



LARUS-PRO: PRAXISTRANSFER IN RETTUNGSORGANISATIONEN

**Teilvorhaben: ERLI
„Einsatzrobustheit und Luftraumintegration“**

RWTH Aachen (RWTH)

Schlussbericht

Projektkronym	Larus-Pro
Titel des Verbundvorhabens	Praxistransfer in Rettungsorganisationen
FKZ	13N15665
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2021 – 30.06.2024

Berichtszeitraum	01.01.2021 – 30.06.2024
Erstellungsdatum	23.07.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N15665 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Informationen des Zuwendungsempfängers



Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
Aachen

Institut für Flugsystemdynamik

Herr Prof. Dr.-Ing. Dieter Moormann

0241 80 96811

office@fsd.rwth-aachen.de

Autoren

Jan Tilmans

Jan-Philipp Herzog

Dieter Moormann

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht.....	7
I.1	Aufgabenstellung	7
I.2	Voraussetzungen.....	10
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	10
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	11
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
II.	Eingehende Darstellung.....	13
II.1	Verwendung der Zuwendung und erzielten Ergebnisse im Einzelnen	13
II.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	30
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	30
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans.....	30
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	31
II.6	Veröffentlichungen, Beiträge und studentische Arbeiten	31

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
CM	Condition-Monitoring
CPA	Closest Point of Approach
DGzRS	Deutsche Gesellschaft zur Rettung Schiffsbrüchiger
FADS	Flush Air Data Sensing
FSD	Institut für Flugsystemdynamik
GUI	Graphical User Interface
HAP	Hauptarbeitspaket
HAVS	Hanseatic Aviation Solutions GmbH
MRCC	Maritime Rescue Coordination Centre
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
TAP	Teilarbeitspaket
TUDO	Technische Universität Dortmund
UAS	Unmanned Aircraft System

I. Kurzbericht

Dieses Kapitel umfasst eine kurze Beschreibung der Aufgabenstellung, der Voraussetzungen, der Planung und des Ablaufs des Teilvorhabens „Einsatzrobustheit und Luftraumintegration“ im Verbundvorhaben Larus-Pro. Des Weiteren werden der bei Projektbeginn vorhandene technische und wissenschaftliche Stand sowie die Zusammenarbeit mit anderen Forschungspartnern dargestellt.

I.1 Aufgabenstellung

Im Vorgängerprojekt Larus wurde eine Lageunterstützung bei Seenoteinsätzen durch unbemannte Luftfahrtsysteme (Unmanned Aerial System, UAS) entwickelt. Im Folgeprojekt Larus-Pro soll die Entwicklung fortgesetzt und das Flugsystem zu einer höheren technischen Reife geführt werden. Das teilvorhabenspezifische Ziel sieht eine Erweiterung der Einsatzgrenzen und eine Integration in den gemeinsam mit anderen Luftverkehrsteilnehmern genutzten Luftraum vor. In diesem Rahmen beschäftigt sich das Institut für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen innerhalb des Projekts insbesondere mit den Themen Kollisionsvermeidung, Conditionmonitoring und Schwerwettertauglichkeit des Fluggerätes.

Nachfolgend werden die Aufgabenstellungen der von der RWTH im Verbundvorhaben bearbeiteten Arbeitspakete aufgeführt.

Hauptarbeitspaket 1: Ganzjährige und ortsunabhängige Einsatztauglichkeit

Innerhalb des ersten Aufgabenbereichs „Ganzjährige und ortsunabhängige Einsatztauglichkeit“ wird das Larus-Pro Flugsystem zur Allwettereinsatztauglichkeit hin angepasst und erweitert. Die Hauptaufgabe der RWTH innerhalb des ersten Hauptarbeitspaketes findet sich im Teilarbeitspaket 1.A „Wetterschutz und Reichweitenoptimierung“, innerhalb welchem die Entwicklung eines Böenlastminderungssystems vorgesehen ist. Weiterhin leistet die RWTH innerhalb des TAP 1.D „Aufbau einer mobilen Bodenkontrollstation“ Zuarbeit auf Basis ihrer bisherigen Erfahrungen im Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge.

TAP 1.A Wetterschutz und Reichweitenoptimierung

Durch die Integration eines Böenlastminderungssystems sowie die Ansteuerung eines Heizsystems zur Vereisungsverhinderung kann eine Allwettereinsatztauglichkeit auch bei größeren Windgeschwindigkeiten und niedrigen Temperaturen erreicht werden. Besonderes Augenmerk liegt hierbei im Aufbau auf den in Larus entwickelten Systemen und der Robustheitssteigerung des Lastminderungssystems und dessen zugehöriger Sensorik gegen Umwelteinflüsse.

TAP 1.D Aufbau einer mobilen Bodenkontrollstation

Es werden mobile Bodenkontrollstationen entwickelt, die den unterschiedlichen Einsatzgebieten und –fällen der

Endanwender gerecht werden. Die RWTH liefert Zuarbeit zur Erstellung von Entwicklungs- und Konstruktionsunterlagen und bringt hierbei ihre Erfahrungen aus dem Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge ein.

Hauptarbeitspaket 2: Effektive technische Unterstützung des Einsatzes

In diesem Arbeitspaket wird die Demonstrationsplattform durch Weiterentwicklung und Erforschung technischer Ansätze in die Lage zu versetzt in einem Einsatz oder einer Übung die Einsatzkräfte der Anwender effektiv zu unterstützen. Dazu gehört u.a. die Bereitstellung von universellen Nutzlast- und Zustandsdaten, aber auch die Anbindung durch robuste, ortsunabhängig einsatzfähige Kommunikationskomponenten, welche einen flexiblen Einsatz des Flugsystems ermöglichen. Die RWTH-Aachen trägt innerhalb TAP 2.A „Integriertes Condition-Monitoring“ durch die Weiterentwicklung und Anbindung eines Condition-Monitoring-Systems (kurz: CM-System) zu diesen Ziel bei.

TAP 2.A Integriertes Condition-Monitoring

Ziel dieses Teilarbeitspaketes ist die Entwicklung eines integrierten Condition-Monitorings zur Bereitstellung relevanter Informationen für die Einsatzkräfte und Systeme des Wetterschutzes. Die Weiterentwicklung und Erforschung der Demonstrationsplattform soll zu einer Arbeitsentlastung der Einsatzkräfte führen und diese effektiv und zielgerichtet unterstützen. Das integrierte CM-System wird daher systemgruppenspezifisch aufgebaut. Eine Benutzerschnittstelle in der Bodenstation ermöglicht Interaktionen zwischen Entscheidern, Bedienpersonal und dem Flugsystem. Beispielhafte Einzelinformationen des Systems sind vorliegende Spannungen und Temperaturen, Drehzahlen und elektrische Ströme. Zur Sicherstellung der Einsatztauglichkeit bei Schwerwetterbedingungen soll das CM-System weiterführend Eingangsdaten liefern, die seitens der Systeme des Wetterschutzes genutzt werden und beispielsweise die Antivereisungseinrichtungen des Flugsystems ansteuern. Um eine Interaktion und eine Bedienstelle zu ermöglichen, wird die Bodenstation hinsichtlich der dafür notwendigen Software erweitert.

Hauptarbeitspaket 3: Sichere Integration in den Luftraum

Arbeitspaket 3 verfolgt das Ziel der sicheren Integration von Larus-Pro in den Luftraum. Die zentralen Forschungsaspekte der RWTH umfassen zu diesem Zweck die in TAP 3.B angesiedelten Arbeiten an der Integration eines aktiven Kollisionsvermeidungssystems. Zuarbeiten werden zudem in TAP 3.A und 3.E geleistet.

TAP 3.A Sichtbarkeit, Beleuchtung und Farbgebung

Die Larus-Pro Flugsysteme sollen mit leistungsstarken Navigations- und Anti-Kollisionslichtern ausgestattet werden, um für andere Luftverkehrsteilnehmer optisch wahrnehmbar zu sein und Informationen zur Fluglage zu übermitteln.

TAP 3.B Kollisionsvermeidungssystem: UTM, ADS-B, FLARM und AIS

Die Larus-Pro-Flugsysteme sollen auch bei Schwerwetterbedingungen und größeren Distanzen eingesetzt werden und dabei vollständig in den geteilten Luftraum integriert werden. Die Systeme müssen daher für andere Luftverkehrsteilnehmer auch ohne direkten Sichtkontakt erkennbar sein. Zugleich soll durch entsprechende Systeme die Detektion und das Tracking anderer Flugobjekte seitens der Larus-Pro-Flugsysteme ermöglicht werden. Dafür werden verschiedene Positionserfassungs- und Meldesysteme, wie ADS-B, FLARM und das Droniq-System zur Übermittlung von Flugzustandsdaten integriert. Die gewonnenen Informationen aus den verschiedenen Quellen werden zusammengeführt und verarbeitet, um somit Hindernisse zu erfassen, deren Flugrouten abzuschätzen und ggf. erforderliche Ausweichmanöver zur Kollisionsvermeidung zu planen und einzuleiten.

TAP 3.E Verteilte Missionssteuerung

Das Lagebild soll sowohl Entscheidern wie Bedienpersonal nahezu in Echtzeit vorliegen. Durch eine Klassendefinition der verschiedenen Informationen soll eine verteilte Missionssteuerung realisiert werden. Diese berücksichtigt den Umstand, dass die Entscheider und das Bedienpersonal im Rahmen der jeweiligen Anwendungsszenarien nicht zwangsläufig zusammensitzen.

Hauptarbeitspaket 4: Integrierte Larus-Pro-Flugsysteme

Dieses Arbeitspaket dient der Umsetzung der Entwicklungstätigkeiten in Testsysteme, welche für eine Flugerprobung der entwickelten Komponenten und Prozesse genutzt werden können. Die Einrüstung des RWTH-Flugdemonstrators erfolgt in TAP 4.F.

TAP 4.F Aufbau und Integration des Larus-Pro-Flugsystems, der Onboard-Sensorik und Sicherheitssysteme

Das Institut für Flugsystemdynamik verfügt aus dem Vorgängerprojekt Larus über ein S360 Fluggerät. Innerhalb dieses Teilarbeitspakets wird dieses in den relevanten Punkten auf das technische Niveau von Larus-Pro erweitert. Es soll zur Integration und Flugerprobung der in den Arbeitspaketen 1-3 entwickelten Teilsystemen wie der Böenlastminderung, des Condition-Monitorings sowie der Kollisionsvermeidung dienen.

Hauptarbeitspaket 5: Nachhaltiges Betriebskonzept

Dieses Arbeitspaket umfasst alle Aktivitäten, die für eine erfolgreiche Implementierung des Larus-Pro-Systems bei den beteiligten Endanwendern erforderlich sind. Ziel ist es, die Flugsysteme der beteiligten Endnutzer im praxisnahen oder realen Einsatz umfassend zu erproben, etwaig notwendige Nachbesserungen vorzunehmen und die Systeme iterativ in die Einsatzpraxis zu überführen. Ebenso wird das Betreibermodell weiterentwickelt und angewendet. Die RWTH-Aachen leistet hierzu Zuarbeiten in den TAPs 5.J, 5.I und 5.L.

TAP 5.I: Ausbildung und Betrieb

Für den sicheren Betrieb bei den Endanwendern soll ein Ausbildungscurriculum erstellt und evaluiert werden und eine hinreichende Anzahl an Systemführern ausgebildet werden. Die RWTH-Aachen leistet einen Beitrag zur Erstellung von Schulungsunterlagen für das Larus-Pro-Flugsystem, mit denen ein eigenverantwortlicher Betrieb durch das Bedienpersonal möglich ist.

TAP 5.J: Genehmigungen

Die RWTH-Aachen unterstützt bei der Beschaffung der notwendigen Genehmigungen für den Betrieb der Larus-Pro-Flugsysteme und der Verwendung der Telekommunikation.

