# Schlussbericht OPTIMISTIC

Verbundvorhaben:

Optimaler Betrieb eines Transitions UAV unter Unsicherheiten
[OPTIMISTIC]

Teilvorhaben:

Systemidentifikation
[SysID]

---


| | |
|---|---|
| Förderkennzeichen: | 20Q1936A |
| Laufzeit: | 01. Juli 2020 bis 31.12.2023 |
| Verbundpartner: | Quantum-Systems GmbH<br>Zeppelinstraße 18<br>82205 Gilching |

# Inhalt

Abbildungen ..... 3

Abkürzungen ..... 4

I. Kurze Darstellung zu ..... 5

1. Aufgabenstellung ..... 5

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ..... 6

3. Planung und Ablauf des Vorhabens ..... 7

4. Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde ..... 9

4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden ..... 9

4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste ..... 9

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 10

II. Eingehende Darstellung ..... 11

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele ..... 11

1.0. HAP 0 – Projektmanagement ..... 11

1.1. HAP 1 – Entwicklung einer Modellstruktur des Transitions-UAVs ..... 12

1.2. HAP 2 – Systemidentifikation des Transitions-UAVs ..... 16

1.3. HAP 3 – Toolchain zur Optimierung des Transitions-UAVs ..... 23

1.4. HAP 4 – Implementierung eines robusten Ansatzes ..... 24

1.5. HAP 5 – Beispielszenarien ..... 25

1.6. HAP 6 – Validierung ..... 27

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, ..... 29

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, ..... 30

3.1. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans, ..... 31

4. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen, ..... 32

5. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11. ..... 33

Literaturverzeichnis ..... 34

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# Abbildungen

Abbildung 1: Balkenplan mit Meilensteinen ..... 7
Abbildung 2: Überblick über die Modellimplementierung ..... 15
Abbildung 3: Nasensegment des Vector mit Flugtestinstrumentierung und Nasenmast ..... 17
Abbildung 4: Beispielhafte Flight Test Card ..... 19
Abbildung 5: ausgewählte Beispielergebnisse zur Systemidentifikation ..... 21
Abbildung 6: geschätzte Parameterunsicherheiten für die Modellvalidierung ..... 22
Abbildung 7: links - resultierende Trajektorien eines "Teardrop" Manövers bei verschiedenen Windstärken; rechts - zugehöriger Energieverbrauch ..... 28

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# Abkürzungen

| | |
|---|---|
| **FALCON.m** | FSD optimAL CONtrol tool for MATLAB (Rieck, 2024) |
| **IMU** | Inertial Measurement Unit |
| **PPK** | post-processed-kinematics |
| **QS** | Quantum Systems GmbH |
| **TUM-FSD** | Lehrstuhl für Flugsystemdynamik der Technischen Universität München |
| **UAV** | Unmanned Aerial Vehicle (unbemanntes Flugsystem |

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# I. Kurze Darstellung zu

## 1. Aufgabenstellung

Die Systeme der Quantum-Systems GmbH bilden eine neue Klasse im Bereich der unbemannten Flugsysteme („unmanned aerial vehicle“ – UAV): Sie verbinden die Senkrechtstartfähigkeit von Multikoptern mit der effizienten, aerodynamischen Flugfähigkeit von konventionellen Flächenflugzeugen. Der Übergang, die sogenannte „Transition“, findet dabei am Ende des vertikalen Startvorgangs statt, indem die Antriebsstränge nach vorn gerichtet werden, um nicht mehr ausschließlich Auf- sondern dann Vortrieb zu erzeugen. Durch diese Strategie sind die Transitions UAV von QS einerseits in der Lage, ohne Bodeninfrastruktur abzuheben, andererseits können sehr lange Flugzeiten von bis zu drei Stunden erreicht werden.

Die Erfahrungswerte und in der Literatur verfügbaren Erkenntnisse zu dieser Art Flugsystemen ist überschaubar bis nicht vorhanden. Daher wurde im Rahmen dieses Projektes grundlegende Untersuchungen angestellt, mit dem schlussendlichen Ziel, einen optimalen Betrieb der QS-Transitions-UAV zu ermöglichen.

Um dieses Ziel zu erreichen, mussten wichtige Werkzeugketten aufgebaut werden, welche für sich selbst einen immensen Nutzen für QS darstellen: Es wurden Algorithmen im Flugsteuerungssystem („flight control system“ – FCS) implementiert, welche eine Automatisierte Erfassung der dominanten flugmechanischen Charakteristika der QS -Flugsysteme ermöglichen. Weiterhin wurde die komplette Werkzeugkette zur Systemidentifikation bei QS etabliert. Diese ermöglicht es nun, für alle zukünftigen Transitions-UAV effizient und schnell die freien Parameter einer speziell angepassten Modellformulierung zu bestimmen. Letztere wurde eigens für die hier zu betrachtenden Systeme entwickelt und implementiert, um die einzigartigen Charakteristika der QS-Flugsysteme realitätsgetreu in der Simulation abbilden zu können. Bereits heute wird diese Simulationsumgebung sowohl im FuE Bereich für die Weiterentwicklung der Flugsteuerungs- und Navigationsalgorithmik als auch als Kern für eine zukünftige Trainingssimulation genutzt.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

# 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Kernkompetenz der Quantum-Systems GmbH liegt in der Entwicklung, Produktion und Vermarktung von senkrechtstartfähigen Transitions-UAV. Eine weiterhin wichtige Voraussetzung war, dass das Gesamtsystem, inklusiver aller Hard- und Software Subsysteme, in-house entwickelt wird. Damit war gewährleistet, dass notwendige Änderungen schnell in die Wege geleitet werden konnten. Außerdem wurde die QS-Entwicklung historisch schon immer mit sehr viel realen Testflügen begleitet, was es im Rahmen des Projektes leicht gemacht hat, echte Testdaten für die Systemidentifikation zu erheben.

Zu Projektstart gab es bereits eine Flotte von QS-Systemen bei diversen Endkunden auf der ganzen Welt. Dadurch konnte auf viel Erfahrung in unterschiedlichsten Einsatzszenarien zurückgegriffen werden, und die Arbeiten im Projekt immer mit realem Nutzen für die Endkunden durchgeführt werden.

Aufgrund der neuartigen Konfiguration war zu Projektbeginn wenig Informationen zu bewährten Vorgehensweisen im Betrieb und der Entwicklung von Flugregelungsalgorithmen verfügbar. Sämtliche Informationen begründeten sich auf Erfahrungswerten und heuristischen Empfehlungen. Um hier eine bessere Entscheidungsgrundlage, sowohl für die Betreiber als auch die QS-Entwicklungsingenieure zu schaffen, wurde dieses Projekt beantragt und durchgeführt.

Modellseitig konnte auf eine sehr rudimentäre Implementierung zurückgegriffen werden, die die echte Flugdynamik nur unzureichend abbildete, sodass immer zwei Flugsteuerungsparametersätze gepflegt werden mussten: einer für Simulationstests, und einer für echte Flüge. Außerdem konnte auf Basisimplementierungen von Parameterschätzalgorithmen aus der Dissertation von Dr. Göttlicher (Göttlicher, 2019) aufgebaut werden.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in Hauptarbeitspakete und Arbeitspakete unterteilt, deren Ergebnisse im Abschnitt II.1 eingehend dargestellt werden. Abbildung 1 gibt einen Überblick über den ursprünglich geplanten Ablauf des Projektes.

Zu Beginn konnten die Arbeiten noch größtenteils in der geplanten Zeit und zu den geplanten Zeitpunkten durchgeführt werden. Jedoch führte in der ersten Hälfte des Projektes die Covid-19 Pandemie bereits zu Verzögerungen. Als im Februar 2022 dann der Überfall auf die Ukraine stattfand, und QS begann, die ukrainischen Verteidiger mit militärischen Aufklärungsdrohnen auszurüsten, mussten die Arbeiten am Projekt pausieren, was zu weiteren Verzögerungen führte. Diese zwei Punkte waren der hauptsächliche Anlass für die Projektpartner eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis Ende 2023 zu beantragen, welche auch genehmigt wurde.

Zwar waren kleine, iterative Anpassungen an Modellformulierung und -implementierung über die ganze Projektlaufzeit notwendig, jedoch konnte der Großteil des HAP 1 in der veranschlagten Zeit bis Anfang 2021 abgeschlossen werden. Mit der Bearbeitung des HAP 2 konnte etwas vor Zeitplan begonnen werden, jedoch ergaben sich Verzögerungen bei der Implementierung der Flugtestsoftware, und damit der Erhebung Flugtestdaten für die finale Systemidentifikation. Zum Projektende konnten allerdings alle Ergebnisse zusammengestellt werden. Es waren immer Zwischenresultate verfügbar, auf denen aufgesetzt werden konnte, weswegen sich keine kritische Blockade ergab. Jedoch war der späte Abschluss der Arbeiten in HAP 2 mitursächlich für Verzögerungen in den

