deren Visualisierung für spätere Nutzer ermöglicht. Der Fokus der TU Braunschweig lag dabei auf Technologien und Anwendungen, die aktuelle und im Aufbau befindliche Satellitennavigationssysteme nutzen, der Erfassung, Aufbereitung und Auswertung bildgebender Sensorik sowie der für einen nutzbringenden Einsatz erforderlichen Datenaustauschstrategien.

Aufgrund der flexibel und modular gehaltenen Einbindung der Sensoriken zur Erkundung ist ebenfalls eine Erweiterungsmöglichkeit in Hinblick auf den Einsatz anderer Sensoriken (z. B. Gasdetektoren, Strahlungsmesser, etc.) über die demonstrierten Anwendungen hinaus gegeben.

Teile der entwickelten Technologien lassen sich ebenfalls auf andere Anwendungsbereiche übertragen, wie z. B. der Landtechnik – Stichwort „Landwirtschaft 4.0“ – und extra-terrestrische Erkundungsmissionen.

9 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit

An der TU Braunschweig wurde das Vorhaben ANKommEn schon zur Laufzeit intensiv dazu genutzt über studentische Arbeiten, den Einsatz studentischer Hilfskräfte sowie der Einbindung der in ANKommEn erzielten Erkenntnisse in aktuelle Vorlesungen, wissenschaftlichen Nachwuchs auszubilden und an aktuelle Forschungsthemen heranzuführen. Hierbei fand ebenfalls eine engere Zusammenarbeit mit Studenten der AKAMAV an der TU Braunschweig statt.

Darüber hinaus können und werden die Erkenntnisse in andere Forschungsaktivitäten und -vorhaben übertragen und genutzt. Ein Beispiel ist die Nutzung der in ANKommEn aufgebauten und integrierten Kombination aus Inertialmesseinheit mit dem GNSS Empfänger, welche in der Folge im Vorhaben ALICE (Airborne tool for methane isotopic composition and polar meteorological experiments; DFG-Projekt LA2907/8-1 im Rahmen des DFG-SPP 1158 "Antarktisforschung") eingesetzt wurde und wird. In diesem wurde vom IFF ein Multicoptersystem mit integriertem Luftprobenentnahmesystem aufgebaut und für die Luftprobenentnahme in definierten Flughöhen, bis zu einer Höhe von 1000m über Grund im polaren Regionen eingesetzt.

Durch die aufgebaute Expertise am IFF im Bereich der UAV-gestützten Luftbildphotogrammetrie wurden Beteiligungen an weiteren Forschungsvorhaben und deren Beantragung ermöglicht, z. B. Vorhaben Aerolnspekt (BMVI, Forschungsprogramm IHATEC), zur präzisen photogrammetrischen Vermessung von Schienensystemen.

Die entwickelten Verfahren sollen in weitere Forschungsaktivitäten Einfluss nehmen, wie z. B. dem Einsatz von Maschinenverbänden im Rahmen der aktuellen Trends "Digitale Landtechnik" und "Landwirtschaft 4.0".

Eine direkte Weiterentwicklung und funktionale Erweiterung des aufgebauten Gesamtsystems erfolgt im Anschlussvorhaben ANKommEn 2 durch ein um das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Braunschweig erweitertes Projektkonsortium.

Mit den beschriebenen Tätigkeiten und Entwicklungen durch die TU Braunschweig wurde ein wesentlicher Beitrag für automatisiert agierende Trägersysteme in einem Explorationssystem geleistet.

10 Bekanntgewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Bei der Bearbeitung der einzelnen Themenfelder wurde zu den jeweiligen Themen recherchiert ob und inwieweit an anderen Stellen Fortschritte erzielt wurden. Dies geschah im Wesentlichen durch Internetrecherche und den Besuch von nationalen und internationalen Fachkonferenzen mit zugehörigem Austausch und Diskussionen des dort anwesenden Fachpublikums.

