



Abschlussbericht



Abschlussbericht INFLIGHT

Förderkennzeichen: 20Q1711C
Projekt Akronym: INFLIGHT
Projekt Titel: Innovative Flugregelung und echtzeitfähige LIDAR onboard
Messtechnik für leichtere, komfortablere Flugzeuge
Förderlinie: Nationales Luftfahrtforschungsprogramms LuFo V-3,
Förderlinie Technologie
Projektdauer: 01.01.2018 – 31.12.2021
Titel: Abschlussbericht INFLIGHT
Autoren: Carl-Simon SANDVOß, Meiko STEEN
Beitragender
Partner: Technische Universität Braunschweig
Datum: 31. März 2022
Status: Veröffentlicht

Verbundführer:
IBK Innovation GmbH & Co. KG
Rehdorfer Straße 4
90426 Nürnberg

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
1.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen	5
1.2 Wissenschaftliche / Technische Ergebnisse	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4 Erreichung der Ziele des Vorhabens	8
1.5 Relevante Ergebnisse Dritter	8
1.6 Relevante Ergebnisse von Verbundpartnern	8
1.7 Änderungen in der Zielsetzung	8
1.8 Verwertung der Ergebnisse	9
1.9 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2. Technischer Bericht	9
2.1 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 0 „Projektmanagement“	9
2.2 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 1 „Anforderungen und Schnittstellen“	9
2.2.1 Arbeitspaket 1.1 „Spezifikation von Randbedingungen und Parametern“	10
2.2.2 Arbeitspaket 1.2 „Definition des Versuchsträgers“	10
2.2.3 Arbeitspaket 1.3 „Planung der Flugversuche und deren Anforderungen“	10
2.3 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 2 „Reglerentwicklung“	11
2.3.1 Arbeitspaket 2.1 „Modellbildung und -reduktion“	11
2.3.2 Arbeitspaket 2.2 „Reglerentwurf“	11
2.3.3 Arbeitspaket 2.3 „Simulationsgestützte Validierung“	11
2.4 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 3 „Böen- und Zustandsmesstechnik“	12
2.4.1 Arbeitspaket 3.1 „Flugzustandsermittlung“	12
2.4.2 Arbeitspaket 3.2 „Lidar Integration“	13
2.4.3 Arbeitspaket 3.3 „Lidar Böenfelschätzung“	24
2.4.4 Arbeitspaket 3.4 „Regler und Aktuator Integration“	25
2.5 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 4 „Flugversuchsträger und -versuche“	27
2.5.1 Arbeitspaket 4.1 „Messkampagne zur Modellidentifikation“	27
2.5.2 Arbeitspaket 4.2 „Messtechnische Ausrüstung des Flugversuchsträgers“	28
2.5.3 Arbeitspaket 4.3 „Flugversuche zur Systemvalidierung“	28
2.5.4 Arbeitspaket 4.4 „Diskussion der Ergebnisse“	28
3. Veröffentlichungen, Vorträge	31
4. Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur	32

1. Zusammenfassung

Dieser Abschlussbericht umfasst die Arbeiten des Instituts für Flugführung (IFF) der Technischen Universität Braunschweig (TUBS) in dem Projekt **INFLIGHT** (**IN**novative **F**lugregelung und echtzeitfähige **LIDAR** (**L**IGHT **D**etection and **R**anging) on-board Messtechnik für leichtere, komfortablere Flugzeuge) im Zeitraum Januar 2018 bis März 2022. Die ursprüngliche Projektlaufzeit war bis März 2021 vorgesehen. Aufgrund von extern und intern bedingten Verzögerungen im Projektablauf wurde das Projekt bis Ende 2021 kostenneutral verlängert und eine erfolgreiche Demonstration des entwickelten Gesamtsystems konnte im März 2022 gezeigt werden.

Zielsetzung des TUBS Teilprojektes **INFLIGHT-OBS** (**INFLIGHT** **O**n-**B**oard **S**ensorik) war die Entwicklung und Erprobung der vorausschauenden Messung von Böen- und Turbulenzfeldern mittels LiDAR. Die Flugregelung sollte auf Basis einer kombinierten Nutzung von vorausschauenden Messverfahren (LiDAR) und prädiktiven Regelungsansätzen zur Lastabminderung ermöglicht werden um Gewichtseinsparungen durch Lastreduktion sowie eine Erhöhung des Passagierkomforts durch Reduktion von Vibrationen zu erreichen. Das Institut für Flugführung der TU Braunschweig übernahm dabei die Entwicklung und Erprobung der vorausschauenden Messung von Böen- und Turbulenzfeldern mittels LiDAR an einem Kleinflugzeug des Typs Remos GX, deren Messergebnisse für die beteiligten Partner aufbereitet und zur Verfügung gestellt wurden. Darüber hinaus war die Verarbeitung und Auswertung der LiDAR Daten in Echtzeit während des Fluges und deren Fusion mit den Daten der online Flugzustandsbestimmung und Luftdatenberechnung durch konventionelle Sensoren ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit des IFF. Eine weitere Aufgabe war die Flugzustandsbestimmung und damit die Erfassung und Auswertung aller relevanten Steuereingaben und Auslenkungen, Kräfte und Flächenbelastungen. Zusätzlich war das IFF in Zusammenarbeit mit der Firma messWERK GmbH Gesellschaft für Mess- und Anzeigetechnik (als Unterauftrag der TUBS) für die Ausrüstung und den Betrieb des Flugversuchsträgers zuständig.

Das Institut für Flugführung der TUBS hat in dem INFLIGHT Projekt mit den zwei Partnern IBK Innovation und Otto von Guericke Universität Magdeburg (OvGU) zusammengearbeitet. Die thematische Aufteilung ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Institut für Flugführung hat den Flugversuchsträger mittels eines Unterauftrages an die messWERK GmbH bereitgestellt, einen LiDAR Sensor zur Verfügung gestellt und in den Versuchsträger eingerüstet und die bordseitige Bereitstellung des Böen- und Turbulenzfeldes umgesetzt. IBK Innovation hat basierend auf dem Flugversuchsträger der OvGU eine Flugzeugmodellierung erstellt auf dessen Basis OvGU eine Model-prädiktive Flugregelung entwickelt und implementiert hat. Der Projektstrukturplan ist in Abbildung 2 dargestellt.

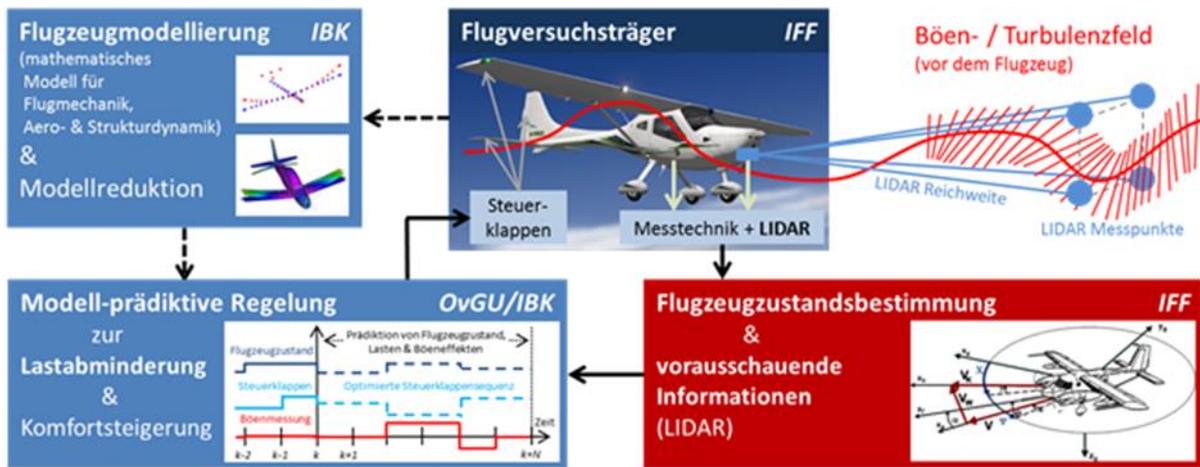
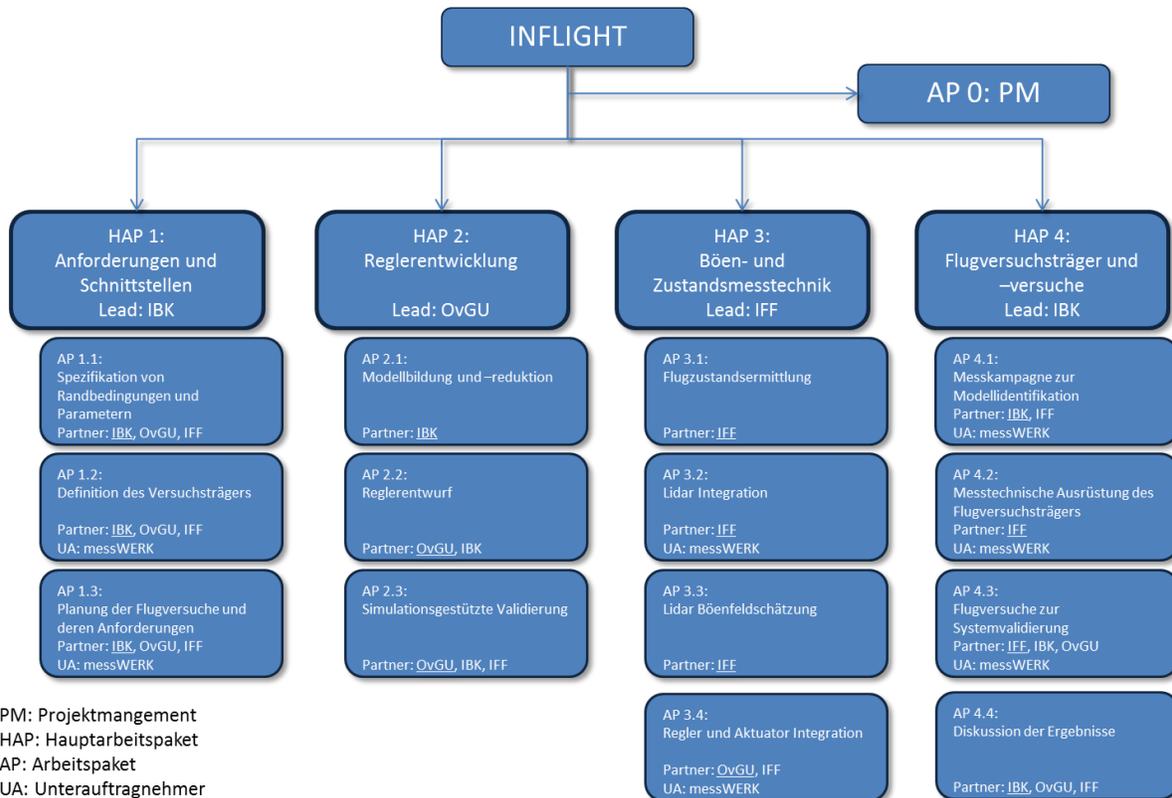


Abbildung 1: Übersicht über das INFLIGHT Projekt



PM: Projektmanagement
HAP: Hauptarbeitspaket
AP: Arbeitspaket
UA: Unterauftragnehmer

Abbildung 2: Projektstrukturplan

1.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben ordnet sich in Ziel 1 (umweltfreundliche Luftfahrt) des Luftfahrtforschungsprogramms ein, indem es ein System untersucht und erprobt hat, welches es ermöglicht aktive Lastminderung mit vorausschauender LIDAR basierter Windmesstechnik zu kombinieren. Ein solches System kann zu einer besseren Ausnutzung des Leichtbaupotenzials moderner Werkstoffe und Bauweisen beitragen, indem es die zu dimensionierenden Lastfälle beeinflusst. Dadurch kann eine deutliche Gewichtseinsparung erzielt werden und damit verbunden auch eine Reduzierung von Emissionen im Flugbetrieb und eine Einsparung von Ressourcen in der Fertigung von Flugzeugen. Durch die Abminderung der Wirkung von Böen und Windlasten auf das Flugzeug wurde daneben auch Ziel 2 (passagierfreundliche Luftfahrt) verfolgt, indem der Komfort an Bord des Flugzeugs erhöht wird. Daneben wird auch ein Einfluss auf die Sicherheit beim Führen eines Luftfahrzeugs erwartet, da Gefahren durch Böen und Scherwinde speziell im Endanflug besser erkannt und beherrscht werden können. Des Weiteren hat das IFF während der Durchführung des Projektes qualifizierte Nachwuchskräfte im MINT-Bereich ausgebildet und trägt damit dazu bei, das Wachstumspotenzial der Luftfahrtbranche zu sichern.

