

# Schlussbericht

## Datenlinkbasierte Notfallnavigation (DaNoNav)

Quantum-Systems GmbH  
Zeppelinstraße 18  
82205 Gilching

**Projektleiter:**  
Dr.-Ing. Christoph Göttlicher  
Email: [cgoettlicher@quantum-systems.com](mailto:cgoettlicher@quantum-systems.com)  
Tel: +49 8105 24150-53

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Flugsystemdynamik  
Boltzmannstraße 15  
85748 Garching bei München

**Projektleiter:**  
Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel  
Email: [florian.holzapfel@tum.de](mailto:florian.holzapfel@tum.de)  
Tel: +49 89 289 16081



## Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzzusammenfassung .....	3
1.1.	Aufgabenstellung .....	3
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	6
	Vor dem Projekt .....	6
	Angabe bekannter Konstruktionen .....	7
	Verwendete Fachliteratur .....	7
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
2.	Eingehende Darstellung .....	8
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	8
	AP0 Projektmanagement .....	8
	AP1 CONOPS .....	8
	AP2 Missionsszenarien .....	9
	AP3 Gesamtsystemarchitektur und Schnittstellenspezifikation .....	9
	AP4 Integration in Flugführung und Missionsplanung .....	10
	AP5 Systemmodellierung und -analyse .....	10
	AP6 Entwurf und Implementierung der Filterarchitektur .....	15
	AP7 Sicherstellung der Echtzeitanforderungen an den entwickelten Algorithmus .....	18
	AP8 Verifikation auf Komponentenebene .....	18
	AP9 Gesamtsystemintegration, Validierung und Verifikation .....	19
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	21
	Quantum Systems .....	21
	TU München .....	22
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	22
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	22
2.5.	Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	23
2.6.	Veröffentlichung der Ergebnisse .....	23
	Anhang .....	24
2.7.	Open Data .....	24
2.8.	Einfluss auf das Specific Operational Risk Assessment (SORA) .....	25
2.9.	Literaturverzeichnis .....	26



## 1. Kurzzusammenfassung

### 1.1. Aufgabenstellung

Drohnen verschiedener Größen und Gewichtsklassen erfreuen sich zunehmend großer Beliebtheit. Der Grad der Automatisierung steigt stetig, sodass UAS bereits autonome Starts, Flüge und Landungen vornehmen können. Die Mission kann, je nach Rechtslage, auch außerhalb der Sichtweite des Piloten stattfinden, sodass dieser nur noch über eine Datenlinkverbindung die Drohne überwachen kann. Selbst wenn die Drohne im Sichtbereich operiert wird, kann die Distanz zwischen dem Piloten und der Drohne erheblich sein. Selbst wenn am Startpunkt der Flug nicht beeinträchtigt ist, kann durch die große Distanz die Drohne durch gewollte oder ungewollte Störungen des GNSS Signals gefährdet werden. Das Ziel dieses Projektes ist es den sichereren Betrieb der Drohne trotz GNSS Ausfalls zu gewährleisten. Das Vorhaben erprobt einen sicheren Betrieb des Quantum-Systems (QS) Transitions-UAS Vector während GNSS Ausfällen unter der Verwendung von Distanzinformationen zwischen Datenlinks.

Üblicherweise weisen UAS in leichten Gewichtsklassen, am Beispiel von Quantum-Systems die Klasse C3/C4 der Europäischen Drohnenverordnung<sup>1</sup>, eine starke Abhängigkeit zu Satellitennavigationssystemen ("Global Navigation Satellite System" - GNSS) wie GPS (US-amerikanisch), Galileo (europäisch), Glonass (russisch) oder BeiDou (chinesisch) auf, da die vorhandene Sensorik genannter UAS allein nicht ausreichend ist, um zu navigieren. Diese Abhängigkeit zu Navigationssatelliten ist ein einzelner Ausfallpunkt („engl. single point of failure“) und kann, je nach Dauer des GNSS Ausfalls, zum Totalverlust des UAS führen.

Das angestrebte System soll die Abhängigkeit zu GNSS verringern, indem ein zusätzliches, betreiber autonomes Positionierungssystem als zuverlässige und unabhängige Alternative in das Navigationssystem der Quantum-Systems UAS integriert wird. Die Grundlage hierfür sind Datenlinks, welche eine Laufzeitinformation der Datenpaket zwischen Netzwerkteilnehmern bestimmen können. Zur Positionsbestimmung soll eine variable Anzahl an möglicherweise bewegten oder unbewegten Datenlink Bodenstationen verwendet werden, sodass eine rudimentäre Navigation bereits mit der Standardkonfiguration, von einem einzelnen Datenlink, möglich ist. Dieses Netzwerk soll mindestens ausreichend sein, um das UAV im Fehlerfall jederzeit sicher zum vorgegebenen Landepunkt führen zu können.

### 1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ausfälle von Satellitennavigationssystemen haben sich in jüngster Vergangenheit gehäuft und werden daher zunehmend wahrscheinlicher. Insbesondere werden die Signale mutwillig durch „Jamming“ so gestört, dass keine Möglichkeit mehr besteht diese für die Navigation zu nutzen. Durch die Analyse von ADS-B Sendern von Verkehrsflugzeugen, können GNSS Störungen nahezu in Echtzeit weltweit beobachtet werden<sup>2</sup>. Neben bewussten Störungen gibt es auch weitere Fehlerquellen wie Geomagnetische Stürme oder Probleme mit GNSS Satelliten, wie zum Beispiel im Juli 2019 als alle Galileo Satelliten zeitweise offline waren. Die Entwicklung

---

<sup>1</sup> <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems> - aufgerufen am 28.05.2024

<sup>2</sup> <https://gpsjam.org> - Aufgerufen am 19.06.2024



eines Notfallnavigationssystems, das einen sicheren Betrieb während GNSS Signalverlust ermöglicht, ist daher zwingend erforderlich.

Die beiden Projektpartner, die Firma Quantum-Systems und der Lehrstuhl für Flugsystemdynamik der Technischen Hochschule München (TUM) erarbeiten in diesem Verbundprojekt ein Navigationssystem welches die Navigationsfähigkeit auch bei GNSS Signalverlust erhalten soll.

Die Firma Quantum-Systems verfügt über umfangreiche Erfahrung in der Entwicklung von Transitions-UAS für professionelle Long Range-Anwendungen. Das Unternehmen ist in nationalen und internationalen Projekten aktiv, insbesondere im Bereich der Luftfahrtmobilität für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben, sowie im medizinischen Bereich, wie beispielsweise im Förderprojekt MEDinTime<sup>3</sup> (Förderkennzeichen 45UAS1043A).

Die Zusammenarbeit von Quantum-Systems mit verschiedenen Partnern hat gezeigt, dass es eine hohe Nachfrage nach einem sicheren BVLOS (engl. beyond visual line of sight) Betrieb gibt. Basierend auf dieser Praxiserfahrung ist es notwendig, praktikable und sichere Lösungen anzubieten zu können, um beispielsweise Zulassungen für entsprechende BVLOS Flüge zu erlangen. Ohne ein solches Notfallnavigationssystem wäre ein sicherer UAS Betrieb in solchen Situationen nicht gewährleistet und riskant.

Der Lehrstuhl für Flugsystemdynamik an der Technischen Universität München ist aktiv in Forschungsbereichen wie Flugführung- und Regelung, Navigation, Datenfusion, Avionik und sicherheitskritische Systeme tätig. Das Institut verfügt über Erfahrung in der Entwicklung von Sensor- und Navigationssystemmodellen sowie in der Reglerauslegung für Transitions-UAS.

Ein Positionierungssystem auf Basis des Two-Way-Ranging-Konzepts mit Ultrawideband-Signalen wurde bereits von der TUM für Indoor- und Short Range Outdoor-Anwendungen entwickelt. Die Forschungsergebnisse des Instituts, insbesondere im Bereich der praktischen Anwendbarkeit, sollen in das geplante Vorhaben einfließen. Durch Kooperationsprojekte mit Partnern aus der Industrie hat TUM-FSD Erfahrung in der Umsetzung abstrakter Konzepte in funktionierende Anwendungen. Die vorhandene Infrastruktur umfasst Flugsimulatoren, (HIL)-Teststände, bemannte und unbemannte Flugzeuge, ein Inertiallabor zur Sensorkalibrierung und einen Multi-GNSS Space Segment Simulator.

Des Weiteren haben QS und der FSD-Lehrstuhl der TU München bereits in verschiedenen Projekten zusammengearbeitet, sowie einige QS Mitarbeiter bereits an dem Lehrstuhl gearbeitet und studiert. Die Arbeitsweise, sowie ein enges Netzwerk sind daher ebenfalls vorhanden und soll zusätzlich durch dieses Projekt gestärkt werden.

Im Rahmen dieses Vorhabens kann auf dem bereits bestehenden, von QS entwickeltes Navigationssystem, das auf GNSS Messungen basiert, zum Projektstart zurückgegriffen werden. Der Funktionsumfang des Navigationssystems beinhaltet, dass trotz Verlust von GNSS-Signalen die Bestimmung von Lagewinkeln, Geschwindigkeit und der Vertikalkomponente der Position weiterhin möglich sind. Aufgrund fehlender Korrekturen driftet die horizontale Positionsschätzung jedoch schnell von der wahren Position ab, sodass diese nicht mehr für eine

---

<sup>3</sup> <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/UAV-Projekte/medintime.html> - aufgerufen am 27.06.2024



automatische Flugführung verwendet werden kann. Das Autopilotensystem wird in diesem Vorhaben daher um entsprechende Softwarefunktionalitäten erweitert.

Der verwendete Datenlink von der US amerikanischen Firma Silvus Technologies, Inc.<sup>4</sup> ist bereits in allen Vector UAS verbaut und wird erfolgreich eingesetzt. Die benötigten Laufzeitinformationen der Datenpakete zwischen zwei Datenlinks ist Teil der offiziellen Silvus Datenlink Software und wird lediglich der Autopilotensoftware hinzugefügt.

### 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und Durchführung des Vorhabens erfolgt nach festgelegten Arbeitspaketen, die bereits in der Antragsphase definiert wurden. Die einzelnen Arbeitspakete werden in Abschnitt [2.1](#) genauer erläutert. Die Projektlaufzeit erstreckte sich auf ein Jahr von 12.12.2022 bis 31.12.2023 und wurde auf Nachfrage vom Projektträger um zwei Monate auf 29.2.2024 verlängert.

Die Veröffentlichung und Präsentation, des im Rahmen des Vorhabens verfassten Papers, „Analysis and Testing of Data Link Time of Flight measurements in Data Fusion Algorithms for Positioning of UAV“ fand im Zeitraum zwischen dem 8. und 12. Januar auf der AIAA SCITECH Konferenz in Orlando, FL statt (<https://doi.org/10.2514/6.2024-2796>).

Abschließende Flugtests wurden Ende Februar auf dem Testgelände von Quantum-Systems in Gilching durchgeführt. Dort haben sich alle Teilnehmer des Projektes inklusive Testpiloten zu einer Live-Demonstration getroffen und die verbesserten Navigationsfähigkeiten des Vector UAS von Quantum Systems erprobt.

In nachfolgender Abbildung ist das Gant Diagramm zu sehen, welches für die Projektplanung und für die Meilensteine zur Erfolgskontrolle verwendet wurde.