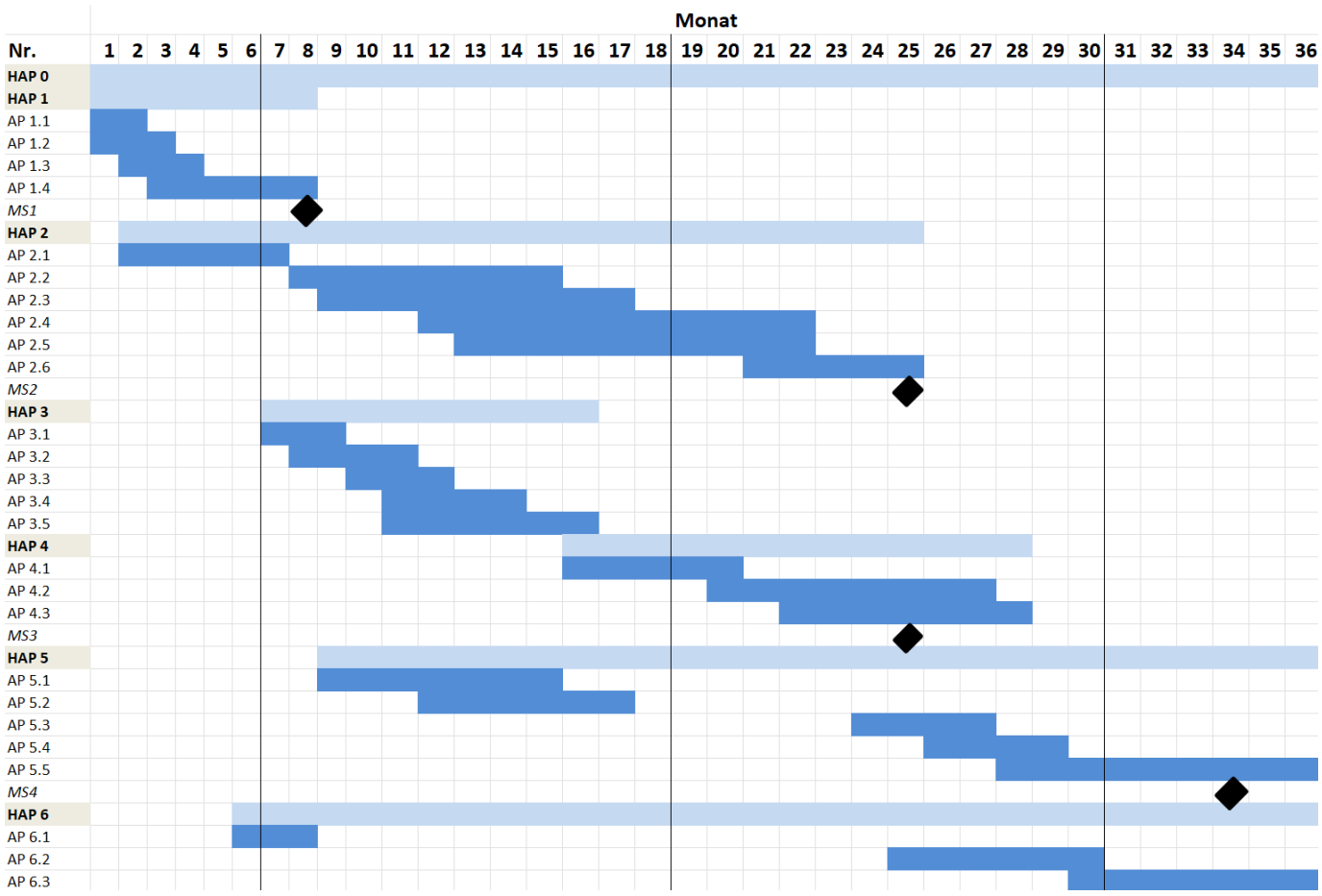


*Abbildung 1: Balkenplan mit Meilensteinen*

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

letzten HAP 5 und HAP 6. Schlussendlich konnten auch diese beiden letzten Hauptarbeitspakete erfolgreich abgeschlossen werden.

In den HAP 3 und HAP 4 war der TUM-FSD in der Führungsrolle, da die entsprechenden Arbeiten im dortigen Kompetenz- und Aufgabenbereich lagen. Die vereinbarten Zuarbeiten von QS wurden rechtzeitig abgeliefert.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# 4. Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

## 4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Verglichen mit der Vorhabensbeschreibung hat sich am Stand der Wissenschaft und Technik, soweit bei QS bekannt ist, wenig geändert. Wie dort im Abschnitt 2.1 detailliert dargestellt, existiert der Prozess der Flugzeugsystemidentifikation bereits seit ca. 50 Jahren. Die in dieser Zeit entwickelten Algorithmen fokussierten sich jedoch hauptsächlich auf militärische und zivile Großluftfahrt, und entstanden noch in Zeiten, als Rechenleistung sehr limitiert war. Die Anwendung auf kleine UAVs, welche aus Gewichts- und Kostengründen qualitativ nicht annähernd so hochwertige Sensorik einsetzen, bleibt ein aktives Forschungsfeld.

Im Projekt OPTIMISTIC – SysID konnten nun durchgehend moderne Ansätze genutzt werden. Hierzu wurde auf den Werkzeugen aufgebaut, die Dr. Göttlicher im Rahmen seiner Dissertation entwickelte (Göttlicher, 2019). Neben Implementierungen der gängigen Standardmethoden (basierend auf Maximum-Likelihood-Methoden, siehe (Jategaonkar, 2006) (Klein, 2006)) konnte im Projekt die Anwendbarkeit neuartiger, optimalsteuerungsbasierter Methoden auf reale Probleme nachgewiesen werden.

Weiterhin konnten aktuelle Forschungsergebnisse zum Thema „Maneuver Injection“ für eine Anwendung in QS-Systemen adaptiert werden (Krause, Goettlicher, & Holzapfel, 2018). Hierbei werden synthetisch generierte Signal auf die Steuergrößen des Flugregelungssystems addiert, um die charakteristischen Eigenbewegungsformen der QS Transitions UAV optimal anzuregen, und so Daten zu erheben, welche den maximalen Informationsgehalt für eine nachfolgende Parameterschätzung beinhalten.

## 4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Eine Quellenverzeichnis findet sich am Ende des Berichtes. Die Hauptquellen, auf denen die meisten Arbeiten dieses Projekts fußen sind die folgenden:

- Jategaonkar – „Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology“ (Jategaonkar, 2006)
- Klein, Morelli – „Aircraft System Identification: Theory and Practice“ (Klein, 2006)
- Göttlicher, C – „System Identification for Aerial Applications Using Optimal Control Methods“ (Göttlicher, 2019)
- Krause, Göttlicher, Holzapfel – „Development of a generic flight test maneuver injection module“ (Krause, Goettlicher, & Holzapfel, 2018)

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

# 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt war initial derart aufgesetzt, dass hauptsächlich eine bilaterale Zusammenarbeit zwischen der Quantum-Systems GmbH (QS) und dem Lehrstuhl für Flugsystemdynamik der TU München (TUM-FSD) erfolgt. Die beiden Institutionen hatten bereits in der Vergangenheit erfolgreich zusammengearbeitet. Die Abstimmung zwischen den Projektpartnern lief reibungslos, selbst als auf Grund der Covid-19 Pandemie sämtliche Treffen nur noch digital erfolgen konnten.

Die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes OPTIMISTIC war mit ein Grund für beide Seiten, die Kooperation in weiteren gemeinsamen Forschungsprojekten, wie zum Beispiel dem Projekt „Datenlinkbasierte Notfallnavigation“ (DaNoNav; gefördert durch mFund des BMDV; FKZ 45ILM1006A) fortzusetzen.

Außer den beiden direkten Projektpartnern war im Projekt die VectoFlow GmbH als Unterauftragnehmer involviert. Diese lieferte ein System zur Luftdatenerfassung, um zusätzliche Messgrößen im Rahmen der Systemidentifikation zur Verfügung zu haben. Außerdem unterstützten sie bei der Auslegung und Integration dieser zusätzlichen Sensorik.

Darüber hinaus waren keine weiteren Partner involviert, da der Fokus auf die QS-Produkte, und die Methoden, welche am TUM-FSD entwickelt wurden lag.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# II. Eingehende Darstellung

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

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse detailliert beschrieben, und den ursprünglich in der Vorhabensbeschreibung illustrierten gegenübergestellt.

### 1.0. HAP 0 – Projektmanagement

Im „HAP0 Projektmanagement“ wurden alle Arbeiten zusammengefasst, welche für die Projektorganisation notwendig waren. Hierunter fielen die Organisation eines Kick-Off Meetings im September 2020, welches unter Beteiligung aller Projektpartner erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Die weitere Projektkoordination, die Planung weiterer Schritte, sowie die fortlaufende Erfolgskontrolle verliefen dann weitestgehend digital. Initial war dies durch die Covid-19 Pandemie bedingt. Da es sogar Vorteile brachte, sich digital zu abzustimmen, v.a. im Hinblick auf Reisezeiten und kurzfristig möglichen Absprachen, wurde dieser Modus auch nach Aufhebung der Coronamaßnahmen beibehalten.

Die Projektkoordination verlief weitestgehend reibungslos, zugesagte Arbeiten wurden innerhalb der vereinbarten Zeiten und im vereinbarten Umfang geliefert, Meilensteine konnten erfolgreich abgeschlossen werden, es ergaben sich lediglich akzeptable Verzögerungen, siehe Abschnitt I.3..

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

## 1.1. HAP 1 – Entwicklung einer Modellstruktur des Transitions-UAVs

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass das HAP 1 sehr erfolgreich bearbeitet und abgeschlossen werden konnte. Die entwickelte Modellstruktur ist in der Lage, alle notwendigen Flugzustände und Flugphasen (Schweben, Transition, und aerodynamischer Flug) im gewünschten Realitätsgrad abzubilden. Die genauen Charakteristika der Modellantwort konnten mit den eingeführten, variablen Parametern im Rahmen des HAP 2 ausreichend genau an die real gemessenen Flugzeugreaktionen angepasst werden.

Weiterhin wurde und wird die entwickelte Modellstruktur erfolgreich eingesetzt: Sie bildet die Grundlage für Simulationen im FuE Bereich zur Weiterentwicklung der Autopilotensteuerungs- und Navigationsfunktionen; außerdem wurde die gleiche Modellstruktur für die Systemidentifikation in HAP2 genutzt, und für Optimierungsaufgaben in nachfolgenden HAP an den TUM-FSD weitergegeben.

Im Allgemeinen wurde bei Definition und Implementierung des mathematischen Modells auf größtmögliche Modularität geachtet, sodass sich die Modellstruktur auch in Zukunft gut nutzen, und auf neue Transitions-UAV Generationen anwenden lässt.