1.2 Wissenschaftliche / Technische Ergebnisse

AP 1.1: Spezifikation von Randbedingungen und Parametern:

- Mitwirkung an den Spezifikationen der Parameter und Schnittstellen
- Dokumentation

AP 1.2: Definition des Versuchsträgers:

- Spezifikation Ausrüstungsgrad des Flugversuchsträgers
- Bereitstellung der erforderlichen Unterlagen für die Projektpartner

AP 1.3: Planung der Flugversuche und deren Anforderungen:

- Beitrag zur Spezifikation der drei Flugversuche und des Bodenversuches
- Bereitstellung der erforderlichen Informationen bzgl. des Flugversuchsträgers

AP 2.3: Simulationsgestützte Validierung:

- Unterstützung des Partners IBK durch das zur Verfügung stellen von Informationen

AP 3.1: Flugzustandsermittlung:

- Untersuchung der Auswirkung der Geometrie auf Messergebnisse durchgeführt
- Untersuchung von Algorithmen zur Bestimmung notwendiger Parameter
- Auswahl der Algorithmen zur Bestimmung des Flugzustandes und a-priori Schätzung des Windvektors basierend auf den Messungen eines LiDARs
- Festlegung von Algorithmen zur Bestimmung des Windvektors basierend auf den Messungen eines LiDARs
- Fusionsfilter (Extended Kalman Filter) zur Fusion von Trägheitsnavigation (INS), Satellitennavigation (GNSS), Luftdaten (Fünflochsonde und Fluglog) und LiDAR in die Institutssoftware TriPos integriert
- Schnittstelle (output) via UDP zu den Systemen des Flugversuchsträgers und dem Flugregler der OvGU implementiert

AP 3.2: LIDAR Integration:

- Identifikation der Schnittstellen für die softwaretechnische Integration der LiDAR-Messungen in eine existierende Softwareumgebung des IFF
- Erarbeitung des Mietvertrages für das LidarFlex der Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften - Zentrum für Aviatik
- Abklärung bzgl. der rechtlichen Aspekte für die Anmietung des LiDAR
- Beschaffung des LiDAR
- Aufbau eines Laserlabors und Durchführung erster Versuche
- Hardwareseitige Integration, u. a. Entwicklung eines Racks für den Innenraum und eines Pods als Flügelunterlast
- Ausarbeiten von Sicherheitskonzepten und Erstellen der Zulassungsunterlagen
- Hardwareseitige Integration
- Fortsetzung der Erstellung der Zulassungsunterlagen
- Implementierung von Flugzustandsbestimmung und Schnittstellen
- Analyse der Datenschnittstelle des LiDAR
- Fertigung aller erforderlichen Komponenten zur Installation des LiDAR Transceivers im Flugzeug und der Optiken unter dem rechten Tragflügel
- Implementation eines auf das LiDAR zugeschnittenen Luftdatenmoduls in die Institutssoftware TriPos
- Softwareseitige Anbindung

AP 3.3: LIDAR Böenfeldschätzung:

- Ausarbeitung Installation der zwei Optiken und darauf angepasste Algorithmen zur Bestimmung der vertikalen Windkomponente vor dem Flugzeug
- Monte-Carlo Simulation zur Bestimmung des optimalen Installationswinkels der Optiken
- Ausarbeitung der Algorithmen zur softwareseitigen Integration in AP 3.2
- Verifizierung der Ergebnisse aus Flugversuchen anhand der Standardinstrumentierung

AP 3.4: Regler und Aktuator Integration:

- Konzept zum Einbau der Aktuatoren
- Systemidentifikation der Aktuatoren
- Einbau der Aktuatoren
- Zulassung und damit zusammenhängende Zulassungsflüge
- Systemidentifikation der Aktuatoren im Rahmen von Flugversuchen

AP 4.1: Messkampagne zur Modellidentifikation:

- Durchführung eines Flugversuches zur Bestimmung der aerodynamischen, flugmechanischen und aeroelastischen Parameter
- Aufarbeitung und Bereitstellung der aufgezeichneten Flugversuchsdaten für die Projektpartner
- Planung und Vorbereitung des Bodenversuches
- Versuche zur Bestimmung von Schwerpunktlage und Massenträgheitsmomenten (via Pendelversuch)

AP 4.2: Messtechnische Ausrüstung des Flugversuchsträgers:

- Ausrüstung des Flugversuchsträgers mit der erforderlichen Sensorik und Aufzeichnungseinheiten für den ersten Flugversuch
- Definition der zusätzlichen Aktuatorik

- Spezifikation und Beschaffung der Aktuatoren
- Einbau von Messtechnik zur Lastbestimmung
- Einrüstung der Messtechnik
- Installation des LIDAR

AP 4.3: Flugversuche zur Systemvalidierung:

- Definition weiterer Manöver und Untersuchung von Optionen für Versuche mit Böen
- Flugversuche zur Systemidentifikation des Schubmodells
- Zulassungsflug Aktuatorik
- Zulassungsflug mit installiertem LIDAR
- Flugversuche zum Testen der Einzelkomponenten
 - PID Regler
 - MPC Regler
 - LIDAR
- Test des Gesamtsystems

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die geplante Projektlaufzeit war von Anfang 2018 bis März 2021. Eine zunächst Auftretende Verzögerung von drei Monaten aufgrund fehlenden Personals einerseits und der entsprechenden Ausschreibungszeit für den Unterauftrag für den Flugversuchsträger andererseits konnte im ersten Jahr kompensiert werden, so dass Flugversuche zur Systemidentifikation und Modellbildung sowie die Bodenversuche wie geplant durchgeführt wurden. Im zweiten Projektjahr hat sich eine Verzögerung von einem halben Jahr aufgebaut, da zunächst ein unvorhergesehener Verwaltungsaufwand für die Anmietung des LiDAR Sensors aufgetreten war. Nach Abklärung der rechtlichen Rahmenbedingungen und Abklärung des Imports des LiDAR aus der Schweiz mit dem deutschen Zoll konnten die Arbeiten an dem LiDAR erst im Juni 2019 beginnen. Die somit zeitlich verschobenen Arbeiten am LiDAR, insbesondere die Installation und Zulassung sind damit in den Zeitraum der COVID-19 Pandemie gefallen, was letztlich zu erheblichen Verzögerungen im Projektablauf geführt hat. So kam insgesamt eine Verzögerung von drei Monaten aufgrund diversen Personalausfalls zustande. Aufgrund des ersten shutdowns kam es beim LIDAR zu einer Tiefentladung einer Batterie und eine Reparatur konnte nur durch den Hersteller Zephir-Lidar in Großbritannien durchgeführt werden. Reparatur, Aus- und Einfuhr haben insgesamt zu einer weiteren Verzögerung von vier Monaten geführt. Im Juli 2021 ist ein erneuter Defekt am LiDAR aufgetreten: bei dem LIDAR handelt es sich um einen Prototypen. Im Gehäuse des LIDAR ist ein interner PC zur Ansteuerung und Prozessierung installiert. Nach Rücksprache mit dem Hersteller ist der im Gehäuse verbaute Lüfter nicht ausreichend, um den internen PC wie angefordert im Dauerbetrieb und auf Langlebigkeit zu kühlen, so dass der interne PC ausgefallen ist. Da dieser PC (fit PC3) nicht mehr hergestellt wird konnte das Institut für Flugführung direkt beim Hersteller in Israel zwei Einheiten aus Restbeständen erwerben. Recherche, Transport und Installation haben zu einer weiteren Verzögerung von zwei Monaten geführt. Im weiteren Verlauf des Projektes kam es zu der Herausforderung, dass der Hersteller des LiDAR entgegen der Zusage gegenüber der ZHAW und dem Institut für Flugführung zu Beginn des Projektes kein Interesse und keine Ressourcen hat, die Echtzeitschnittstelle des LIDAR offenzulegen. In einem reverse-engineering Verfahren ist es dem Institut für Flugführung dennoch gelungen, den Rohdatenstrom des LIDAR abzugreifen, das LIDAR mit eigener INFLIGHT: Abschlussbericht

Software zu steuern und die eigentlichen Messungen zu dekodieren, so dass eine Echtzeitfähigkeit zum Einsatz im Flugversuch gegeben ist. Nichts desto trotz kamen hierdurch weitere drei Monate an Verzögerung hinzu. Das Projekt musste somit bis Ende 2021 kostenneutral verlängert werden. Zwischen September und Dezember 2021 kamen weitere Pandemiebedingte Verzögerungen hinzu, insbesondere bei der Bearbeitung der Zulassungsdokumente seitens der EASA. Um dennoch das Projekt hinsichtlich der technischen Ergebnisse erfolgreich abschließen zu können, haben sich die Projektpartner dazu entschieden, bis Ende März 2022 das Projekt weiterzubearbeiten. Aus diesem Grund umfasst dieser Abschlussbericht auch nicht den Berichtszeitraum bis Ende 2021 (im Sinne der kostenneutralen Verlängerung) sondern bis zum Tage der Berichtspflicht Ende März 2022. Die Zulassung der EASA für das LiDAR ist Anfang März 2022 erfolgt, die entsprechende Freigabe des Luftfahrtbundesamtes erfolgte am 15. März 2022 mit entsprechendem Zulassungsflug.

1.4 Erreichung der Ziele des Vorhabens

Das IFF sollte in dem Vorhaben die Bereiche der Flugzustandsermittlung, der Windmesstechnik im Nah- und Fernfeld, sowie die Ausrüstung des Flugversuchsträgers und die Durchführung der Flugversuche übernehmen. Dies wurde erreicht. Zu diesem Zweck sollte ein LIDAR in den Flugversuchsträger integriert werden und Algorithmen zur Bestimmung der relevanten Komponenten des Windvektors für die gewählte Installation des LiDARS hergeleitet und implementiert werden. Auch dieses Ziel wurde erreicht. Bekannte Algorithmen sollten auf Ihre Einsetzbarkeit untersucht und verglichen werden. Der gewählte Ansatz sollte so implementiert werden, dass die Informationen in einer für die angestrebte Lastabminderung geeigneten Form bereitgestellt werden konnte. Dieses Ziel wurde erreicht. Ergänzt werden sollten diese Informationen mit weiteren Flugzustandsgrößen, die mit einer herkömmlichen Luftdatensonde und einem INS/GNSS System ermittelt werden. Dieses Ziel wurde erreicht. Die Daten konnten mit grundsätzlich hinreichend geringer Latenz der Flugregelung zur Verfügung gestellt werden. Für die LiDAR-Daten wurde diese Latenz nur teilweise erreicht

Alle Komponenten sollten in einen Flugversuchsträger integriert werden und der Flugversuchsträger durch Umrüstung der Aktuatoren für die geplanten Flugversuche ertüchtigt werden. Zu diesem Zweck wurde ein Unterauftrag an die Firma messWERK vergeben, deren Flugversuchsträger REMOS-GX die Versuche durchgeführt hat. Auch diese Ziele wurden erreicht.