Entsprechende Meilensteine sind:

- M1 Definition der CONOPS
- M2 Definition der Missionsszenarien
- M3 Systemmodellierung und -analyse
- M4 Erstellung der Schnittstellenspezifikation
- M5 Implementierung der Navigationsalgorithmen
- M6 Gesamtsystemintegration, Validierung und Verifikation

---

<sup>4</sup> <https://silvustechnologies.com/> - aufgerufen am 12.06.2024

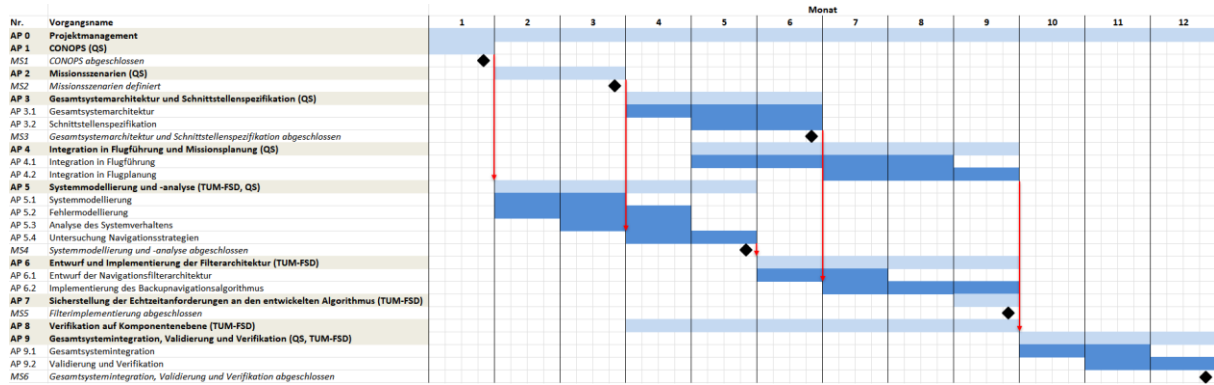


Abbildung 1: Gant Diagramm

Da sich während des Vorhabens abgezeichnet hat, dass die Integration einzelner Module in das QS-Navigationssystem früher begonnen werden kann als geplant, wurden vielversprechende Ansätze bereits von QS integriert. So konnte die Entwicklung und die Feedbackschleife zwischen QS und TUM engere Zyklen durchlaufen, was zu einer beschleunigten Entwicklung führte. Beispielsweise wurde der  $\chi$ -Quadrat-Test, welcher Laufzeit-Messfehler basierend auf der Zustandsänderung des Navigationssystems verwirft, oder eine DOP (engl. Dilution of Precision) Berechnung bereits deutlich früher erfolgreich in das QS Navigationssystem integriert. Dadurch konnten echte Daten gesammelt und die Subsysteme in mehreren realen Missionen erprobt werden. Der initial angestrebte Ansatz, ein komplett modulares und eigenständiges Navigationssystem zu entwickeln, wurde daher abgeändert.

Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit konnten durch dieses Vorgehen schneller Daten erhoben werden, Systeme frühzeitig getestet werden und ein pünktlicher Projektabschluss gewährleistet werden. Eine besonders enge Abstimmung, sowie der modulare Aufbau der Navigationsalgorithmen, hatten QS und TUM im Verbund dazu bewegt diesen Schritt zu gehen. Die engere Integration der entwickelten Module in das QS Navigationssystem haben außerdem den Vorteil, dass feingranularer zwischen verschiedenen Modis, wie zum Beispiel der Betrieb mit und ohne GNSS gewechselt werden kann, bzw. eine bessere Auswahl der zur Verfügung stehenden Datenlinks getroffen werden kann.

Seitens QS werden sehr schnelle und enge Iterationen bezüglich Firmware Updates gepflegt, sodass die Möglichkeit ergriffen wurde bereits frühzeitig die Systeme unter verschiedenen und realistischen Szenarien zu testen.

#### 1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

##### Vor dem Projekt

Vor dem Projekt zielten viele Publikationen auf die Stützung der Navigationslösung im Indoor-Bereich ab, da dort meist nicht auf GNSS zurückgegriffen werden kann. Hier wird unter anderem auf Kameras [7-9], UWB (Ultra-Wideband) [7] und WLAN [5] zurückgegriffen. Ebenso gibt es Untersuchungen zur Positionierung mit Bluetooth [6, 29, 30], allerdings zeigten diese Ansätze eine Zunahme des Messfehlers mit der Entfernung. Im Außenbereich wird meist auf zusätzliche, dedizierte Hardware im Bereich UWB [10-13], Radar [14, 15] oder auch Lidar [10, 16] zur präzisen Positionsbestimmung zurückgegriffen. UWB-Positionierung wurde zum Beispiel anhand eines am Spannseil befestigten Winddrachen zur Energiegewinnung erprobt [11].



Diese Untersuchung beschränkte sich allerdings auf kleinere Distanzen und Ortsgebundenheit. Ebenso die Positionsstützung zwischen UAVs wurde untersucht [2, 17, 18]. Dort stützen UAVs mit GNSS Empfang UAVs, welche kein GNSS besitzen. Allerdings wird hier wieder dedizierte Hardware zur präzisen Distanzmessung verwendet.

Bei größeren Systemen, wie in der kommerziellen Luftfahrt, wird ein GNSS-Ausfall meist mittels reiner Trägheitsnavigation kompensiert, was durch die hohe Sensorgüte der IMU (Inertial Measurement Unit) möglich ist. Bei kleineren Systemen kommt jedoch aus Kosten- und Gewichtsgründen meist MEMS-Sensorik ("Micro Electro Mechanical System") zu Einsatz, welche ohne zusätzliche Stützung sehr schnell von der wahren Position abdriftet.

Projekte, bei denen eine parallele Nutzung des Telemetriedatenlinks zu Positionierungszwecken für UAS als Notfallnavigationssystem verwendet wird, wurden nicht gefunden.

Der generelle Aufbau eines Navigationsalgorithmus war auf Seiten der TUM und Quantum Systems bereits bekannt, ebenso Messgleichungen zur Einbindung von Distanzmessungen zur Navigation. Diese mussten allerdings auf die Charakteristiken der Distanzmessungen des Datenlinks angepasst werden. Darüber hinaus war an der TUM keine Hardware zur Verwendung von Datenlinks als Navigationsstütze vorhanden.

## Angabe bekannter Konstruktionen

Es sind keine bekannten Konstruktionen ähnlicher Art bekannt.

## Verwendete Fachliteratur

Die Fachliteratur, die während des Projekts und beim Erarbeiten der Veröffentlichung verwendet wurde, befindet sich im [Anhang](#) unter.

## 1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Optimierung der Hardwarebeschaffungen wurde gemeinsam mit Broadcast-Solutions ein geschlossenes Datenlink-System, welches die Notfallnavigation ermöglicht, beschafft. Dieses kann für mehrere Systeme verwendet werden, da es zwei von Silvus integrierte Stationen mit Batterien für den Bodenbetrieb beinhaltet, sowie eine OEM-Version, welche Gewicht spart und bedarfsgerecht in ein UAS integriert werden kann.

Mit dem Datenlinkhersteller Silvus wurde ebenso häufig kommuniziert. Zu Beginn war allerdings die Bereitschaft Anpassungen an der Firmware vorzunehmen, um zusätzlich zur Distanz noch eine Richtung zwischen den Datenlinks herauszugeben, gering. Nach Veröffentlichung des, im Rahmen des Vorhabens erstellten, Papers wurde der Kontakt erneut seitens Silvus Technologies Inc. aufgenommen und bestätigt, dass diese Anpassung nun in den Entwicklungsplan aufgenommen wurde.

Darüber hinaus wurde ausschließlich mit Quantum und dem Lehrstuhl für Flugsystemdynamik zusammengearbeitet.



## 2. Eingehende Darstellung

Um die Zuordnung der Arbeiten zum jeweiligen Verbundpartner zu erleichtern, ist die eingehende Darstellung nach Arbeitspaketen aufgeteilt.

### 2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### AP0 Projektmanagement

Zu Beginn des Projekts übernahm QS hauptverantwortlich administrative Planungen und Abstimmungen zwischen den Verbundpartnern. Die initiale Planungsphase legte den Grundstein für das Vorhaben, wobei besonderes Augenmerk auf die Definition der Anforderungen und Ziele gelegt wurde. Seitens QS waren keine Neuanschaffungen notwendig, da ein Vector UAS jederzeit für Testzwecke zur Verfügung steht und Silvus-Datenlinks ohnehin verbaut sind.

Die TU München beschaffte im Rahmen dieses Projekts einen Silvus Datenlink, sodass sie jederzeit über einen eigenen Datenlink verfügen und eigenständig Tests durchführen können. Dabei musste aufgrund der Projektverzögerung und einhergehender Hardwarekostenerhöhung eine Umschichtung von Finanzpositionen beantragt werden. Ebenso wurde die Hardwarebeschaffung optimiert, sodass eine nachhaltige Nutzung möglich ist. Der beschaffte Datenlink ist somit so generisch und kann in künftigen Projekten wiederverwendet werden.

Des Weiteren wurde durch die TU München eine kostenneutrale Verlängerung beantragt, welche trotz der Verzögerung während der Hardwarebeschaffung die Präsentation von aussagekräftigen Zwischenergebnissen auf einer renommierten Konferenz ermöglichte.

Regelmäßige Abstimmungstermine zwischen der TU München und QS ermöglichten eine sorgfältige und strukturierte Vorgehensweise sowie eine hohe Reaktionsfähigkeit bei Problemen. Durch den häufigen Austausch konnte auch der Fortschritt des Projekts stetig überwacht und kontrolliert werden.

#### AP1 CONOPS

Die Erstellung der CONOPS (Concept of Operations) ermöglicht eine klare Definition der operativen Anwendung des Systems und dient als Systemspezifikation aus der Sicht künftiger Benutzer. Diese CONOPS liefern die grundlegenden Anforderungen an das zu entwickelnde System, welche erfüllt werden müssen. Dieses Arbeitspaket wurde überwiegend von QS bearbeitet, da diese über die notwendige Erfahrung, Kenntnis und Kontakt zu Kunden haben, die das System später verwenden und daher die Ziele und Vision des Projektes definieren können.

Das CONOPS definiert dabei, dass das Notfallnavigationssystem eine softwarebasierte Lösung ist, die das Navigationssystem von Quantum-Systems um entsprechende Funktionalitäten erweitert. Die Mindestanforderung an das System ist es mit einem Datenlink die Navigationsfähigkeit zu erhalten. Zusätzliche Datenlinks sollen die Robustheit und die Genauigkeit verbessern. Die Datenlinks sollen dabei vom Piloten frei platziert werden können.

Künftige Ausbaustufen sollen auch bewegte oder fliegende Datenlinks berücksichtigen können, sodass mehrere UAS gegenseitig Distanzinformationen austauschen. Das Notfallnavigationssystem bleibt zudem passiv, bis ein GNSS Ausfall erkannt wird und aktiviert sich dann von selbst.



Vor dem Flug soll der Pilot bereits bei der Missionsplanung für die Platzierung der Datenlinks unterstützt werden.

Die Erstellung der CONOPS ist der erste Meilenstein des Vorhabens.

## AP2 Missionsszenarien

Die Missionsszenarien wurden ebenfalls hauptsächlich von QS definiert, da diese über die Expertise verfügen wie die eigens entwickelten UAS eingesetzt werden können und sollen. Es kann dabei auf Kundendaten und Praxiserfahrungen zurückgegriffen werden. Die Missionsszenarien definieren klare Rahmenbedingungen für den realen Einsatz, z.B. welche Missionen später mit dem neu entwickelten Notfallnavigationssystem erfolgreich absolviert werden können sollen und welche nicht. Dabei wurde insbesondere darauf eingegangen, ob der GNSS Signalverlust nur teilweise oder während der gesamten Mission zu erwarten ist, und wie viele Datenlinks im oder um das Missionsgebiet verfügbar sind. Der Einsatz bewegter Datenlinks wird, aufgrund der kurzen Projektlaufzeit jedoch nicht tiefer behandelt, stellt aber insbesondere für künftige, im Schwarm operierenden UAS, eine Herausforderung und interessante Weiterentwicklungsmöglichkeit dar.