Eine allgemeine Erkenntnis ist, dass in Einzelanwendung der Einsatz von unbemannten Systemen, z. B. für Vermessungsanwendungen oder auch der optischen Aufklärung im Anwendungsbereich von Einsatzkräften, wie Feuerwehr und Polizei, stark zunimmt, beispielsweise wie in [39] und [40]. Dabei steht in der Regel die rein visuelle Live-Aufklärung ("Kameradrohne") im Vordergrund, ohne eine Zusammenführung von Informationen in einer integrierten Bodenstation, wie es in ANKommEn der Fall ist.

Anknüpfungspunkte existieren zum Beispiel bei Aktivitäten der Telekom Deutschland GmbH, die durch eine Veröffentlichung zu den entwickelten Live-SLAM auf ANKommEn und das IFF aufmerksam geworden ist. Der Hauptfokus bei diesen Aktivitäten liegt jedoch mehr in dem Bereich der Integration von UAV in den Luftraum unter Nutzung von Mobilfunkdatenverbindung als Datenlink und Austausch von luffahrtrelevanten Informationen. Im Rahmen dieser Aktivitäten fand eine Einbindung des am IFF entwickelten Mappingverfahrens im Rahmen einer Demonstration als Beispielanwendung statt.

Im Bereich der Middleware-systeme ist die derzeit fortschreitende Entwicklung von ROS2 zu nennen. Wie bereits in Abschnitt 6.3.3.1 beschrieben beinhalten ROS2 bereits einige der in ANKommEn entwickelten QoS-Mechanismen um die Kommunikation in verteilten Netzen zu optimieren, ist aber zur Projektlaufzeit noch nicht im benötigten Umfang veröffentlicht wurden.

Durch den weiteren Ausbau der Mobilfunknetze und insbesondere durch die Einführung von 5G werden sich in Zukunft völlig neue Möglichkeiten zur Steuerung der UAVs System und Einsatzreichweiten ergeben, jedoch ist aktuell noch nicht absehbar wann 5G flächendeckend

eingeführt sein wird und ob alle angekündigten Eigenschaften im vollen Umfang erfüllt werden.

Bei der dreidimensionalen LiDAR-Kartierung handelt es sich um ein hochdynamisches Forschungs- und Entwicklungsfeld, welches sich zunehmendem Zuspruch von Forschern weltweit erfreut. Während auf dem Bereich des zweidimensionalen LiDAR-SLAM bereits viele Algorithmen und Verfahren implementiert worden sind, welche mittlerweile zum Stand der Technik gehören und zumeist öffentlich zugänglich als Open-Source-Software zur Verfügung gestellt worden ist, befinden sich viele Ansätze im dreidimensionalen Bereich noch in der experimentellen Erprobung. Dennoch ist in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung zu beobachten, welche hier nicht in Gänze abgebildet werden kann.

Exemplarisch zu nennen sei das europäische Forschungsprojekt „TRADR“ (Long-Term Human-Robot Teaming for Robot Assisted Disaster Response). Im Rahmen dieses Projekts kam es zu einer Reihe von interessanten Entwicklungen. Bspw. [41] und [42] haben einen Ansatz entwickelt, bei dem zur sicheren und effizienten Detektion von bereits kartierten Bereichen eine automatisierte Segmentierung gefolgt von dem Matching einzelner Segmente erfolgt. Die Autoren konnten die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren sowohl mittels öffentlich zugänglicher Datensätze, sowie in realen Einsatzszenarien abbilden. Eine Übertragbarkeit auf Arbeiten im Rahmen von „ANKommEn“ sind jedoch nicht ohne weiteres möglich, da in den Arbeiten stets LiDAR-Sensoren mit einer deutlich höheren Auflösung genutzt werden, wie bspw. Velodyne HDL-64 Sensoren und rotierende 2D-LiDAR-Sensoren. Bei der Nutzung von Sensoren mit einer deutlich geringeren Auflösung (Velodyne VLP-16 Puck), sind Aufnahmen entsprechend, insbesondere in vertikaler Richtung bezogen auf den Sensor, geringer aufgelöst. Dies führt zumeist bereits bei den Segmentierungsverfahren, welche in den genannten Veröffentlichungen genutzt werden, zu erheblichen Problemen, da diese zumeist auf der Flachheit oder dem euklidischen Abstand der einzelnen Punkte zueinander beruhen. Die robuste Segmentierung ist mit derartigen Verfahren nicht möglich. Weiterhin ist die Einsatzbarkeit in unstrukturierten Szenarien (geringe Bebauung) schwierig, da sich das Matching von Segmenten, welche bspw. von Büschen oder Bäumen stammen, mit den heutigen Matching-Verfahren kaum robust realisieren lässt.