1.5 Relevante Ergebnisse Dritter

Es sind keine F&E-Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

1.6 Relevante Ergebnisse von Verbundpartnern

Es sind keine F&E-Ergebnisse von Verbundpartnern bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

1.7 Änderungen in der Zielsetzung

Die Gesamtzielsetzung hat sich gegenüber dem Antrag nicht geändert.

1.8 Verwertung der Ergebnisse

Zum Verwertungsplan des Förderantrags ergeben sich keine Veränderungen.

Im zugrunde gelegten Berichtszeitraum sind keine Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen oder erteilte Schutzrechte von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen worden.

Aus dem Projekt heraus haben sich für das Institut für Flugführung nationale Folgeprojekte ergeben. Aktuell bearbeitet das Institut für Flugführung innerhalb des Exzellenzclusters SE²A das Projekt **ARGO** (**A**ctive load **R**eduction for enabling a 1-**G** wing using **f**ORward-looking and distributed sensors), in dem der Ansatz des INFLIGHT Projektes auf CS-25 Flugzeuge ausgeweitet werden soll.

Die entwickelten Methoden und Anwendungen flossen in die Lehre ein, unter anderem in die Vorlesung Flugmeteorologie. Hierdurch wird die Ausbildung von qualifiziertem Nachwuchs verbessert sowie die Attraktivität der Universität Braunschweig erhöht.

1.9 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit den anderen beteiligten Projektpartnern hat sich sehr positiv gestaltet. Seit Beginn des Projektes gab es viel Ideenaustausch und enge Abstimmungen in Bezug auf verwendete Schnittstellen und konzeptionelle Entwicklungen. Regelmäßige Treffen und Telefonkonferenzen haben einen reibungslosen Ablauf gewährleistet. Im Zuge der COVID-19 Pandemie wurden regelmäßige Projekttreffen auf virtuelle Treffen umgestellt.

Der Flugversuchsträger wurde laut Vorhabensbeschreibung als Unterauftrag geplant. Der Zuschlag wurde nach erfolgter Ausschreibung an die Firma messWERK GmbH erteilt. Die Zusammenarbeit erfolgte positiv. Aufgrund der COVID-19 Pandemie musste der Unterauftrag erweitert werden, da über einen langen Zeitraum Mitarbeiter des Instituts für Flugführung keinen Zutritt zu dem Flugversuchsträger hatten um einen reibungslosen Einbau und Testungen der on-board Sensorik durchzuführen.

Das LIDAR wurde vom Institut für Flugführung angemietet. Vermieter war die Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften - Zentrum für Aviatik (ZHAW). Bei dem Gerät handelte es sich um ein LidarFlex (Seriennummer 4001) der Firma ZephIR Lidar mit zwei Transceiver-Einheiten. Die Zusammenarbeit mit der ZHAW war erfolgreich.

2. Technischer Bericht

2.1 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 0 „Projektmanagement“

Dieses Arbeitspaket wird ausschließlich von dem Verbundpartner IBK Innovation bearbeitet und in dessen Zwischenbericht detailliert dargestellt.

2.2 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 1 „Anforderungen und Schnittstellen“

2.2.1 Arbeitspaket 1.1 „Spezifikation von Randbedingungen und Parametern“

Das IFF hat an der Spezifikation der notwendigen Parameter und Schnittstellen mitgewirkt und den Projektpartnern Informationen bzgl. des avisierten Flugversuchsträgers geliefert. Entsprechend hat das IFF zu der Dokumentation des Arbeitspaketes beigetragen.

2.2.2 Arbeitspaket 1.2 „Definition des Versuchsträgers“

Das IFF hat in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern die Anforderungen an die Ausrüstung des Flugversuchsträgers spezifiziert. Es wurde definiert, welche Sensorik im Versuchsträger verbaut werden soll, welche Rechereinheiten verbaut werden und welchen Zweck diese haben sollen (Rechner für Basissensorik, Rechner für Flugregler und Rechner für Windfeld (LIDAR) Bestimmung).

2.2.3 Arbeitspaket 1.3 „Planung der Flugversuche und deren Anforderungen“

Das IFF hat in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern die Flugversuche spezifiziert. Dabei wurden insgesamt vier Versuche definiert: ein Bodenversuch zur Bestimmung der Schwerpunktlage und der Massenträgheitsmomente des Flugversuchsträgers, ein Flugversuch zur Identifizierung der relevanten aerodynamischen und flugmechanischen Parameter, ein Flugversuch zur Verifizierung der Einzelsysteme (Flugregler, Aktuatorik und Windfeldbestimmung) und ein Flugversuch zur Validierung und Demonstration des INFLIGHT Gesamtsystems. Nach erfolgter Ausschreibung wurde die messWERK GmbH beauftragt, den Flugversuchsträger zu stellen und Die Versuche durchzuführen. Die messWERK GmbH als Unterauftragnehmer des IFF war in der Planung hinsichtlich der flugbetriebsbedingten Fragestellungen und hinsichtlich des Flugversuchsträgers involviert.

2.3 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 2 „Reglerentwicklung“

2.3.1 Arbeitspaket 2.1 „Modellbildung und -reduktion“

Das IFF war in diesem Arbeitspaket nicht beteiligt.

2.3.2 Arbeitspaket 2.2 „Reglerentwurf“

Das IFF war in diesem Arbeitspaket nicht beteiligt.

2.3.3 Arbeitspaket 2.3 „Simulationsgestützte Validierung“

Um die Einzelkomponenten und das Gesamtsystem auf Basis von Simulationen zu validieren, hat der Projektpartner IBK Innovation eine Simulationsumgebung aufgebaut. Das IFF und der Unterauftragnehmer messWERK GmbH haben hierbei Unterstützung durch die Bereitstellung von spezifischen Daten zu Flugversuchsträger und Messinstrumenten geleistet. Im Besonderen wurden Informationen zu den ausgewählten Aktuatoren und dem LIDAR zur Verfügung gestellt.

2.4 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 3 „Böen- und Zustandsmesstechnik“

2.4.1 Arbeitspaket 3.1 „Flugzustandsermittlung“

In diesem Arbeitspaket wurden seitens des IFF zunächst geeignete Algorithmen untersucht, um den Flugzustand und insbesondere das Windfeld mittels des LiDAR zu bestimmen. Mögliche Algorithmen für die a-priori Schätzung des Windvektors basierend auf den Messungen eines LiDARs wurden identifiziert. Da das ausgewählte LiDAR der ZHAW über zwei Transceiver verfügt, können gleichzeitig nur zwei Komponenten des Windvektors gemessen werden. Weiterhin erfolgt eine Messung immer nur in einem bestimmten Abstand zum Messinstrument. Eine manuelle Veränderung dieses Abstandes ist zwar möglich, allerdings nur mechanisch und kann daher nicht im Flug erfolgen. In Bezug auf die geplante Aufgabe der Böenlastabminderung haben die vertikale Windkomponente v_z , sowie die zeitliche Veränderung der Windkomponente in Flugrichtung v_x den größten Einfluss. Auf Basis dieser Eigenschaften wurde ein Einbau der Transceiver beschlossen, bei der die Transceiver nach oben und unten gerichtet sind. Eine schematische Darstellung findet sich in Abbildung 3. Auf Basis dieser Parameter ergibt sich die Bestimmung des Windvektors aus geometrischen Zusammenhängen. Die Windrichtung und -stärke kann somit in mehreren Punkten auf einer Linie in Flugrichtung ermittelt werden, unter der Annahme, dass das Windfeld im eingestellten Abstand vom Flugzeug weitgehend homogen ist. Da eine Beobachtung der Veränderung des Windfeldes in einem Punkt nicht möglich ist, wurde eine Modellierung des zeitlichen Verlaufs des Windfeldes nicht weiter verfolgt.

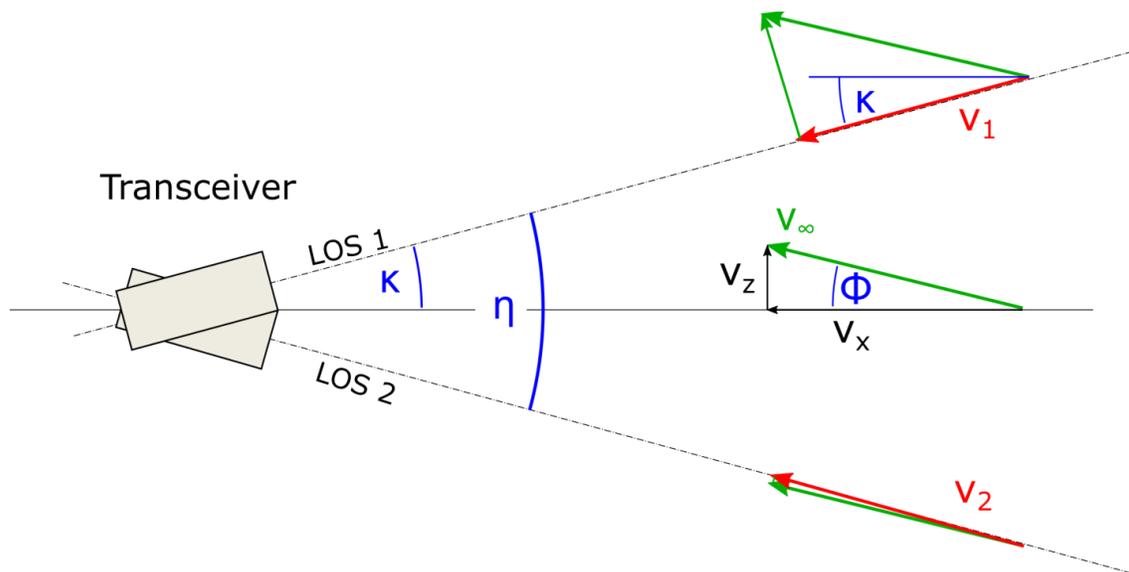


Abbildung 3: Schematische Darstellung der LIDAR Messungen

Gemeinsam mit den Verbundpartnern wurde eine simulationsgestützte Abschätzung des Einflusses der Einbaugeometrie auf die zu erwartenden Messergebnisse vorgenommen. Hierzu wurde der Einfluss von Fehlern mit einer Monte-Carlo-Simulation für verschiedene Einbauwinkel untersucht. Eine beispielhafte Darstellung des Einflusses des Winkels η (vgl. Abbildung 3) zwischen den beiden Transceivern findet sich in Abbildung 4. Dargestellt ist die zu erwartende Standardabweichung von fehlerbehafteten Ergebnissen

der Vertikalgeschwindigkeit für ein η von 20° , bzw. 45° . Gut zu erkennen ist, dass ein größerer Winkel zwischen den Transceivern zu einer Verbesserung der Ergebnisse führt. Gleichzeitig führt ein größerer Winkel zu einer Verschiebung der Messvolumina nach oben und unten weg von der Flugbahn des Flugzeugs. Weiterhin wird durch den vergrößerten Abstand zwischen den Messpunkten die getroffene Annahme eines homogenen Windfeldes im Messbereich unwahrscheinlicher. Als Kompromiss zwischen diesen Faktoren wurde ein Winkel η von 30° gewählt.