Mögliche, realistische Missionen, für die das Vector UAS ausgelegt ist, dauern zwischen 60 und 120 Minuten und haben einen bis drei Datenlinks zur Verfügung. Eine Randbedingung ist, dass mindestens ein Datenlink am Startpunkt aufgestellt wird, über den der Pilot das UAS steuern und überwachen kann.

Die Distanz zwischen Piloten und dem UAS kann abhängig von der Mission beträchtlich sein. Im Worst Case und bei exakt linear geplanter Mission, kann die Distanz bei einer Flugeschwindigkeit von 17m/s mehr als 50km betragen. In der Realität, je nach rechtlicher Lage, ist die Distanz zwischen UAS und Pilot auf einige hundert Meter bis wenige Kilometer beschränkt. Der Einsatz von einem bis drei Datenlinks ist hierfür ausreichend und realistisch. Prinzipiell soll das Navigationssystem bei jeder möglichen Mission ausreichend gut funktionieren, um das UAS sicher navigieren zu können.

Ebenfalls wurde zu Beginn des Projektes noch davon ausgegangen, dass Datenlinks Richtungsinformationen des Null-Steering Algorithmus zur Verfügung stellen können. Da, wie bereits eingangs erwähnt, sich nach Abstimmung mit Silvus Technologies Inc. herausgestellt hat, dass diese nicht verfügbar sind, und auch nicht zeitnah verfügbar sein werden, kann mit dem entwickelten Notfallnavigationssystem nicht alle definierten Anforderungen und Missionen berücksichtigt werden. Beispielsweise ist die exakte Positionierung mit nur einem Datenlink daher nicht möglich, die Erhaltung der Navigationsfähigkeit aber dennoch gewährleistet.

Die Definition der Missionsszenarien stellt den zweiten Meilenstein des Vorhabens dar.

## AP3 Gesamtsystemarchitektur und Schnittstellenspezifikation

Die Ausarbeitung der Gesamtsystemarchitektur und Schnittstellenspezifikation legte die technische Grundlage für einen modularen Aufbau des Systems sowie eine reibungslose Integration des zu entwickelnden Navigationssystems fest. Durch eine klare Definition der Schnittstellen zu Beginn des Projekts kann die Kompatibilität gegen Ende des Projekts gewährleistet werden.



Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass die TU München ein eigenständiges, externes Navigationsmodul entwickelt, welches das QS Navigationssystem ergänzt. Um jedoch die Entwicklung zu beschleunigen, vorab Daten sammeln zu können und feingranulare Modus Entscheidungen, sowie feinere Abstimmungen im Navigationssystem zu ermöglichen, wurde diese Architekturentscheidung im Verlauf des Projekts überarbeitet. Aus Architektursicht entschied man sich im Verbund für ein geringeres Abstraktionslevel und integrierte kleinere Module direkt in das QS Navigationssystem. Die grundlegenden Schnittstellen für den Datenaustausch blieben dennoch sehr ähnlich, da nur eine begrenzte Datenmenge vom Datenlink zur Verfügung steht und die Verarbeitung dieser weiterhin in modularen Systemen stattfindet.

Das Ende dieses Arbeitspaketes ist der vierte Meilenstein. Parallel wurde seitens TUM an der Systemmodellierung und -analyse gearbeitet, welche zeitlich früher fertiggestellt wurde, aber eine höhere Arbeitspaket-Nummer besitzt.

## AP4 Integration in Flugführung und Missionsplanung

Im Arbeitspaket "Integration in die Missionsplanung und -führung" wurde der Missionsplanungs- bzw. Trajektoriengenerator von QS so erweitert, dass gleichzeitig Missionen sowie eine unterschiedliche Anzahl von Datenlinks und Geometrien simuliert, getestet und verglichen werden können. Die Basis hierzu legte insbesondere die geometrische Analyse der möglichen Genauigkeit aus AP5 seitens der TU München. Die Möglichkeit, verschiedene Ansätze deterministisch zu vergleichen, erlaubt es bereits während der Simulation, den vielversprechendsten Ansatz auszuwählen. Eine gemeinsame Simulationsumgebung zwischen der TU München und QS hat eine nahtlose Integration der Software in die bestehenden Prozesse von QS ermöglicht. Der Trajektoriengenerator ist seitens TUM, als auch bei QS ein alltägliches Entwicklerwerkzeug mit dem verschiedenste Szenarien erstellt und getestet werden können. Beispielsweise können so in der Simulation BVLOS Missionen geflogen werden, welche einen erheblichen Aufwand zur Beantragung mit sich führen würde und daher in der Realität nicht oder nur sehr selten stattfinden.

Zudem werden während des Fluges in Echtzeit die Datenlink Positionen, sowie die jeweiligen Distanzen zum UAS in der QS eigenen Bodenkontrollsoftware angezeigt. Dies erleichtert zusätzlich die Navigation im Falle eines GNSS Signalverlusts.

## AP5 Systemmodellierung und -analyse

Der Fokus bei der Systemmodellierung und -analyse, welche parallel zu AP3 und AP4 seitens TU München bearbeitet wurde, war ein mathematisches Modell des Datenlinks zu entwickeln, welches in der Simulation verwendet werden kann. Dieses mathematische Modell ist dann je nach Entwicklungsstand in das Simulationsmodell aus AP4 integriert worden.

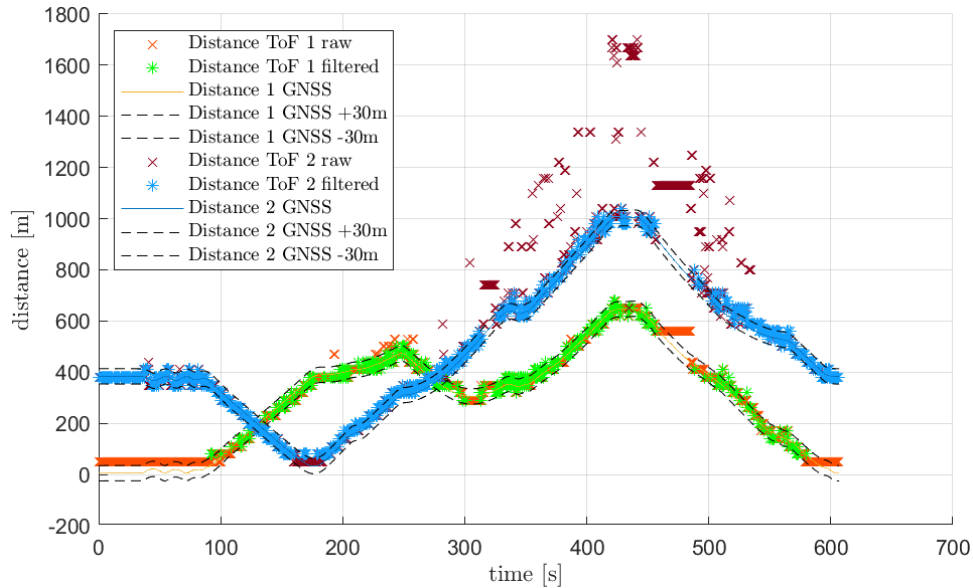


Abbildung 2: Exemplarische Aufnahme der Messdaten

Zu Beginn wurden mit dem erworbenen Silvus Datenlink zum Testen der ToF (Time of flight) Messungen Daten aufgezeichnet. Durch die Montage eines Datenlink auf einem Autodach wurden erste Daten gesammelt, die mit einem GNSS Receiver verglichen werden konnten. Mit diesem ersten Test konnten die Charakteristiken der Signale qualifiziert werden und entsprechende mathematische Modelle für die Simulation abgeleitet werden.

Die zwischen den Datenlinks empfangene ToF Messungen  $\tau$  werden zur Annäherung an direkte Entfernungsmessungen zwischen den Geräten verwendet. Die wichtigste Kennzahl in den Spezifikationen der Datenverbindung ist die Auflösung  $J_s$  bei 100 ns liegt. Zusammen mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  von 299792458 m/s liegt die räumliche Diskretisierung somit nahe 30 m. Bei Tests wurde ein konstanter Bias  $b_{TOF}$  von etwa 50 m beobachtet. Bei kleineren Entfernungen ist die Distanzmessung immer Null, sie beginnt mit einem Wert von 100 ns. Daraus ergibt sich eine Totzone von 80 m. Die angenäherte Entfernung  $d_{TOF}$  wird somit wie folgt berechnet:

$$d_{TOF} = J_s c \tau + b_{TOF}$$

Diese Daten stellen die Ausgangsbasis für die Parametrisierung der Simulation dar. (siehe Abb. 2)

Das entwickelte Simulationsmodell eines Datenlinks berechnet basierend auf vorgegebenen Bodenstationspositionen und einer simulierten Trajektorie eine perfekte Distanz. Diese perfekten Distanzmessungen wurden anschließend in ihrer Updaterate reduziert, Rauschen hinzugefügt, sowie die Totzone und ein Bias berücksichtigt. Diese Charakteristiken wurden parametrisierbar implementiert, sodass diese sehr einfach angepasst werden können. Die so erstellten Daten wurden als initiale Grundlage zur Implementierung des Navigationsalgorithmus verwendet.

Mittels der aufgezeichneten Daten konnte das Simulationsmodell um weitere, datenlinkspezifische Fehler erweitert werden. Beispielsweise waren zu den initial erwarteten Fehlern eine unregelmäßige Updaterate aufgefallen und teilweise Datenspikes zu sehen, insbesondere beim Betrieb von mehreren Datenlinks gleichzeitig.



Diese Fehler soll das Navigationssystem herausfiltern können, sodass die Positionslösung nicht divergiert. Entsprechende Filter für das Navigationssystem konnten daher mit den simulierten Daten entwickelt und parametrisiert werden, sowie anschließend in verschiedenen Simulationen überprüft werden. Der Fokus lag bei der Entwicklung bereits auf der Sicherstellung der Echtzeitanforderungen, sodass einige Modelle nicht auf absolute Genauigkeit, sondern vor allem auf Alltagstauglichkeit ausgelegt wurden. Damit wurde ein Kompromiss zwischen theoretischer Tiefe und Nutzbarkeit gefunden, denn das Navigationssystem muss unter harten Echtzeitbedingungen in der Realität funktionieren.

Mithilfe der zusätzlich zur ToF Messung verfügbaren "age" Ausgabe  $\zeta$ , welche die Zeit zwischen Messung und Ausgabe definiert konnte folgende Filterlogik implementiert werden:

$$\begin{aligned} \text{isDuplicate} &= (\zeta_{k-1} == \zeta_k) \ \& \ (\tau_{k-1} == \tau_k) \\ \text{isOld} &= \zeta_k > 0.3 \text{ s} \\ \text{isDeadband} &= \tau_k == 0 \\ \text{useToF} &= \neg \text{isDuplicate} \ \& \ \neg \text{isOld} \ \& \ \neg \text{isDeadband} \end{aligned}$$

Somit werden Messungen nur verarbeitet, wenn diese weder doppelt (erste Gleichung), alt (zweite Gleichung) oder außerhalb der Totzone liegen (dritte Gleichung).