*AP 1.1 Auswahl der zu modellierenden Zustände und Steuerungen*

Die Überlegungen zur Modellfidelität konnten zügig abgeschlossen werden, und es wurde sich auf ein 6-Freiheitsgrad-Starrkörpermodell mit einem 1-Punkt Aerodynamikmodell verständigt. Diese Struktur ist in der Lage, im Gegensatz zu einem reinen Punktmassenansatz, auch die Ratendynamik des Flugzeuges abzubilden. Dieses ist für eine realitätsnahe Abbildung des echten Flugverhaltens essenziell. Für die Implementierung des aerodynamischen Modells werden zwei Formulierungen überblendet, abhängig von der aerodynamischen Geschwindigkeit. Damit kann die Aerodynamik im Schweben unabhängig von der Aerodynamik im Flächenflug parametriert werden, und der Übergang während der Transition ergibt sich natürlich. Fortgeschrittenere Modellierungsansätze (Mehrpunkt- oder instationäre Aerodynamik) wurden verworfen, da der Zugewinn an möglicher Genauigkeit als zu gering angesehen wurde im Vergleich zum Aufwand und der gesteigerten Komplexität.

Damit ist die notwendige Modellfidelität gegeben, um auch komplexe FuE Simulationen durchzuführen, und eine realitätsnahe Simulation im Trainingskontext zu ermöglichen. Außerdem ist die erzielbare Genauigkeit ausreichend für die nachfolgenden Optimierungsschritte.

Aus diesen Vorüberlegungen ergab sich das Set an Zuständen und Steuerungen für das Kernmodell, welches im Nachgang für Systemidentifikations- und Optimierungsaufgaben herangezogen werden konnte. Diese umfassen die gängigen Starrkörperzustände (rotatorisch und translatorisch), sowie Ladezustand der Batterie, Aktuatorpositionen und -geschwindigkeiten und die Drehraten der verfügbaren Motoren. Steuerungen, welche in das Modell gehen sind Aktuatorkommandos, sowie normierte Motorkommandos. Als weiterer Modelleingang werden Komponenten des Windvektors berücksichtigt, welche als generische Störgrößen genutzt werden können.

Im Rahmen der Simulation für FuE und Trainingszwecke wurde das Kernmodell weiterhin um Modelle für Aktuatoren, Motorsteuergeräte und Propellerdynamik, sowie die statische „International Standard Atmosphere“ (MathWorks, 2024) und ein dynamisches „Dryden Atmosphere Model“ (MathWorks, 2024) für Wind- und Turbulenzsimulation erweitert.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

*AP 1.2 Auswahl zu identifizierender und unsicherer Parameter*

Basierend auf den vorhandenen Informationen und bisherigen Erfahrungen wurde ein Satz zu identifizierender und unsicherer Parameter definiert. Diese lassen sich grob in drei Gruppen unterteilen:

- Aktuatorparameter:
  Eine separat durchgeführte Parameterschätzung hat ergeben, dass ein Tiefpassfilter zweiter Ordnung das Verhalten der verbauten Aktuatoren adäquat wiedergibt. Die freien Parameter (Eigenfrequenz, Dämpfung, Ratenlimits) wurden bestimmt. Die neueste Generation der QS-UAVs ist mit CAN-fähigen Aktuatoren ausgestattet, welche unter anderem ihre aktuelle Position über einen Telemetriekanal rückmelden. Dies erlaubte eine Verifizierung der erstellten Modelle im Flug.
- Parameter des Antriebsstranges:
  Vorhandene Windkanaldaten von vergleichbaren Propellern wurden ausgewertet und konnten mit nur kleinen Anpassungen, z.B. bezüglich des Durchmessers, herangezogen werden, um den Schub, sowie den Energieverbrauch des betrachteten QS-Transitions-UAV abzubilden.
- Aerodynamische Parameter des Flugzeugs:
  Hier sind, wie bereits in der Beschreibung des AP1.1 erwähnt, verschiedene Modelle miteinander verwoben. Sprungloses Überblenden anhand der aerodynamischen Geschwindigkeit war ein Hauptaugenmerk. Weiterhin wurden die Parameter, welche den aerodynamischen Flug beschreiben, unterteilt in solche des segelnden Flugzeugs („bare airframe“) und solche, die die Interaktion mit dem Antriebssystem (vordere und hintere Motoren) abbilden.

Für jeden dieser Parameter kann ein Unsicherheitsmaß bestimmt werden, sodass sie prinzipiell als robuste Parameter in den nachfolgenden Optimierungen auftauchen könnten.

Die numerischen Werte der Parameter wurden im Rahmen des HAP2 bestimmt. Hierbei wurde bei der iterativen Verbesserung der Modellformulierung spezielles Augenmerk daraufgelegt, möglichst wenige Parameter zu inkludieren, um ein minimales, finales Set zu erhalten.

*AP 1.3 Spezifikation der Schnittstellen*

Die hauptsächlichen Schnittstellen zwischen dem aufgebauten Modell und der Lösungssoftware für Optimalsteuerungsprobleme des TUM-FSD (FALCON.m) sind die in AP 1.1 ausgewählten Zustände und Steuerungen. Nach deren Definition, und Implementierung im Modell seitens QS, konnte eine problemlose Integration sowohl in FALCON.m, als auch in die Systemidentifikationswerkzeuge von QS erfolgen.

Weiterhin wurden sämtliche freien Parameter im Modell mit ihren Unsicherheiten definiert. Diese bilden eine weitere Schnittstelle zur nachfolgenden robusten Optimierungsmethoden.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

*AP 1.4 Implementierung der Zustandsdifferentialgleichungen und Lookup Tabellen*

Die in den vorangegangenen Arbeitspaketergebnissen beschriebenen Modellstrukturen und Schnittstellen wurden mit Hilfe der Software MATLAB/Simulink implementiert. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der erfolgten Implementierung mit den wichtigsten Subkomponenten:

- „Input / Output Processing“:
  Übersetzung der generischen Zustände, Modellein- und Ausgänge auf konkrete Signale innerhalb der Implementierung
- „Flight Mechanics“:
  Implementierung der flugmechanischen Bewegungsgleichungen, Atmosphärenmodelle und diverser kinematischer Beziehungen
- „Airframe“:
  Implementierung der Eigenschaften des QS Transitions-UAV inklusive Aerodynamik, elektrischer und relevanter mechanischer Subsysteme und Gewichtseinflüssen
- „Sensors“:
  Sensormodelle, um interne Modellgrößen derart darzustellen, dass sie direkt mit den im Flug aufgezeichneten übereinstimmen. Vor allem die richtigen Bezugspunkte und Koordinatensysteme sind hierbei essenziell.

Wie in AP 1.1 beschrieben, kann dieses Kernmodell einfach für FuE sowie Trainingszwecke um weitere Subsystemmodelle und Interaktionsmöglichkeiten für den Nutzer erweitert, und so für alle ursprünglich anvisierten Einsatzszenarien genutzt werden.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

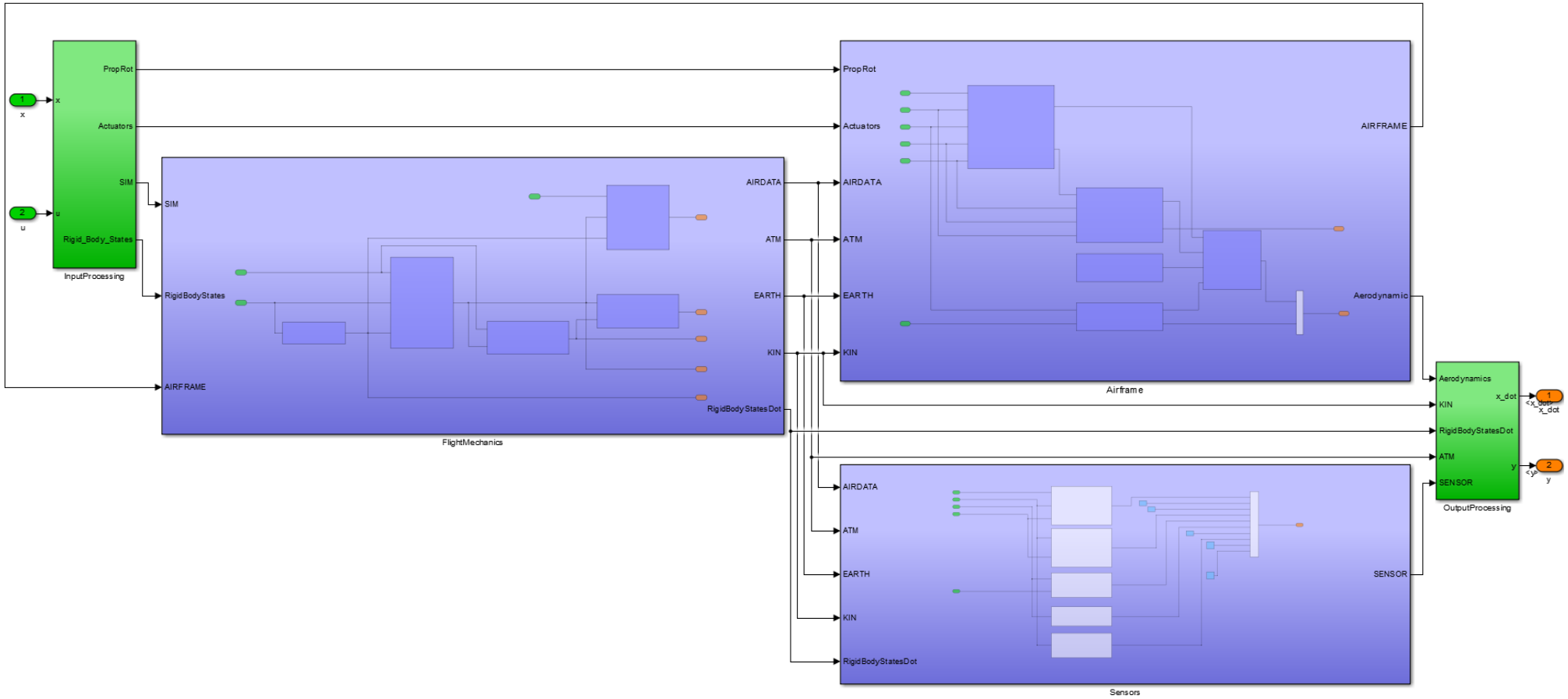


*Abbildung 2: Überblick über die Modellimplementierung*

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

## 1.2. HAP 2 – Systemidentifikation des Transitions-UAVs

Im Kick-Off Meeting wurde gemeinsam mit allen Partnern beschlossen, als Zielsystem den QS „Vector“ zu verwenden. Die meisten Ergebnisse werden 1:1 auf andere Fluggeräte von QS übertragbar sein, da die Konfiguration z.B. der „Trinity“ sehr ähnlich ist. Im Vergleich zur Trinity hat der Vector den Vorteil, dass seine Nutzlast in der Nase montiert wird, und damit ohne bauliche Änderungen gegen eine dedizierte Flugtestinstrumentierung inkl. Mehrlochsonde getauscht werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im HAP sehr gute Ergebnisse erzielt wurden. Es wurde die komplette Werkzeugkette vom automatisierten Flugversuch, über automatische Datenextraktionsfunktionalitäten, und angepasste Modellformulierungen bis hin zu den entsprechenden Parameterschätzalgorithmen entworfen, implementiert, und auf echte Flugdaten angewandt. Neben den konkreten Ergebnissen wurde damit QS befähigt, schnell und effizient Systemidentifikationsvorhaben für zukünftige Systeme durchzuführen.