Die Umsetzung des erarbeiteten Gesamtsystems führt – nicht zuletzt basierend auf den erfolgten Veröffentlichungen – zu einer Beachtung der in ANKommEn erzielten Ergebnisse und zeigt auch, dass ein Bereich adressiert wurde, in dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf herrscht.

11 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

In der Laufzeit des Vorhabens wurden folgende Veröffentlichungen durch die beteiligten Institute der TU Braunschweig publiziert.

11.1 Veröffentlichungen der TU Braunschweig

- [Pub1] Hannes Harms, Jan Schattenberg, Julian Schmiemann, Ludger Frerichs "A Communication Layer for UAV/UGV Swarm Applications" MCG 2016 – 5 th International Conference on Machine Control & Guidance Vichy, France, October 5-6th, 2016
- [Pub2] Julian Schmiemann, Hannes Harms, Jan Schattenberg, Ludger Frerichs " Examination of methods for error-tolerant data association between independent relative pose graphs during Multi-Agent SLAM", MCG 2016 – 5 th International Conference on Machine Control & Guidance Vichy, France, October 5-6 th , 2016
- [Pub3] Kern, A.; Bobbe, M.; Bestmann, U. (2016): "Towards a real-time aerial image mosaicing solution" Konferenz. International Micro Air Vehicle Conference and Competition (IMAV), 17.10.2016

- [Pub4] S. Batzdorfer, M. Bobbe, M. Becker, H. Harms, and U. Bestmann, "MULTISENSOR EQUIPPED UAV/UGV FOR AUTOMATED EXPLORATION" in ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences , 2017
- [Pub5] J. Schmiemann, H. Harms, J. Schattenberg, M. Becker, S. Batzdorfer, and L. Frerichs, "A DISTRIBUTED ONLINE 3D-LIDAR MAPPING SYSTEM" in ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences , 2017
- [Pub6] M. Bobbe, A. Kern, Y. Khedar, S. Batzdorfer, and U. Bestmann, "An automated rapid mapping solution based on orbslam and agisoft photoscan api," in International micro air vehicle conference and flight competition 2017, Toulouse, France, 2017, pp. 286-292.
- [Pub7] Harms, H.; Schattenberg, J.; Schmiemann, J.; Frerichs, L.: "Development of an Adaptable Communication Layer with QoS Capabilities for a Multi-Robot System", ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference, 2017.
- [Pub8] S. Batzdorfer, M. Bobbe, M. Becker, U. Bestmann, "Autonomous Multi-Sensor Survey with Teamed Ground and Air Vehicles" in GPS WORLD, April 2018, Volume 29, No 4, Seite 18-34, ISSN 1048-5104, published by North Coast Media LLC, Cleveland, Ohio, USA
- [Pub9] S. Batzdorfer, M. Becker, M. Bobbe, U. Bestmann, "Automated Exploration with Multi-Sensor Equipped UAV/UGV", Technical Paper in Proceedings of the European Navigation Conference 2018 (ENC 2018), edited by J. Johansson and G. Elgered, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden, May 2018, ISBN 978-91-88041-14-2

11.2 Presse und Berichte

Über wissenschaftliche Veröffentlichungen hinaus, fanden Berichterstattungen in regionalen und überregionalen Medien statt, sowie durch Presseveröffentlichungen und einem Bericht der Stadt Braunschweig im Nachgang zum Einsatz im Rahmen des Hochwassers im Juli 2017.