TAP 5.L: Umfangreiche Erprobung und Validierung im operativen Betrieb

Die entwickelten Systeme sollen in umfangreichen Tests erprobt und validiert werden. Dazu werden zunächst geeignete Gebiete und Missionen eruiert. Die Erprobung der verschiedenen Einsatzszenarien soll in Zyklen erfolgen, so dass eine optimale Nutzung des bereits gesammelten Wissens erfolgt.

I.2 Voraussetzungen

Das Vorhaben ist im Rahmen des Programms "Forschung für die zivile Sicherheit 2018 bis 2023" der Bundesregierung innerhalb der Bekanntmachung " Innovationen im Einsatz – Praxisleuchttürme der zivilen Sicherheit " in Anknüpfung an das im Dezember 2020 erfolgreich abgeschlossene Projekt „Lageunterstützung bei Seenoteinsätzen durch unbemannte Luftfahrtsysteme (Larus)“ für eine Förderung ausgewählt worden.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtvorhaben gliedert sich insgesamt in fünf Hauptarbeitspakete, die im nachfolgenden Projektstrukturplan in Abbildung 1 dargestellt werden. Wie bereits zuvor erläutert liegen die Arbeitsschwerpunkte der RWTH Aachen in der Optimierung des Fluggerätes für den Einsatz unter widrigen Wetterbedingungen durch die Integration eines aktiven Böenlastminderungssystems (HAP 1), der Entwicklung und Integration eines Condition-Monitorings (HAP 2), sowie der sicheren Integration des unbemannten Fluggeräts in den zivilen Luftraum durch ein Kollisionsvermeidungssystem (HAP 3).

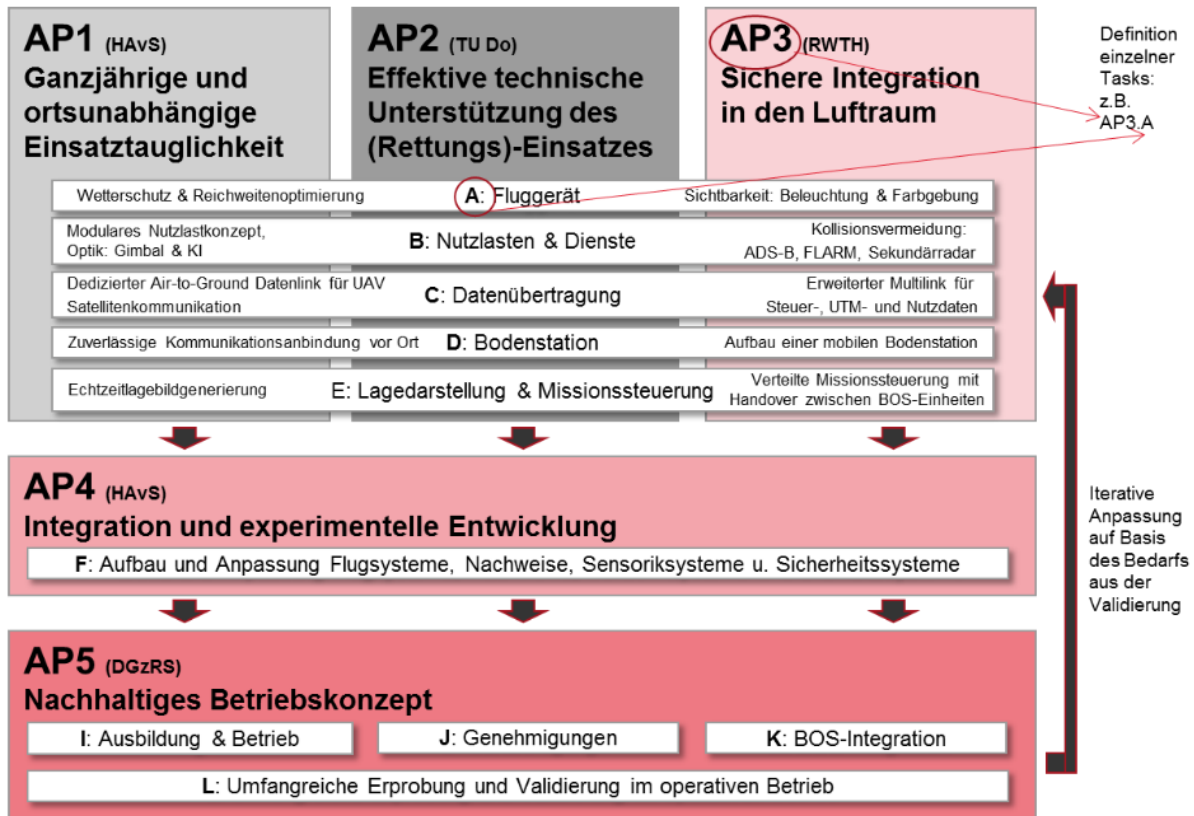


Abbildung 1: Projektstrukturplan

Der zeitliche Ablaufplan der Arbeiten der RWTH Aachen ist in Abbildung 2 dargestellt. Aufgrund von Verzögerungen im Gesamtverbund wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 12 Monate bis zur Jahresmitte 2024 beantragt und bewilligt.

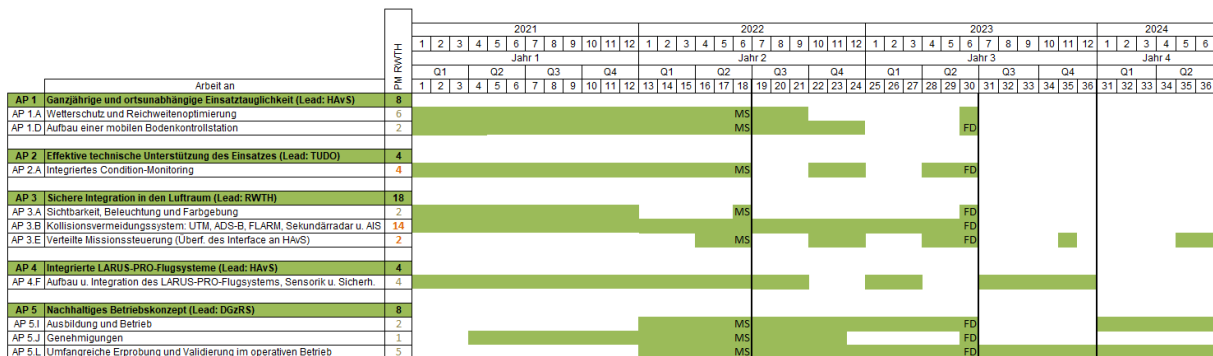


Abbildung 2: Arbeiten der RWTH Aachen

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns wurden Flugsysteme mit einer Abflugmasse kleiner als 150 kg, welche im Rahmen ihrer Aufgabe außerhalb der Sicht des Flugzeugoperators betrieben werden durften, in der Regel lediglich in experimentellen Versuchsbetrieben eingesetzt. Es war kein System bekannt, welches die für eine generelle Zulassung für einen kommerziellen Flugbetrieb über bewohntem Gebiet und im zivilen Luftraum ohne direkten Sichtkontakt des Operators zu erfüllenden Sicherheitsziele

erreicht. Zur Einhaltung der Sicherheitsziele ist unter anderem eine umfangreiche Automatisierung notwendig, die sowohl für Start wie auch zur Landung ausgelegt sein muss. Eine mögliche Fehlererkennung und –lokalisierung ist ebenfalls essenziell, da der zuständige Operateur am Boden nicht über alle wesentlichen Informationen für diese Aufgaben verfügt und weiterführend eine umfangreiche Ausbildung notwendig werden würde.

Ausgewählte Publikationen des Instituts für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen zu diesen Themen:

- C. Ben, N. Voget und D. Moormann: Konzeption und Evaluierung einer Kommunikationsinfrastruktur für Beyond-Line-of-Sight Flugversuche von unbemannten Fluggeräten, DGLR, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, 2015
- C. Ben, T. Islam und D. Moormann: Field study of a 24 GHz FMCW radar system suitable to detect small-sized RPAS under 5 kg MTOW, International Micro Aerial Vehicle Conference, Aachen, 2015
- D. Rofalski, N. Siepenkötter und D. Moormann: Demonstration of automatic cooperative synchronization of heterogeneous systems by landing a small scale aircraft on a moving ground vehicle, International Micro Aerial Vehicle Conference, Aachen, 2015
- J. Holsten und D. Moormann: Flight control law design criteria for the transition phase for a tiltwing aircraft using multi-objective parameter synthesis, CEAS Aeronautical Journal, 2014, Springer Verlag
- P. Hartmann, M. Schütt und D. Moormann: Konzept eines stetigen Bahnreglers für den vollständigen Flugbereich eines Kippflügelflugzeuges, DGLR, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Augsburg, 2014
- J. Holsten, T. Ostermann und D. Moormann: Struktur der Missionskontrolle und Trajektorienplanung eines Schwarms autonom agierender Flugplattformen, DGLR Workshop UAV-Regelung und Flugführung – Vom Missionsauftrag zur geflogenen Trajektorie, Braunschweig, 2011
- T. Ostermann, J. Holsten und D. Moormann: Entwicklung eines autonom operierenden Tiltwing-UAV für den Einsatz in selbstorganisierenden Drohenschwärmen, DGLR, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Hamburg, 2010

- G. Hahnen, W. Alles, R. Berting und D. Moormann: CESAR: Entwicklung und Bau eines dynamisch ähnlichen Modells eines Flugzeuges der Allgemeinen Luftfahrt, DGLR, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress Hamburg, 2010

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Forschungstätigkeiten im Rahmen der Aufgabenstellung der Teilvorhabensbeschreibung erfolgten in enger Kooperation mit den Forschungspartnern:

- Technische Universität Dortmund – Lehrstuhl für Kommunikationsnetze (TUDO)
- Hanseatic Aviation Solutions GmbH (HAVS)
- DGzRS Deutsche Gesellschaft zur Rettung Schiffbrüchiger (DGzRS)
- Bayrisches Rotes Kreuz (BRK)
- Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW)

Die Zusammenarbeit gestaltete sich sowohl auf technischer als auch auf konzeptioneller Ebene. Die Bearbeitung der HAPs 2 und 4 zeichnete sich jeweils durch eine enge Kooperation mit Hanseatic Aviation Solutions GmbH aus, um die notwendige Umrüstung am aus dem Vorgängerprojekt Larus bestehenden S360 Fluggerät durchzuführen und das Condition Monitoring System für die Larus-Pro Fluggerätearchitektur auszulegen und zu integrieren.

Nennenswert ist auch die enge Kooperation mit den Anwendern DGzRS, BRK und THW insbesondere was die Begleitung von Flugversuchen innerhalb der Projektlaufzeit betraf.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielten Ergebnisse im Einzelnen

II.1.1 Ergebnisse aus HAP 1: „Ganzjährige und ortsunabhängige Einsatztauglichkeit“

Hauptaufgabe der RWTH innerhalb des ersten Arbeitspaketes findet sich im Teilarbeitspaket 1.A „Wetterschutz und Reichweitenoptimierung“, innerhalb welchem die Entwicklung eines Böenlastminderungssystems vorgesehen ist. Weiterhin leistet die RWTH innerhalb des TAP 1.D „Aufbau einer mobilen Bodenkontrollstation“ Zuarbeit auf Basis ihrer bisherigen Erfahrungen im Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge.

Mit Hilfe des aktiv arbeitenden Böenlastminderungssystems sollen die durch Böen auftretenden Zusatzlasten vermindert und die Einsatzgrenzen des Fluggerätes somit erweitert werden. Hierbei wird auf die bestehenden Ergebnisse des Vorgängerprojektes Larus aufgebaut. Der Schwerpunkt der zu leistenden Arbeiten liegt insbesondere in der Anpassung an die Larus-Pro Flugsysteme, einer Steigerung der Systemrobustheit sowie der praktischen Erprobung des Systems.

Das Böenlastminderungssystem lässt sich, wie in Abbildung 3 dargestellt, in zwei grundlegende Bestandteile unterteilen. Zum einen in die zur Böenerfassung notwendige FADS-Sensorik, sowie die eigentliche Böenlastminderung, welche den nötigen Klappenausschlag berechnet und als Steuersignal kommandiert.