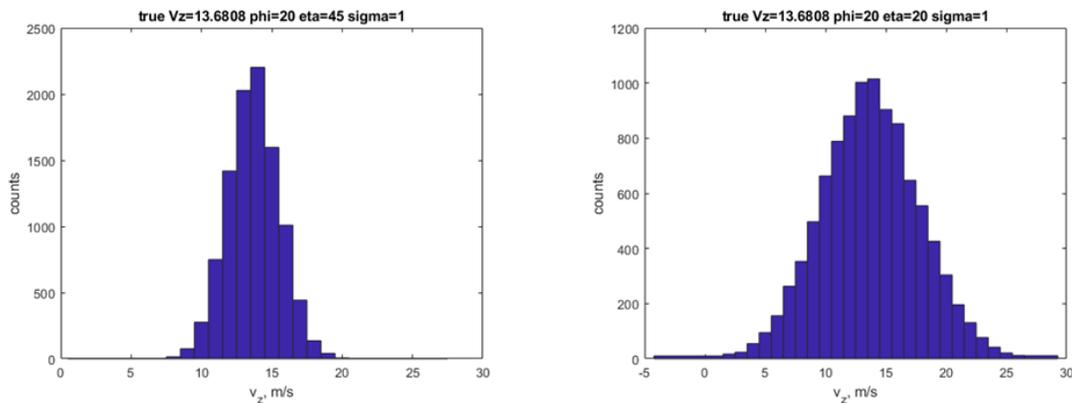


Abbildung 4: Einfluss des Einbauwinkels Eta auf die Standardabweichung

Im Rahmen der Untersuchung der Einbauwinkel zeigte sich zudem eine Abhängigkeit der Ergebnisse des Winkels κ , die physikalisch nicht schlüssig erklärbar ist. Diese Korrelation ist möglicherweise auf die Modellierung zurückzuführen und wurde deshalb nicht weiter berücksichtigt. Angestrebt wurden gleiche Winkel der Transceiver gegenüber der Horizontalen. Im stationären Gradeausflug ist mit einem Anstellwinkel von etwa drei Grad zu rechnen. Um diesen zu kompensieren wurde κ entsprechend auf 12° festgelegt.

Um sowohl die Daten des LiDAR, als auch die der Trägheitsnavigation (INS), Satellitennavigation (GNSS) und der Luftdaten (Fünflochsonde und Fluglog) zu koppeln, kommt ein Fusionsfilter (Extended Kalman Filter) zum Einsatz. Hierzu wurden die Funktionalitäten der Institutssoftware TriPOS erweitert und angepasst. Weiterhin wurden Schnittstellen (sowohl in- als auch output) via UDP zu den Systemen des Flugversuchsträgers und dem Flugregler der OvGU implementiert.

2.4.2 Arbeitspaket 3.2 „Lidar Integration“

Die Integration des LiDAR erfolgte hardware- und softwareseitig. Zunächst wurden die Schnittstellen für die softwaretechnische Integration des LiDAR in eine am IFF existierende Softwareumgebung identifiziert. Als Kern kommt die echtzeitfähige Navigationssoftware TriPos des IFF zum Einsatz, in der für die Flugzustandserfassung ein Extended KALMAN Filter als Fehlerzustandsschätzer oder als Vollzustandsschätzer zum Einsatz kommen kann. Auf Seite der Luftdatenreferenz kommt die Air Data Komponente der Software als Basis zum Einsatz, zum einen um über eine Fünf-Loch-Sonde eine Referenz bereitzustellen und zum anderen, um als Weiterentwicklung die LiDAR Messungen zu integrieren.

Bezüglich der LiDAR Hardware wurde das LidarFlex System der Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften - Zentrum für Aviatik (ZHAW) ausgewählt. Das System besteht aus zwei unabhängigen

Laser Einheiten. Durch entsprechende Anbringung des LIDAR an das Forschungsflugzeug können damit die wahre Fluggeschwindigkeit und der Anstellwinkel vor dem Flugzeug bestimmt werden.

Ein Mietvertrag für das LiDAR konnte im Frühjahr 2019 abgeschlossen werden, nachdem die rechtlichen Aspekte der Anmietung (Abgleich mit den Drittmittelbestimmungen der TUBS, Definition, ob es sich um eine Anmietung oder eine Beschaffung handelt, Fragen des Transportes und Versicherungsschutz, Zollbestimmungen, etc.) abgeschlossen waren. Der Transport erfolgte im Juni 2019 (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Versandbox für das LIDAR (links) und einer der zwei Lasereinheiten (rechts)

Bei dem LiDAR handelt es sich um einen Klasse IV Laser. Zur Erprobung des LIDAR-Systems wurde deshalb am Institut für Flugführung ein Laserlabor eingerichtet, da ein Betrieb nur unter der Einhaltung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften erlaubt ist. Ein entsprechend geschulter Lasersicherheitsbeauftragter war Teil der Projektgruppe, sodass Veränderungen am Versuchsaufbau kurzfristig vorgenommen werden konnten. Die Anmeldung des Systems bei den zuständigen Behörden wurde entsprechend durchgeführt. Eine Darstellung des Labors findet sich in Abbildung 6. Der gesamte Strahlengang fand innerhalb der orangenen Rohre statt um die Sicherheit zu erhöhen. Durch einen eingebauten handelsüblichen Lüfter konnte ein Luftstrom in der Messstrecke für Testmessungen erzeugt werden, wobei aufgrund von räumlichen Beschränkungen immer nur ein Transceiver verwendet werden konnte. Mithilfe dieses Aufbaus wurden erste Testdatensätze aufgezeichnet, die den Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurden.



Abbildung 6: Laserlabor

Für die avisierten Flugversuche musste das LiDAR in den Versuchsträger, einer RemosGX, eingebaut werden. Das eigentliche Messsystem besteht aus einer zentralen Einheit, in der alle wichtigen Komponenten integriert sind. Der dort erzeugte Laserstrahl wird mittels Lichtleitern an zwei Transceiver übertragen. Die einzelnen Komponenten sind in Abbildung 7 dargestellt. Links im Bild die sind beiden Transceiver, in der Mitte die Zentraleinheit und rechts die Stromversorgung zu sehen.



Abbildung 7: Komponenten des ZHAW LidarFlex-System

Mit Ausnahme der Transceiver wurden alle Komponenten des Systems im Inneren des Flugzeuges eingebaut. Aufgrund der Größe der Zentraleinheit musste hierfür der Sitz des Copiloten entfernt und durch ein entsprechendes Rack ersetzt werden. Ein entsprechendes Konzept wurde erstellt und auf dessen Basis ein Mock-up gefertigt. Dieses musste erwartungsgemäß mehrfach angepasst werden, da der Flugzeuginnenraum nur schwer zu vermessen war. Weiterhin konnte durch die Verwendung des Mock-up die Ergonomie des Entwurfs verbessert werden. Das Rack kann die Zentraleinheit, den zugehörigen Spannungswandler, Akkus, einen Messrechner und Vorrichtungen zur Notabschaltung aufnehmen. Eine Darstellung der Konstruktion findet sich in Abbildung 8, sowie des im Flugzeug eingebauten Mock-up mit Ersatzkörpern in Abbildung 9.

Die Transceiver wurden außerhalb des Rumpfes angebracht, da eine ungehinderte Sichtachse erforderlich war. Somit stand der von der Luftschraube überstrichene Bereich nicht zur Verfügung. Weiterhin musste ein hinreichend großer Abstand zum Boden gewährleistet sein, um die Optiken vor Beschädigungen beim Rollen am Boden zu schützen. Auch eine Beeinflussung der Aerodynamik und der Schwerpunktlage sollte möglichst gering gehalten werden. Zunächst war geplant, die Transceiver in einer Umhüllung an der Vorderkante des Tragflügels zu montieren, was sich jedoch als nicht umsetzbar erwies. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde deshalb an einer Lösung gearbeitet, bei der die Transceiver in einem Behälter (Pod) unter der rechten Tragfläche angebracht werden konnten. Dieses Vorgehen entspricht der vorherigen Nutzung durch die ZHAW. Zur Befestigung am Flügel sollte ein Handschuh aus Faserverbundwerkstoffen (FVW) dienen. Die Verbindung zwischen Flügelhandschuh und Pod sollte über

ein Stabwerk hergestellt werden. Der Pod wurde zunächst mit einem Rohrrahmen geplant, der die Transceiver und zugehörige Komponenten trägt, sowie einer ebenfalls daran befestigten Umhüllung aus FVW, die im Sinne eines Pylon auch das Stabwerk mit umschließt. Ein Zwischenstand der Entwicklung ist in Abbildung 10 zu sehen. Im Kontext dieses Entwurfs wurde eine erste Irisblende beschafft, um eine zusätzliche Sicherheitskomponente zu integrieren.

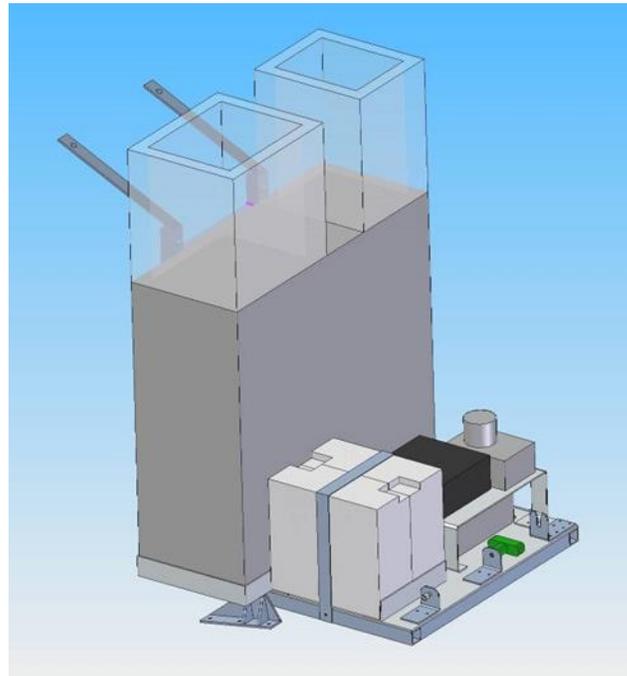


Abbildung 8: CAD Konstruktion der Rack Einheit

Da mit dem Einbau des Racks Veränderungen im Innenraum vorgenommen werden mussten und für die Transceiver eine zusätzliche Außenlast angebracht wurde, mussten diese Modifikationen von der EASA zugelassen werden. Diese ist die zuständige Zulassungsbehörde für Veränderungen am Flugversuchsträger. Da es sich bei dem LiDAR um einen Klasse IV Laser handelt, sind spezielle Sicherheitsvorkehrungen nötig, um potenzielle Schäden an Menschen und Material abzuwenden. Diese müssen im Sinne eines Gesamtkonzeptes ebenfalls zugelassen werden. Daher wurde ein Sicherheitskonzeptes ausgearbeitet, welches auf der ursprünglichen Risikoanalyse des Systemherstellers beruht. Für die strukturelle Zulassung wurden Belastungsversuche geplant.

Die Zulassung durch die EASA gestaltete sich als iterativer Prozess. Im Rahmen dessen wurde zunächst die Struktur des Pod angepasst. Die Rohrrahmenkonstruktion wurde durch ein Blechbiegeteil ersetzt und auf die Umhüllung des Stabwerks im Stile eines Pylons wurde verzichtet. Weiterhin musste das Sicherheitskonzept deutlich erweitert werden. Ein Nachweis der Sicherheit für Beobachter mit dem bloßen Auge stellte sich als nicht hinreichend heraus. Aus diesem Grund wurde der kritische Fall um Beobachter mit Spektiven erweitert. Aus diesem Grund wurde eine Mindestflughöhe von 900ft für den Betrieb des Lasers vorgegeben. Weiterhin wurde ein mehrstufiges Sicherheitskonzept für die Aktivierung und Deaktivierung des Lasers integriert. Außerdem musste die Sicherheit der verwendeten Akkumulatoren zusätzlich nachgewiesen werden. Diese wurden zwar bereits im Flugzeug eingesetzt, jedoch nicht im Inneren des Cockpits. Hierfür erfolgte eine Analyse der Sicherheit gegen Durchgehen in Kombination mit einem Test des Verhaltens unter Entladebedingungen. Als weiterer begrenzender Faktor erwies sich der

Pod. Kritisch war nicht wie zunächst angenommen der Einfluss auf die Flugleistungen des Flugversuchsträgers oder die Durchbiegung des Holms, sondern dessen Torsion. Auf Basis der Berechnungen des Herstellers des Flugzeuges wurde eine maximal zulässige Flugeschwindigkeit von 94 Knoten festgelegt.