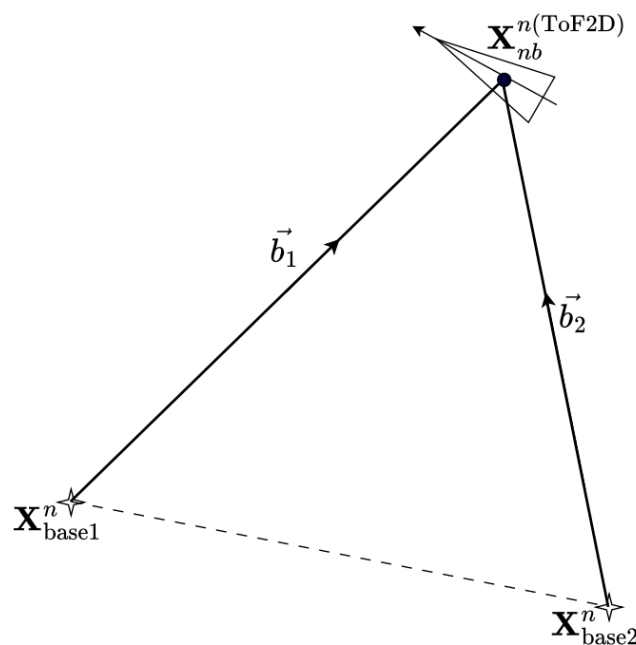
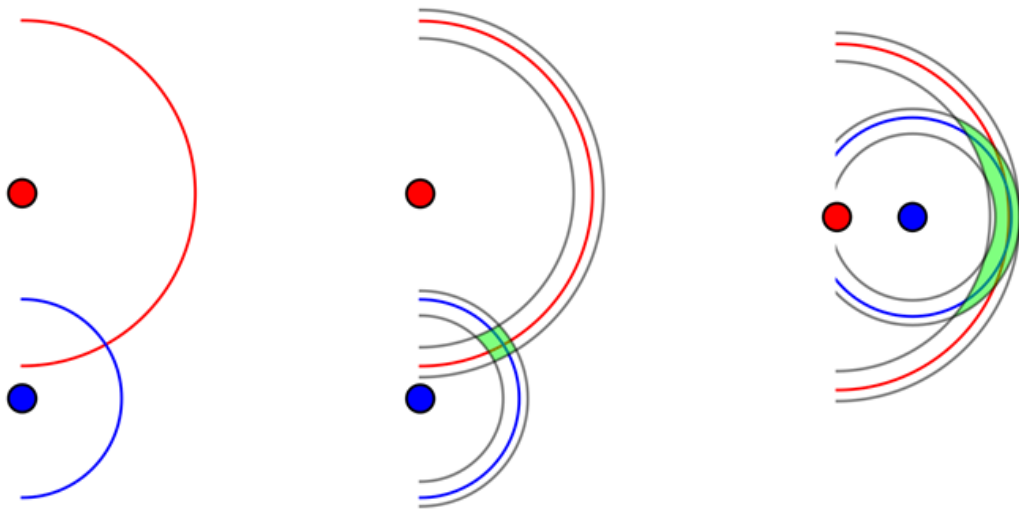


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Messgrößen

In Abb. 3 ist der grundlegende Aufbau der TU München abgebildet: Zwei Bodenstationen und ein UAS. Daraus resultieren zwei gemessene Distanzen  $\vec{b}_1$  und  $\vec{b}_2$ , welche zwei Kugeln aufspannen. Mittels der barometrischen Höhe, welche bereits im Navigationssystem vorhanden ist, kann das Problem auf eine 2D Lösung reduziert werden und es ergeben sich zwei Kreise. Diese haben zwei Schnittpunkte (Abb. 4 links), von denen einer logisch ausgeschlossen werden kann (z.B. am nächsten zur vorherigen Position).



Parallel zur Analyse der Messgrößen selbst wurde der Einfluss der relativen Positionierung der Bodenstationen und des UAS untersucht. Grundlage dafür ist die eingeschlossene Fläche zweier Annuli, welche anhand der 30m Diskretisierung, berechnet werden konnte.



Source: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dilution\\_of\\_precision\\_%28navigation%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_%28navigation%29)

Abbildung 4: Veranschaulichung der Abhängigkeit der möglichen Genauigkeit von der Geometrischen Anordnung der Datenlinks

Für alle Bodenstationen kann dabei für jede mögliche Position ein Kreis mit der zugehörigen Distanz zum UAS gezeichnet werden. Der Annulus ist durch die 30m Diskretisierung auf eine Distanz  $\pm 15\text{m}$  definiert (Abb. 4 Mitte). Die jeweiligen Annuli für die Bodenstation-Distanz-Kombination schließen dann eine Fläche ein, welche die mögliche Position des UAS abbildet. Je nach relativer Position zwischen Bodenstationen und UAS ergibt sich daraus eine unterschiedlich große Fläche (vgl. Abb. 4 Mitte und rechts).

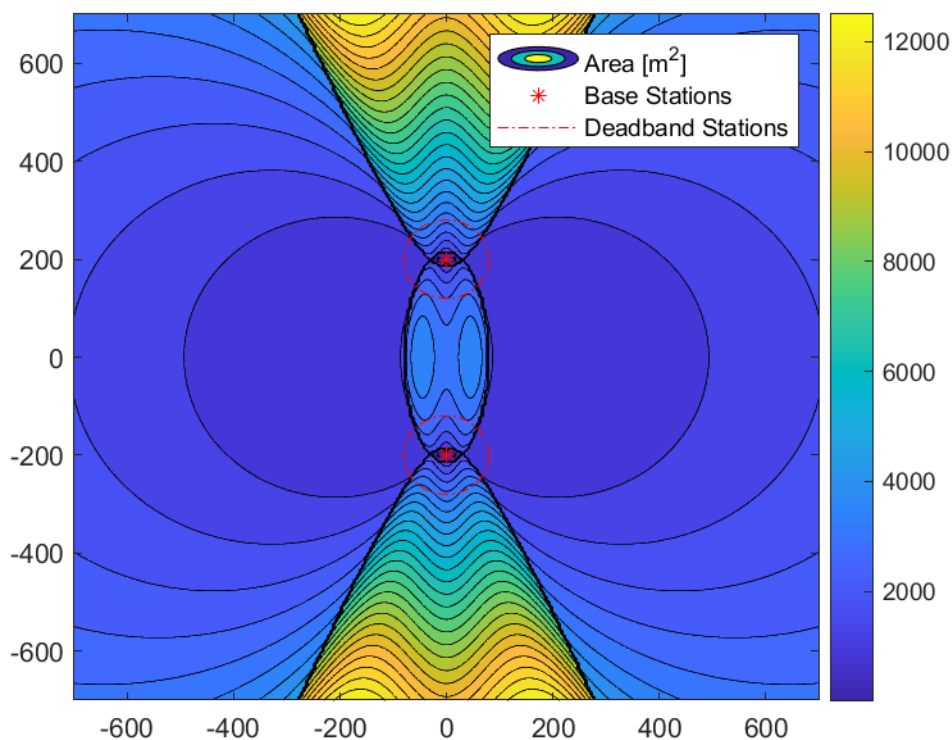


Abbildung 5: Geometrischer Einfluss auf die Positionsgenauigkeit zwei Stationen

In Abb. 5 ist exemplarisch eine solche Analyse basierend auf der eingeschlossenen Fläche dargestellt. Jeder Punkt auf der Karte steht dabei für die Größe der eingeschlossenen Fläche basierend auf den Annulli der Bodenstationen in Quadratmeter an diesem Punkt. Dabei wird eine höhere Genauigkeit senkrecht zu den Stationen deutlich (dunkelblaue Felder). Parallel dazu nimmt die Genauigkeit außerhalb der Stationen rapide ab (helle Felder). Dies deckt sich mit den Erwartungen, ersichtlich aus Abb. 4.

Mit einer dritten Bodenstation muss, bei guter Geometrie, im zweidimensionalen Fall der logische Ausschluss einer möglichen Position nicht mehr stattfinden, da das Gleichungssystem nicht mehr unterbestimmt ist. Des Weiteren konnte durch geometrische Analyse, wie auch mit zwei Bodenstationen, eine hohe Abhängigkeit der möglichen Genauigkeit von der Konstellation der Bodenstationen festgestellt werden.

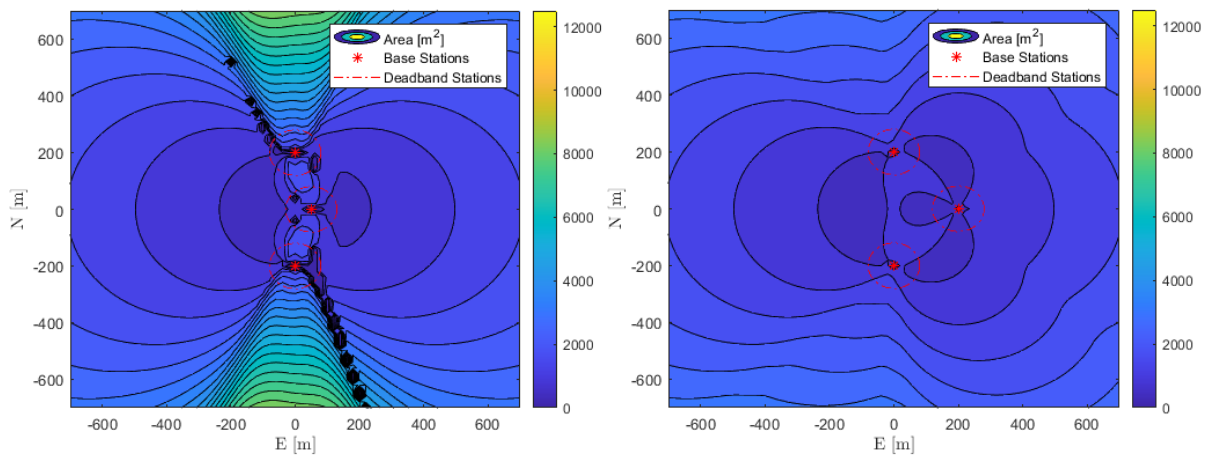


Abbildung 6: Geometrischer Einfluss auf die Positionsgenauigkeit drei Stationen

Zur Verdeutlichung werden in Abb. 6 zwei Konstellationen mit drei Bodenstationen verglichen. Die zwei äußeren Stationen in Nord-Richtung sind am selben Punkt platziert wie in Abb. 5. Zur Linken wird nun eine Station bei 0m in Nord-Richtung und 50m in Ost-Richtung platziert. Dies führt zwar zu einer Verbesserung gegenüber der ursprünglichen Konstellation, sehr ähnliche, schlechtere Genauigkeiten in der Flucht der Bodenstationen sind allerdings zu beobachten. In Abb. 6 zur Rechten wird nun eine Station bei 0m in Nord-Richtung und 200m in Ost-Richtung platziert. Hierbei kann eine deutliche Verbesserung der Positionsgenauigkeit, insbesondere in Nord/Süd-Richtung beobachtet werden.

Eine höhere Anzahl an Bodenstationen würde die Robustheit gegenüber Ausfällen und bei geometrisch günstig platzierten Stationen die Genauigkeit weiter erhöhen. Ebenso gäbe es die Möglichkeit zur Erkennung von falschen Messungen durch Mehrheitsbeschluss.