*AP 2.1 Sensorintegration und Analyse von Sensoren und deren Güte*

Die vorhandenen Inertialdatensensoren (Inertial Measurement Unit – IMU) wurden eingehend untersucht, vor allem im Hinblick auf die Kombination der günstigen IMU mit aufwändig nachbearbeiteten Satellitennavigationsdaten. Letztere sind unter dem Stichwort „post-processed-kinematics“ (PPK) zu verordnen und erlauben durch Berücksichtigung von Korrekturmessungen einer Basisstation sowie Trägerwelleninformationen eine Positionierungsgenauigkeit im einstelligen Zentimeterbereich. Es zeigte sich, dass nicht nur die Genauigkeit der Positions-, und Geschwindigkeitslösung profitiert. Auch die Qualität der Lageinformationen kann dadurch signifikant gesteigert werden. Dies bildet eine sehr gute Ausgangsbasis, um trotz günstiger Sensorik qualitativ hochwertige Daten für die Systemidentifikation bereitstellen zu können. Aufgrund der überzeugenden Datenqualität wurde davon abgesehen, eine dedizierte IMU für Flugtests zu erwerben.

Im Verlauf des „AP 2.5 Durchführung der Identifikation“ wurde weiterhin festgestellt, dass diese sehr hohen Genauigkeiten der Lagewinkelschätzung für ein akzeptables Modell nicht notwendig sind, da sie im Vergleich zu den resultierenden, absolut akzeptablen Modellfehlern, einen Vernachlässigbaren Einfluss haben. Beispielhaft illustriert Abbildung 5 die Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Lagewinkeln. Das Ergebnis ist für eine UAV-Anwendung außerordentlich gut, aber es verbleibt nach wie vor ein Modellfehler im Bereich von 1° in den betrachteten Lagewinkeln. Die erwartete Genauigkeitssteigerung der Messung im Bereich < 0.3° würde hierbei nicht ins Gewicht fallen.

Auf Genauigkeitsaspekte und Modellvalidierung wird in den Beschreibungen der „AP 2.5 Durchführung der Identifikation“ und „AP 2.6 Modellvalidierung und Bestimmung von Unsicherheiten“ genauer eingegangen.

Nach Klärung der Rahmenbedingungen (abzudeckender Druckmessbereich; dominante Frequenzen der Strukturvibration; digitales Interface) hat die Firma „Vectoflow GmbH“ eine Mehrlochsonde für den Einsatz im Flugsystem Vector ausgelegt. Diese befindet sich am Ende eines Nasenmastes, der in der speziellen Flugtestnase verbaut wird (siehe Abbildung 3). Vor der Freigabe für die Produktion wurde seitens Vectoflow durch eine Analyse mit Finite Elemente Methoden sichergestellt, dass die im Flug zu erwartenden Lasten keine Gefahr für die Struktur

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

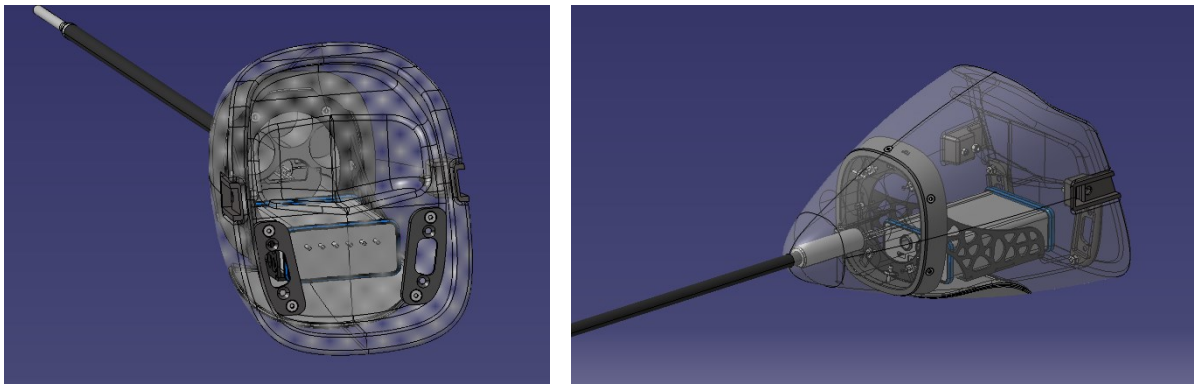

*Abbildung 3: Nasensegment des Vector mit Flugtestinstrumentierung und Nasenmast*

darstellen. Die so erhobenen Daten zu Anstell- und Schiebewinkel können die Qualität der resultierenden Modelle noch einmal steigern. Allerdings wurde weiterhin festgestellt, dass bei sinnvoller Auswahl von Experimenten, Modellzuständen und Arbeitspunkten, die angewandten Parameterschätzmethoden auch ohne zusätzliche Luftdateninformationen in der Lage sind, die vorherrschenden Windbedingungen ausreichen gut zu bestimmen. Lediglich Einflüsse von Thermik stellen diese Algorithmen vor Herausforderungen, aber dies kann durch sinnvolle Wahl der Flugtestzeit und des -ortes vermieden werden.

*AP 2.2 Anpassung vorhandener Parameterschätzalgorithmen an Transitions-UAV*

Es konnte bereits auf Vorarbeiten zurückgegriffen werden, welche im Rahmen der Dissertation von Dr. Göttlicher (Göttlicher, 2019) erfolgten, und eine gute Basisimplementierung gängiger Parameterschätzalgorithmen darstellen. Der akademische Beitrag von Dr. Göttlichers Doktorarbeit bestand darüber hinaus in der Anwendung moderner Optimalsteuerungsmethoden auf Probleme der Parameterschätzung.

Basierend auf diesen Vorarbeiten wurde nach und nach die komplette Werkzeugkette zur Systemidentifikation aufgebaut. Im ersten Schritt wurden alle Datenquellen (Luftdaten, Inertialdaten, Satellitennavigationsdaten, etc.) zeitsynchronisiert und zusammengeführt. Es wurde dabei festgestellt, dass ein dedizierter Flugpfadrekonstruktionsschritt nicht notwendig ist, da die Zustandsbeschreibung des in Echtzeit laufenden Navigationsfilters bereits eine ausreichend hohe Qualität aufweist, was gleichzeitig der Grund ist, dass zur Qualitätssteigerung keine PPK Ergebnisse integriert werden mussten (siehe AP 2.1 )

Im nächsten Schritt wurden Algorithmen implementiert, die automatisiert aus einem Flugdatensatz die relevanten Abschnitte extrahieren, kategorisieren (z.B. nach Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Art und Magnitude des Anregungssignals) und in einem für die Verwendung in FALCON.m nutzbaren Format abspeichern.

Die in HAP 1 – Entwicklung einer Modellstruktur des Transitions-UAVs entwickelte und Implementierte Modellstruktur wurde dann in die Werkzeugkette zur Systemidentifikation integriert. Die sehr herausfordernde Aufgabe, Parameter eines UAV Modells zu bestimmen, welches noch dazu instabile Flugzustände aufweist, konnte schlussendlich durch sinnvolle Partitionierung gelöst werden. So wurden verschiedene Modellformulierungen abgeleitet, bei denen jeweils nur ein Subset an Parametern und Zustände geschätzt, und für die Verbliebenen direkte Messdaten verwendet wurden. Damit konnte der Lösungsraum derart eingeschränkt werden, dass für alle

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

Phasen sinnvolle Ergebnisse resultierten. Speziell in den instabilen Schwebephasen musste die Anzahl der Freiheitsgrade sehr weit reduziert, und teilweise manuell Werte bestimmt werden, jedoch konnte, in Verbindung mit den neuartigen optimalsteuerungsbasierten Methoden, eine zufriedenstellende Modellgüte erreicht werden

*AP 2.3 Vorbereitung von teilautomatisierten Identifikationsflügen*

Es wurde früh im Projektverlauf festgestellt, dass nur mit einer vollständigen Automatisierung von dedizierten Flugtestmanövern eine sinnvolle Datenaufzeichnung für Systemidentifikationsaufgaben möglich ist.

Daher wurde ein Modul im Flugsteuerungscomputer entwickelt, welche vorhandene Regelungsalgorithmen nutzt, um das UAV in einen getrimmten Ausgangszustand zu bringen. Danach können Steuerflächensignale auf diesem Trimmwert eingefroren, und mit künstlichen Signalen überlagert werden, welche die Dynamik des Transitions UAV derart anregen, dass die Charakteristik der Systemantwort bestmöglich in den aufgezeichneten Daten sichtbar werden. Nach Beendigung des Manövers wird die Kontrolle wieder an die eigentliche Flugregelung übergeben, welche das UAV „einfängt“ und die Mission normal fortsetzt.