Abbildung 9: Mockup des Rack im eingebauten Zustand mit Ersatzkörpern

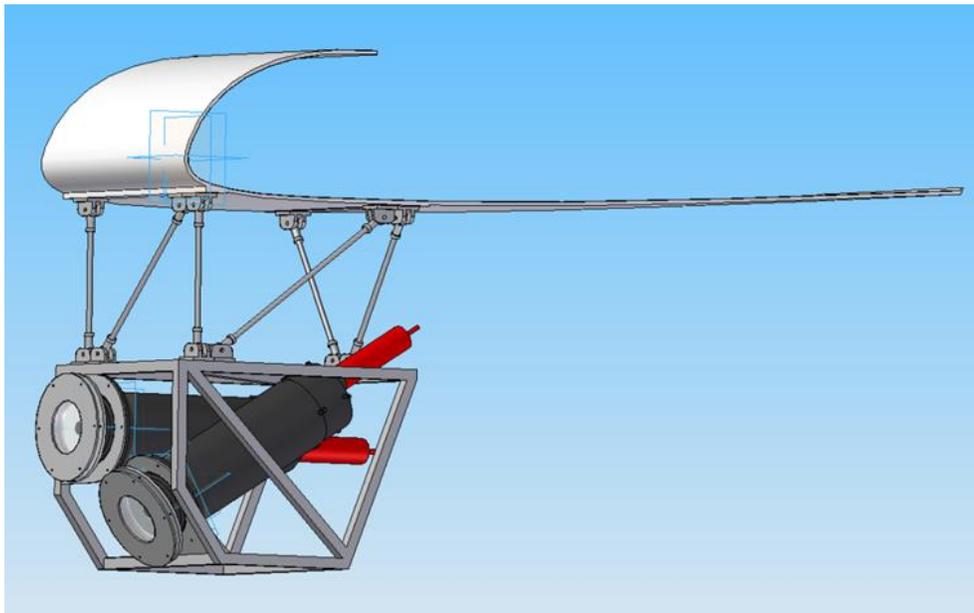


Abbildung 10: CAD Modell einer Iterationsstufe des Underwing Pad

Nach Annahme der rechnerischen Nachweise und der vorgeschlagenen Sicherheitskonzepte durch die EASA, folgte die Durchführung von Nachweisversuchen. Diese für die Zulassung nötigen Belastungs- und

Funktionstests wurden unter der Aufsicht eines Prüfers durchgeführt. Hierbei wurde zunächst die Funktion aller Sicherheitskonzepte und Funktionalitäten nachgewiesen. Hierzu zählte u. a. der sechsstufige Aktivierungsvorgang des LiDAR. Weiterhin wurden die Belastungstests aller installierten Komponenten abgenommen. Hierzu wurden gemäß der Zulassungskriterien und der Masse der Komponenten definierte Kräfte in verschiedenen Richtungen auf die Komponenten aufgebracht. Ein Beispiel hierfür findet sich in Abbildung 11. Alle Tests wurden bestanden.



Abbildung 11: Belastungsversuch einer eingebauten Komponente

Nach dem Einreichen der Ergebnisse der Tests wurde von der EASA die Zulassung erteilt. Diese musste im Anschluss noch durch das Luftfahrtbundesamt in eine Deutsche Zulassung umgeschrieben werden. Dieses Vorgehen und die grundsätzliche Zuständigkeit der EASA ergibt sich aus der Tatsache, dass der Flugversuchsträger unter die Klasse Light Sports Aircraft fällt, deren Bauvorschrift nicht in deutsches Recht übertragen wurde. Im Anschluss an die Zulassung wurden abschließende Roll- und Flugerprobungsversuche durchgeführt, um den Zulassungsprozess abzuschließen. Hierbei wurden die im Rahmen der Zulassung berechneten geringen Auswirkungen auf die Flugleistungen bestätigt.

Die abschließende Konfiguration der Einbauten in die Kabine hat sich gegenüber der Planung nur leicht verändert und ist in Abbildung 12 dargestellt. Am auffälligsten ist eine zusätzliche Stromverteilungseinheit mit eigenem Not-Aus-Schalter über den Akkumulatoren. Der Einsatz eines Mock-Up wurde als sehr positiv bewertet, da somit keinerlei weitere Anpassung der gefertigten Komponenten notwendig war, trotz der komplexen Kabinengeometrie.

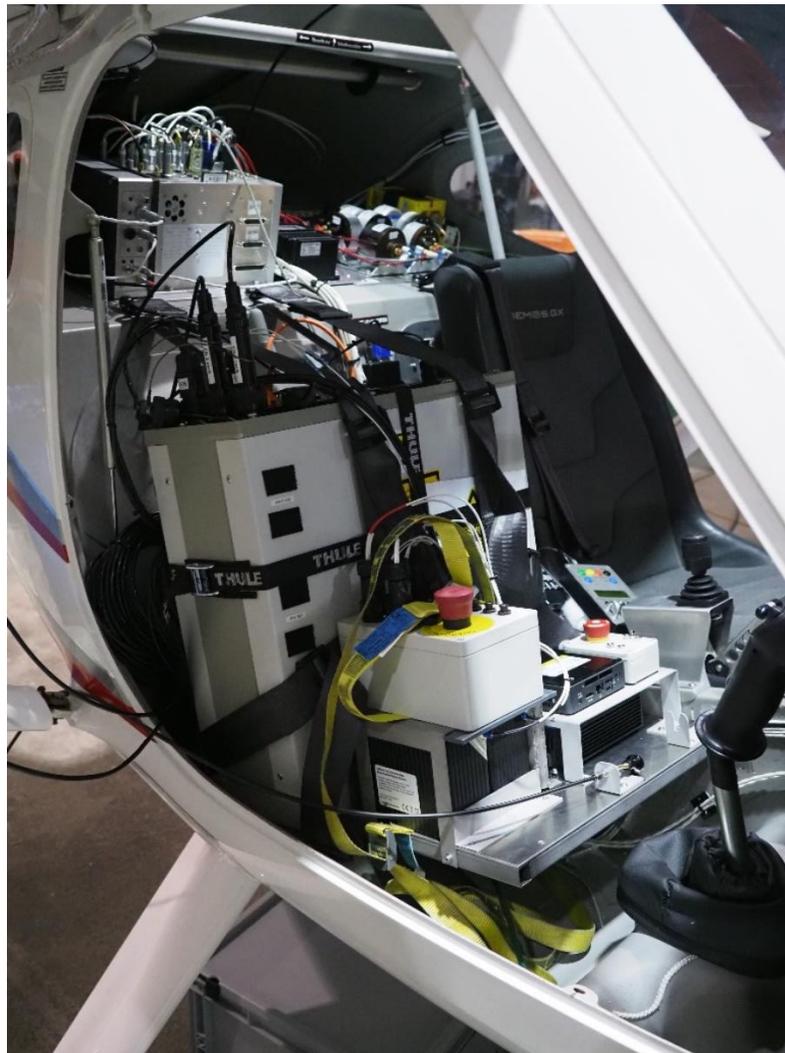


Abbildung 12: Eingebaute Komponenten in der Kabine

Die unter dem Flügel montierten Komponenten sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 gezeigt. In der ersten Abbildung ist der Gesamteinbau mit dem Cover zu sehen. Im oberen Bereich am Flügel befindet sich der Handschuh mit Versteifungsrippen. Darunter folgt das Gestänge für die Anbindung und das Gehäuse mit eingeklebten Schutzfenstern. In der folgenden Grafik ist der Pod ohne die Umhüllung gezeigt. Die veränderte Konstruktion aus Blechbiegeteilen bietet gegenüber der ursprünglichen Planung mit einer Rohrkonstruktion Gewichtsvorteile bei einer dennoch hervorragenden Stabilität. Vor den beiden Transceivern befinden sich die Irisblenden mit der Anbindung an die Bowdenzüge zum Öffnen und den Gummibändern für das Schließen. Die Gesamtkonstruktion weist eine sehr gute Stabilität und Steifigkeit auf. Vibrationen konnten im Flug durch den Piloten und auf Videoaufzeichnungen nicht festgestellt werden. Eine abschließende Darstellung des Flugversuchsträgers im Flug mit eingebautem LiDAR ist in Abbildung 15 gegeben. Alle beschriebenen Komponenten wurden von der zum Institut für Flugführung gehörenden Werkstatt gefertigt. Eine Ausnahme bilden lediglich die Faserverbundstrukturen, Diese wurden vom IFF in Zusammenarbeit mit der Firma MessWERK erstellt.



Abbildung 13: Eingebauter Pod mit Cover



Abbildung 14: Pod ohne Cover



Abbildung 15: Flugversuchsträger im Flug mit eingebautem LiDAR

Bezüglich des Auslesens der Daten des LIDAR ergab sich eine unvorhergesehene Komplikation. Zwar konnten die Daten nachträglich ausgelesen werden, jedoch ist eine Echtzeitschnittstelle in diesem Prototypen seitens des Herstellers nicht implementiert. Als erste Maßnahme wurde versucht die gespeicherten Daten zur Laufzeit aus der Datei zu lesen. Die hierfür vorhandenen Sicherheitsmechanismen konnten allerdings nicht umgangen werden. Um echtzeitfähigen Zugriff auf die Daten zu erhalten, wurde Kontakt mit dem Hersteller aufgenommen und um eine Offenlegung des Quellcodes gebeten, was allerdings durch den Hersteller verweigert wurde. Um dennoch eine Echtzeitfähigkeit des Systems zu gewährleisten, wurden die Rohdaten direkt an der seriellen Schnittstelle des LIDAR ausgelesen. Via reverse-engineering war es dem Institut für Flugführung möglich, die Länge der Nachrichten, dessen Struktur und Inhalt sowie die erforderlichen Steuerbefehle zu dekodieren, so dass die Messungen des LIDAR direkt in der Software für die Flugzustandsermittlung verarbeitet werden konnten.

Im Rahmen der Systemintegration ergab sich die Notwendigkeit zur Anpassung der Software. Diese wurde parallel zu den durchgeführten Versuchen iterativ durchgeführt. Nach den ersten Flugversuchen wurden zunächst unerklärliche Schwankungen der auf den LiDAR-Daten basierenden Winddaten im flugzeugfesten Koordinatensystem festgestellt. Diese wurden bis zu diesem Zeitpunkt weder in Labor- noch Bodenversuchen beobachtet. Nach dem Zurückführen auf den unteren Transceiver, wurden zunächst vermutete Einflüsse durch den Einbau und daraus möglicherweise resultierende Reflektionen an Cover, Schutzscheibe oder Iris ausgeschlossen. Erst durch die Analyse der LiDAR-Rohdaten, den FFT-Werten, konnte eine Korrelation mit dem Heading festgestellt werden. Weiterhin konnte durch den Abgleich mit Umgebungsbedingungen an mehreren Testtagen ein Einfluss der Sonneneinstrahlung ausgeschlossen werden. Schlussendlich ergab sich durch das Heranziehen der Windrichtungen an den Testtagen als wahrscheinlichste These ein Auffangen von Bodenreflektionen. Dies wurde zunächst ausgeschlossen, da aufgrund des divergenten Strahlengangs jenseits des Fokuspunktes von einer zu

geringen Energiedichte für relevante Rückstreuungen ausgegangen wurde. Die Indizien sprechen jedoch ganz eindeutig für diese These.