Zum Vergleich und Validierung der Methode der eingeschlossenen Flächen wurde mit der klassischen DOP-Berechnung (Dilution of Precision), bekannt aus der Satellitennavigation, gearbeitet. Dabei wird die Varianz der Vektoren verwendet, um ein Maß für den geometrischen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit zu erhalten. Der verwendete Wert der DOP-Berechnung ist HDOP (Horizontal Dilution of Precision), da das Problem auf die zwei Dimensionen der Horizontalen reduziert wurde. Beim Vergleich zeichnete die Analyse mittels der eingeschlossenen Fläche der Annulus in Grenzbereichen zwar mehr Details ab, war aber rechnerisch sehr



aufwendig. Daher wurde zur Berechnung während der Online-Navigation die DOP-Variante gewählt. Dieser Vergleich und weitere Szenarien wurden ebenso genauer betrachtet, hierbei wird auf die Veröffentlichung hingewiesen.

Die Ergebnisse zur erwarteten, geometrieabhängigen Genauigkeit, wurden ebenfalls in das vorher erwähnte Missionsplanungstool übernommen, sodass bereits zu Planungsbeginn die maximal erwartete Genauigkeit des Notfallnavigationssystems bestimmt werden kann. Ebenso kann somit schon vor Flugbeginn die Platzierung der Bodenstationen optimiert werden.

Der Abschluss dieses Arbeitspaketes stellt den dritten Meilenstein dar.

## AP6 Entwurf und Implementierung der Filterarchitektur

Ein kaskadischer error-state Kalman Filter wurde für die Navigation verwendet. Um die Komplexität zu reduzieren, wurden als Zustände Position, Höhe und Geschwindigkeit gewählt, die Lage (Gier-, Nick- und Rollwinkel) wurden direkt vom nativen Navigationssystem übernommen. Diese Architektur ist in Abb. 7 dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert. Genauere mathematische Formulierungen können der Veröffentlichung entnommen werden, eine allgemeine Beschreibung wird in diesem Bericht eingebracht.

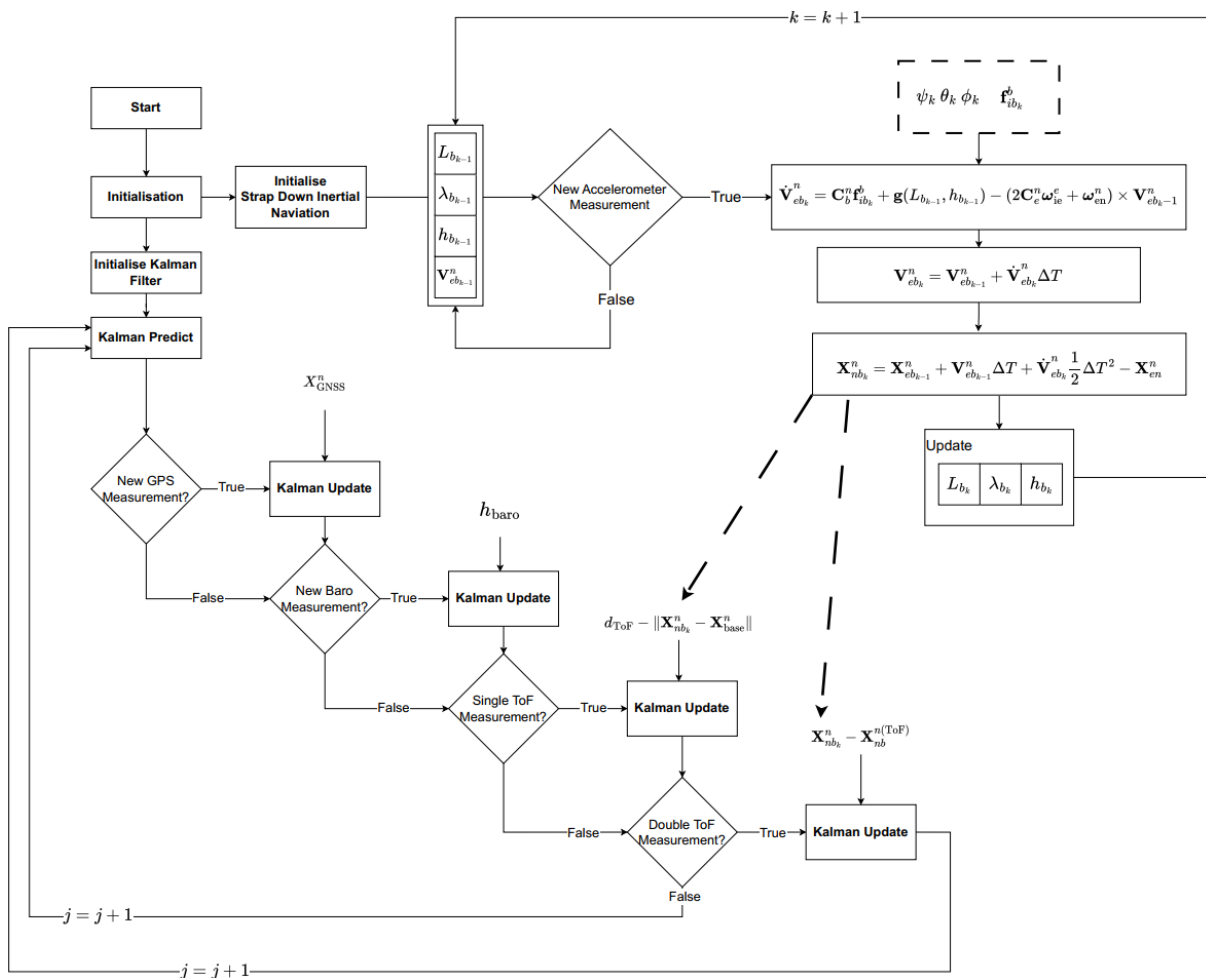


Abbildung 7: Navigationsfilter Flowchart



Zunächst wird der Filter initialisiert (Abb. 7 links oben), wobei zur initialen Positionsbestimmung die GNSS Position verwendet wird. Die initiale Position des UAS und der Bodenstationen können aber auch manuell bestimmt werden, indem der Pilot die Position über eine Karte ermittelt.

Ist in einem Navigationsschritt eine neue Beschleunigungsmessung vorhanden wird diese mittels einer Strapdown-Rechnung in eine Geschwindigkeit und Position überführt (Abb. 7 oben Mitte/Rechts). Dies bildet die Grundlage des Filters. Da jedoch alle Beschleunigungsmessungen fehlerbehaftet sind und zusätzlich zweifach integriert werden müssen, um von Beschleunigung auf Position zu kommen, wächst der Positionsfehler quadratisch zum ursprünglichen Beschleunigungsmessfehler. Zusammen mit der erwähnten Ungenauigkeit der verwendeten MEMS-Sensoren ist eine Stützung der Position unbedingt notwendig.

Um den Fehleraufbau zu schätzen, wird zunächst eine Kalman Prädiktion durchgeführt (Abb. 7 links Mitte). Bei jedem Filterzyklus wird danach kaskadisch geprüft, ob eine Stützmessung zum jetzigen Zeitpunkt vorhanden ist (Abb. 7 links unten/Mitte). Wenn dies der Fall ist, wird damit ein jeweiliges Kalman Update durchgeführt. Zum Beispiel kann der Positionsfehler reduziert werden, indem eine GNSS Messung den Positionszustand aktualisiert. In diesem Filter werden GNSS, Barometer und Tof Messungen verwendet. GNSS wird allerdings ausschließlich initial verwendet. Die Tof Messungen können auf zwei Arten eingebunden werden: zum einen durch Linearisierung jeder Messung separat und zum anderen kombiniert als direktes, Filterunabhängiges Positionsupdate. Wenn die letzten Tof Messungen der jeweiligen Bodenstation und dem UAS zeitlich weiter als 0,5s auseinander liegen werden die Messungen separat linearisiert und eingebunden. Wenn diese allerdings zeitlich näher beieinander liegen, kann daraus direkt eine Position mittels einer Schnittpunktbestimmung der beiden Kreise ermittelt werden und so eingebunden werden. Damit ist dies eine filterunabhängige Positionslösung, welche den Navigationsfilter robuster gegenüber Fehlern macht.

Abb. 7 stellt die Filterarchitektur für die Erprobung mittels eines Hexacopters der TUM dar. Bei den Starrflüglern von Quantum-Systems ist zusätzlich noch ein Pitot-Rohr zur Messung der Luftgeschwindigkeit vorhanden. Dabei kommt zur Kalman-Filter Kaskade eine weiterer Updateschritt hinzu, welcher die Geschwindigkeit aktualisiert. Somit kann als weiterer Zustand der Wind geschätzt werden, was die Güte der Navigation weiter erhöht.

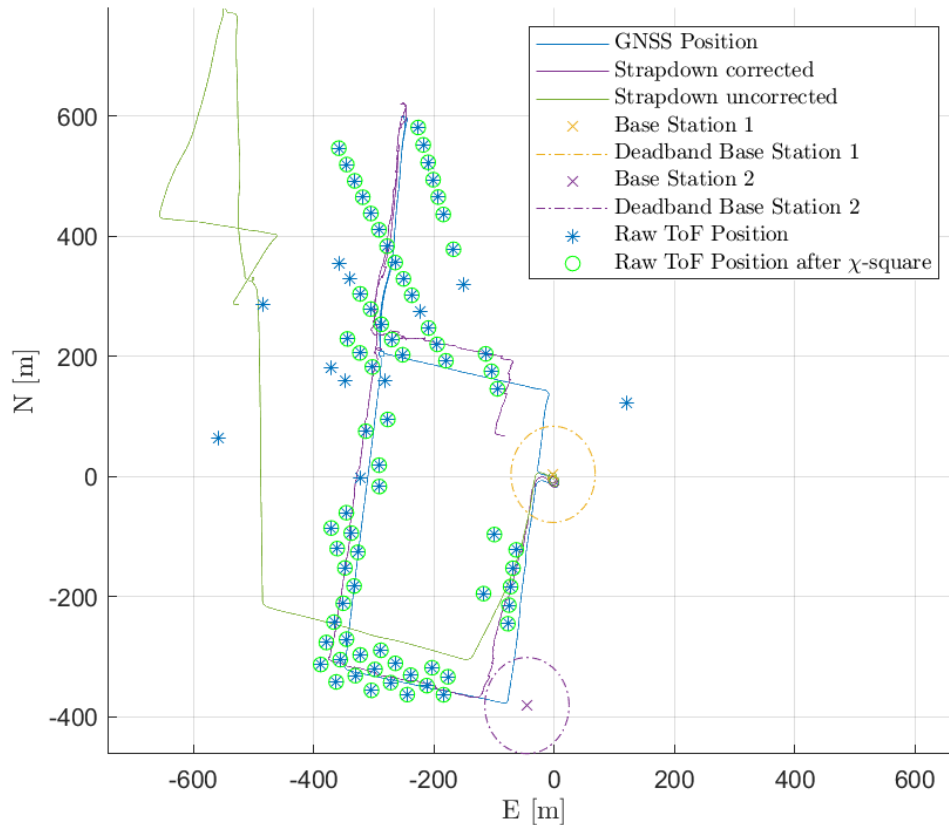


Abbildung 8: Geometrischer Einfluss auf die Positionsgenauigkeit

In Abb. 8 ist ein Testfall des Hexacopters in einer Nord-Ost-Ebene dargestellt. GNSS wurde hier nach 30 s deaktiviert. Als Referenz ist die GNSS-Position im NED-Koordinatensystem (North, East, Down) dargestellt (blau). Überlagernd in lila ist die durch den Kalman-Filter fehlerzustandskorrigierte Strapdown Position dargestellt. Die ersten 30 Sekunden werden durch GNSS gestützt, danach werden nur noch ToF Messungen und die Barometerhöhe verwendet. Die frei integrierende Strapdown Berechnung ist in grün dargestellt. Die beiden in diesem Lauf verwendeten Basisstationen sind mit ihrem jeweiligen Deadband von 80 m dargestellt. Die geometrische 2D ToF Position basierend auf gefilterten Entfernungsmessungen ist als '\*' dargestellt, die ToF Messungen, die auch vom  $\chi$ -Quadrat-Test akzeptiert wurden, sind mit einem zusätzlichen, grünen Kreis 'O' dargestellt. Der  $\chi$ -Quadrat-Test überprüft, ob die aktuelle Messung stark von der zu erwartenden Messung abweicht.