Da dieses Modul Teil der fliegenden Software ist, mussten die entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen eingehalten werden, welche mit detaillierten Reviews und Tests einhergehen. Dies verzögerte die Durchführung der eigentlichen Flüge, sorgte aber für einen stets sicheren Betrieb während der Experimente.

Das Arbeitspaket wurde mit großem Erfolg abgeschlossen: Das hier beschriebene Modul ermöglicht es, dass normale Flugtestpiloten Experimente für die Systemidentifikation durchführen, ohne speziell dafür geschult werden zu müssen. Die Analysten mussten lediglich die gewünschten Manöver definieren, codieren, und konnten dann kurz darauf auf einen hochwertigen Datensatz zugreifen. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für eine in diesem Kontext erstellte „Flight Test Card“

Da die kompletten Manöver automatisiert sind, können auch gleichzeitig Markierungen im Datensatz gesetzt werden, welche die Extraktion und Kategorisierung der Experimente (siehe AP 2.2) enorm erleichtern.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

**rear motor tests**

In order to force tests with the rear motor, please set the Operation mode to "Eco" befor beginning to test this! Also, set MOTON to 1 in oder to keep the motor running during the test.

| Test Number | MODE | MAG | TYPE | TTIME | MTIME | HTIME | DOF | MOTON | comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1-2-1 on elevator; please conduct test first with magnitude 0.05 and increase in steps of 0.05 to 0.3 until there is a visible reaction; if reaction seems too much, stop. |
| 2 | 3 | 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1-2-1 on elevator; same as above, increased manuever time; |
| 3 | 3 | 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1-2-1 on elevator; same as above, increased manuever time |
| 4 | 3 | 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 | 4 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1-2-1 on elevator; same as above, increased manuever time |
| 5 | 4 | 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1-2-1 on aileron; please conduct test first with magnitude 0.15 and increase in steps of 0.05 to 0.4 until there is a visible reaction; if reaction seems too much, stop. |
| 6 | 4 | 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1-2-1 on aileron; same as above, increased manuever time; |
| 7 | 4 | 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1-2-1 on aileron; same as above, increased manuever time; |
| 8 | 4 | 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 | 4 | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1-2-1 on aileron; same as above, increased manuever time; |
| 9 | 5 | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1-2-1 on rudder; please conduct test first with magnitude 0.15 and increase in steps of 0.05 to 0.4 until there is a visible reaction; if reaction seems too much, stop. |
| 9 | 5 | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35 | 4 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1-2-1 on rudder; same as above, increased manuever time; |
| 9 | 5 | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35 | 4 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1-2-1 on rudder; same as above, increased manuever time; |
| 9 | 5 | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35 | 4 | 2 | 4 | 1 | 3 | 1 | 1-2-1 on rudder; same as above, increased manuever time; |

light-green cells indicate those values, that have to be changed compared to the previous test

*Abbildung 4: Beispielhafte Flight Test Card*

## AP 2.4 Durchführung der Versuchsflüge

Die Auswahl der Betriebspunkte und Flugzeugkonfigurationen konnte deutlich eingeschränkt werden, da die Flugregelungsalgorithmen der QS-Transitions UAV darauf ausgerichtet sind, genau eine Geschwindigkeit zu halten. Gleichzeitig ist die Prädiktionsfähigkeit der gewählten Modellformulierung so gut, dass die gewöhnlich vorkommenden Abweichungen von diesem Ziel-Arbeitspunkt immer noch sehr gut abgebildet werden können.

Der Einfluss des Antriebstranges konnte untersucht werden, indem zunächst ein aerodynamisches Modell für den Segelflugzustand, ohne Motoraktivität erstellt wurde. Basierend hierauf konnten die Einflüsse des Antriebes als inkrementelle Modelle mit wenigen zusätzlichen Parametern aufgesetzt werden. Entsprechend wurden Flugtests in Segelflugkonfiguration durchgeführt, und solche, in denen jeweils nur die vorderen beziehungsweise der hintere Motor aktiv waren.

Da die Manöverautomatisierung deutlich besser als erwartet funktioniert, wurde entschieden weniger Zeit in vorläufige Analysen zu investieren, um sinnvolle Manöverparametrierungen zu finden. Vielmehr konnten auf einfache Art und Weise sehr viele Experimente geflogen werden, sodass eine große Datenbasis entstand, aus der man dann die entsprechenden Segmente für Parameterschätzung und Modellvalidierung auswählen konnte. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel hierfür, in dem sowohl Manöveramplitude als auch die Frequenz der Rechtecksignale variiert wurde, um alle möglichen Kombinationen abzudecken, und so genügend Daten zu erheben. Durch diese Erhebung eines sehr großen Datensatzes konnten Iterationen aus Analyse und weiteren Flugtests reduziert werden, da häufig Daten, welche sich erst im Nachhinein als notwendig herausstellten, bereits in den initialen Flugtests aufgezeichnet wurden.

### *AP 2.5 Durchführung der Identifikation*

In diesem Arbeitspaket wurden schlussendlich alle bis dahin gemachten Schritte zusammen geführt: Die in AP 2.1 evaluierte Sensorik wurde genutzt, um im Rahmen der AP 2.3 und AP 2.4 Daten

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

zu erheben, welche mit der in AP 2.2 aufgesetzten Werkzeugkette genutzt werden konnten, um die freien Parameter der in HAP 1 definierten und implementierten Modellstruktur zu bestimmen.

Naturgemäß waren einige Iterationen notwendig, um ein finales Set an sinnvollen Parametern zu erhalten, jedoch zahlten sich hier die gemachten Vorarbeiten in dem Sinne aus, dass mit wenig Aufwand notwendige Anpassungen durchgeführt werden, und so die Iterationsschleifen kurzgehalten werden konnten. Die gemachten Modellannahmen, und implementierten Modelle (Schwebe- versus aerodynamischer Flug; inkrementeller Einfluss des Antriebstranges) haben sich als hervorragend geeignet erwiesen, und lediglich die Auswahl der notwendigen Parameter musste angepasst werden. Sehr geringe Schwerpunktvariation bei den QS Transitions UAV und sehr geringe Schwankungen des Staudrucks während des Fluges haben bestätigt, dass es ausreichend ist, nur eine Konfiguration detailliert zu modellieren und zu identifizieren.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft einen Teil der Ergebnisse der Identifikation der Seitenbewegung in der Segelflugkonfiguration. Insgesamt kann die Übereinstimmung zwischen Modell und Messwerten für eine UAV Applikation als außerordentlich gut bewertet werden. Die hier gezeigten Hänge- und Kurswinkel stimmen bis auf ca. 1° überein. In der für die Regelung sehr wichtigen Simulation der auftretenden Raten sind die Haupteinflüsse sehr gut abgebildet, lediglich in der Rollrate zeigen sich unmodellierte, hochfrequente Anteile, welche ihren Ursprung vermutlich in Strukturefekten haben. Die Genauigkeit reicht jedoch auf jeden Fall aus für die anvisierten Anwendungen in der Entwicklung von Flugsteuerungs- und Navigationsalgorithmen, sowie Trainingssimulationen. Die nachfolgenden Schritte der Robusten Optimierung sollen außerdem genau diese Art von Modellunsicherheiten berücksichtigen.

In Gesamtsimulationen konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass die Autopilotenalgorithmen, welche auf das reale Flugzeug abgestimmt wurden, auch das identifizierte Modell ohne große Anpassungen in allen Flugphasen kontrollieren können. Dies zeigt, dass die Simulation nun nahe genug an der Realität ist, um sinnvoll zukünftige Entwicklungsaufgaben zu unterstützen.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