Ein Beispiel der Problematik ist in Abbildung 16 gezeigt. Dargestellt sind die FFT-Bins des unteren Transceivers eines Fluges über der Zeit. Je intensiver die Farbe, desto stärker ist die Rückstreuung in einem Geschwindigkeitsbereich. Für eine normale Messung ist mit nur einer Linie zu rechnen. In dieser Abbildung sind jedoch zwei Linien zu beobachten, die nur in einigen Bereichen stark voneinander abweichen. In diesen Bereichen kommt es bei der Berechnung der gemessenen Geschwindigkeiten zum Wechseln zwischen dem jeweils stärkeren Signal und damit zu den beobachteten Schwankungen. Die Abweichung zwischen den beiden Signalen ist nur dann gegeben, wenn ein Unterschied zwischen Air- und Groundspeed vorliegt. Dies ist nur bei Wind und auf Parallelwindkursen der Fall, womit sich die Abhängigkeit von Heading und Windrichtung erklären lässt.

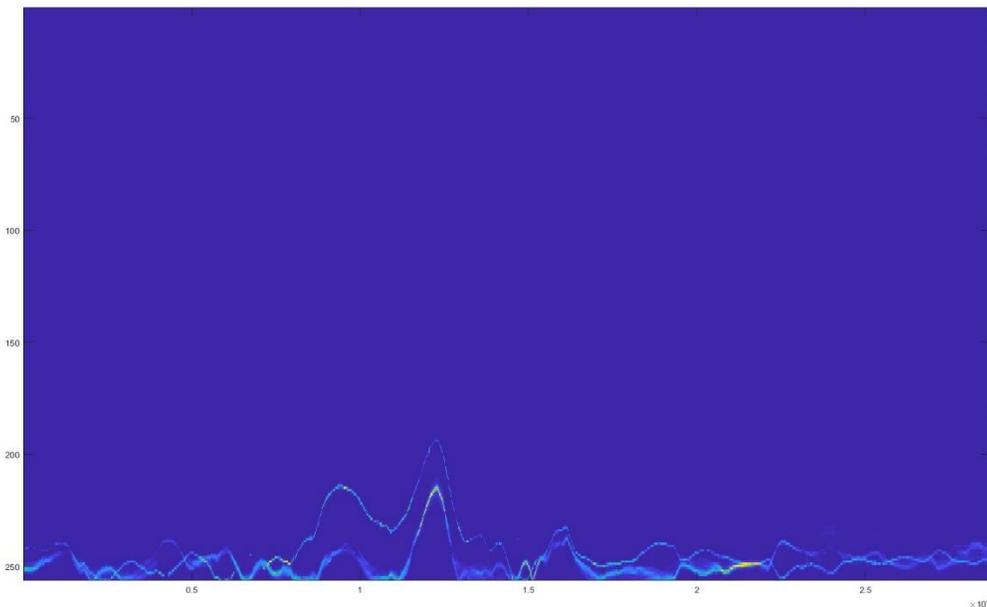


Abbildung 16: FFT-Bins eines Fluges über der Zeit

Um dieses Phänomen zu umgehen, wurden sowohl eine größere Flughöhe, als auch ein Verringern der Fokusdistanz erprobt. Beide führten jedoch zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen. Für größere Flughöhen wurde eine Verringerung des Effekts nur für sehr große Höhen von mehreren Tausend Fuß erreicht. In diesen Höhen können Bodeneffekte die genutzt werden sollen aber praktisch nichtmehr nachgewiesen werden. Auch eine Verringerung der Fokusdistanz führte nur zu unzureichenden Verbesserungen und resultiert außerdem in einer Verringerung der Vorlaufzeit für die Datenverarbeitung. Um dennoch verwertbare Ergebnisse zu erhalten, wurde ein rudimentärer Filter implementiert. Dieser stützt sich auf die Tatsache, dass das Signal der Boderrückstreuung prinzipiell weniger breit streut, als das Signal der Aerosolpartikel, die für die Windmessung erfasst werden. Dies beruht wahrscheinlich darauf, dass der Boden immer eine konstante Relativgeschwindigkeit zum Flugzeug hat, während die Aerosolpartikel immer eine Streuung der Geschwindigkeit aufweisen. Zum Filtern werden alle Signalbereiche eines Zeitschritts verglichen und nur der breiteste zusammenhängende Abschnitt wird als wahr angenommen. Eine weitere Kopplung mit z. B. der Groundspeed wäre wünschenswert, um das

Ergebnis zu verbessern. Diese liegt aber zur Auswertung der FFT-Bins nicht vor, da diese direkt auf dem LiDAR geschieht, die Datenfusion jedoch erst auf einem externen Rechner durchgeführt wird. Als weitere Kompensationsmaßnahme wurden Flüge auf Kursen quer zur Windrichtung erwogen, da dieses Phänomen dann nicht auftritt. Ein Ergebnis der Filterung für den bereits gezeigten Flug ist in Abbildung 17 dargestellt. Das Ergebnis zeigt eine deutliche Verbesserung der Daten, jedoch ohne eine absolute Zuverlässigkeit.

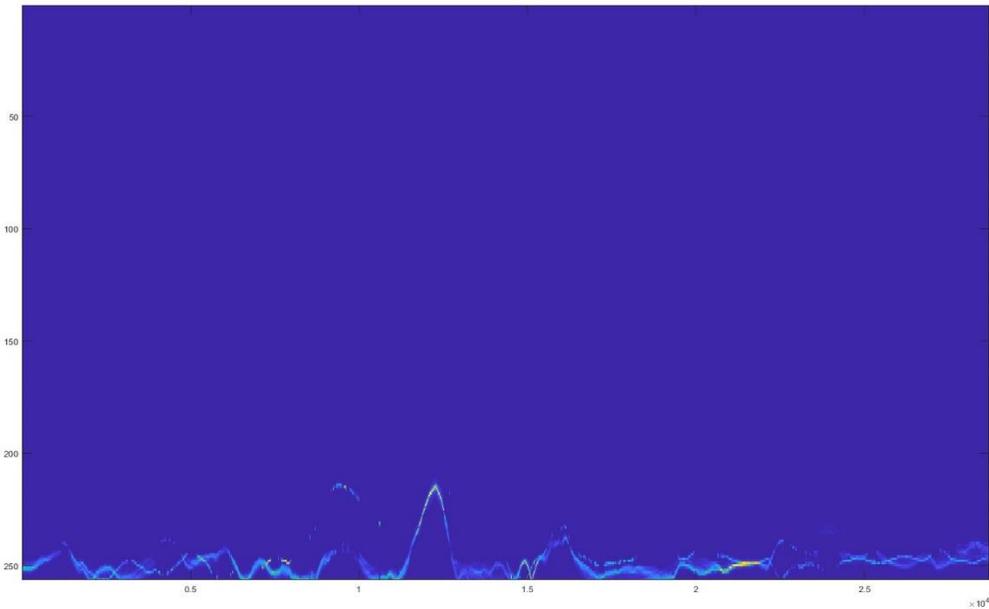


Abbildung 17: FFT-Bins eines Fluges über der Zeit mit Filterung der Bodenreflexionen

2.4.3 Arbeitspaket 3.3 „Lidar Böenfeldschätzung“

Für die Schätzung des Böenfeldes werden die vom LiDAR ermittelten Geschwindigkeiten in Strahlrichtung (Line of Sight – LOS) durch die in TriPOS integrierten Algorithmen zunächst in Geschwindigkeitskomponenten in x- und z-Richtung im Flugzeugfesten Koordinatensystem umgewandelt. Die Lösung ergibt sich aus den folgenden Formeln. Eine Referenz für die geometrischen Zusammenhänge und Formelzeichen findet sich in Abbildung 3. Zunächst die Herleitung:

$$v_1 = V \cos(\Phi + \kappa)$$

$$v_2 = V \cos(\Phi + \kappa - \eta)$$

$$= V(\cos(\Phi + \kappa) \cos(-\eta) - \sin(\Phi + \kappa) \sin(-\eta))$$

$$V = \frac{v_1}{\cos(\Phi + \kappa)}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\cos(\Phi + \kappa)} (\cos(\Phi + \kappa) \cos(-\eta) - \sin(\Phi + \kappa) \sin(-\eta))$$

$$v_2 = v_1(\cos(-\eta) - \tan(\Phi + \kappa) \sin(-\eta))$$

$$\tan(\Phi + \kappa) = \frac{\cos(-\eta)}{\sin(-\eta)} - \frac{v_2}{v_1 \sin(-\eta)}$$

Die Ergebnisse können dann berechnet werden zu

$$(\Phi + \kappa) = \arctan\left(\frac{\cos(-\eta)}{\sin(-\eta)} - \frac{v_2}{v_1 \sin(-\eta)}\right)$$

$$V = \frac{v_1}{\cos(\Phi + \kappa)}$$

$$v_z = V \sin(\Phi)$$

Im Anschluss erfolgt eine Korrektur für die Eigenbewegung des Flugzeugs, sodass als Resultat der Windvektor mit x- und z-Komponente im flugzeugfesten Koordinatensystem vorliegt.

Die Richtigkeit dieser Berechnungen konnte mit Hilfe von Bodenversuchen bestätigt werden. Besonders bewährt hat sich hierbei die Messung mit nur einem Transceiver. Aufgrund des Messprinzips muss der Windvektor in diesem Fall senkrecht auf der Sichtachse des zweiten Transceivers stehen und die Berechnung der Windkomponenten im flugzeugfesten System vereinfacht sich deutlich. Eine Korrelation im Flug mit den Daten der Fünflochsonde kann ebenfalls gezeigt werden. Die Berechnung der Komponenten des Windvektors aus den LOS Geschwindigkeiten und damit auch die Detektion von Böen ist somit eindeutig. Allerdings sind wie bereits beschrieben, die FFT-Daten im Flug, welche die Basis für die LOS Geschwindigkeiten sind, gestört. Dies kann durch den beschriebenen Filter und ein Anpassen der Flugrichtung während der Versuche teilweise aufgefangen werden.

Über die bekannten Größen Messentfernung und Fluggeschwindigkeit kann weiterhin der Auftreffzeitpunkt des gemessenen Luftvolumens am Flugzeug ermittelt werden.

2.4.4 Arbeitspaket 3.4 „Regler und Aktuator Integration“

Um die Steuerflächen des Flugversuchsträgers hinreichend schnell zu verfahren wurden neue Aktuatoren beschafft. Eine Untersuchung des Systemverhaltens wurde durch die messWerk GmbH mit Unterstützung einer studentischen Arbeit durchgeführt und die notwendigen Zulassungsunterlagen zur Vorlage bei der EASA wurden erstellt und die Aktuatoren seitens dieser zugelassen. Eine Darstellung eines eingebauten Aktuators findet sich in Abbildung 18. Im weiteren Projektverlauf mussten nur kleine Veränderungen an einem Aktuator vorgenommen werden.

Auch die Integration der Iterationen des Reglers wurde durch die MessWerk GmbH durchgeführt. Hierzu wurden durch die OVGU Regler zur Verfügung gestellt, auf die im Anschluss die Schnittstellen des Flugversuchsträgers angepasst wurden. Hierzu wurde u. a. ein Interface Control Document (ICD) erstellt, um die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten des Gesamtsystems zu definieren. Eine Übersicht über den Signalaustausch zwischen den einzelnen Systemkomponenten findet sich in Abbildung 19.