In dieser Darstellung wird die grobe Natur der ToF Messungen bei der direkten Positionsbestimmung durch die große Streuung der berechneten Positionen sichtbar. Obwohl alle bereits genannten Filterkriterien erfüllt sind, sind einige Positionen aufgrund des Einflusses der Geometrie wesentlich weiter als die 30 m Diskretisierung von der wahren Position entfernt. Daher filtert der  $\chi$ -Quadrat-Test zusätzlich zu den logischen Filterkriterien einige der falschen Positionsupdates heraus. Die Kombination aus der Integration der einzelnen ToF Messungen durch die linearisierte Beobachtungsgleichung und die direkte Positionsaktualisierung aus einer rein geometrisch bestimmten Position, ergänzen sich gegenseitig, da die geometrische Lösung keinen Linearisierungsfehler aufweist und nicht von den Filterzuständen abhängt. Der linearisierte Ansatz kann Messungen verarbeiten, die zeitlich zu weit auseinander liegen, und dennoch eine gültige Position bilden. Ohne Verwendung der rein geometrischen Position und nur unter Verwendung des linearisierten Ansatzes beträgt die endgültige Entfernung zum Endpunkt 153,6 m, während bei zusätzlicher Verwendung der rein geometrischen



Positionsberechnung das Experiment in einer Entfernung von 105,28 m endet. Dieses Experiment dient vor allem dem Vergleich verschiedener Ansätze.

## AP7 Sicherstellung der Echtzeitanforderungen an den entwickelten Algorithmus

Die Sicherstellung der Echtzeitanforderungen des erweiterten Navigationssystems wurde seitens QS übernommen, da die komplette Autopilotenentwicklung und -integration von QS durchgeführt wird. Echtzeit- und Speicheranforderungen werden automatisiert vor jedem Softwareupdate der Quantum-Systems UAS durchgeführt. Da, wie bereits erwähnt, ein realitätsnaher Modellierungsansatz verfolgt wurde, gab es in diesem Arbeitspaket keine Probleme und Änderungen am System.

Seitens der TUM wurde bei der Entwicklung der Navigationsfilters darauf geachtet möglichst ressourcenschonende Methoden zu verwenden.

Am Ende dieses Arbeitspaket ist der fünfte und vorletzte Meilenstein des Vorhabens erreicht.

## AP8 Verifikation auf Komponentenebene

Durch den Modularen Aufbau der Softwaresysteme, sind diese atomar testbar, sodass die Subkomponenten bereits vor Auslieferung auf die korrekte Funktion geprüft werden können. Ebenfalls wurden seitens TUM verschiedene Test- und Referenzmissionen erstellt, sodass die Algorithmen einzeln oder im Verbund getestet werden können.

Es wurde ebenfalls seitens TUM eine Testumgebung eingerichtet, um unabhängig Messdaten am realen System zu sammeln und den Navigationsfilter weiterzuentwickeln. Dazu wurde der am Lehrstuhl bereits vorhandenem Hexacopter um einen zusätzlichen Pixhawk 6x mit einem Raspberry Pi Command Module 4 (CM4) als Companion-Computer, sowie ein Silvus-Datenlink erweitert (siehe Abb. 9).

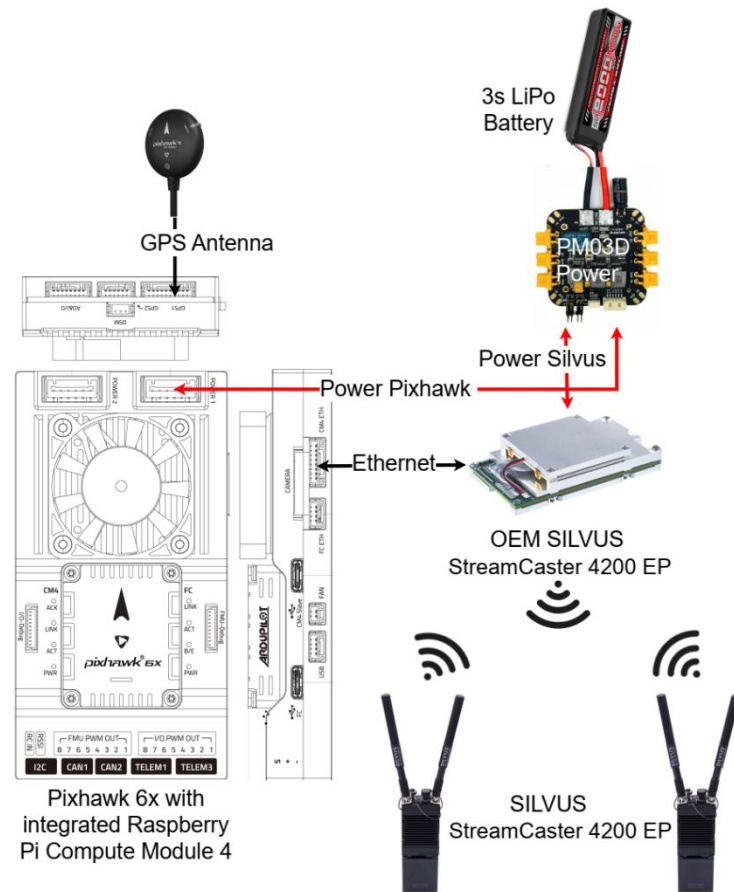


Abbildung 9: Messdatenaufnahmesystem TUM

Mit diesem System konnten mittels Pixhawk Beschleunigungs-, Barometer- und GNSS Daten gesammelt werden, welche an den Raspberry Pi CM4 geschickt wurden. Dieser liest ebenso die ToF Daten der Silvus Verbindungen aus. Alle Daten werden in ein Logfile geschrieben, sodass mit den gesammelten Daten der Algorithmus kontinuierlich getestet und verbessert werden konnte. Ebenso wurde das Sensormodell mit den gesammelten Daten verbessert. Der Hexacopter hatte hierbei durchweg GNSS Empfang und der Navigations-Loop wurde nicht geschlossen. Dadurch konnte mit diesem Aufbau Daten für die Filterentwicklung gesammelt werden und gleichzeitig eine Referenztrajektorie aufgenommen werden.

Künftige Weiterentwicklungen sehen vor den Filter online auf dem Raspberry Pi CM4 parallel zum Pixhawk-internen Navigationssystem auszuführen und entweder per Kommando oder bei echtem GNSS Verlust die Navigationslösung im Pixhawk mit der des Rasperrys zu überschreiben.

## AP9 Gesamtsystemintegration, Validierung und Verifikation

Die abschließende Phase umfasste die Validierung und Verifikation des Gesamtsystems, um sicherzustellen, dass es den definierten Anforderungen entspricht. Einige definierte Anforderungen, wie zum Beispiel die exakte Positionierung mit einem Datenlink, konnten abschließend nicht erfüllt werden, da die dafür benötigten Richtungsinformationen vom Datenlink nicht zur Verfügung stehen. Entsprechende Tests konnten daher nur in Simulationen durchgeführt werden, aber nicht unter realen Bedingungen.



Die in AP3 beschriebene Änderung der Architektur ermöglichte bereits früher als geplant Komponententests unter realen Einsatzszenarien durchzuführen, vorab Daten zu sammeln und auszuwerten. Daher gab es beim Abschluss des Projektes keine weiteren Verzögerungen oder Abweichungen. Ein gemeinsamer Testflug mit mehreren Datenlinks, sowie mit einem simulierten GNSS Ausfall wurden von erfahrenen Piloten von Quantum-Systems erfolgreich durchgeführt. Die Genauigkeiten und Funktionalität des Systems waren erwartungsgemäß gut und ermöglichte das QS UAS komplett ohne GNSS zu betreiben und erfolgreich zur Startposition zurückkehren zu lassen.

Die folgende Abbildung zeigt eine Beispielstrajektorie eines Fluges, welche im Rahmen der abschließenden Tests geflogen wurde. Magentafarbene Markierungen zeigen die Positionen der verwendeten Datenlinks, die magentafarbene Zahl ist die entsprechende Datenlink ID. Grüne Linien symbolisieren Phasen in der Trajektorie, in denen das Flugzeug ohne GNSS geflogen ist, gelbe und blaue Linien sind Phasen in denen GNSS in der Datenfusion verwendet wird. Die hellblaue Linie stellt die GNSS Referenztrajektorie dar, die aufgezeichnet wurde, aber nur zweitweise, beim Flug mit GNSS, in die Navigationslösung eingeflossen ist.

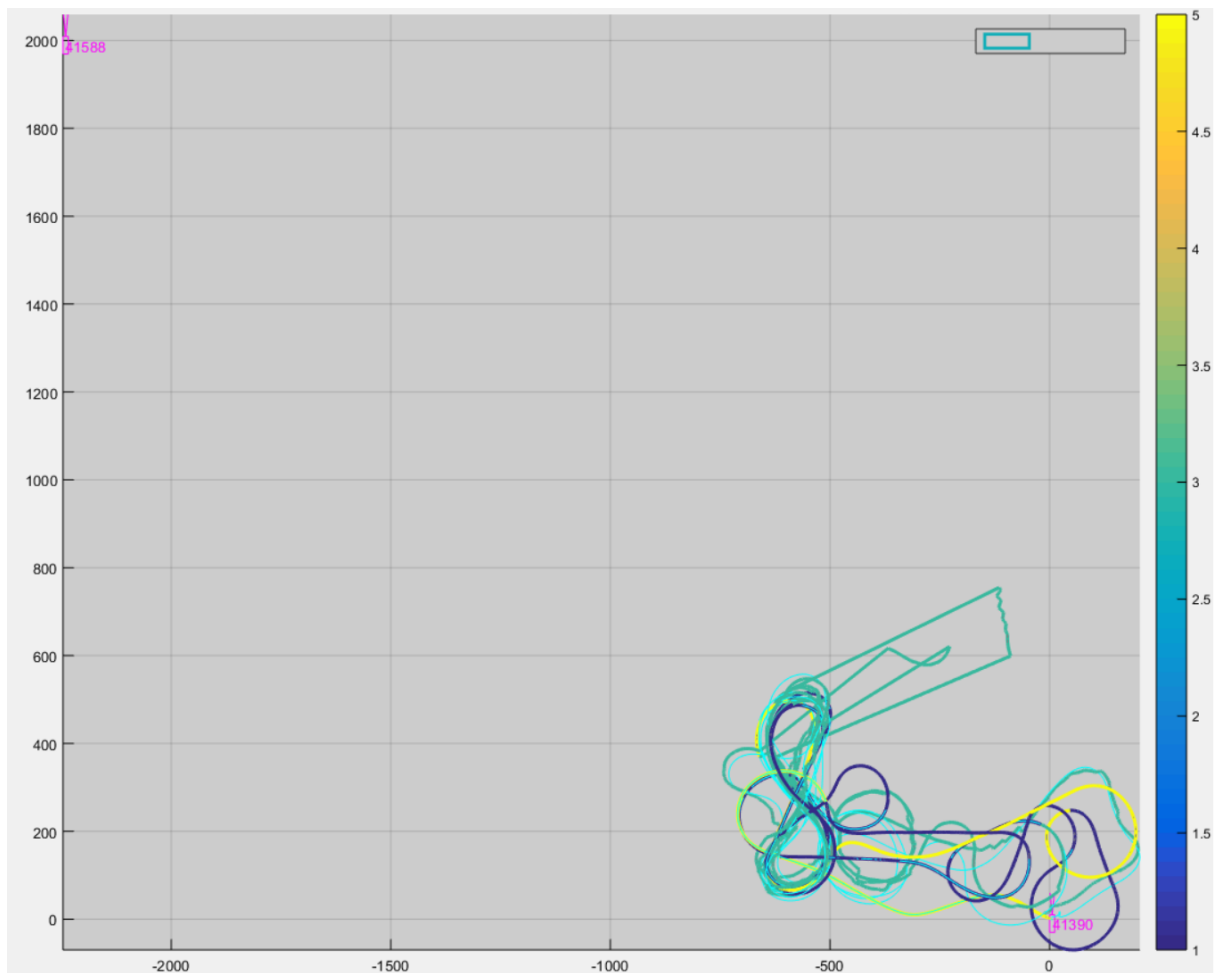


Abbildung 10: Testflug mit wechselndem GNSS Empfang

Die nachfolgende Abbildung zeigt den horizontalen Positionsfehler für die geflogene Mission. Blaue Linien entsprechen dem Positionsfehler, rote Linien entsprechen der Kovarianz. Es ist zu erkennen, dass aufgrund der guten Geometrie der beiden Datenlinks zum Flugzeug die Position sehr gut bestimmt werden kann. Der Positionsfehler, welcher anhand der GNSS