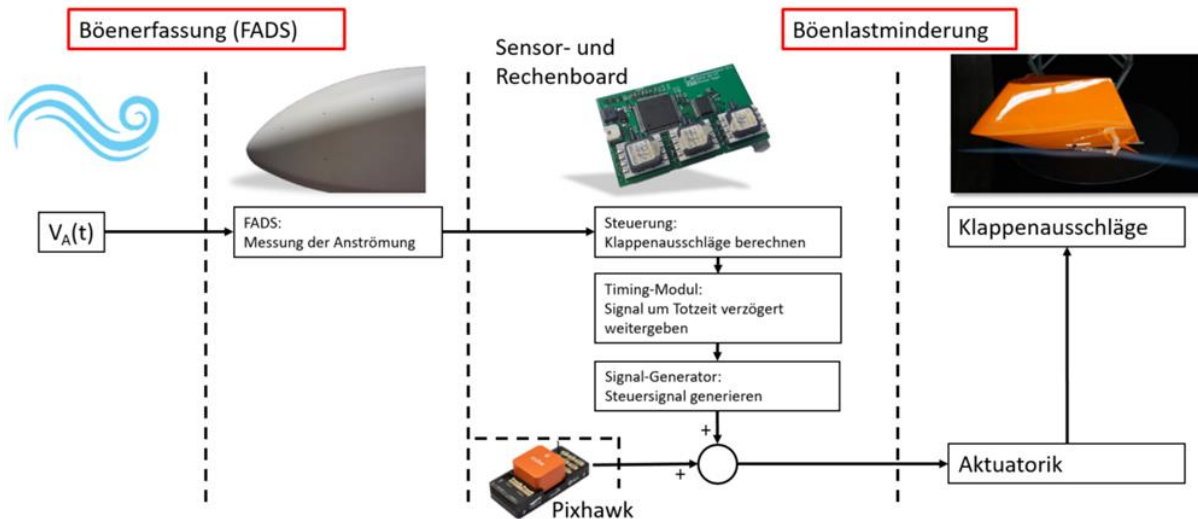


Abbildung 3: Systemarchitektur des Larus-Pro Böenlastminderungssystems

Die FADS-Sensorik schließt mit Hilfe diskreter Druckmessungen an der Fluggerätenase auf die aktuell vorherrschenden Anströmgrößen: Schiebewinkel, Anstellwinkel und Anströmgeschwindigkeit. Die Übertragung der Druckmesswerte in diese Größen erfolgt durch den Einsatz eines neuronalen Netzes. Anhand von Änderung der Anströmsituation können Böen identifiziert werden und deren Auswirkung auf das Fluggerät antizipiert werden. Innerhalb der Böenlastminderung wird auf dem Sensor- und Rechenboards anschließend der notwendige Klappenausschlag berechnet und kommandiert, welcher die erwarteten Zusatzlasten der Böe bestmöglich kompensiert. Dabei wird die Fluggeschwindigkeit und Dynamik der Klappen berücksichtigt um den Klappenausschlag zeitlich an das Auftreffen der Böe am Hauptflügel anzupassen.

In Zusammenarbeit mit HAVS wurde zunächst die innerhalb von Larus entwickelte Systemarchitektur angepasst, um eine Integration des Systems in die Larus-Pro Fluggeräte zu erlauben. Neben Anpassungen auf den neuen Flugcontroller „Pixhawk PX4 Cube Orange“ stand insbesondere auch die Unabhängigkeit des Systems von an der RWTH verwendeten Komponenten im Vordergrund. So wurde innerhalb von Larus zur Berechnung der Steuerausschläge, der Totzeiterzeugung sowie Signalgenerierung ein für Forschungszwecke optimiertes Rechenboard eingesetzt, dessen Verwendung für die Projektpartner über Larus-Pro hinaus nicht zielführend gewesen wäre.

Das angepasste Design für Larus-Pro sieht daher vor, dass diese Berechnungen direkt auf dem Sensorboard erfolgen sollen. Hierfür wurden die notwendigen Hardwarekomponenten und Platinenarchitektur spezifiziert, beschafft und „Sensor- und Rechenboard“-Platinen für den Demonstratoraufbau gefertigt.

Zur Steigerung der Systemrobustheit wurde zunächst die Anfälligkeit der FADS-Sensorik gegenüber fehlerhaften Messwerten genauer untersucht. Die im Anwendungszusammenhang wahrscheinlichste Beeinflussung der Druckmesswerte ist dabei auf eine zeitweise Verstopfung der Druckmesspunkte insbesondere durch Regen zurückzuführen.

In einer Windkanalversuchsreihe wurde der Einfluss durch Regen experimentell quantifiziert. Hierzu wurde ein Windkanalmodell der FADS-Fluggerätenase im Maßstab 1:1 verwendet und Wasser mit Hilfe einer verfahrbaren Tropfenausgabe in die Strömung injiziert. Es erfolgte eine Auswertung der Druckmessdaten, welche zur Bestimmung der Fehlerbilder mit zeitlich synchronisierten Videoaufnahmen verglichen wurden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt.

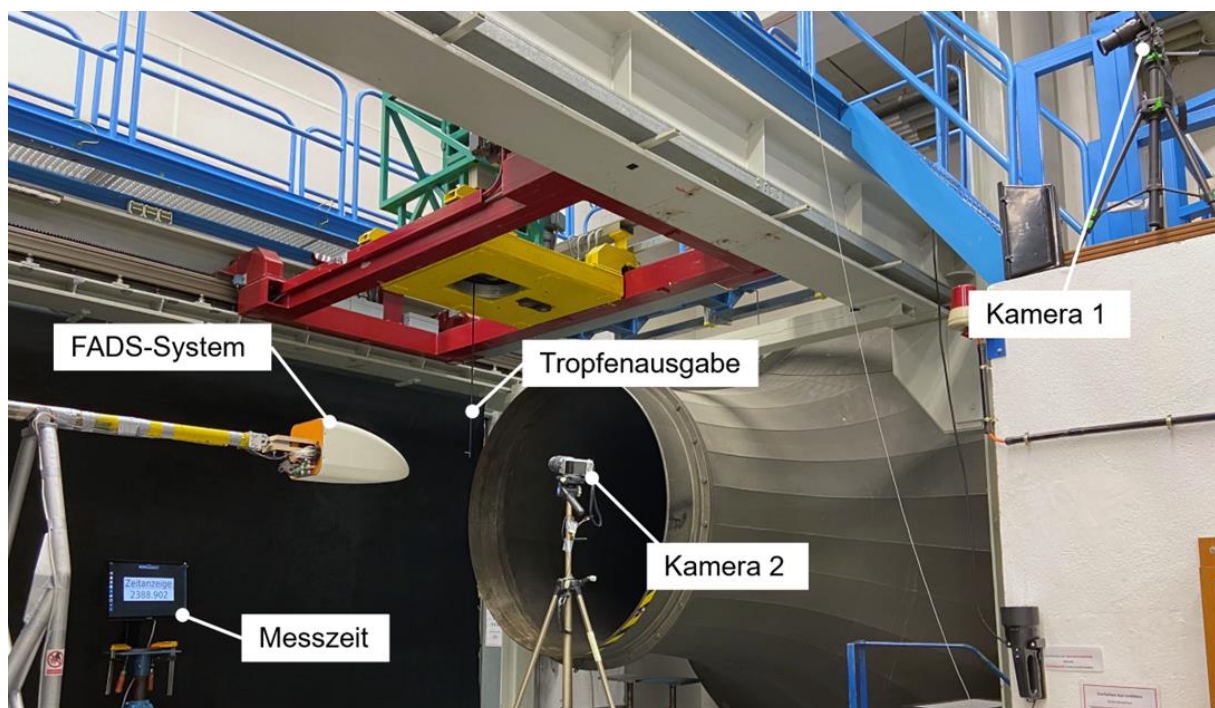


Abbildung 4: Aufbau der Windkanalversuche zur Bestimmung des Regeneinflusses

Zur Beurteilung der Druckmesswerte wurde der Störungsverlauf sowie dessen maximale Amplitude als auch die Störungsdauer ausgewertet. Die jeweiligen Fehlerdauern bewegten sich innerhalb einer Spannweite von wenigen Sekunden bis hin zu maximal 20 Minuten, wobei die Druckmesswerte im Durchschnitt etwa zwei Minuten durch einen einzelnen Regentropfen beeinflusst wurden. Je nach Regenstärke ist auf dieser Grundlage zu erwarten, dass Druckbohrungen bei einem Flug unter Regenbedingungen erneut von einem Regentropfen erfasst werden, noch bevor der Einfluss eines vorherigen Tropfens abgeklungen ist.

Zur Untersuchung der Fehlerempfindlichkeit des FADS-Systems wurden auf dieser Grundlage jeweils einzelne Druckmesswerte künstlich mit Messfehlern beaufschlagt

und die Abweichung der so ermittelten Anströmgrößen von der tatsächlich anliegenden Anströmung untersucht. Die Ergebnisse sind zusammengefasst in Abbildung 5 dargestellt.

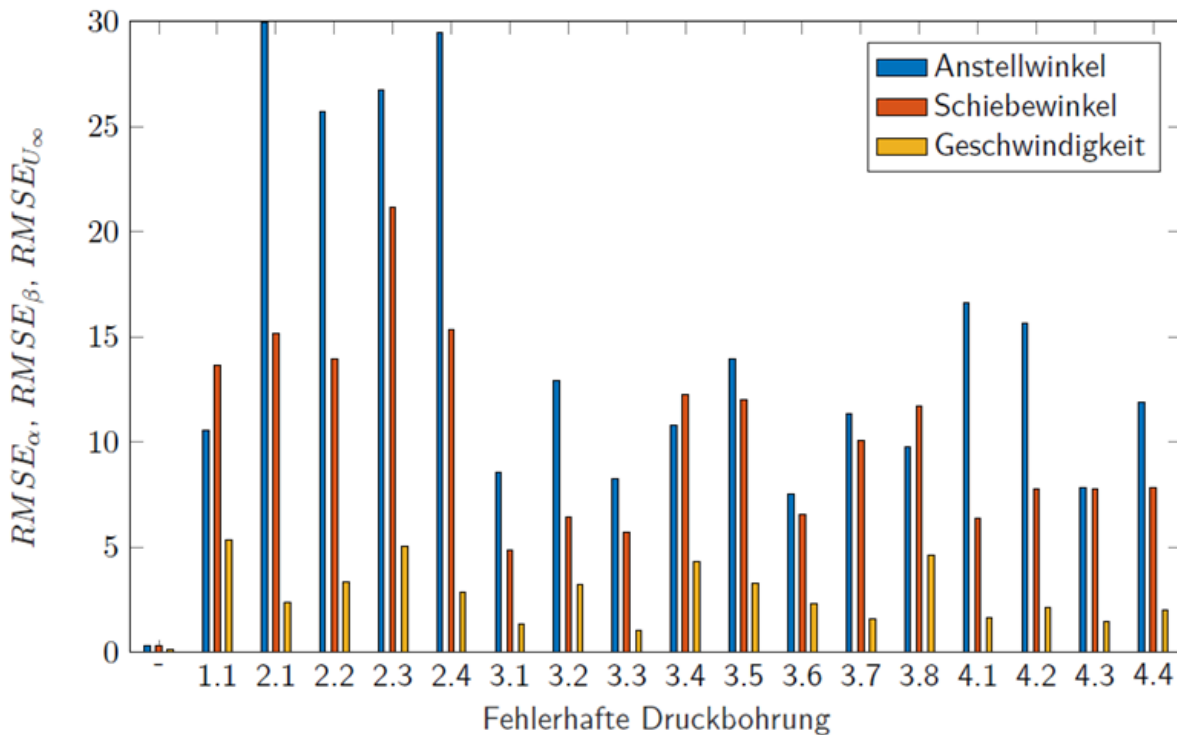


Abbildung 5: Mittlere Messfehler (RMSE) des FADS-Systems bei Ausfall einzelner Druckmesswerte

Es zeigt sich, dass Abweichungen von 20° bis 30° für die Anstell- und Schiebewinkelermittlung bzw. 5 m/s für die Fluggeschwindigkeitsermittlung möglich sind. Die beobachteten Fehleramplituden bestätigen, dass eine Fehlerkompensation auch für Regenbeeinflussungen notwendig ist, um die zuverlässige Funktion des FADS-Systems zu gewährleisten.