Abbildung 18: Eingebauter Aktuator im Flugversuchsträger

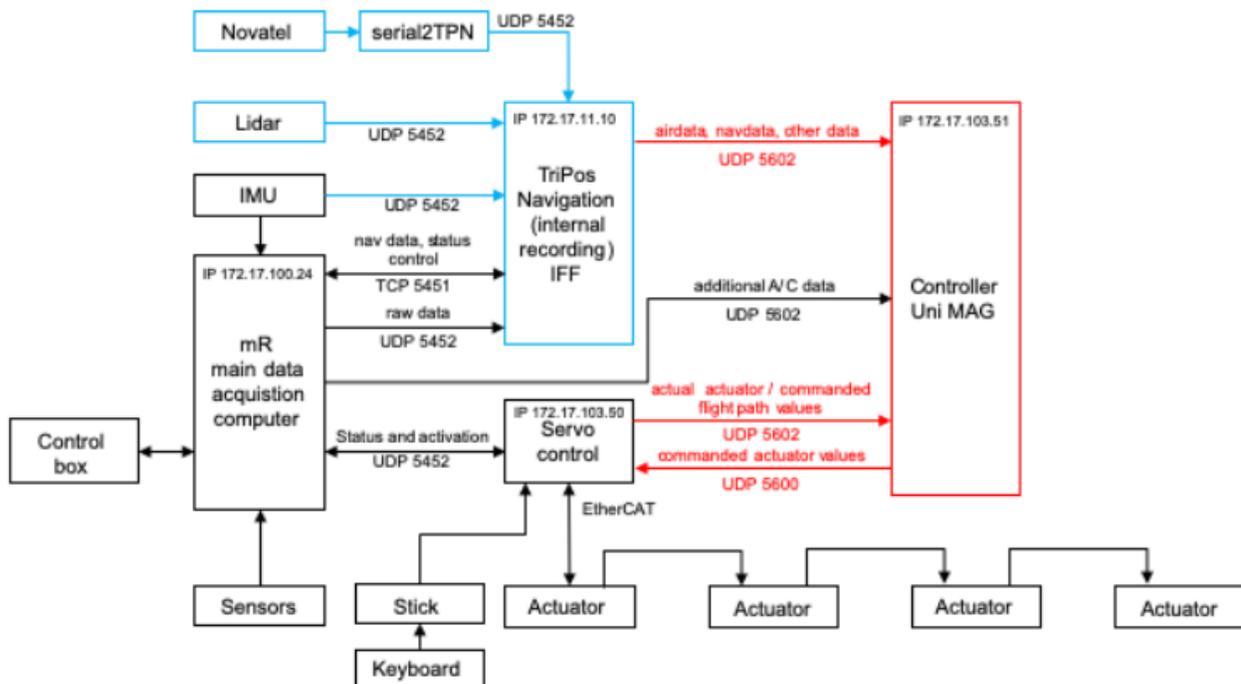


Abbildung 19: Netzwerkarchitektur im Flugversuchsträger

2.5 Ergebnisse zum Hauptarbeitspaket 4 „Flugversuchsträger und -versuche“

2.5.1 Arbeitspaket 4.1 „Messkampagne zur Modellidentifikation“

Die messWERK GmbH als Unterauftragnehmer des IFF hat einen Flugversuch durchgeführt. Im Rahmen des Flugversuchs wurden mehrere Manöver geflogen. Die während des Flugversuches aufgezeichneten Daten wurden den anderen Projektpartnern bereitgestellt und dienen als Grundlage zur Bestimmung der relevanten aerodynamischen, flugmechanischen und aeroelastischen Parameter. Für die Bestimmung der Schwerpunktlage und der Massenträgheitsmomente ist ein Pendelversuch vorgesehen gewesen. Dabei soll der Flugversuchsträger an einem Doppelpendel aufgehängt werden. Über definierte Anregungen kann aus der Flugzeugreaktion auf die gesuchten Parameter geschlossen werden.

Masse und Schwerpunktlage des Flugzeuges wurden durch radweises Wägen in verschiedenen Konfigurationen bestimmt und Pendelversuche zur Bestimmung der Massenträgheitsmomente wurden durchgeführt. Hierfür wurde der Versuchsträger in den Räumlichkeiten der Aerodata AG am Forschungsflughafen Braunschweig an einem Hallenkran aufgehängt. Eine beispielhafte Konfiguration findet sich in Abbildung 20. Das Flugzeug wurde dann durch definierte Auslenkungen zu Pendelschwingungen angeregt. Die sich einstellenden Bewegungen wurden mit dem im Flugzeug vorhandenen und einem externen Messsystem aufgezeichnet. Weiterhin wurden Videoaufnahmen angefertigt. Mit der nun bekannten Masse, der Schwerpunktlage und den erfassten Pendelschwingungen und damit Periodendauern, konnten die Massenträgheitsmomente um die gemessenen Achsen bestimmt werden.



Abbildung 20: Beispielhafter Versuchsaufbau zur Bestimmung der Massenträgheitsmomente der RemosGX

2.5.2 Arbeitspaket 4.2 „Messtechnische Ausrüstung des Flugversuchsträgers“

In diesem Arbeitspaket wurde der Flugversuchsträger hardwaretechnisch mit der erforderlichen Aktuatorik und Sensorik ausgerüstet. Hierzu zählen die Basisausstattung zur Bestimmung des Flugzustandes (GNSS/INS, Fünfflochsonde und Fluglog), die hardwaretechnische Einrüstung des LIDAR (vgl Kapitel 2.4.2) und die Installation der Aktuatorik (siehe Kapitel 2.4.4).

2.5.3 Arbeitspaket 4.3 „Flugversuche zur Systemvalidierung“

Zu Beginn wurden Flugversuche zur Systemvalidierung durchgeführt. Weitere Manöver wurden durch den Projektpartner IBK Innovation in Abstimmung mit dem Unterauftragnehmer messWerk definiert. Um Validierungsflüge unter Böeneinfluss durchzuführen, sollten diese über dem Kühlturm des Braunschweiger Heizkraftwerkes Mitte durchgeführt werden. Hierdurch sollten möglichst reproduzierbare Bedingungen erreicht werden. Ein erster Testflug ergab allerdings, dass der Aufwind in Überflughöhe nicht mehr bemerkbar ist. Als Ersatz werden thermische Aufwinde, sowie Hangaufwinde erwogen, welche jedoch nicht die gleiche Reproduzierbarkeit erwarten lassen.

Für die Zulassung des LiDAR wurden als letzter Schritt dieses Prozesses Versuchsflüge unternommen, um die Sicherheit der eingebauten Komponenten zu erproben. Hierbei zeigte sich eine nur sehr geringe Einschränkung der Flugleistungen. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Berechnungen im Rahmen der Zulassung und zusätzlichen Berechnungen auf der Basis des von IBK erstellten Flugzeugmodells.

Im Rahmen der Flugerprobung der Regler wurden zunächst einige Iterationsstufen von PID-Reglern erprobt. Dies diente sowohl zur Validierung des zugrundeliegenden Modells des Versuchsträgers und dessen Verbesserung, als auch der Erprobung der Fly by Wire Steuerung durch den Piloten. Weiterhin konnten die Grenzen der verwendeten Aktuatoren ermittelt werden. Diese arbeiten im angestrebten Arbeitsbereich problemlos, jedoch führen zu starke Manöver außerhalb dieses Bereiches zu zu hohen Anforderungen an die Stromversorgung, welche dann zusammenbricht. Dieses Verhalten ist für das Projekt aber ohne Bedeutung. Zudem wurden aufgrund der Rückmeldungen und Messergebnisse von MessWerk kontinuierliche Verbesserungen des Reglers durchgeführt. In den Flugversuchen konnte ein gutes Verhalten des PID-Reglers gezeigt werden. Auch die Steuerung durch den Piloten mittels eines Sidesticks erwies sich als erfolgreich. Mit dem MPC-Regler wurden ebenfalls mehrere Flüge durchgeführt um verschiedene Iterationen zu erproben und diesen zu verbessern.

Bei den Flügen zum Testen des LiDAR konnte dessen grundsätzliche Funktion nachgewiesen werden. Jedoch führen die bereits beschriebenen Bodenreflektionen zu einer Verschlechterung der Messwerte. Weiterhin zeigt sich eine Verzögerung der Ankunft der LiDAR-Daten an der Schnittstelle zum Regler, die mit etwa zwei Sekunden deutlich größer ist als zunächst angenommen.

2.5.4 Arbeitspaket 4.4 „Diskussion der Ergebnisse“

Die Integration aller Komponenten in den Flugversuchsträger ist erfolgreich verlaufen. Aufgrund der geringen Größe desselben kann davon ausgegangen werden, dass eine Integration in größere Flugzeuge ebenfalls problemlos zu bewerkstelligen ist. Eine grundsätzliche Nutzung des Systems in kommerziellen Flugzeugen erscheint somit realistisch.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit im flugzeugfesten Koordinatensystem arbeitet wie erwartet. Die Ergebnisse können mit dem bereits beschriebenen Verfahren der Messung mit nur einem Transceiver gut validiert werden. Auch ein Vergleich mit Daten der Fünflochsonde zeigt eine gute Übereinstimmung der Verläufe, wenngleich mit einem Offset wie in Abbildung 21 gezeigt. Der Offset resultiert aus der Tatsache, dass die Fünflochsondendaten im geodätischen KOS vorliegen und die LiDAR-Daten im flugzeugfesten. Die unteren Kurven zeigen von der Fünflochsonde gemessenen Vertikalwind aufgetragen über zwei Zeitstempel, die obere Kurve den vom LiDAR ermittelten Wert. Die Algorithmen funktionieren allerdings nur, wenn die verwendeten Daten nicht fehlerbehaftet sind. Dies ist aufgrund der unerwarteten Bodenreflexionen nur eingeschränkt gegeben. Erste Ansätze für eine Kompensation wurden vorgestellt. Für den Einsatz eines solchen Systems in der Zukunft dürfte dieser Faktor entscheidend sein. Ein Einsatz in Bodennähe ist nur realistisch, wenn diese Reflexionen herausgerechnet werden können. Weiterhin muss ein System mit einer geringeren Ausgangsleistung des Lasers verwendet werden, da sonst bei jeder Landung eine Gefährdung von Menschen am Boden eintreten würde.

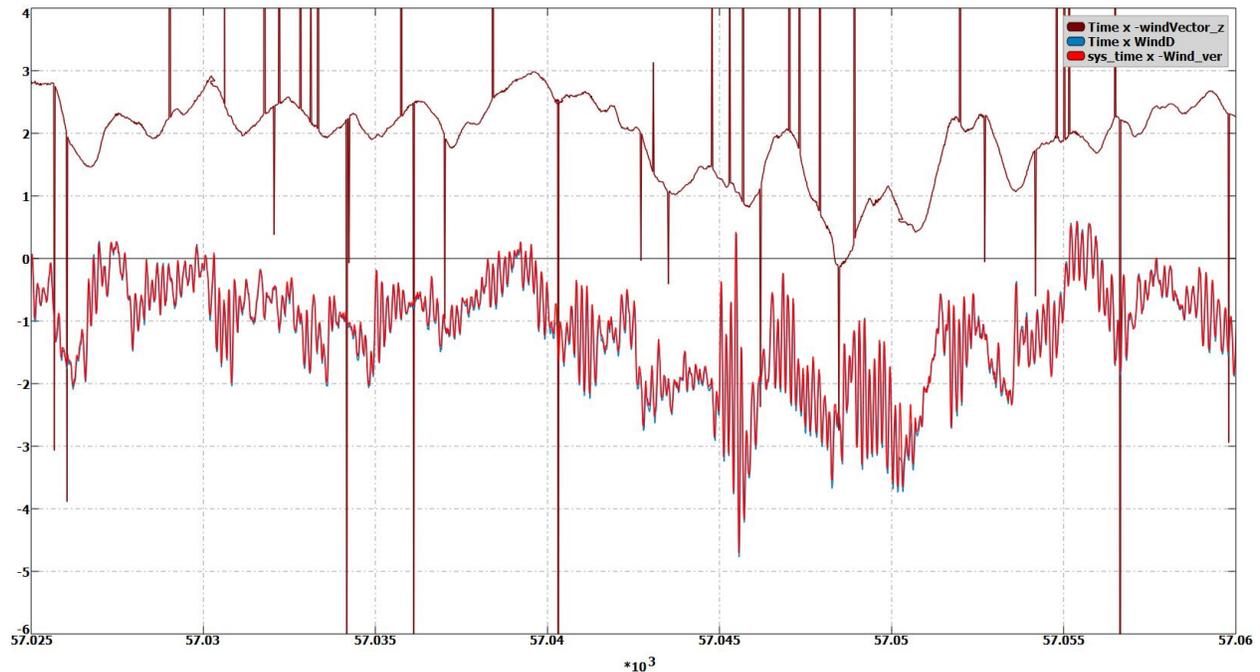


Abbildung 21: Vertikalwind gemessen durch LiDAR und Fünflochsonde über der Zeit

In der aktuellen Konfiguration können zudem nur zwei Komponenten des Windvektors erfasst werden. Diese sind zwar am relevantesten für die Strukturbelastungen, aber das Berücksichtigen des gesamten Windfeldes würde die Ergebnisse voraussichtlich verbessern.