Daten bestimmt wird, ist nahezu immer unter 50m. Entsprechende Ausreißer wurden durch manuelle Positionsupdates, welche den Navigationsfilter Zustand mit einer externen Position überschreiben, (selbe Ausreißer sind in der Trajektorie zu sehen) verursacht und stellten einen Test dar.

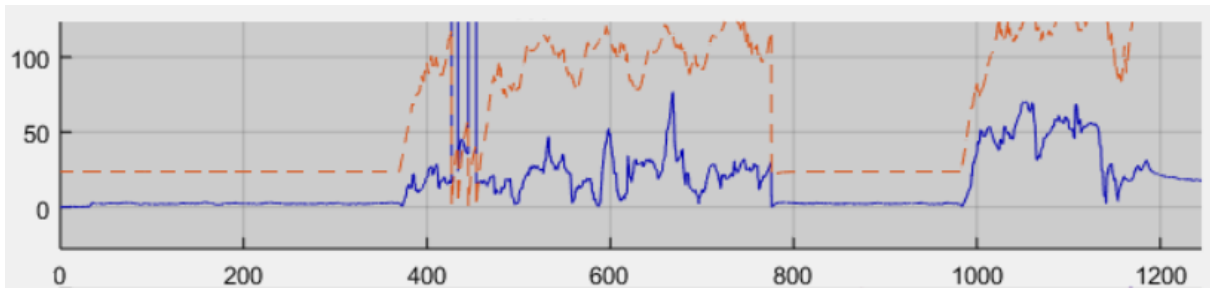


Abbildung 11: Horizontaler Positionsfehler

Die nachfolgende Abbildung zeigt die jeweiligen Distanzen zwischen Flugzeug und Bodenstationen. Die IDs sind äquivalent zur vorherigen Abbildung. Die dargestellten Distanzen sind zweidimensional und entsprechen daher der horizontalen Distanz zwischen Datenlink und UAS. Blaue Linien stellen die vom Navigationsfilter berechnete Distanz dar, rote Linien die vom Datenlink gemessene Distanz. In der dritten Reihe ist die DOP Berechnung zu sehen, welche Auskunft über die Qualität der Geometrie liefert.

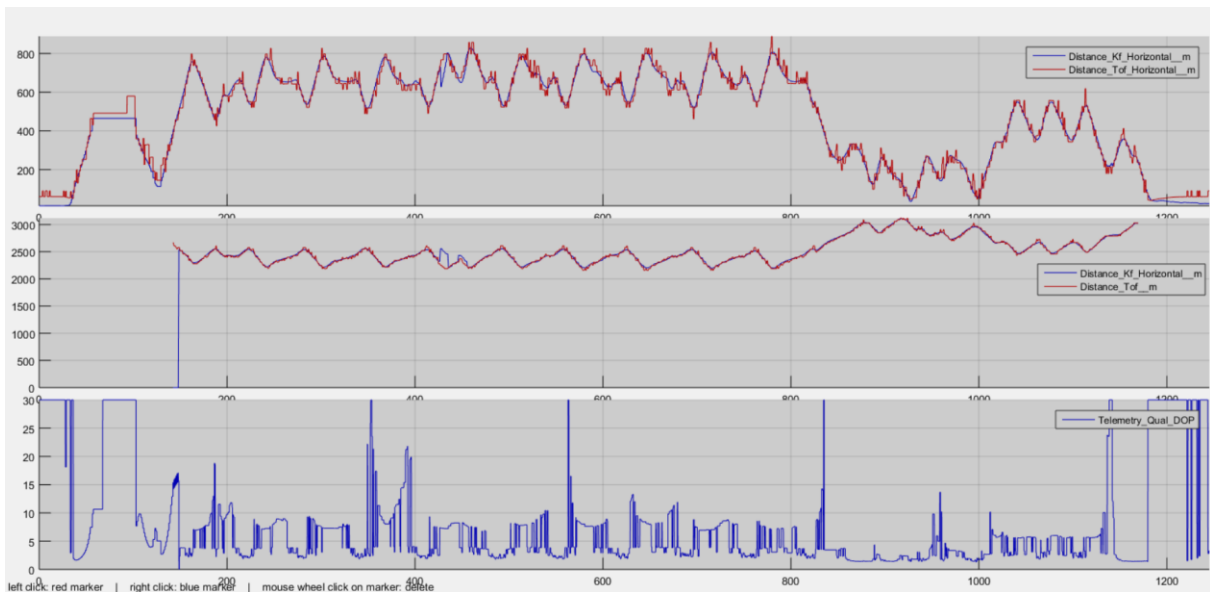


Abbildung 12: Vergleich der berechneten Distanzen

Mit Abschluss der letzten Testflüge, und somit auch das Ende dieses Arbeitspaketes wurde der letzte Meilenstein und das Ende des Vorhabens erreicht.

## 2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

### Quantum Systems

Die Finanzierungs- und Zeitplanungen wurden weitestgehend eingehalten. Die einzelnen Positionen wurden zweckentsprechend und sparsam verwendet. Die wesentliche Kostenposition für das Projekt stellt Personalkosten (0837) dar. Da auf Seitens QS auf bereits existierende



Hardware zurückgegriffen werden konnte, musste keine neue Hardware beschafft werden, sodass die geplanten Materialkosten von 0€ eingehalten werden konnten.

## TU München

Die wesentlichen Kostenpositionen auf TUM-Seite sind die Personalkosten, sowie die Kosten für die Beschaffung der Datenlinkhardware und deren Integration in den vorhandenen Hexacopter. Darüber hinaus wurde die Dienstreise zur Paper Präsentation auf der Konferenz getilgt. Die Finanz- und Zeitpläne wurden hierbei unter Einbeziehung der gewährten Verlängerung, sowie gewährten Verschiebungen innerhalb der Finanzpositionen eingehalten. Die einzelnen Positionen wurden zweckentsprechend und sparsam verwendet.

### 2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

GNSS Ausfälle, sei es durch gezielte Störungen oder unbeabsichtigte Interferenzen, führen regelmäßig zu Navigationsproblemen. Dies stellt eine ernsthafte Bedrohung für hochautomatisierte UAS dar, da sie ihre Mission möglicherweise nicht erfolgreich abschließen können oder im schlimmsten Fall abstürzen. Das Projekt reagiert gezielt auf diese Herausforderungen und verbessert die Robustheit von UAS gegenüber GNSS Ausfällen.

Es wird daher nicht nur die Möglichkeit geschaffen, UAS einfacher zuzulassen und diese automatisiert und außerhalb der Sichtweite zu betreiben, sondern auch grundlegend die Sicherheit des UAS Betriebs erhöht. In Situationen, in denen UAS außer Kontrolle geraten können, besteht die potenzielle Gefahr, dass sie unvorhersehbar agieren und möglicherweise Gefahren für Menschen und Eigentum darstellen.

Die geleistete Arbeit ist angemessen, da sie nicht nur auf die Identifizierung von Problemen abzielt, sondern konkrete Lösungen in Form eines robusten und innovativen Navigationssystems liefert. Die Implementierung des Systems stellt einen technologischen Fortschritt dar, der die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit autonomer Flugsysteme verbessert. Das Projekt DaNoNav legt somit einen soliden Grundstein für den Betrieb autonomer Flugsysteme, die eine unverzichtbare Rolle in der modernen Luftfahrt spielen.

### 2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Projektzwischenenergebnisse konnten auf einer Konferenz vorgestellt werden. Dadurch wurde der Hersteller des verwendeten Datenlinks aufmerksam, was ein Nachfolgeprojekt erwirken könnte. Bei vorherigen Anfragen an Vertreter und Hersteller des Datenlinks konnte keine erweiterte Kooperation eingegangen werden. Durch dieses Projekt mit der einhergehenden Veröffentlichung ist nun auch dem Hersteller das Potential der bereitgestellten ToF Messung bekannt. Es wird nun von Herstellerseite geprüft, ob genauere oder weitere Messungen wie die ursprünglich erwartete Peilungsinformation bereitgestellt werden können.

Im Rahmen des Projekts wurde am Lehrstuhl eine Testumgebung zur Verwendung des Datenlinks im Flug, sowie der Einbindung dessen Messdaten eingerichtet und verwendet. Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend und werden weiterverfolgt. Der Datenlink wird



ebenso in einem weiteren Projekt verwendet, bei dem entsprechende ToF Daten gesammelt werden und nun zur Verfügung gestellt werden können.

Ebenfalls wurde ein Forschungspraktikum durchgeführt, in dem die geometrische Analyse, wie sie im Paper zu finden ist, bearbeitet wurde.

Seitens QS ist zu erwarten, dass künftige Zulassungen für BVLOS (Test-)Flüge einfacher erhalten werden können, sowie Kunden die Möglichkeit haben diese erleichtert zu bekommen. Zudem wird der Betrieb hochautomatisierter UAS sicherer, da auf ein betreiber autonomes Datenlinknetzwerk zurückgegriffen werden kann, das insbesondere bei GNSS Signalverlust den sicheren Betrieb von UAS gewährleistet. Besonders in Gebieten mit schlechten GNSS Empfang kann dies einen sicheren Betrieb von UAS überhaupt erst möglich machen.

Ein hoher Grad an Anpassungsfähigkeit gegenüber den Fortschritten in den Bereichen der Automatisierung ist entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit und kann nur durch kontinuierliche Anpassung und Integration neuer Technologien sichergestellt werden.

Die Ergebnisse und Erfahrungen des Projektes sollen in weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, sowohl seitens TUM als auch QS eingebracht werden. Der Einsatz von Richtungsinformationen, welche ggf. in künftigen Silvus Firmware Versionen zur Verfügung stehen könnten, oder auch der Einsatz bewegter Datenlinks eignet sich daher hervorragend für die Weiterentwicklung des Navigationssystems

## 2.5. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bereich der Notfallnavigation mithilfe von datenlinkbasierten Distanzmessungen ist kein weiterer Fortschritt bekannt.