Zur aktiven Kompensation der Fehler wurden verschiedene Lösungsstrategien erarbeitet und implementiert. Zunächst wurde der fehlerhafte Messwert durch den Messwert einer umliegenden Druckbohrung ersetzt. Auf diese Weise konnte der auftretende Fehler bereits auf unter 2° bzw. 0,5 m/s gesenkt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht für jede Druckbohrung zwangsläufig ein zur Substitution geeigneter Nachbar vorhanden ist. Andere untersuchte Strategien sehen daher den Ausschluss der fehlerhaften Druckmesswerte vor. Da das ursprüngliche Neuronale Netz jedoch nur mit einem vollständigen Set an Eingangsmesswerten arbeiten kann, wurden hierfür weitere Netze erstellt, welche jeweils ohne die potenziell fehlerhafte Druckbohrung trainiert wurden. Um die Anzahl der zusätzlich zu trainierenden Netze gering zu halten, wurde hierbei jeweils Sets von etwa 4 – 8 Messwerten anstatt nur eines einzelnen Messwertes ausgeschlossen. Je nach Wahl des ausgeschlossenen Sets beträgt der bestehende Fehler zwischen 0,5° bis 1,3° bzw. 0,25 m/s bis 0,5 m/s.

Die erarbeiteten Methoden setzen voraus, dass bekannt ist zu welchem Zeitpunkt eine Druckbohrung fehlerbehaftete Messwerte liefert. Um diese fehlerhaften Messwerte

Schlussbericht

während des Fluges zu identifizieren, wurden Autoassoziative Neural Networks (kurz: AANN) implementiert und ihre Eignung zur Fehlererkennung untersucht.

AANNs werden eingesetzt, um eine Menge an Eingangswerten am Ausgang zu reproduzieren und sie bilden damit ein Werkzeug zur Fehlererkennung in kontinuierlichen Prozessen. Ein solches Neuronales Netz ist beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt. Diese Netze bestehen im Allgemeinen aus drei verdeckten Schichten. Hierbei stellt die mittlere Schicht, der sog. Bottleneck-Layer einen Informationsengpass des Netzes dar. Durch diese Schicht wird eine triviale eins-zu-eins-Abbildung verhindert, wodurch das Netz gezwungen ist, den Ausgang nicht allein durch die einzelnen Eingangswerte, sondern insbesondere durch Ihre Beziehung zueinander zu ermitteln. Sind einzelne Messwerte im Eingang fehlerbehaftet, so werden sie durch das AANN anhand der restlichen zur Verfügung stehenden Messwerte im Ausgang geschätzt. Die Erkennung eines Sensorfehlers, dessen Isolierung und die Berechnung eines Ersatzwertes erfolgt somit in einem Schritt, was Ihnen ein hohes Potential zum Einsatz innerhalb des FADS-Systems zuschreibt.

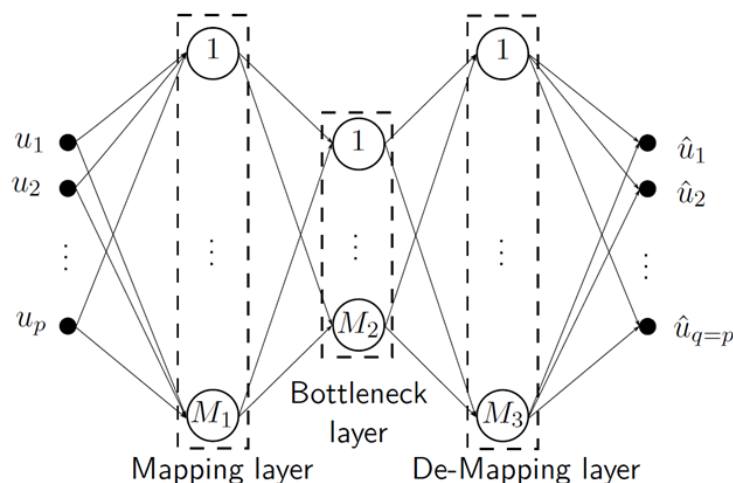


Abbildung 6: Struktur eines Autoassoziativen Neural Network

Es wurden mehrere AANN's auf unterschiedliche Weisen trainiert und versucht, fehlerhafte Messwerte durch den Vergleich der Eingangs- und Ausgangswerte zu ermitteln. Diese äußern sich durch eine überdurchschnittlich hohe Abweichung des jeweiligen Wertepaares, wobei die erzielte Fehlererkennungsrate für eine sichere Fehleridentifikation unzureichend niedrig ausfiel.

Neben den erarbeiteten Strategien zur aktiven Fehlerkompensation wurde daher zusätzlich die Verwendung einer fehlertoleranteren Auswertung untersucht. Diese soll robuster gegenüber fehlerhaften Messwerten sein, ohne Kenntnis darüber zu benötigen, ob überhaupt Fehler innerhalb der Druckmesswerte vorliegen. Die Trainingsdatenbasis des neuronalen Netzes zum Überführen der Druckmesswerte in Anströmgrößen wurde zu diesem Zweck um die im Windkanal aufgenommenen Regendaten ergänzt. Anschließend wurde die Übertragungsgenauigkeit des neuronalen Netzes für

verschiedene simulierte Fehleramplituden untersucht. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Übertragungsgenauigkeit für den Anstellwinkel für verschieden trainierte Netze.

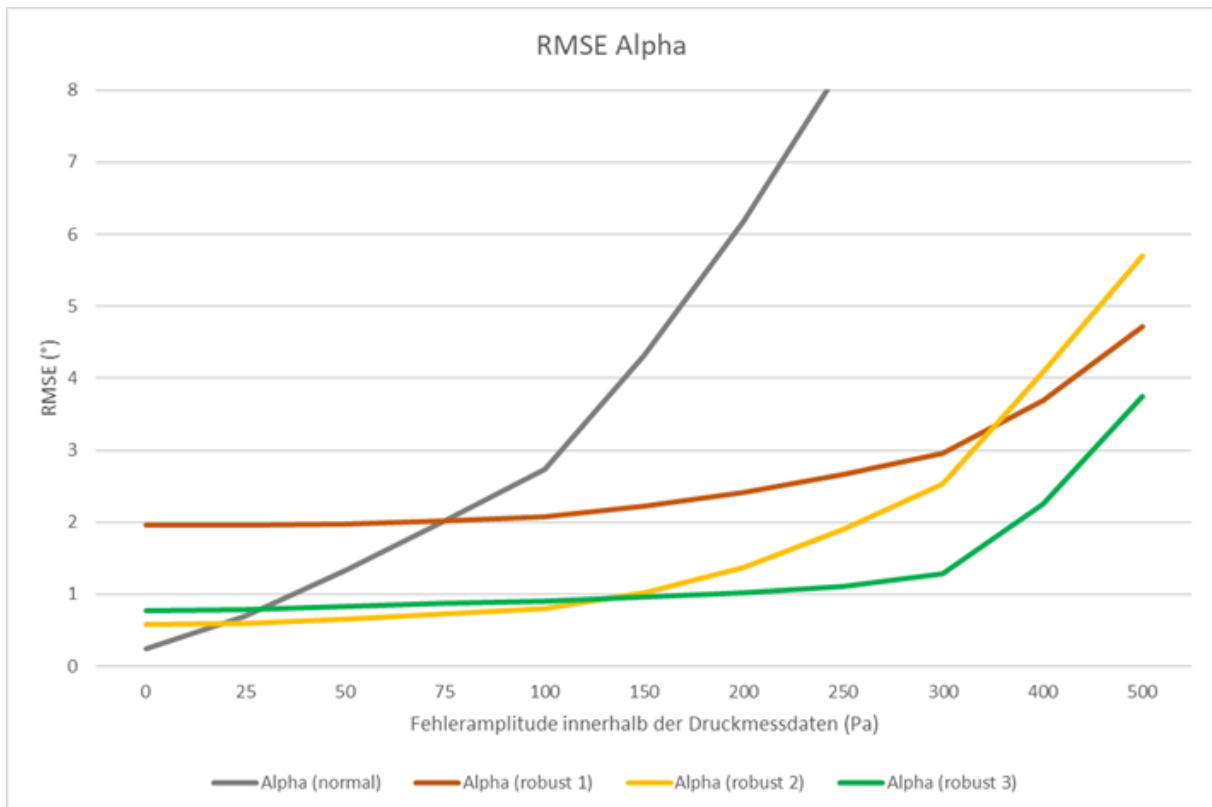


Abbildung 7: Übertragungsgenauigkeit unterschiedlich trainierter Neuronaler Netze zur Übertragung von Druckmessdaten in Anströmgrößen für unterschiedlich stark fehlerbehaftete Druckmessdaten

Da die fehlertoleranteren Netze mit fehlerbehafteten Druckdaten trainiert wurden, sinkt erwartungsgemäß die Grundgenauigkeit der Anströmgrößenermittlung im Vergleich zum ursprünglich fehlerfrei trainierten Netz. Diese bleibt mit zunehmenden Fehleramplituden innerhalb der Druckmessdaten jedoch über einen weiten Bereich relativ konstant, wobei der genaue Verlauf durch eine geschickte Auswahl der Trainingsdaten beeinflusst werden kann. Die innerhalb der Windkanalversuche maximal gemessenen Fehleramplituden lagen bei etwa 300 Pa, für welche sich durch die Verwendung fehlertoleranterer Netze weiterhin Genauigkeiten von etwa 1,2° im Beispiel der Anstellwinkelermittlung erreichen lassen. In Summe ist die Verwendung der fehlertoleranteren Auswertung insbesondere bei unklaren Informationen über das Vorliegen fehlerhafter Daten den erarbeiteten Strategien zur aktiven Fehlerkompensation vorzuziehen.

Abschließende Arbeiten zur Robustheitssteigerung der Böenerfassung bezogen sich insbesondere auf die Hardwareanpassung der Druckaufnehmer, um die Empfindlichkeit der Messung gegen Störeinflüsse durch Regen möglichst zu reduzieren. Hierzu wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und erprobt, wie beispielsweise eine Variation der Druckbohrungsdurchmesser, das aktive Ausblasen der Druckleitungen oder die Schaffung redundanter Druckmesspunkte. Zur Erprobung der Hardwareanpassungen wurden weitere Windkanalversuche durchgeführt. Modifizierte FADS-

Druckbohrungen wurden hierfür in Windkanalmodelle mit der in Abbildung 8 dargestellten Geometrie integriert. Die Modellgeometrie wurde so ausgelegt, dass die relevanten Krümmungsradien denen der Fluggerätenase des S360 Larus-Pro Fluggeräts nahekommen, gleichzeitig jedoch mehrere identisch angeströmte Druckbohrungen in einen einzelnen Körper integriert werden konnten.