Des Weiteren muss die Frage nach den getroffenen Annahmen gestellt werden. Aufgrund der einzigen sinnvollen Einbaumöglichkeit im Rahmen des Projektes, liegen die Messvolumina verhältnismäßig weit voneinander entfernt. Hieraus resultiert die Annahme eines homogenen Windfeldes im gesamten Messbereich. Kleinskalige Phänomene können somit nicht berücksichtigt werden. Dies sollte einfacher werden, wenn das System für größere Flugzeuge in Betracht gezogen wird. Hier könnten die Messvolumina näher aneinandergelegt, werden bei trotzdem hinreichend großen Winkelunterschieden.

Hierzu könnten Befestigungspunkte der Transceiver an den Flügelspitzen und am Seitenleitwerk in Betracht gezogen werden.

Als eine weitere Annahme muss das Windfeld als stationär betrachtet werden, da nur ein Messpunkt vorliegt. Dies ist bei nur geringer Verzögerung zwischen Messung und dem Durchfliegen des Volumens eine hinreichende Annahme, allerdings wird dadurch der Vorhersagebereich und damit die Phasenreserve für einen Regler deutlich verkleinert. Eine größere Entfernung bedeutet weiterhin einen größeren Bereich in dem eine Gefährdung durch Laserstrahlung auftreten kann. Es muss also eine Abwägung getroffen werden, um allen Bedingungen Rechnung zu tragen. Im Rahmen des Projektes wurde eine Distanz von 100m vor den Transceivern gewählt um Sicherheitsanforderungen mit einer hinreichend niedrigen Flughöhe erfüllen zu können. Das entspricht einer horizontalen Distanz zwischen Flugzeug und Messvolumen von etwa 96,5m. Bei einer Fluggeschwindigkeit von etwa 75 Knoten ergibt sich somit eine Reserve von etwa 2,5 Sekunden. Dies erschien zunächst ausreichend. Im weiteren Verlauf zeigte sich jedoch, dass die Verarbeitungszeit somit im Bereich der Vorhersagezeit liegt und somit nicht zufriedenstellend ist.

Diese Verzögerung kann nicht eindeutig zugeordnet werden. Einen großen Einfluss dürfte das LiDAR selbst haben. Die Verarbeitungszeit im Sensor selbst stellt sich als Black-Box dar und kann nicht weiter quantifiziert werden. Das Reengineering der Datenverarbeitung im Lidar dürfte ebenfalls zur Verzögerung beitragen, kann aber nicht vermieden werden. Die Verzögerung aufgrund der Kommunikation zwischen verschiedenen PCs im Netzwerk dürfte eine untergeordnete Rolle spielen, trägt aber dennoch zur Gesamtverzögerung bei.

Eine Bündelung der Berechnungen auf nur einem PC dürfte einige Vorteile bieten. Zunächst fallen der Overhead und die Verzögerungen durch die Netzwerkkommunikation weg. In diesem speziellen Fall ergäbe sich ein besonderer Vorteil. Würden die LiDAR FFT Daten insgesamt übergeben, könnten weitere Messergebnisse für die Filterung verwendet werden. Dies wäre auch möglich, wenn die FFT Daten über das Netzwerk verschickt würden, allerdings wurde die Belastung aufgrund der großen Datenmenge als zu hoch eingeschätzt. Durch eine Berechnung im LiDAR wurde diese deutlich reduziert.

Insgesamt wurden die Ziele des Projektes erreicht, obgleich diese durch die technischen Voraussetzungen erschwert, bzw. eingeschränkt wurden. Dies kann in Zukunft vermieden werden, wenn ein Messsystem verwendet wird, bei welchem ein Zugriff auf die gesamte Signalverarbeitungskette ohne weiteres möglich ist. Zusätzlich wurden Potentiale und der Anwendung auf größeren Plattformen aufgezeigt.

3. Veröffentlichungen, Vorträge

Durch das Institut für Flugführung wurden bis zum Zeitpunkt des Abschlusses dieses Berichts keine Veröffentlichungen zu den in INFLIGHT durchgeführten Arbeiten vorgenommen. Nach der Laufzeit des Vorhabens ist eine Veröffentlichung der Ergebnisse mit den anderen Partnern geplant.

Es wurde eine studentische Arbeit zum Thema Lastabminderung im direkten Bezug zum Projekt bearbeitet:

- B. Brandt; „Auswahl und Integration von Aktuatoren zur Steuerung des Forschungsflug-zeuges Remos GX“; Masterarbeit; TU Braunschweig; 2018

4. Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

- [1] H.-G. Giessler, M. Kopf, P. Varutti, T. Faulwasser und R. Findeisen, „Model predictive control for gust,“ in s *Proc. 4th IFAC Nonlinear Model Predictive Control Conference*, Leeuwenhorst, Netherlands, 2012.
- [2] Cambridge-MIT Institute, „CMI MULTIDISCIPLINARY DESIGN PROJECT,“ [Online]. Available: http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/vlm/vlm.html. [Zugriff am 23 April 2018].
- [3] B. Houska, H. J. Ferreau und M. Diehl, „ACADO toolkit - An open-source framework for automatic control and dynamic optimization,“ *Optimal Control Applications and Methods*, Bd. 32, Nr. 2, pp. 298-312, May 2010.
- [4] R. Jategaonkar, *Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology*, Bd. 216, Reston, VA, USA: AIAA, 2006.
- [5] T. M. Kier, „Comparison of Unsteady Aerodynamic Modelling Methodologies,“ in s *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*, San Francisco, California, 2005.
- [6] W. P. Rodden, *Theoretical and Computational Aeroelasticity*, Burbank, California: Crest Publishing, 2011.
- [7] M. R. Waszak und D. K. Schmidt, „Flight dynamics of aeroelastic vehicles,“ *Journal of Aircraft*, Bd. 25, Nr. 6, pp. 563-571, 1988.
- [8] P. Zometa, M. Kögel und R. Findeisen, „muAO-MPC: A Free Code Generatin Tool for Embedded Real-Time Linear Model Predictive Control,“ in s *American Control Conference ACC13*, Washington D.C., USA, 2013.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel INFLIGHT Abschlussbericht		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Steen, Meiko Sandvoß, Carl-Simon	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2021	
	6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2022	
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig - Fakultät 4 - Maschinenbau - Institut für Flugführung	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 20Q1711C	
	11. Seitenzahl 32	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 8	
	14. Tabellen 0	
	15. Abbildungen 21	
16. DOI (Digital Object Identifier)		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger Luftfahrtforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Koenigswinterer Strasse 522-524, 53227 Bonn, 31. März, 2022		
18. Kurzfassung Dieser Abschlussbericht umfasst die Arbeiten des Instituts für Flugführung (IFF) der TU Braunschweig (TUBS) in dem Projekt INFLIGHT (INnovative Flugregelung und echtzeitfähige LIDAR on-board Messtechnik für leichtere, komfortablere Flugzeuge) im Zeitraum Januar 2018 bis März 2022. Die ursprüngliche Projektlaufzeit war bis März 2021 vorgesehen. Aufgrund von extern und intern bedingten Verzögerungen im Projektablauf wurde das Projekt bis Ende 2021 kostenneutral verlängert und eine erfolgreiche Demonstration des entwickelten Gesamtsystems konnte im März 2022 gezeigt werden. Zielsetzung des TUBS Teilprojektes INFLIGHT-OBS (INFLIGHT On-Board Sensorik) war die Entwicklung und Erprobung der vorausschauenden Messung von Böen- und Turbulenzfeldern mittels LIDAR. Die Flugregelung sollte auf Basis einer kombinierten Nutzung von vorausschauenden Messverfahren (LIDAR) und prädiktiven Regelungsansätzen zur Lastabminderung ermöglicht werden um Gewichtseinsparungen durch Lastreduktion sowie eine Erhöhung des Passagierkomforts durch Reduktion von Vibrationen zu erreichen. Das Institut für Flugführung der TU Braunschweig übernahm dabei die Entwicklung und Erprobung der vorausschauenden Messung von Böen- und Turbulenzfeldern mittels LIDAR an einem Kleinflugzeug des Typs Remos GX, deren Messergebnisse für die beteiligten Partner aufbereitet und zur Verfügung gestellt wurden. Darüber hinaus war die Verarbeitung und Auswertung der LIDAR Daten in Echtzeit während des Fluges und deren Fusion mit den Daten der online Flugzustandsbestimmung und Luftdatenberechnung durch konventionelle Sensoren ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit des IFF. Eine weitere Aufgabe war die Flugzustandsbestimmung und damit die Erfassung und Auswertung aller relevanten Steuereingaben und Auslenkungen, Kräfte und Flächenbelastungen. Das Institut für Flugführung der TUBS hat in dem INFLIGHT Projekt mit den zwei Partnern IBK Innovation und Otto von Guericke Universität Magdeburg (OvGU) zusammengearbeitet.		
19. Schlagwörter INFLIGHT, Lastabminderung, LIDAR, Abschluss Bericht		
20. Verlag Technische Informationsbibliothek Hannover	21. Preis	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1641381-9

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title INFLIGHT Final Report		
4. author(s) (family name, first name(s)) Steen, Meiko Sandvoß, Carl-Simon	5. end of project 31.12.2021	
	6. publication date 31.03.2022	
	7. form of publication Sonstiges	
8. performing organization(s) name, address Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig - Fakultät 4 - Maschinenbau - Institut für Flugführung	9. originators report no.	
	10. reference no. 20Q1711C	
	11. no. of pages 32	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. no. of references 8	
	14. no. of tables 0	
	15. no. of figures 21	
16. DOI (Digital Object Identifier)		
17. presented at (title, place, date) Projekträger Luftfahrtforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Koenigswinterer Strasse 522-524, 3227 Bonn, March 31, 2022		
18. abstract This final report describes the work of the Institute of Flight Guidance of Technische Universität Braunschweig within the INFLIGHT project (INnovative Flugregelung und echtzeitfähige LIDAR (LIGHT Detection and Ranging) on-board Messtechnik für leichtere, komfortablere Flugzeuge) in the time frame January 2018 to March 2022. Goal of the project was the development and verification of forward looking wind measurements for the purpose of load alleviation for small light-weight aircraft. An airborne LIDAR was installed onto a Remos GX aircraft. LIDAR measurements and airborne flight state estimation were fused in real-time and provided to a Model-Predictive-Control (MPC) developed by the partner Magdeburg University (OvGU).		
19. keywords INFLIGHT, load alleviation, LIDAR, Final Report		
20. publisher Technische Informationsbibliothek Hannover	21. price	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1641403-7