## 2.6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Konferenz-Papers bei der "SCITECH" der AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) im Januar 2024 vorgestellt. Unter dem Titel "Analysis and Testing of Data Link Time of Flight measurements in Data Fusion Algorithms for Positioning of UAV" (<https://doi.org/10.2514/6.2024-2796>) wurde neben der Veröffentlichung auch eine Präsentation gehalten. Daraus resultierend wurde der Datenlinkhersteller Silvus Technologies Inc. auf die Möglichkeiten der ToF Messungen aufmerksam und es wurde Kontakt direkt zum Vice President of Engineering hergestellt. Dieser versprach die Ausgabe von Bearing-Informationen in den Entwicklungsplan mit aufzunehmen. Ebenso konnte dieser hilfreiche Anregungen geben, wie beispielsweise die Datenrate des Datenlinks zu erhöhen, um höherfrequente ToF Messungen zu erhalten.



## Anhang

### 2.7. Open Data

Die gesammelten Daten der TUM sind zur Bereitstellung als Open-Data geeignet, da diese im Rahmen des Projektes und ohne Dritte gesammelt wurden. Ebenso sind Teile der Daten schon in Form einer Veröffentlichung publiziert.



## 2.8. Einfluss auf das Specific Operational Risk Assessment (SORA)

Das Specific Operational Risk Assessment ist ein wesentlicher Bestandteil des Genehmigungsprozesses für BVLOS Flüge. SORA bewertet die Risiken, die mit dem Betrieb von UAS verbunden sind, und stellt sicher, dass geeignete Maßnahmen zur Risikominderung getroffen werden. Der Einsatz des entwickelten Notfallnavigationssystems hat mehrere positive Auswirkungen auf die SORA-Bewertung:

1. **Reduzierung des Risikos:** Das Notfallnavigationssystem ermöglicht es UAS, auch bei einem GNSS Ausfall zu navigieren. Dies reduziert das Risiko von Navigationsfehlern erheblich, was ein zentraler Faktor in der SORA-Bewertung ist. Eine niedrigere Risikobewertung erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Genehmigung für BVLOS-Flüge.
2. **Erhöhung der Sicherheit:** Durch die Integration redundanter, betreiberautonomer Navigationssysteme wird die Ausfallsicherheit insgesamt reduziert. Ein sicherer Betrieb, während GNSS Ausfällen zeigt, dass das UAS robust und zuverlässig in Notfallsituationen ist, was regulatorische Behörden bei ihrer Entscheidungsfindung positiv beeinflusst.
3. **Verbesserte Risikominderung:** Das Notfallnavigationssystem bietet eine wirksame Risikominderungsmaßnahme, die im Rahmen von SORA berücksichtigt wird. Die Fähigkeit, auch bei GNSS Störungen sicher operieren zu können, zeigt, dass potenzielle Gefahren proaktiv und effektiv adressiert werden.
4. **Erfüllung regulatorischer Anforderungen:** Die Fähigkeit, alternative Navigationsmethoden im Falle eines GNSS Ausfalls nutzen zu können, entspricht den Erwartungen und Anforderungen vieler Luftfahrtbehörden weltweit. Dies erleichtert die Erfüllung der Vorschriften und erhöht die Akzeptanz des UAS.
5. **Nachweis der technischen Reife:** Die erfolgreiche Entwicklung, Integration, sowie absolvierte Testflüge des Notfallnavigationssystems unter realen Bedingungen zeigen die technische Reife und Zuverlässigkeit des Systems. Dies kann in der SORA Bewertung als Beleg für die Stabilität und Robustheit der technischen Lösung verwendet werden.

Das entwickelte Notfallnavigationssystem stellt einen bedeutenden Fortschritt in der sicheren Durchführung von hochautomatisierten BVLOS Flügen dar. Risiken, die durch einen GNSS Ausfall entstehen, werden effektiv reduziert und die Sicherheit erheblich verbessert. Diese Eigenschaften tragen wesentlich dazu bei, die Anforderungen des SORA zu erfüllen und die Genehmigung von BVLOS Flügen zu erleichtern. Durch die Bereitstellung einer zuverlässigen und robusten Lösung wird der Weg für die weitreichende Nutzung von UAS in verschiedenen Branchen geebnet, was langfristig zu einem sichereren und effizienteren Luftverkehr beiträgt.



## 2.9. Literaturverzeichnis

- [1] Yuan, Y., Shen, F., and Xu, D., "Multipath modeling and mitigation by using sparse estimation in global navigation satellite system-challenged urban vehicular environments," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 17, No. 5, 2020. <https://doi.org/10.1177/1729881420968696>.
- [2] Mao, G., Drake, S., and Anderson, B. D. O., "Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization," *2007 Information, Decision and Control*, 2007, pp. 224–229. <https://doi.org/10.1109/IDC.2007.374554>.
- [3] Matos-Carvalho, J. P., Santos, R., Tomic, S., and Beko, M., "GTRS-Based Algorithm for UAV Navigation in Indoor Environments Employing Range Measurements and Odometry," *IEEE Access*, Vol. 9, 2021, pp. 89120–89132. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089900>.
- [4] del Carmen Pérez, M., Gualda, D., Vicente-Ranera, J. D., Villadangos, J. M., and Ureña, J., "Review of UAV positioning in indoor environments and new proposal based on US measurements," *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2019.
- [5] Masiero, A., Fissore, F., Guarnieri, A., Pirotti, F., and Vettore, A., "UAV POSITIONING AND COLLISION AVOIDANCE BASED ON RSS MEASUREMENTS," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-1/W4, 2015, pp. 219–225. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-219-2015>, URL <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-1-W4/219/2015/>.
- [6] Ariante, G., Ponte, S., and Del Core, G., "Bluetooth Low Energy based Technology for Small UAS Indoor Positioning," *2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, 2022, pp. 113–118. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace54187.2022.9856321>.
- [7] Masiero, A., Fissore, F., Antonello, R., Cenedese, A., and Vettore, A., "A COMPARISON OF UWB AND MOTION CAPTURE UAV INDOOR POSITIONING," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W13, 2019, pp. 1695–1699. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1695-2019>, URL <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W13/1695/2019/>.
- [8] Rahmani, W., Wang, W.-J., Caesarendra, W., Glowacz, A., Oprędkiewicz, K., Sułowicz, M., and Irfan, M., "Distance Measurement of Unmanned Aerial Vehicles Using Vision-Based Systems in Unknown Environments," *Electronics*, Vol. 10, No. 14, 2021. <https://doi.org/10.3390/electronics10141647>, URL <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/14/1647>.
- [9] Vetrella, A. R., Opromolla, R., Fasano, G., Accardo, D., and Grassi, M., *Autonomous Flight in GPS-Challenging Environments Exploiting Multi-UAV Cooperation and Vision-aided Navigation*, 2017. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0879>, URL <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2017-0879>.
- [10] Orjales, F., Losada-Pita, J., Paz-Lopez, A., and Deibe, "Towards Precise Positioning and Movement of UAVs for Near-Wall Tasks in GNSS-Denied Environments," *Sensors*, Vol. 21, No. 6, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21062194>, URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/2194>.
- [11] Millane, A., Hesse, H., Wood, T. A., and Smith, R., "Range-Inertial Estimation for Airborne Wind Energy," *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE,



Piscataway, NJ, 2015, pp. 455 – 460. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000111277>, 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2015); Conference Location: Osaka, Japan; Conference Date: December 15-18, 2015.

[12] Park, K., Kang, J., Arjmandi, Z., Shahbazi, M., and Sohn, G., “MULTILATERATION UNDER FLIP AMBIGUITY FOR UAV POSITIONING USING ULTRAWIDE-BAND,” *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. V-1-2020, 2020, pp. 317–323. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-1-2020-317-2020>, URL <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/V-1-2020/317/2020/>.

[13] Kang, J., Park, K., Arjmandi, Z., Sohn, G., Shahbazi, M., and Ménard, P., “Ultra-Wide-band Aided UAV Positioning Using Incremental Smoothing with Ranges and Multilateration,” 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020, pp. 4529–4536. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341439>.

[14] Dobrev, Y., Dobrev, Y., Gulden, P., Lipka, M., Pavlenko, T., Moormann, D., and Vossiek, M., “Radar-Based High-Accuracy 3D Localization of UAVs for Landing in GNSS-Denied Environments,” 2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), 2018, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMIM.2018.8443483>.

[15] Sivaneri, V. O., and Gross, J. N., “UGV-to-UAV cooperative ranging for robust navigation in GNSS-challenged environments,”

*Aerospace Science and Technology*, Vol. 71, 2017, pp. 245–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.09.024>, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963817307472>.

[16] Moleski, T. W., and Wilhelm, J., Trilateration Positioning Using Hybrid Camera-LiDAR System, 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0393>, URL <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2020-0393>.

[17] Opromolla, R., Fasano, G., and Accardo, D., “A Vision-Based Approach to UAV Detection and Tracking in Cooperative Applications,” *Sensors*, Vol. 18, No. 10, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18103391>, URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3391>.

[18] Wang, Z., Liu, R., Liu, Q., Han, L., and Thompson, J. S., “Feasibility Study of UAV-Assisted Anti-Jamming Positioning,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 70, No. 8, 2021, pp. 7718–7733. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3090403>.

[19] Kalman, R. E., “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems,” *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, Vol. 82, No. Series D, 1960, pp. 35–45.

[20] Weisstein, E. W., “Circle-Circle Intersection”, 2023. URL <https://mathworld.wolfram.com/Circle-CircleIntersection.html>.

[21] Yarlagadda, R., Al-Dhahir, N., and Hershey, J., “GPS GDOP metric,” *Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings -*, Vol. 147, 2000, pp. 259 – 264. <https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20000554>.

[22] Titterton, D., and Weston, J. L., *Strapdown inertial navigation technology*, Vol. 17, IET, 2004.

[23] Groves, P. D., “Navigation using inertial sensors [Tutorial],” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 30, No. 2, 2015, pp. 42–69.

[24] Groves, P. D., *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, 2nd ed., Artech House, Boston, MA, 2013.



- [25] Committee, N. W. U., et al., "Department of Defense World Geodetic System 1984, its definition and relationships with local geodetic systems," National Imagery and Mapping Agency Technical Report, Vol. 8350, 1997.
- [26] Maybeck, P., "Edited by," Stochastic models, estimation, and control Vol 1, Mathematics in Science and Engineering, Elsevier, 1979, p. iii.
- [27] Kefferpütz, K., and McGuire, K., "Error-State Unscented Kalman-Filter for UAV Indoor Navigation," 2022 25th International Conference on Information Fusion (FUSION), 2022, pp. 01–08. <https://doi.org/10.23919/FUSION49751.2022.9841385>.
- [28] Koubâa, A., Allouch, A., Alajlan, M., Javed, Y., Belghith, A., and Khalgui, M., "Micro Air Vehicle Link (MAVlink) in a Nutshell: A Survey," IEEE Access, Vol. 7, 2019, pp. 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>.
- [29] Hallberg, Josef & Nilsson, M. & Synnes, Kåre. (2003). Positioning with Bluetooth. Proceedings of the 10th International Conference on Telecommunications. 2. 954 - 958 vol.2. 10.1109/ICTEL.2003.1191568.
- [30] A. Kotanen, M. Hannikainen, H. Leppakoski and T. D. Hamalainen, "Experiments on local positioning with Bluetooth," Proceedings ITCC 2003. International Conference on Information Technology: Coding and Computing, 2003, pp. 297-303, doi: 10.1109/ITCC.2003.1197544.