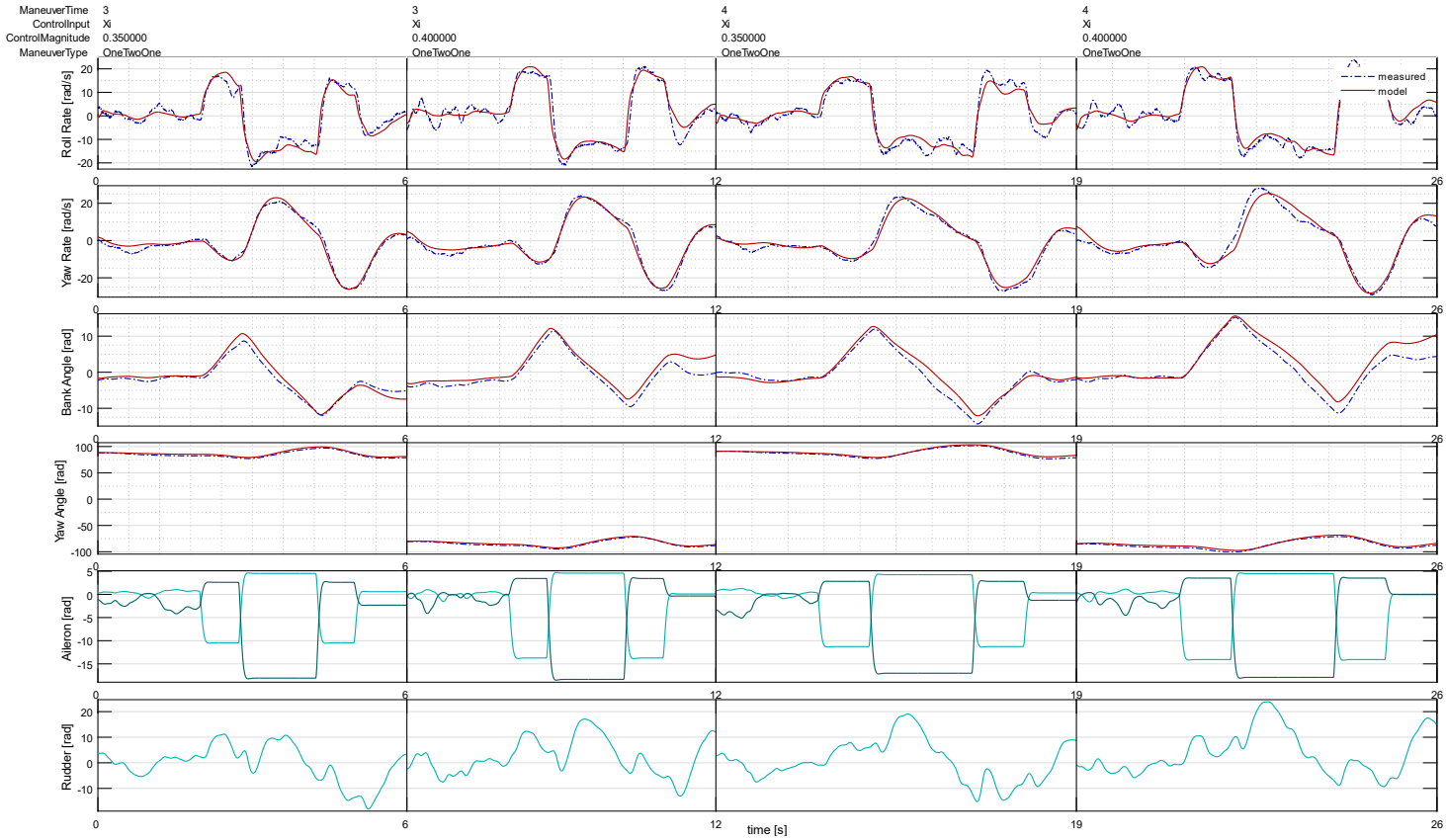


*Abbildung 5: ausgewählte Beispielergebnisse zur Systemidentifikation*

*AP 2.6 Modellvalidierung und Bestimmung von Unsicherheiten*

Bei den in „AP 2.5 Durchführung der Identifikation“ erzielten Ergebnissen wurde als Teil des Identifikationsprozesses stets die resultierende Schätzung der Parameterunsicherheiten betrachtet. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für das resultierende Unsicherheitsmaß der Parameter, welche im Rahmen der bereits illustrierten Seitenbewegung im Segelflug bestimmt wurden. Die geschätzten relativen Standardabweichungen der Parameter sind, bis auf die Ausnahme von $C_{n,\zeta}$, alle weit unter 10%, was als sehr erfolgreiches Ergebnis bewertet werden kann. Bei den geschätzten Korrelationen zwischen den Parametern wurden einige Hohe in Kauf genommen, da v.a. das Prädiktionsvermögen des resultierenden Modells absolut ausreichend ist, und diese somit lediglich ein kosmetisches Problem darstellen. Hier hatte der Parameterschätzalgorithmus aufgrund der sehr reaktiven UAV Dynamik Schwierigkeiten, zwischen den Anregungen durch die Ruderausschläge, und den resultierenden Drehraten zu unterscheiden, da letztere fast verzugsfrei und mit ähnlicher Signalform auftreten.

Weiterhin wurde sichergestellt, dass die eigentlichen Parameterwerte einer Plausibilitätsanalyse bezüglich der Vorzeichen und ungefähren numerischen Regionen standhalten. Außerdem zeigten die bereits erwähnten Gesamtsimulationen in Verbindung mit dem echten Flugregelungssystem eine sehr gute Realitätstreue.

Abschließend wurde sichergestellt, dass Datensätze, welche nicht an der eigentlichen Parameterschätzung teilhatten, auch mit akzeptabler Güte vom Modell wiedergegeben werden können.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

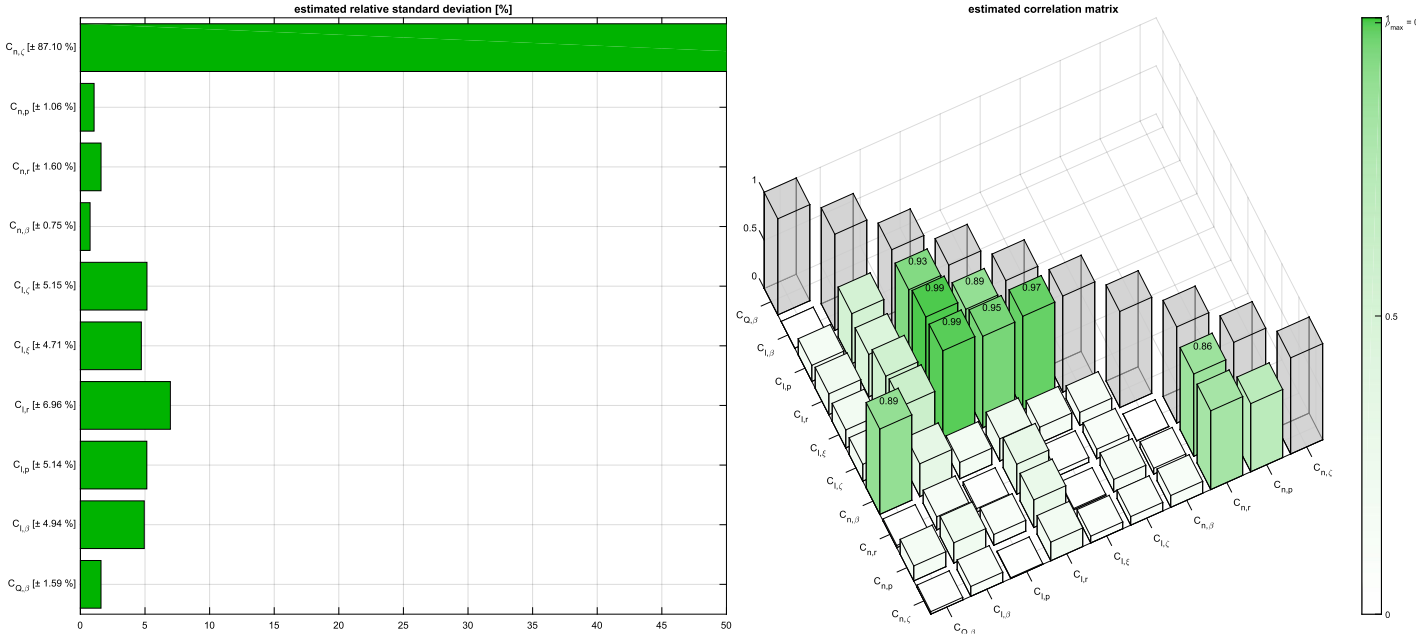


*Abbildung 6: geschätzte Parameterunsicherheiten für die Modellvalidierung*

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

## 1.3. HAP 3 – Toolchain zur Optimierung des Transitions-UAVs

Dieses Hauptarbeitspaket lag größtenteils im Kompetenz- und Aufgabenberiech des TUM-FSD. QS steuerte lediglich die anvisierten Anwendungsszenarien bei, in denen QS-Mitarbeiter die Toolchain einsetzen können sollen.

*AP 3.1 Definition des User-Interfaces*

Die Gestaltung der eigentlichen Nutzerschnittstelle erfolgte in enger Abstimmung mit dem TUM-FSD. Dabei wurde spezielles Augenmerk auf ein angepasstes Abstraktionslevel gelegt, um sicherzustellen, dass die Werkzeuge auch ohne intimes Wissen in der Optimalsteuerungstheorie angewandt werden können. Die Art und Weise, wie QS plante, die entstehenden Werkzeuge einzusetzen bildete dabei die Basis für die hierfür notwendigen Abstimmungen. Kern der Diskussion war eine möglichst einfache Definition des zu untersuchenden Szenarios, sowie eine intuitive Aufarbeitung der Ergebnisse. Beispielhaft wurde sich hierbei an Szenarien des AP 5.1 orientiert.

Aufgabe des TUM-FSD war es dann, diese abstrahierten Nutzereingaben intern in programmatische und mathematische Elemente von FALCON.m zu übersetzen.

*AP 3.2 Aufbau eines generischen Templates zur Problemdefinition (basierend auf FALCON.m)*

Die in AP 3.1 definierten Schnittstellen wurden vom TUM-FSD in ein Problemtemplate gegossen. Dieses ist in Matlab implementiert, und erlaubt es dem Nutzer, für verschieden Aspekte des Optimalsteuerungsproblems einfach auf vorgefertigte Alternativen zurückgreifen zu können. QS wurde während der Bearbeitung eng eingebunden, um sicherzustellen, dass das resultierende Template den Vorstellungen entspricht, und auch zukünftig angewandt werden kann.

*AP 3.3 Implementierung von Sensitivitäten für Parameteranalysen*

Hier waren keine QS-Arbeiten vorgesehen, dementsprechend wurde das Arbeitspaket komplett vom TUM-FSD durchgeführt.

*AP 3.4 Auswahl und Bewertung geeigneter Solver*

Hier waren keine QS-Arbeiten vorgesehen, dementsprechend wurde das Arbeitspaket komplett vom TUM-FSD durchgeführt.

*AP 3.5 Verifikation*

Die Verifikation erfolgte hauptsächlich durch die Anwendung der Werkzeuge, und die Diskussion der Ergebnisse, deren Sinnhaftigkeit und der Anwendbarkeit der erstellten Templates und Arbeitsabläufe.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

## 1.4. HAP 4 – Implementierung eines robusten Ansatzes

Ähnlich zum vorherigen HAP 3 bestand der hauptsächliche Beitrag von QS darin, mögliche Anwendungsszenarien der Werkzeuge zu diskutieren, um so die Nutzbarkeit zu gewährleisten.

*AP 4.1 Implementierung eines robusten Ansatzes*

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde mit dem TUM-FSD die anvisierte Softwarearchitektur, sowie die zu implementierenden Nutzerschnittstellen und deren Bedienung abgesprochen.

*AP 4.2 Implementierung einer effizienten Lösung der stochastischen Subprobleme*

Hier waren keine QS-Arbeiten vorgesehen, dementsprechend wurde das Arbeitspaket komplett vom TUM-FSD durchgeführt.

*AP 4.3 Integration der robusten Optimierung in das Optimierungstool*

Hier waren keine QS-Arbeiten vorgesehen, dementsprechend wurde das Arbeitspaket komplett vom TUM-FSD durchgeführt.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

## 1.5. HAP 5 – Beispielszenarien

Die Beispiele, auf welche die in den vorangegangenen Arbeitspaketen entwickelten Werkzeuge angewendet werden sollen, wurden in diesem HAP gemeinsam definiert. Dabei konnte auf die QS-Erfahrungen im Betrieb von Transitions-UAV aufgebaut, sowie die Expertise des TUM-FSD in der mathematischen Formulierung von Optimalsteuerungsproblemen genutzt werden.