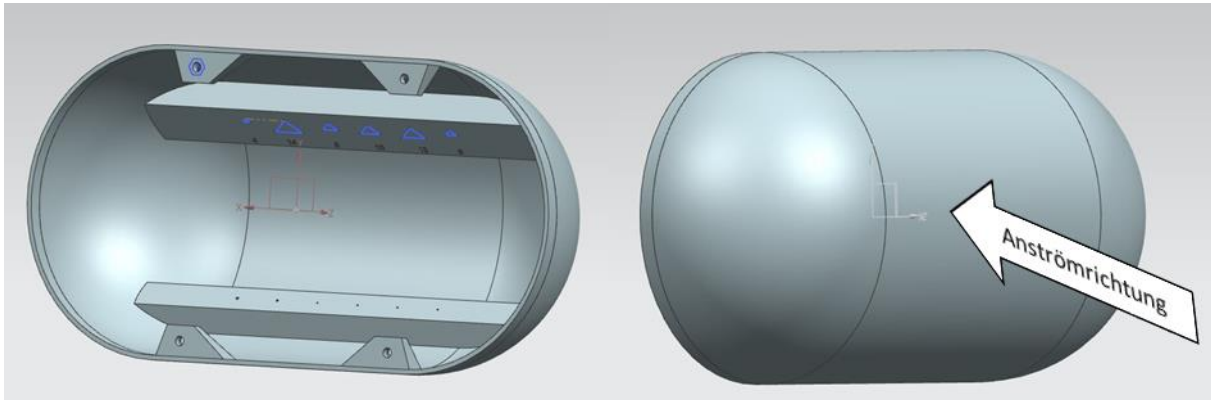


Abbildung 8: Geometrie des Windkanalmodells zur Erprobung angepasste der erarbeiteten Hardwareanpassungen des FADS-Systems

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vergrößerung der Bohrungsdurchmesser auf über 3 mm eine Verstopfung durch Regentropfen verhindern kann. Hierzu muss jedoch zusätzlich der innere Anschluss des Druckschlauchs nach oben weggeführt werden, um zu verhindern, dass Wasser in die Druckleitung selbst eindringen kann. Zusätzlich kann es durch eine Vergrößerung der Bohrungsdurchmesser zu einer Beeinflussung der anliegenden Strömung kommen, welche wiederum Einfluss auf die Messgenauigkeit des FADS-Systems nehmen kann. Der Einsatz einer aktiven Ausblasung zeigte die vielversprechendsten Ergebnisse. Bei diesem Konzept muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Algorithmus des FADS-Systems Messwerte im Moment der Ausblasung ignoriert. Das Zusammenschalten mehrerer benachbarter Druckbohrungen brachte im Windkanalversuch keine maßgebliche Verbesserung, da einzelne Wassertropfen an der Oberfläche zerplatzen bzw. über diese hinwegrollen und häufig ein gleichzeitiges Verstopfen der nahen beieinanderliegenden Bohrungen zu beobachten war.

Auf Grundlage der erarbeiteten Ergebnisse wurde das in Abbildung 9 dargestellte Fehlermanagement für die Böenerfassung erarbeitet und implementiert, um ein robustes Gesamtsystem zu erhalten. Zu beachten ist in diesem Kontext jedoch, dass insbesondere der Schritt der Fehleridentifikation nicht mit abschließender Leistungsfähigkeit implementiert werden konnte und über das Larus-Pro Projekt hinaus weiteres Verbesserungspotential bietet. Weiterhin konnte das Gesamtsystem innerhalb der Projektlaufzeit aufgrund der Ermangelung eines flugfähigen S360 Larus-Pro Fluggeräts nicht im Flugversuch erprobt werden. Für weitere Informationen diesbezüglich sei an dieser Stelle auf die Ergebnisdarstellung des HAP 4 verwiesen.

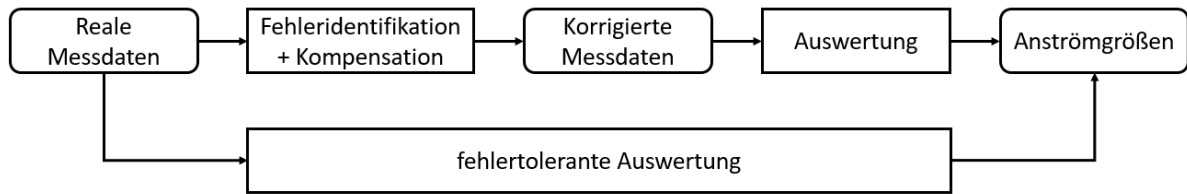


Abbildung 9: Fehlermanagement innerhalb der Böenerfassung

II.1.2 Ergebnisse aus HAP 2: „Effektive technische Unterstützung des Einsatzes“

Innerhalb des zweiten Arbeitspaketes wurde das im Vorgängerprojekt Larus entwickelte Conditionmonitoring-System an das S360 Larus-Pro Flugsystem angepasst und weiterentwickelt. Die innerhalb des Berichtszeitraums getätigten Arbeiten konzentrierten sich hierbei insbesondere auf die hardwareseitige Entwicklung sowie Fertigung des Systems. Hierbei wurden maßgeblich die einsatz- und integrationsorientierten Bedürfnissen des Projektpartners HAVS berücksichtigt.

Gemeinsam mit HAVS wurde hierfür zunächst die Architektur des Conditionmonitoring-Systems erarbeitet, deren finale Version in Abbildung 10 zu sehen ist. Diese sieht vor, dass das System aus mehreren Sensorplatinen aufgebaut werden soll, welche die jeweils angeschlossenen Sensoren auslesen und die Sensordaten über einen CAN-BUS an eine zentrale Recheneinheit übermitteln. Die einzelnen Sensorplatinen werden innerhalb des S360 Larus-Pro Fluggeräts räumlich möglichst nah an den Sensoren platziert, um die Länge und somit die Störungsempfindlichkeit der analogen Sensordatenleitungen gering zu halten. Neben dieser grundsätzlichen Systemarchitektur wurden ebenfalls die notwendige Sensorik, Angaben zu verwendeten Systemspannungen, Kommunikationsschnittstellen sowie auch die Spezifizierung der zu verwendenden Steckersysteme gemeinsam definiert und während der Projektlaufzeit iterativ angepasst.

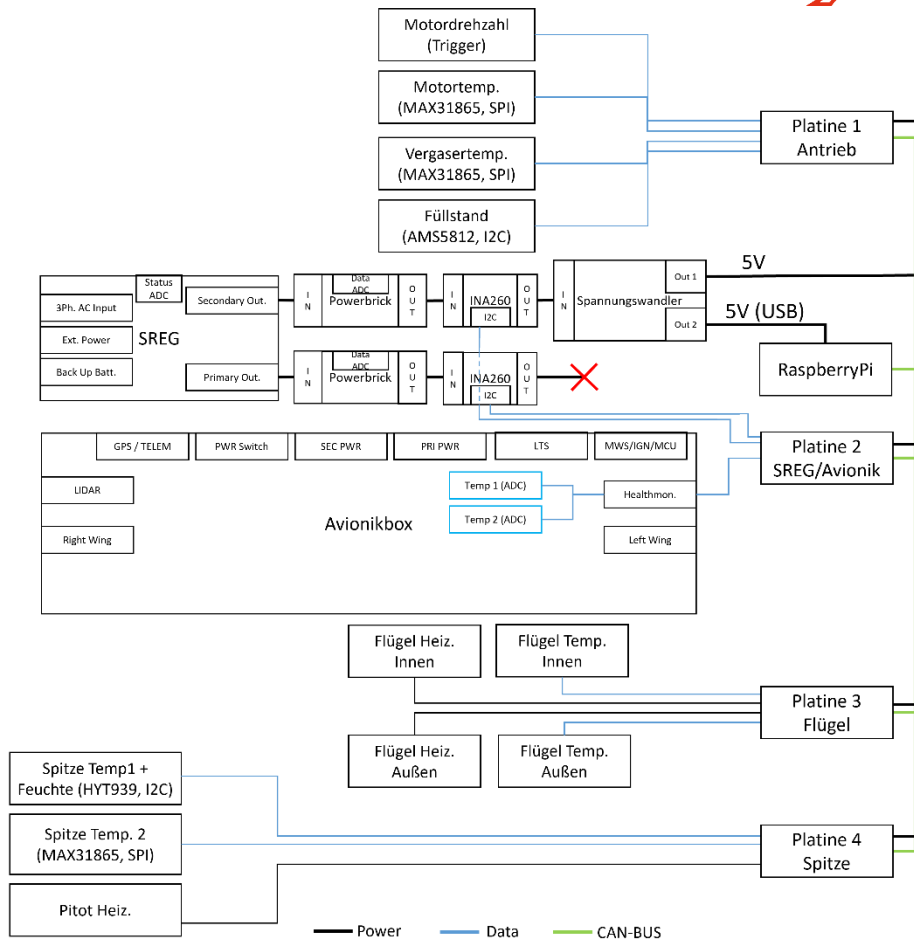


Abbildung 10: Finale Systemarchitektur des Condition-Monitoring-Systems

Anhand der erstellten Spezifikationen wurden seitens der RWTH anschließend die notwendigen Sensorplatinen ausgelegt und gefertigt. Der Erstellungsprozess umfasste hierbei die Festlegung der notwendigen Bauteile, die Erstellung des elektrischen Schaltplans in Form einer Netzliste sowie das Routing der Leiterbahnen. Nach Fertigstellung des ersten Platinendesigns wurde dieses in Fertigung gegeben, die nötigen Komponenten bestellt. Da die Verfügbarkeit der ausgewählten Steckersysteme zwischenzeitlich nichtmehr gegeben war, wurde gemeinsam mit HAVS ein alternativer Steckertyp ausgewählt und das Platinendesign innerhalb mehrerer Iterationsstufen an diesen angepasst. Hierbei wurde ebenfalls das Routing der Leiterbahnen optimiert, um die Größe der Platinen zu reduzieren, Fehler der jeweiligen Vorgängerversion behoben und der Funktionsumfang an die sich ergebenden neuen Anforderungen während der Projektlaufzeit angepasst. So verfügte die erste Iterationsstufe beispielsweise noch nicht über die Möglichkeit zur Ansteuerung der Heizeinrichtung, welche mit Erarbeitung deren Spezifikation in den Folgenden Schritten implementiert und optimiert wurde. Selbiges Verfahren trifft beispielsweise auch auf die verwendeten Sensoren oder auch deren Zuordnung zu einzelnen Platinen zu.

Die drei Iterationsstufen der erstellten Sensorplatinen sind in Abbildung 11 zu sehen.

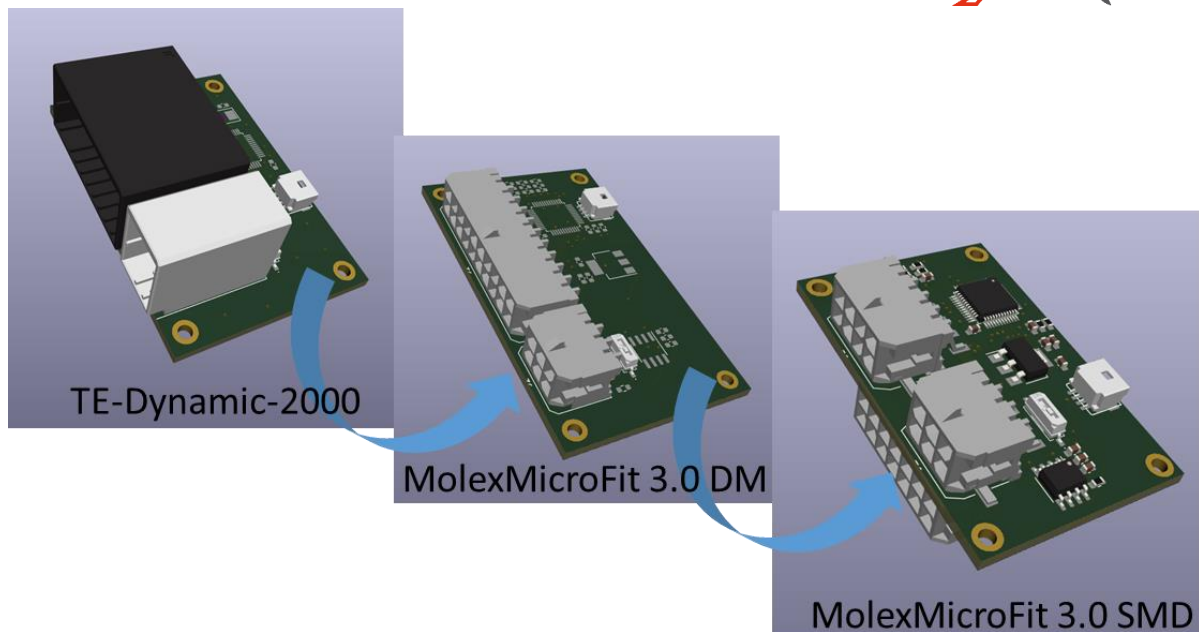


Abbildung 11: Interaktionsstufen des Platinendesigns

Nach Auslieferung des Platinensatzes der ersten Iterationsstufe wurde dieses mit den elektrischen Komponenten bestückt und im Tischaufbau in Betrieb genommen. Für die elektrische Kontaktierung wurden anstatt der vorgesehenen Stecker Stiftleisten verlötet, wodurch die Inbetriebnahme aufgrund der derzeitig bestehenden Lieferengpässe nicht beeinflusst wurde. Die fertigen Platinen dieser Iterationsstufe sind in Abbildung 12 zu sehen.