Einsatz im Rahmen des Hochwassers in Braunschweig – Juli 2017

- [Pub10] Pressemitteilung der TU Braunschweig vom 02.08.2017
<https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/hochwasser-einsatz-fuer-forschungsteam-der-tu-braunschweig/>
- [Pub11] "TU-Forschungsteam im Hochwasser-Einsatz", Braunschweiger Zeitung, 03.08.2017
- [Pub12] "Braunschweig: Hochwasser-Einsatz für Forschungsteam der TU", Peiner Allgemeine Zeitung, 03.08.2017
- [Pub13] "Hilfe aus der Luft - Drohne im Hochwassereinsatz", Online Artikel des Norddeutschen Rundfunks von Sebastian Deliga, 27.08.2017
https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/braunschweig_harz_goettingen/Hilfe-aus-der-Luft-Drohne-im-Hochwassereinsatz,drohne512.html, letzter Zugriff am 10.07.2018
- [Pub14] "Nach der Flut: Braunschweiger Wissenschaftler prüfen Schäden aus der Luft" Sebastian Deliga, Beitrag in der Sendung "Hallo Niedersachsen" vom 27. August 2017, Norddeutscher Rundfunk
- [Pub15] Stadt Braunschweig "Bericht zum Julihochwasser 2017 in Braunschweig", Fachbereich Stadtplanung und Umweltschutz, Untere Wasserbehörde mit Unterstützung des Fachbereiches Feuerwehr und der Stadtentwässerung Braunschweig GmbH, 05.10.2017, Braunschweig
https://www.braunschweig.de/leben/umwelt_naturschutz/wasser/hochwasserschutz/2017_10_05_Bericht.pdf, letzter Zugriff am 10.07.2018

Feldversuch Demonstration Langeoog – Oktober 2017

- [Pub16] "Katastrophenschützer setzen auf Bilder aus der Luft", Klaus Kremer, Langeoognews 27.10.2017
<https://www.langeoognews.de/langeoog-aktuell/aktuelles/katastrophenschuetzer-setzen-auf-bilder-aus-der-luft-20140/n077n3w5ch45hf0r1d20140/>, Letzter Zugriff am 10.07.2018
- [Pub17] "Senkrechtbilder von der Strandaufspülung", Klaus Kremer, Langeoognews, 28.10.2017
<https://www.langeoognews.de/langeoog-aktuell/aktuelles/senkrechtbilder-von-der-strandaufspuelung-20152/5302f5e31cc98e07f3ff14333ea78612/>, Letzter Zugriff am 10.07.2018

11.3 geplante Veröffentlichungen der TU Braunschweig

- Schlussbericht "ANKommEn – Automatische Navigation und Kommunikation zur Exploration" Teilprojekt TU Braunschweig, FKZ 50NA1518
Veröffentlichung in der TIB Hannover für August 2018 vorgesehen

12 Zusammenfassung

Die im Rahmen des Vorhabens ANKommEn vom IFF und IMN der TU Braunschweig bearbeiteten Arbeitspakete wurden erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen. Durchgeführte Meilensteine wurden in Berichten an den Zuwendungsgeber dokumentiert und durch zwei Demonstrationen während der Projektlaufzeit dem Zuwendungsgeber präsentiert.

Gefördert durch:

Gefördert von dem Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 NA 1518.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel ANKommEn Automatische Navigation und Kommunikation zur Exploration (Teilprojekt TU Braunschweig)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Becker, Martin Batzdorfer, Simon Bobbe, Markus Schattenberg, Jan Harms, Hannes Schmiemann, Julian Hecker, Prof. Dr.-Ing. Peter	5. Abschlussdatum des Vorhabens 15.02.2018
	6. Veröffentlichungsdatum Juli 2018
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Flugführung, Technische Universität Braunschweig Hermann-Blenk-Straße 27 38108 Braunschweig, Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Technische Universität Braunschweig Langer Kamp 19a 38106 Braunschweig, Germany	10. Förderkennzeichen 50 NA 1518
	11. Seitenzahl 123
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 50
	14. Tabellen 9
	15. Abbildungen 119
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das vorliegende Dokument ist der Schlussbericht zu dem Vorhaben "ANKommEn – Automatische Navigation und Kommunikation zur Exploration" (Teilprojekt TU Braunschweig). Das Teilprojekt wurde geleitet durch das Institut für Flugführung der TU Braunschweig und ist Bestandteil des gleichnamigen Verbundvorhabens. Die Gesamtprojektleitung lag ebenfalls beim Institut für Flugführung der TU Braunschweig. Der Schlussbericht umfasst neben den wissenschaftlich-technischen Ergebnissen die innerhalb des Vorhabens erzielt wurden, die Beschreibung zu den wissenschaftlichen Rahmenbedingungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde. In dem Projekt wurden durch die beteiligten Institute der Technischen Universität Braunschweig folgende wissenschaftlich-technische Themen behandelt: INS/GNSS Integration, INS/GNSS+Bild Integration, GNSS-Multiconstellation, GPS Trägerphasenauswertung im Schwarm, Kommunikationsstrategien im Schwarm, schwarmbasiertes Mapping, RGB/IR-Mapping, UAV Photogrammetrie, LiDAR-Mapping, Multi UAV/UGV Bodenstation, HMI, Aufbau von Demonstratoren, Erprobung der Technologien im Feldversuch. In dem Projekt wurden diese Themen von den theoretischen Grundlagen bis hin zur praktischen Erprobung der Technologien, basierend auf konzeptionierten und aufgebauten Demonstratoren, in Feldversuchen behandelt. Die Feldtests und Demonstrationen orientierten sich an Einsatzszenarien aus dem Bereich Feuerwehr und Küstenschutz. Seitens der Technischen Universität Braunschweig waren das Institut für Flugführung und das Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge an dem Vorhaben beteiligt. Verbundpartner war die AirRobot GmbH & Co. KG aus Arnshausen. Als assoziierte Partner waren die Feuerwehr Braunschweig und der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) in das Vorhaben mit eingebunden.	
19. Schlagwörter INS/GNSS, GNSS-Multiconstellation, INS/GNSS+Bild Integration, RGB/IR/LiDAR-Mapping, Schwarmkommunikation, schwarmbasiertes Mapping, UAV Photogrammetrie, HMI, UAV/UGV Bodenstation, Feldversuche	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title ANKommEn Automatische Navigation und Kommunikation zur Exploration (Subproject TU Braunschweig)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Becker, Martin Batzdorfer, Simon Bobbe, Markus Schattenberg, Jan Harms, Hannes Schmiemann, Julian Hecker, Prof. Dr.-Ing. Peter	5. end of project 15.02.2018
	6. publication date July 2018
	7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) Institute of Flight Guidance, Technische Universität Braunschweig Hermann-Blenk-Straße 27 38108 Braunschweig, Germany Institute of Mobile Machines and Commercial Vehicles, Technische Universität Braunschweig Langer Kamp 19a 38106 Braunschweig, Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 50 NA 1518
	11. no. of pages 123
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 50
	14. no. of tables 9
	15. no. of figures 119
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract This document is the final report of the project "ANKommEn – Automatische Navigation und Kommunikation zur Exploration" (subproject TU Braunschweig) lead by the Institute of Flight Guidance of the Technische Universität Braunschweig, part of the correspondent joint research project. Overall lead of the joint research project has been the Institute of Flight Guidance of the Technische Universität Braunschweig. This report contains the scientific and technical results achieved within the project as well as specifications concerning the scientific general conditions relevant for working on the project. Within the project the following scientific and technical topics have been dealt with by the involved institutes of the Technische Universität Braunschweig: INS/GNSS integration, INS/GNSS+Vision integration, GNSS-multiconstellation, GPS carrierphase based swarm positioning, swarm communication-strategies, swarm-based mapping, RGB/IR-Mapping, UAV-based photogrammetry, LiDAR-Mapping, multi UAV/UGV ground control station, HMI, validation unit built up, validation of technologies within field tests. The project discusses these topics in a comprehensively way from fundamental basics to practical use in field experiments. These have been orientated on typical operational scenarios of fire brigades and coastal defence. On the part of the Technische Universität Braunschweig the Institute of Flight Guidance and the Institute of Mobile Machines and Commercial Vehicles have been involved. Project partner has been the AirRobot GmbH & Co. KG in Arnsberg. The fire brigade of Braunschweig and the Lower Saxony Water Management, Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN) has been involved as associated project partners.	
19. keywords INS/GNSS, GNSS-multiconstellation, INS/GNSS+Vision integration, RGB/IR/LiDAR-mapping, swarm communication, swarm-based mapping, UAV-based photogrammetry, HMI, UAV/UGV ground control station, field test	
20. publisher	21. price