*AP 5.1 Definition der zu untersuchenden Beispielszenarien*

Für die Auswahl der zu betrachtenden Beispielszenarien wurden Missionsparameter, welche die Leistungsfähigkeit des Flugsystems maßgeblich beeinflussen identifiziert. Hierzu zählen unter anderem

- Haupteinflussfaktoren der Nutzlast:
  - Gewicht
  - notwendiges Missionsprofil (z.B. seitliche Überlappung gemachter Fotos, Flughöhe)
  - durchführbare Manöver (mögliche Verdeckung im Live-Bild durch Flügel oder Fahrwerk)
- Missionsart:
  - Flächenbefliegung
  - Korridorbefliegung
  - Aufklärungsmission
- Missionselement
  - „Teardrop“ Manöver
  - Kreisen
  - Kurven
  - Steig- / Sinkflug
- Wind:
  - Seitenwind
  - Gegenwind
  - Rückenwind
- Geländeprofil:
  - Flach
  - wiederholtes Steigen / Sinken notwendig.
- Landecharakteristik
  - Startrichtung („Transitionsrichtung“)
  - Richtung des Landeanfluges

Aus diesen Einflussfaktoren wurde eine Liste an möglichen Beispielszenarien zusammengestellt. Hierbei mussten zwei Randbedingungen berücksichtigt werden: zum einen mussten praktisch relevante Szenarien untersucht werden. Zum anderen musste es sinnvoll möglich sein, mathematische Optimalsteuerungsprobleme zu formulieren, welche auch mit den entwickelten Werkzeugen lösbar sind.

Weiterhin wurden die Betriebsgrenzen der QS-Transitions UAV an den TUM-FSD weitergegeben, um als Randbedingungen berücksichtigt zu werden, und mögliche Zielsetzungen für Kostenfunktionsformulierungen wurden erarbeitet.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

*AP 5.2 Auswahl der entsprechenden Zielfunktionen und Randbedingungen*

Für jedes der Szenarien wurde gemeinsam ein mathematisches Optimalsteuerungsproblem mit Startbedingungen, Pfadbeschränkungen, Phasenübergängen, und finalen Zustandsbeschränkungen abgeleitet. Die anzuwendenden Kostenfunktionen wurden ebenfalls gemeinsam diskutiert. QS trug hier maßgeblich dazu bei, dass die resultierende Problemformulierung die Praxis so gut als möglich abbildet.

*AP 5.3 Lösung der resultierenden Optimierungsprobleme*

Die vom TUM-FSD bestimmten Lösungen wurden seitens QS auf Sinnhaftigkeit und Plausibilität geprüft, um iterativ zu realistischen Ergebnissen zu kommen.

*AP 5.4 Analyse und Verbesserung der optimalen Lösung bzgl. Robustheit*

Ähnlich zum vorangegangenen Arbeitspaket fand hier eine Plausibilitätsprüfung durch QS statt. Gemeinsam mit dem TUM-FSD wurden speziell die Änderungen durch die robuste Optimierung analysiert.

*AP 5.5 Ableitung von Handlungsweisen für den operativen Betrieb*

Die finalen Ergebnisse des TUM-FSD wurden im Rahmen des Arbeitspaketes als letztem Schritt in der Kette in Handlungsanweisungen für die Bediener der QS-UAV übersetzt, und werden ihnen zukünftig zur Verfügung gestellt. Ein Teil der Ergebnisse erwies sich als komplex, sodass die Aufbereitung für Bediener, ohne spezielles Expertenwissen, herausfordernd war. Dies wurde bereits in der Vorhabensbeschreibung im Risiko R 5.5.1 „Teile der Ergebnisse sind zu kompliziert, um sie in einfache Handlungsanweisungen zu überführen“ antizipiert. Allerdings ergab sich auch eine Vielzahl von Ergebnissen, welche die Erfahrungen, die QS in der Vergangenheit mit ihren Transitions-UAV gemacht hat bestätigen. Die hier aufgebaute Werkzeugkette, und die vom TUM-FSD durchgeführten, robusten Optimierungen erbrachten nun den Nachweis der Optimalität für Strategien, wie sie sich bei QS bereits etabliert hatten.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

## 1.6. HAP 6 – Validierung

Die ursprüngliche Idee, Handlungsanweisungen durch dedizierte Flugtests zu validieren erwies sich als schwierig. Dies wurde bereits in der Vorhabensbeschreibung antizipiert, als Risiko R 6.3.1 „Die Effizienzsteigerung durch die erarbeiteten Handlungsempfehlungen ist so klein, dass sie im realen Flugtest durch andere Störeinflüsse verdeckt wird“. Eine Validierung fand trotzdem statt, indem Ergebnisse mit großen Flugdatenmengen verglichen wurden.

*AP 6.1 Metriken für die Validierung*

Um den möglichen Mehraufwand, welcher aus den abgeleiteten Handlungsanweisungen resultiert, quantifizieren zu können, wurde die Quantum Systems Bodenkontrollstationssoftware “QBase” im Rahmen dieses Arbeitspaketes untersucht. Wie bereits in AP 5.5 illustriert wurde, konnten viele der Vorgehensweisen, die sich bei QS als gängige Praxis etabliert hatten, durch Optimierungsmethoden bestätigt werden. Diese Herangehensweisen waren ohnehin bereits leicht mit den Mitteln der Bodenkontrollstation „QBase“ umzusetzen, weswegen es implementierungsseitig zu keinem Mehraufwand kommt. Dadurch wird es schlussendlich auch für die Endnutzer ein Leichtes sein, die veröffentlichten Handlungsanweisen für den Optimalen Betrieb umzusetzen.

Neben dem Mehraufwand sollte auch die Optimalität der Handlungsanweisungen validiert werden. Ursprünglich war herfür geplant, dedizierte Flugtests durchzuführen. Da jedoch die gängige Praxis bei QS schon sehr gute Ergebnisse liefert, fallen die auf Grund der robusten Optimierung zu erwartenden Verbesserungen so klein aus, dass sie in einer kleinen Stichprobenzahl von Vergleichsflügen durch andere Störeinflüsse überdeckt werden würde. Daher wurde entschieden, die Validierung mit statistischen Mitteln anzugehen. Hierzu wurden relevante Segmente aus einer großen Anzahl von Vergleichsflügen, welche ohnehin vorhanden sind, extrahiert, und zu einem Referenzdatensatz aufbereitet.

Abbildung 7 zeig ein derartig aufbereitetes Segment. Die linke Abbildung illustriert die resultierenden Trajektorien, welche am Ende eines geraden Flugsegments absolviert werden, um in einer definierten seitlichen Abweichung wieder in die Gegenrichtung fliegen zu können. In Anlehnung an die Großluftfahrt wurde dieses Manöver QS-intern „Teardrop“ getauft. Die sehr starke Variation in Länge und Form resultiert hauptsächlich aus den unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen in den jeweiligen Flügen. Der rechte Teil der Abbildung zeigt den Energieverbrauch während dieser Wendemanöver, zusammen mit einem Medianwert in grün.

*AP 6.2 Integration/Validierung der Optimierung mit Unsicherheiten*

Hier waren keine QS-Arbeiten vorgesehen, dementsprechend wurde das Arbeitspaket komplett vom TUM-FSD durchgeführt.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

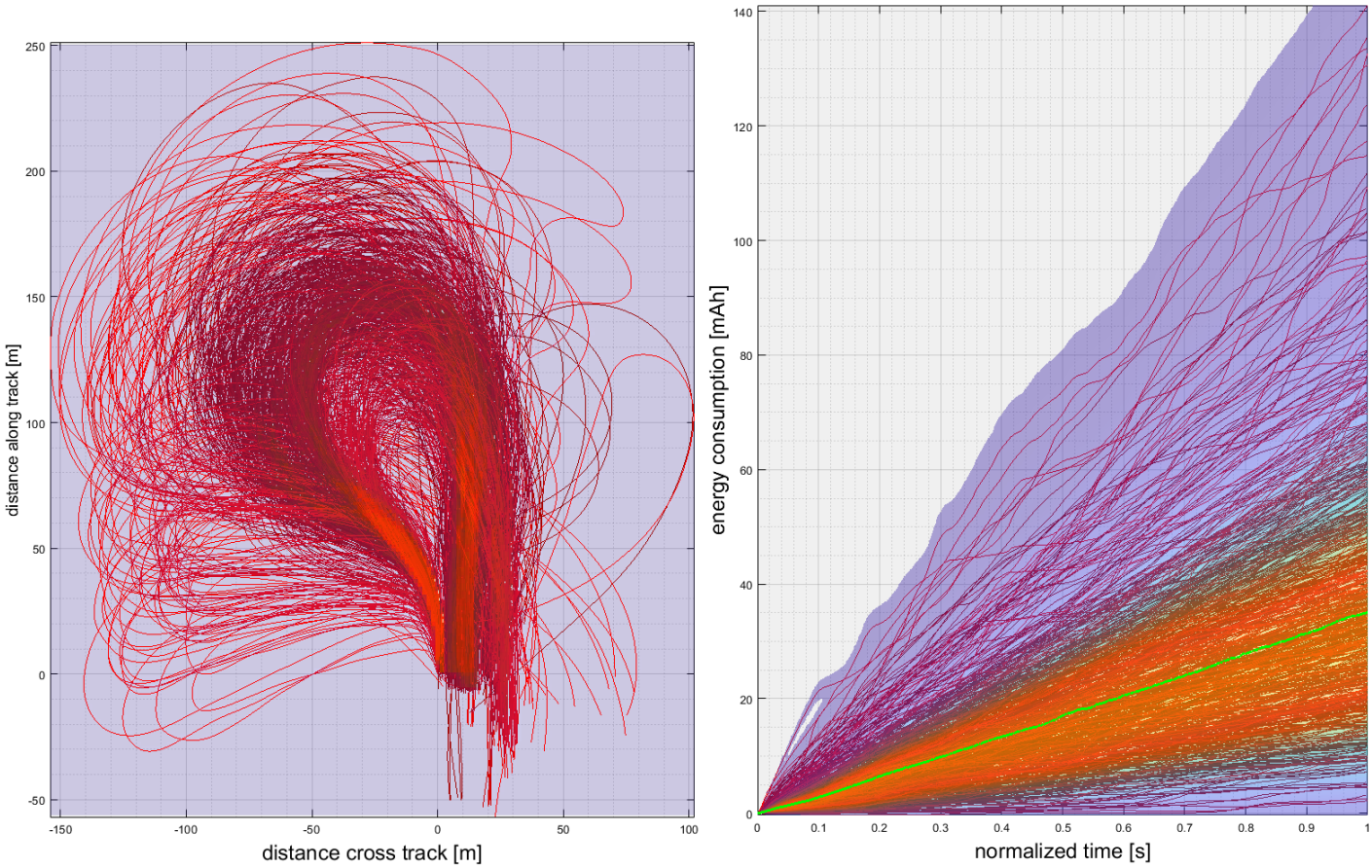


*Abbildung 7: links - resultierende Trajektorien eines "Teardrop" Manövers bei verschiedenen Windstärken; rechts - zugehöriger Energieverbrauch*