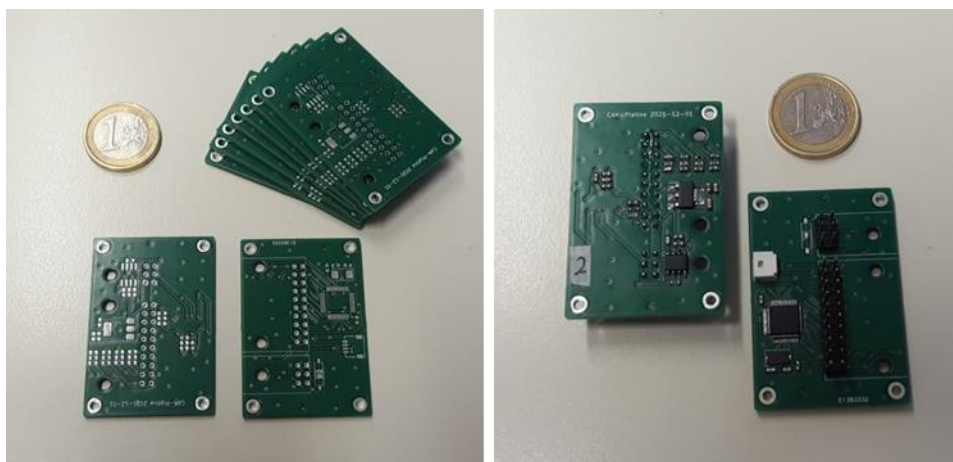


Abbildung 12: Platinenrohlinge (links) und bestückte Platinen (rechts) der ersten Iterationsstufe

Parallel zum Platinendesign und deren Bestückung wurden die notwendigen Sensortreiber und Platinenfirmware erstellt, um diese zunächst mit den Sensoren des RWTH eigenen S360 Fluggeräts, welches sich zu diesem Zeitpunkt noch auf dem hardwarestand aus dem Vorgängerprojekt Larus befand, in Betrieb nehmen zu können. Die in Larus-Pro zusätzlich in das System zu integrierende Sensoren wurden innerhalb eines Tischaufbaus angeschlossen.

Während der Tests der zweiten Iterationsstufe befand sich das RWTH eigene S360 Fluggerät zur Umrüstung auf den Larus-Pro Systemstand beim Projektpartner HAVS. Es wurde sich daher für die Durchführung von Bodentests innerhalb gemeinsamer Integrationstreffen entschieden. Auf diese Weise konnten notwendige Änderungen und Anpassungen erarbeitet werden, auf derer Grundlage schließlich die dritte Iterationsstufe erstellt und gefertigt werden konnte. Diese ermöglicht nun die Heizungsansteuerung und ist mit den Stecksystemen der in den Larus-Pro eingesetzten Flugsystemen sowie deren Gesamtsystemarchitektur kompatibel. Abbildung 13 zeigt das System im Tischaufbau, innerhalb welchem die Funktion aller Platinen getestet werden konnte. Auch innerhalb von Bodenversuchen innerhalb eines S360 Larus-Pro Fluggeräts konnte die fehlerfreie Funktion aller vorgesehenen Sensoren erzielt und die Messwerte auf einem Rechner grafisch dargestellt werden.

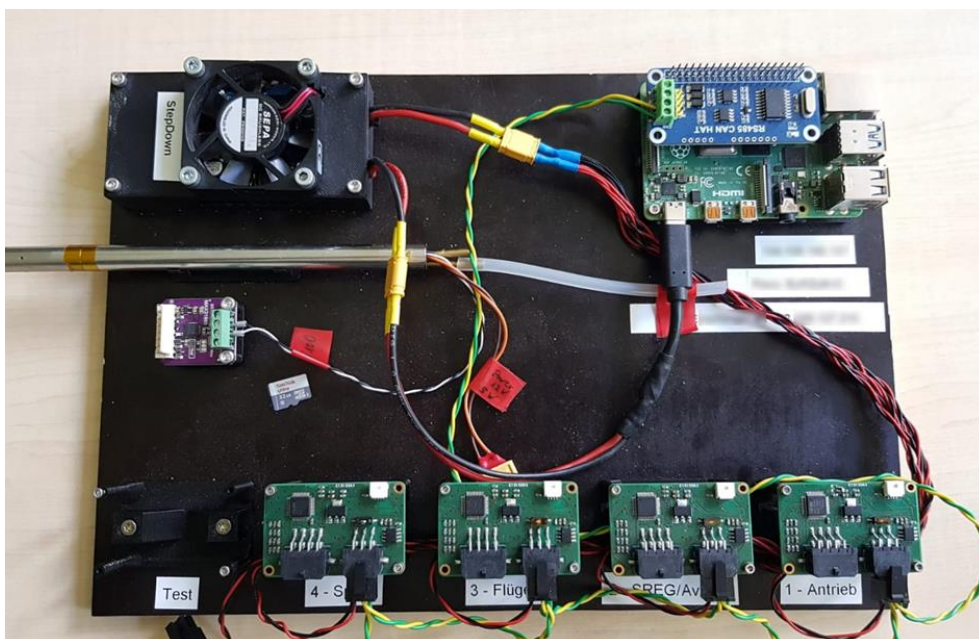


Abbildung 13: Tischaufbau des Condition-Monitoring-Systems der dritten Iterationsstufe

Die grafische Darstellung erfolgt in einer minimalistisch gehaltenen GUI, welche unabhängig der Bodenstation des S360 Larus-Pro Flugsystems lauffähig ist. Die Übertragung der Zustandsdaten erfolgt über einen gemeinsamen Datenlink mit den restlichen Bordsystemen des Fluggeräts.

Während der gesamten Arbeiten innerhalb dieses HAPs wurden Dokumentationsmaterialien erarbeitet, welche für die spätere Integration und den Betrieb des Systems seitens HAVS notwendig sind. Hierzu zählen unter anderem die zugehörigen Netzlisten, welche das elektrische Design der Sensorplatinen dokumentieren. Ebenfalls ist das Hardwarelayout in der opensource Software-KiCAD vollständig einsehbar und alle verwendeten Komponenten mit zugehörigen Teilenummern hinterlegt. Das Gesamtsystem wurde innerhalb eines Betriebshandbuchs beschrieben und alle Dokumente inkl. des erarbeiteten Programmcodes wie der Platinenfirmware oder der grafischen Wertedarstellung wurde an HAVS übergeben.

Eine abschließende Flugerprobung des Gesamtsystems innerhalb der Projektlaufzeit konnte aufgrund der Ermangelung eines flugfähigen S360 Fluggeräts nicht erfolgen. Für weitere Informationen diesbezüglich sei an dieser Stelle auf die Ergebnisdarstellung des HAP 4 verwiesen.

II.1.3 Ergebnisse aus HAP 3: „Sichere Integration in den Luftraum“

In HAP 3 wird die sichere Integration der Larus-Pro Flugsysteme in den Luftraum behandelt, mit dem Ziel, dass das unbemannte Flugsystem im Regelbetrieb außerhalb der Sichtweite des Steuernden auch ohne speziell eingerichtete Flugverbotszonen eingesetzt werden kann.

Die RWTH bearbeitet hierbei insbesondere die Entwicklung eines Kollisionsvermeidungssystems auf Basis von UTM, ADS-B, FLARM, durch welches die Sichtbarkeit des Flugsystems für andere Luftverkehrsteilnehmer auch ohne direkten Sichtkontakt ermöglicht werden soll. Gleichzeitig soll auch das Larus-Pro Flugsystem in der Lage sein, andere Luftverkehrsteilnehmer zu sehen und wenn nötig Ausweichmanöver zur Kollisionsvermeidung durchzuführen.

Im Gegensatz zum Vorgängerprojekt Larus kommt zur Kollisionsvermeidung keine aktiv arbeitende (Radar-)Sensorik zum Einsatz, sondern es wird auf Sekundärlösungen wie FLARM, ADS-B und UTM zurückgegriffen. Durch den Einsatz dieser unterschiedlichen Datenquellen müssen diese zunächst konsolidiert werden. Hierbei gilt es beispielsweise sicherzustellen, dass einzelne Flugobjekte nicht doppelt erkannt werden, wenn sie von mehreren unterschiedlichen Sensoren gleichzeitig erfasst werden. In einem zweiten Schritt muss eine Flugbahnvorhersage für alle erkannten Flugobjekte getroffen werden, auf deren Basis eine mögliche Unterschreitung des Sicherheitsabstands zur eigenen Flugbahn identifiziert werden kann. Abschließend gilt es zu entscheiden, ob eine kritische Annäherung vorliegt und ob diese die Einleitung eines Ausweichmanövers notwendig macht.

Zur Datenkonsolidierung und Flugbahnvorhersage wurde die in Abbildung 14 dargestellte Systemarchitektur erarbeitet.

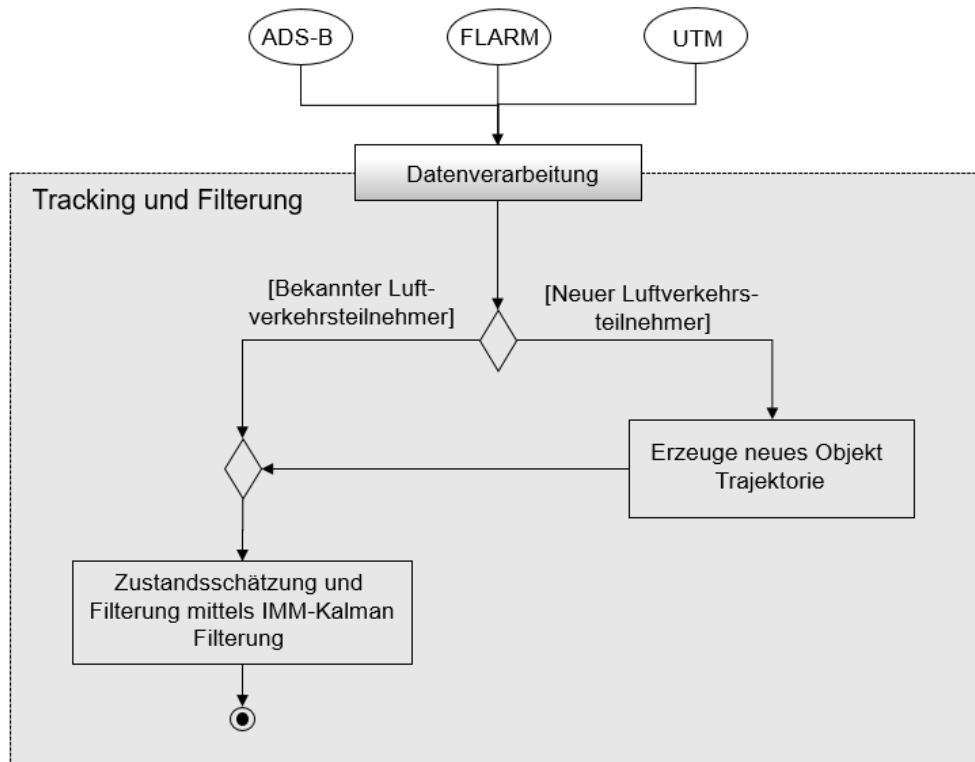


Abbildung 14: Systemarchitektur der Datenkonsolidierung und Flugbahnschätzung

Die Daten der jeweiligen Sensorquellen werden zunächst vorverarbeitet und in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Anschließend wird überprüft, ob es sich bei den jeweiligen Flugobjekten um bereits bekannte Luftverkehrsteilnehmer handelt oder ob ein neues Objekt inkl. einer zugehörigen Trajektorie erzeugt werden muss. Danach wird für jedes erkannte Flugobjekt eine Zustandsschätzung und Filterung durchgeführt, um den Flugzustand und –Trajektorie zu schätzen und vorhandenes Messrauschen zu reduzieren. Der entwickelte Algorithmus kann dabei sowohl eine variable Anzahl von Luftverkehrsteilnehmern als auch Datenquellen verarbeiten. Somit ist es perspektivisch möglich, auch weitere Sensorquellen wie beispielsweise eine aktive Radarsensorik anzubinden. Nötig sind hierfür lediglich vorzunehmende Anpassungen innerhalb der sensorspezifischen Datenverarbeitung z.B. bzgl. der Datenrate oder der Übertragung der Informationen in das gemeinsame Koordinatensystem. Die Zustandsschätzung und Filterung läuft anschließend identisch für alle Flugobjekte und zugehörigen Trajektorien ab, sodass an dieser Stelle keine Abhängigkeit von der jeweiligen Messsensorik mehr besteht.

Für den Schritt der Zustandsschätzung und Filterung wurden mehrere Filteralgorithmen untersucht, implementiert und bewertet, wobei insbesondere das (erweiterte) Kalman-Filter mit dem Einsatz eines Partikel-Filters verglichen wurden. Das Kalman-Filter ist ein weit verbreiteter Algorithmus zur Zustandsschätzung linearer und nichtlinearer Systeme, während das Partikel-Filter zur Klasse der stochastischen Verfahren zur Zustandsschätzung in einem dynamischen Prozess zählt. Kalman-Filter arbeiten mit einem stochastischen Modell des jeweiligen Prozesses, wobei die jeweils prädierte Zustandsschätzung aus dem letzten Zeitschritt durch eine Rückführung dazu genutzt

wird, den Fehler für die nächste Schätzung zu reduzieren. Partikelfilter hingegen verteilen zunächst mehrere mögliche Zustände in Form von Partikeln welche anhand der fortlaufenden Messwerte hin zu den wahrscheinlichsten Zustandsschätzungen konvergieren.

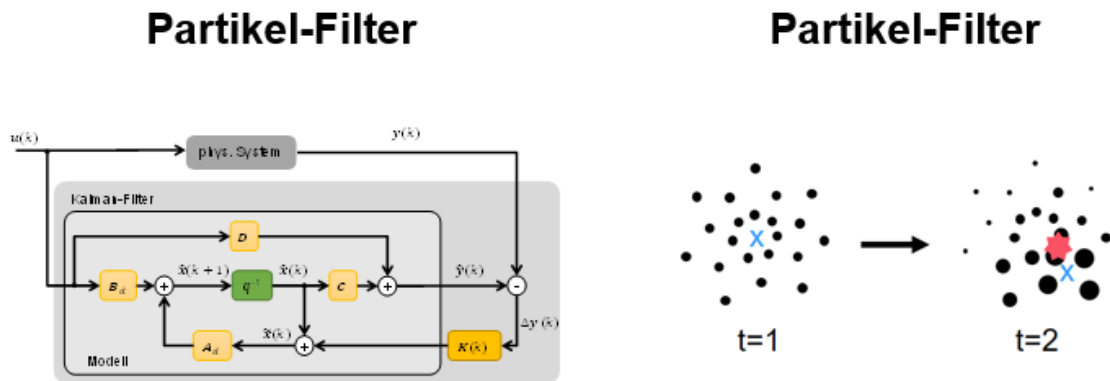


Abbildung 15: Symbolbild für Kalman- und Partikelfilter

Im Anwendungszusammenhang benötigen Partikelfilter einen höheren Aufwand zur Berechnung der jeweiligen Zustandsschätzung, stellen jedoch keine Anforderungen an die Modellierung der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung des jeweiligen Prozesses. Während der Erprobung des Partikel-Filters unter der Verwendung simulierter Messdaten unterschiedlicher Luftverkehrsteilnehmer hat sich jedoch gezeigt, dass das Filter häufig nicht konvergiert und somit keine belastbaren Zustandsschätzungen liefert. Aus diesem Grund wurde für die Zustandsschätzung- und Filterung ein Kalmanfilter implementiert und angepasst, welche robustere Schätzungen liefert.

Da das Kalmanfilter jedoch stark von der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung abhängig ist, mussten verschiedene Systemmodelle zur besseren Abschätzung der Flugobjektdynamik implementiert werden. Für die Genauigkeit Zustandsschätzung macht es beispielsweise einen Unterschied, ob sich das jeweilige Flugobjekt im beschleunigten Geradeausflug, beschleunigten Flug oder aber Kurvenflug befindet, sodass für jeden dieser drei Zustände ein Systemmodell wie in Abbildung 16 dargestellt implementiert wurde.

Constant Velocity, CV

Filterung von Objekten auf stabilen, geraden Trajektorien

$$x = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad z \quad \dot{z}]^T$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Constant Acceleration, CA

Modellierung von Manövern oder Manöveränderungen

$$x = [x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \ddot{z}]^T$$

$$A_d = \begin{bmatrix} \varphi_{CA} & O_3 & O_3 \\ O_3 & \varphi_{CA} & O_3 \\ O_3 & O_3 & \varphi_{CA} \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{CA} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ und } O_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

TURN Model

Modell zur Modellierung eines Kurvenflugs

$$f(x) = f \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + \dot{x} \cdot \frac{\sin(\omega T)}{\omega} - \dot{y} \cdot \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega} \\ \dot{x} \cdot \cos(\omega T) - \dot{y} \cdot \sin(\omega T) \\ y + \dot{x} \cdot \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega} + \dot{y} \cdot \frac{\sin(\omega T)}{\omega} \\ \dot{x} \cdot \sin(\omega T) + \dot{y} \cdot \cos(\omega T) \\ z + \dot{z}T \\ \dot{z} \\ \omega \end{bmatrix}$$

Abbildung 16: Systemmodelle für unbeschleunigten sowie beschleunigten Geradeaus- und Kurvenflug

Ein Objekt wurde dann erfolgreich von dem Tracking-System erfasst, wenn die empfangenen Daten des Flugsystems, beispielsweise FLARM oder ADS-B, auf der Sensor-Schnittstelle gelesen und einem Track hinzugefügt werden können. Die Zustandsschätzung dieses Flugsystems anhand der vorgestellten Systemmodelle erfolgt nach der Zuordnung zum Track. Im Rahmen der Entwicklung des Tracking-Systems wurde eine Simulationsumgebung erstellt, die es ermöglicht verschiedene Architekturen für das Tracking zu evaluieren. Dazu wurde die Performance des Kalman-Filters sowohl mit der Kovarianz des Filters als auch grafisch anhand von simulierter Tracks evaluiert

Auf der Grundlage der Zustandsschätzung wird das Konfliktpotential zwischen dem eigenen und dem getrackten Flugsystem bewertet. Die Einschätzung erfolgt anhand des Punktes der geringsten Nähe (Closest-Point-of-Approach, CPA) zwischen den beiden Objekten. Ist der Abstand zwischen beiden Punkten am CPA unterhalb einer definierten Schwelle, wird eine Ausweichroute für das eigene Flugsystem bestimmt, die den Abstand zu dem anderen Objekt vergrößert und den Konflikt somit löst.

Bei der Konfliktlösung werden zwei grundlegende Fälle unterschieden. Zum einen statische und zum anderen dynamische Objekte. In der umgesetzten Implementierung gilt ein Objekt als statisch, wenn die Geschwindigkeit kleiner 2 m/s beträgt. Zur Konfliktlösung wird die Position des Objektes an der Trajektorie des eigenen Flugsystems gespiegelt. An diesem spiegelsymmetrischen Punkt wird der neue Wegpunkt des Flugsystems positioniert.

Im Fall eines dynamischen Objektes werden unterschiedliche Regionen rund um das eigene Flugsystem definiert. Anhand des Winkels zwischen dem Flugsystem und dem CPA wird unterschieden, ob es sich um eine frontale, orthogonale oder diagonale Situation handelt. Schematisch ist diese Aufteilung in Abbildung 17 dargestellt. In einem Bereich von -10° bis $+10^\circ$ vor und hinter dem Flugsystem handelt es sich um einen frontalen Konflikt. Ebenfalls in einem 20° Bereich jeweils links und rechts von dem Flugsystem handelt es sich um einen orthogonalen Konflikt. Bei den übrigen Konflikten handelt es sich um einen diagonalen Konflikt.

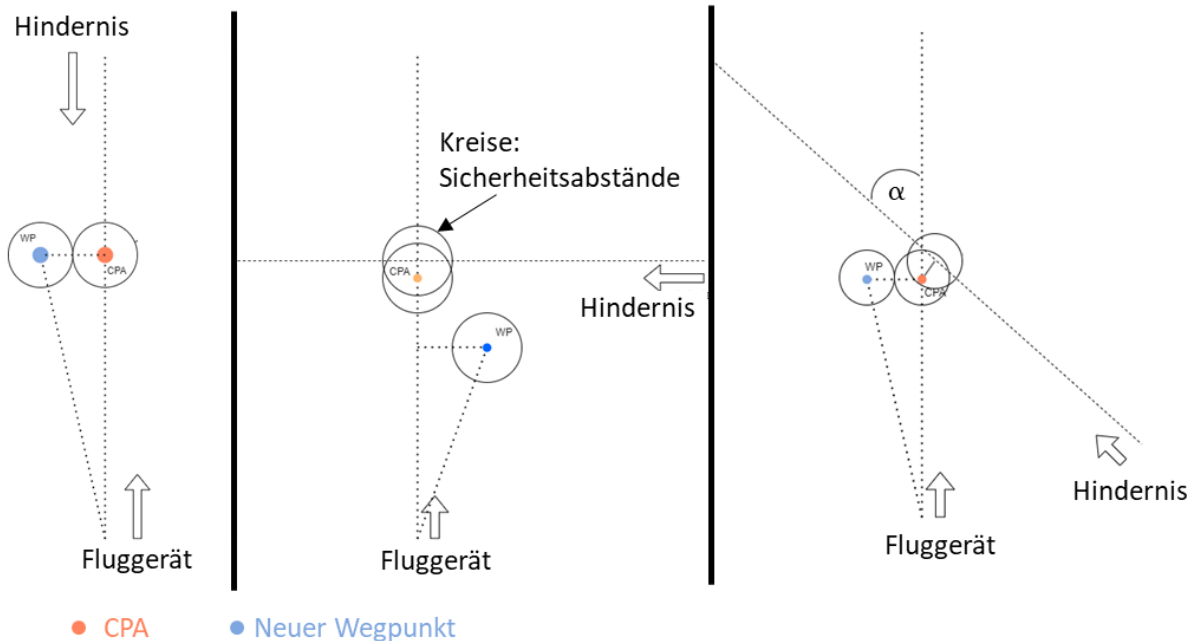


Abbildung 17: frontaler Konflikt (links), orthogonaler Konflikt (mitte), diagonaler Konflikt (rechts)

Für den Fall eines frontalen Konflikts wird ein Ausweichwegpunkt links vom CPA so positioniert, dass keine minimalen Abstände unterschritten werden und eine konfliktfreie aneinander Vorbeifliegen ermöglicht wird. Im Fall eines orthogonales Konfliktes wird ein neuer Wegpunkt so positioniert, dass sicher hinter dem Hindernis vorbeigeflogen werden kann. Bei einem diagonalen Konflikt wird ebenfalls ein neuer Wegpunkt auf Höhe des CPA so positioniert, dass ein Vorbeiflug ohne Unterschreiten eines Mindestabstands gewahrt wird.