*AP 6.3 Validierung der abgeleiteten Handlungsempfehlungen in der Flugerprobung*

Wie in Abschnitt 6.1 erläutert, fand die Validierung nicht mit Hilfe dedizierter Flugversuche statt. Vielmehr wurde sich auf die Datenbasis gestützt, welche bei QS ohnehin vorhanden ist. Auf diese Art und Weise konnten die erarbeiteten Handlungsanweisungen erfolgreich validiert werden. Die Zeit, welche ursprünglich für die Planung und Durchführung der entsprechenden Flugversuche veranschlagt war, wurde stattdessen in die Entwicklung eines Werkzeuges investiert, welches es dem Analysten erlaubt, mit wenig Aufwand große Datenmengen nach relevanten Meta-Informationen zu filtern, und ähnlich der Abbildung 7 zusammen mit statistischen Eigenschaften zu visualisieren.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

## 2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Die Finanzierungs- und Zeitplanungen wurden weitestgehend eingehalten. Die einzelnen Positionen wurden zweckentsprechend und sparsam verwendet.

Aufgrund personeller Engpässe in der QS-Finanzabteilung kann der zahlenmäßige Nachweis leider nicht bis zur Einreichung des Abschlussberichtes fertiggestellt werden. Daher sind die finalen Zahlen der einzelnen Posten beim Verfassen dieses Berichtest noch nicht verfügbar.

Sicher ist jedoch, dass der Hauptanteil der Ausgaben, wie bereits in der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung veranschlagt, auf Personalkosten (0837) entfallen ist. Die veranschlagten Materialkosten (0813) wurden zum Großteil für die Beschaffung der Vectoflow Luftdatensonde eingesetzt. Aufgrund der sehr hohen Genauigkeit, welche durch das Einbeziehen von PPK Informationen erreicht werden konnte (siehe AP 2.1 ), war es nicht notwendig eine dedizierte IMU zu beschaffen. Die hierfür ursprünglich veranschlagten Mittel wurden zu Personalmitteln umgewidmet, um leicht gestiegenen Personalkosten Rechnung zu tragen.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# 3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

In Anbetracht notwendigen Tätigkeiten, um die in II.1 illustrierten Ergebnisse zu erreichen, wird der Umfang und auch die Notwendigkeit der geleisteten Arbeiten klar. Durch das Projekt OPTIMISTIC konnten in den Bereichen der automatisierten Testflüge, Modellierung, und Systemidentifikation, bzw. Parameterschätzung für Transitions-UAV signifikante Fortschritte erzielt werden, auf welche im nächsten Abschnitt detailliert eingegangen wird. Diese ermöglichen nun bei QS schnellere Entwicklungen, effizienteren Betrieb der QS-Systeme, sowie zukünftig besseres Bedienertraining.

Die Notwendigkeit, schnell auf geänderte Randbedingungen reagieren zu können, ist heute größer denn je. Ohne die hier geleisteten Arbeiten könnte QS in einigen Kernbereichen nicht die Entwicklungsgeschwindigkeit an den Tag legen, wie es aktuell geschieht. Dies verschafft im sehr agilen Umfeld der kommerziellen UAV einen signifikanten Vorteil.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

### 3.1. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Durch die im Projekt gewonnen Ergebnisse ergeben sich ein großer technologisch-wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Mehrwert. Vor allem deren entwicklerische Weiterführung wird die Entwicklungsgeschwindigkeit zukünftig signifikant steigern.

Als erstes immens wichtiges Projektergebnis ist das mathematische Modell des Transitions-UAV und seine Implementierung zu nennen. Dies erlaubt eine realitätsgetreue Simulation des Verhaltens, welche nicht nur für die Weiterentwicklung der Flugsteuerungs- und Flugregelungsalgorithmik unabdingbar geworden ist. Auch wird aktuell in vielen öffentlichen Ausschreibungen ein Trainingssystem gefordert, mit welchem die Bedienung des Systems trainiert werden kann, ohne dabei das echte Fluggerät gefährden zu müssen. Speziell das Training von Notfällen kann so deutlich risikoärmer gestaltet werden, da nicht das echte Flugsystem zu Trainingszwecken in kritische Situationen gebracht werden muss. Das hier entwickelte Modell bildet das Herzstück eines solchen Trainingssimulators.

Gleichzeitig wurde als weiteres Ergebnis nicht nur das Modell selbst, sondern auch eine komplette, durchgängige Werkzeugkette zur Modellierung zukünftiger, neuer QS-Systeme aufgebaut. Damit ist die Anpassung an neue Fluggeräte, wie etwa den kürzlich vorgestellten „Reliant“, oder den ebenfalls in der Entwicklung befindlichen „Twister“ mit wenig Aufwand möglich. Diese angepassten Simulationen bilden dann wiederum die optimale Testumgebung, um vorhanden Algorithmen schnell an die Eigenheiten dieser Systeme anzupassen. So kann deutlich Zeit, und damit Geld in der Entwicklung gespart werden.

Durch die enge Zusammenarbeit mit dem TUM-FSD konnten außerdem Methoden, die dem aktuellen Stand der Forschung und Technik entsprechen, für QS zugänglich gemacht werden. Hierzu zählt allen voran die Nutzbarmachung des Optimalsteuerungswerkzeuges FALCON.m, sowie die Verwendung von aktuellen Forschungsergebnissen zum Thema robuste Optimierung. Außerdem konnte der Kontakt in die akademische Forschung weiter gestärkt werden, was sich perspektivisch durch einen Wissensgewinn, und eventuell die Akquise neuer Mitarbeiter auszahlen kann.

Die Ableitung von Handlungsanweisungen für Endkunden, basierend auf mathematisch optimalen Erkenntnissen schließt die Liste der relevanten Projektergebnisse ab. Hier konnte ein direkter Mehrwert für die QS-Endkunden generiert werden, indem aktuelle Forschungsergebnisse für sie aufbereitet und verständlich gemacht wurden. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass die gängige Praxis zur Missionsplanung bei QS bereits sehr effizient ist.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

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

Die Systemidentifikation ist mittlerweile fester Bestandteil bei Projekten in der Großluftfahrt. Den Projektpartnern ist allerdings kein signifikanter Fortschritt bei der Anwendung auf UAS bekannt. Außerdem ist das QS-Konzept der senkrecht start- und landefähigen Transitions-UAV sehr spezifisch, sodass keine vorgefertigten Standardmethoden, vor allem bei der aerodynamischen Modellierung, zur Anwendung kommen können.

Lediglich erfolgte die Veröffentlichung der Dissertation von Dr. Göttlicher (Göttlicher, 2019) während der Projektlaufzeit. Viele der Werkzeuge, die hier genutzt wurden, basieren auf den darin entwickelten Algorithmen.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved
Quantum-Systems GmbH | Zeppelinstr. 18 | 82205 Gilching | Germany
quantum-systems.com

## 5. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Die robuste Optimierung hat in einigen Teilen noch einmal unterstrichen, dass die gängige Praxis bei QS bereits nah an der Optimalität liegt. Diese „best-practice“ Anwendungen der QS-Transitionssysteme sind eingehend in den Bedienhandbüchern der einzelnen Systeme beschrieben, und somit bereits veröffentlicht. Erkenntnisse, die darüber hinaus gehen, werden noch aufbereitet, und gemäß dem Verwertungsplan für die QS-Kunden in geeignetem Format bereitgestellt.

Die Überführung des Simulationsmodells in eine Trainingsumgebung findet, deutlich früher als im ursprünglichen Verwertungsplan gefordert, bereits statt, und soll innerhalb eines Jahres in einer frühen Form bereits an die ersten Kunden gehen.

Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved

# Literaturverzeichnis


Göttlicher, C. (2019). *System Identification for Aerial Applications Using Optimal Control Methods*. Munich, Germany.

Jategaonkar, R. (2006). *Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology*. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Klein, V. M. (2006). *Aircraft System Identification: Theory and Practice*. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Krause, C., Goettlicher, C., & Holzapfel, F. (2018). Development of a generic flight test maneuver injection module. *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2018*. Belo Horizonte, Brasil: International Council of the Aeronautical Sciences.

MathWorks. (2024, 06 25). *Dryden Wind Turbulence Model (Continuous)*. Retrieved from https://de.mathworks.com/help/aeroblks/drydenwindturbulencemodelcontinuous.html

MathWorks. (2024, 06 25). *ISA Atmosphere Model*. Retrieved from https://de.mathworks.com/help/aeroblks/isaatmospheremodel.html

Rieck, M. a. (2024, 05 30). *FALCON.m User Guide*. Retrieved from http://www.falcon-m.com



Copyright © 2024 Quantum-Systems GmbH. All rights reserved