Eine Erprobung der Kollisionsvermeidung konnte innerhalb der Projektlaufzeit aufgrund der Ermangelung eines flugfähigen S360 Fluggeräts nicht auf diesem erfolgen. Für weitere Informationen diesbezüglich sei an dieser Stelle auf die Ergebnisdarstellung des HAP 4 verwiesen. Die Erprobung des Tracking-Systems unter realen Bedingungen erfolgt aus diesem Grund mit RWTH-eigenen Versuchsträgern. Ein mit einem Pixhawk-Flugcomputer ausgestatteter Twinstar 2 der Multiplex Modellsport GmbH repräsentiert das eigene Luftfahrzeug. Durch die Anbringung des Droniq Hook-On-Device können ADS-B, FLARM und UTM Daten empfangen werden. Die empfangenen Daten werden im Tracking auf einem RaspberryPi verarbeitet. Dort kann im Bedarfsfall ebenfalls der Algorithmus zur Konfliktvermeidung ausgeführt werden. Zur Population des Luftraums wurde eine Matrice 600 Pro des Herstellers DJI mit einer Nutzlastkiste ausgestattet, die Sensorik für das Senden und Empfangen von FLARM Daten enthält. Zusätzlich wurde aus der Position der Matrice 600 Pro eine ADS-B Nachricht erzeugt, die über eine eigene Kommunikationsplattform an den Twinstar übermittelt wurde.

II.1.4 Ergebnisse aus HAP 4: „Integrierte Larus-Pro Flugsysteme“

Das HAP 4 sieht die Integration der entwickelten Teilsysteme in das Larus-Pro Flugsystem vor. Hierzu muss zunächst das aus Larus vorhandene S360 Fluggerät der RWTH auf den Systemstand von Larus-Pro erweitert und angepasst werden.

Zur Vorbereitung der Anpassungen wurde gemeinsam mit HAVS zunächst der aktuelle Systemstand des Larus-Demonstrators erfasst und die notwendigen Systemanpassungen identifiziert. Hierbei wird keine vollständige Umrüstung durchgeführt, sondern das Flugsystem gezielt so angepasst, dass alle wesentlichen Teilsysteme und Schnittstellen, welche in Interaktion mit den seitens der RWTH entwickelten Komponenten stehen, dem aktuellen Projektstand entsprechen. Hierzu zählen unter anderem die Flugsteuerung inkl. Bodenstationssoftware, die Funkstrecke und Telemetriesysteme sowie die Spannungsversorgung. Nicht umgerüstet werden beispielsweise der Treibstofftank, Strukturbauteile oder auch die Winglets.

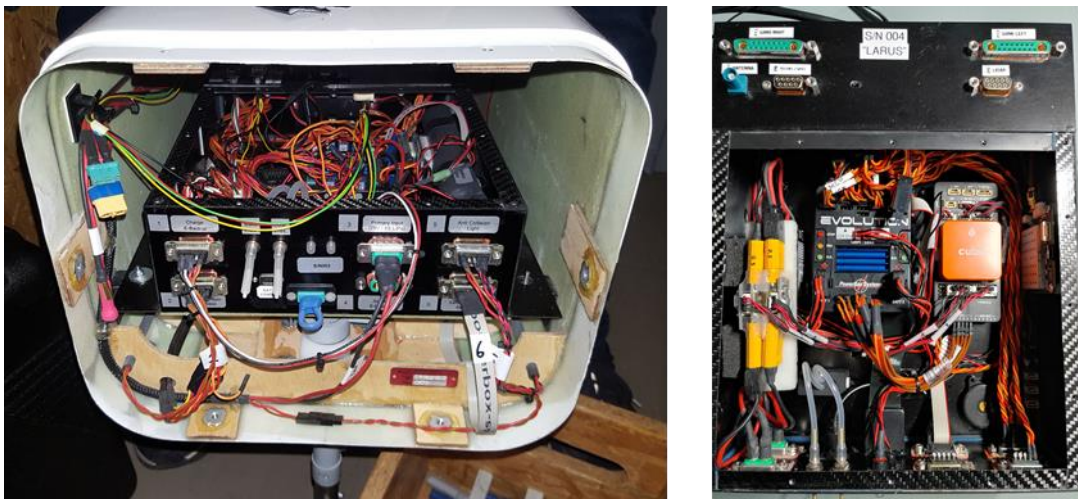


Abbildung 18: Avionikbox vor (links) und nach der Umrüstung (rechts)

Auf dieser Grundlage wurden alle zur Umrüstung notwendigen Komponenten beschafft und die Umrüstungsunterlagen wie Schaltpläne und Konstruktionsskizzen erarbeitet. Die Umrüstung des Fluggeräts wurde seitens der RWTH zur Jahresmitte 2022 fertiggestellt und das Fluggerät zur Abnahme an den Projektpartner HAVS übergeben. Nach erfolgter Kontrolle der durchgeführten Umbauten sollte das Fluggerät zeitnah im Rahmen einer Flugeinweisung an die RWTH zur Durchführung der Teilsystemintegrationen (siehe HAP 1 – 3) zurückgegeben werden. Aufgrund technischer Schwierigkeiten erfolgte die Rückgabe des Fluggeräts erst gemeinsam mit dem Projektabschluss im Juni 2024, weshalb es weder für Systemintegrationen noch für Flugtests zur Verfügung stand. Lediglich das Conditionmonitoring-System konnte in einem frühen Iterationsstand noch vor der Umrüstung des S360 Fluggeräts zeitweise integriert werden (siehe HAP 2).

II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur selbstständigen Durchführung von Integrationsarbeiten und Flugversuchen durch die RWTH wurde das aus dem Vorgängerprojekt Larus bestehende S360 Fluggerät der Firma Hanseatic Aviation Solutions auf den Larus-Pro Systemstand aufgerüstet. Dies umfasst die für die projektspezifischen Arbeiten der RWTH Aachen notwendigen Komponenten wie Flugkontroller, Spannungsversorgung und Funkverbindungskomponenten. Des Weiteren wurden Sensoren und Komponenten zur Herstellung und Integration eines Condition-Monitoring-Systems als auch Kollisionsvermeidungssysteme im Projektrahmen finanziert. Dies umfasst Komponenten zur Platinenherstellung als auch ADS-B, FLARM und UTM-Module. Zur Wetterertüchtigung des zur Böenlastminderung eingesetzten FADS-Systems wurden insbesondere Materialien zur Herstellung von Prüf- und Testaufbauten für Windkanaluntersuchungen benötigt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die am Institut für Flugsystemdynamik geleisteten Forschungsarbeiten waren notwendig und angemessen. Alle im Arbeitsplan des Teilvorhabens formulierten Aufgaben wurden bearbeitet. Dabei konnten sämtliche Arbeiten im Rahmen des zuvor veranschlagten Kostenbudgets durchgeführt werden. Geringfügig erhöhte Investitionskosten konnten durch eine Umverteilung anderer Mittel ausgeglichen werden. Die Ergebnisse entsprechen den im Projektantrag definierten Zielsetzungen. Es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die RWTH Aachen University ist eine Körperschaft öffentlichen Rechts. Als Teil der RWTH Aachen verfolgt das Institut für Flugsystemdynamik keine wirtschaftlichen Verwertungsziele. Stattdessen richtet sich der Hauptfokus auf Wissensbildung und Verbreitung der erzielten Erfahrungen durch wissenschaftliche Publikationen, Teilnahme an Konferenzen und den wissenschaftlichen Austausch in der Fachgemeinschaft. Eine weitere Verwertung der im Projekt erzielten Ergebnisse zielt auf die Schärfung des wissenschaftlichen Profils und der Kompetenzen des Instituts sowie der Ausbildung von Studierenden und Nachwuchswissenschaftlern.

Die Verwertung und Nutzung der im Projekt erzielten Ergebnisse geschieht am Institut für Flugsystemdynamik in Form von Aufbau von Expertise, Wissenstransfer und der Ausbildung von Demonstratoren, Testumgebungen, Sensoren, Sensorplattformen und Algorithmen werden weiterentwickelt und stehen künftigen Vorhaben zur Verfügung. Teile der im Projekt erlangten Fachkompetenz, z.B. zu den Themenkomplexen Parameteridentifikation und Modellbildung, Böenlastminderung und Flugführung zur Kollisionsvermeidung konnten bereits in nachfolgenden hoheitlichen und industriellen Projekten eingebracht werden. Weitere Projekte sind in Planung.

Die Forschungsarbeiten und -ergebnisse bilden ferner die Grundlage zur Ausarbeitung einer Dissertation (bislang noch nicht veröffentlicht) am Institut für Flugsystemdynamik. Im Rahmen der studentischen Ausbildung wurden im Larus-Pro Projekt zwei Masterarbeiten und zwei Bachelorarbeiten angefertigt. Die Erkenntnisse aus den Forschungsarbeiten fließen zudem in die Vorlesungsinhalte der Lehrveranstaltungen Flugdynamik, Flugregelung und Flugführung ein und ermöglichen den Studenten einen Bezug zu aktuellen Forschungsthemen.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Am Institut für Flugsystemdynamik lag ein Fokus im Projekt Larus-Pro auf der Erweiterung des Systems mit Blick auf die Allwettertauglichkeit bei herausfordernden Witterungsbedingungen. Vor diesem Hintergrund wurde ein System zur Minderung von Strukturlasten gegen Störungen durch Wittereinflüsse ertüchtigt. Der Einsatz eines solchen Systems ist bei UAVs bzw. kleinen Fluggerätegrößen bislang eher unüblich und bezieht sich hier auch auf eine spezielle Anforderung in diesem Vorhaben. Eine Entwicklung oder Verfolgung etwaiger Forschungsziele in ähnlicher Form an anderen Stellen während der Projektlaufzeit ist nicht bekannt.

Der zweite Schwerpunkt der Forschungsarbeiten des Instituts für Flugsystemdynamik lag auf der sicheren Integration des Larus Fluggeräts in den allgemeinen Luftraum mittels Detektion von potenziellen Kollisionen mit anderen Luftraumteilnehmern per ADS-B, FLARM und UTM-Daten sowie einer konsequenten Kollisionsvermeidung auf Basis einer Wegpunkteplanung im Rahmen der Flugführung. Während der Vorhabensdurchführung wurden zwar einzelne Teilaspekte aus diesem Themengebiet von anderen Stellen bearbeitet, jedoch nach derzeitigem Kenntnisstand nicht mit dem Fokus auf eine Gesamtsystemlösung zur nichtkooperativen Kollisionsvermeidung.

II.6 Veröffentlichungen, Beiträge und studentische Arbeiten

Publikationen und Beiträge:

- J. Tilmans: Robustheitssteigerung eines aktiv arbeitenden Böenlastminderungssystems für unbemannten Flugsystems gegen fehlerhafte Druckmesswerte, Beitrag auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress, Dresden, 2022
- J.-P. Herzog: Verteilte Kommunikationsplattform zur modellbasierten Entwicklung und Simulation unter realen Bedingungen, Beitrag auf dem deutschen Luft- und Raumfahrtkongress, Stuttgart, 2023

- J.Tilmans: Untersuchung des Regeneinflusses auf Pitot-Statik-Messsysteme unbemannter Fluggeräte, Beitrag auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress, Stuttgart, 2023
- J. Tilmans, S. Jackisch und D. Moormann: Investigation of the Influence of Rain on Pitot-Static Measuring Systems of Unmanned Aerial Vehicles, CEAS Aeronautical Journal, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00788-w>

Studentische Arbeiten:

- Bachelorarbeit: Fehlersimulation und Fehlerdetektion innerhalb eines Flush Air Data Sensing Systems im Rahmen eines Böenlastabminderungssystems, 2022, Kilian Nöth
- Masterarbeit: Untersuchung des Regeneinflusses auf Pitot-Statik-Messsysteme unbemannter Kleinfluggeräte, 2023, Florian Joppe
- Masterarbeit: Optimierung des Luftdatenaufnehmers zur Flugzustandsbestimmung eines unbemannten Fluggerätes gegen Regeneinflüsse, 2023, Shaurya Bhardwaj
- Bachelorarbeit: Identifikation fehlerhafter Druckmesswerte innerhalb eines FADS Systems durch Long Short-Term Memory Networks, 2023, Lena Stilleke