Technische Universität Hamburg
Institut für Flugzeug-Systemtechnik
Nesspriel 5, 21129 Hamburg

PB-Nr. FST-PB-2025-421

Abschlussbericht
für den Berichtszeitraum 01.06.2021 – 30.11.2024

zum Vorhaben

AdLoNet
Fortschrittliches sensor- und beobachterbasiertes Netzwerk zur Überwachung von Flugzeugstrukturlasten

Zuwendungsempfänger	Technische Universität Hamburg
Förderkennzeichen	20Q1948B
Erstellungsdatum	31.05.2025
Laufzeit des Vorhabens	01.06.2021 – 30.11.2024
Berichterstatter	M.Sc. Oliver Luderer
	Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Projektübersicht 5
1.1 Gesamtziel des Teilvorhabens der TU Hamburg 5
1.2 Planung und Ablauf 7
1.2.1. Zeitplan mit Meilensteinplanung 8
1.3 Technischer und wissenschaftlicher Stand 9
1.4 Voraussetzungen 11
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 12
2. Wissenschaftlich-Technischer Bericht 13
AP 1.1: Analyse der Hard- und Softwareanforderungen (Echtzeit) 13
Definition der Anforderungen an die Hardware und Software 13
AP 1.2: Systemkonzeption (Sensoren, Rechner, Schnittstellen…) 13
Sensorkonzept für den Prototypenflügel im Windkanal 13
Avionikkonzept für das Versuchsflugzeug 14
Konzeptionierung reduzierter Lastenschätzer und Fusionsalgorithmen 14
AP 1.3: Testspezifikation und Performanzindikatoren 15
Spezifikation durchzuführender Versuche 15
Bewertungskriterien für das Sensor- und Beobachternetzwerk 16
AP 2.1: Lernfähiges Beobachternetzwerk 16
Entwicklung nichtlineares Referenzmodell 16
Entwicklung des LPV-Systems 18
Methode zur Stützung des Beobachters durch Sensorsignale und lernfähige KI-basierte Methode basierend auf LMNs 19
AP 2.3: Sensornetzwerk 20
Architekturentwurf für die verschiedenen Messsysteme 20
Architekturentwurf für das komplementäre Sensornetzwerk 20
AP 2.4: Intelligente Fusions- und Analysefunktionen zur Lastüberwachung 21
AP 2.5: Integration und Optimierung des Netzwerks 24
Anpassung des Sensornetzwerks für den Flugversuch 24
Anpassung der Fusionsarchitektur für den Flugversuch 24
AP 3.1: Aufbau Prüfstände und Anpassen des Versuchsträgers 27
Prototypenflügel für den Windkanalversuch 28
Gewichtsreduziertes Avionikkonzept für den Flugversuch 28
Versuchsflugzeug LORAS-Dimona 30
AP 3.2: Erproben und Validieren von Teil- und Gesamtsystem 31
Windkanalversuche zur Kalibrierung des Luftdatenmasts und Vermessung des Antriebssystems 32
Windkanalversuche zur Erprobung des Sensornetzwerks 32
Flugversuche zum Einstellen des Versuchsflugzeugs und Erprobung des Sensor- und Beobachternetzwerks 34
AP 3.3: Bewertung von Teil- und Gesamtsystem 35
Erprobung & Bewertung des LPV-basierten Erweiterten Kalman Filters 35
Bewerten der Sensortechnologien für den Flugversuch 36
Erprobung und Bewertung des Gesamtsystems 36
3. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 38
4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 38

5. Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse 38
6. Liste der erstellten Dokumentation 39
7. Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur 39
8. Abbildungsverzeichnis 40
9. Tabellenverzeichnis 41

1. Projektübersicht

1.1. Gesamtziel des Teilvorhabens der TU Hamburg

Im Verbundvorhaben AdLoNet wird eine neue Methode zur Überwachung von Flugzeugstrukturlasten entwickelt, die gegenüber dem Stand der Technik eine höhere Zuverlässigkeit und Genauigkeit bei geringerem Entwurfs- und Implementierungsaufwand bietet. Durch diese Vorteile wird der Einsatz einer Strukturlastüberwachung im zivilen Anwendungsbereich wirtschaftlicher und der Paradigmenwechsel von einer festen zu einer bedarfsorientierten Wartung ermöglicht.

Heutige Methoden der Strukturlastüberwachung sind entweder sensorbasiert, wobei Umwelteinflüsse und Ausfälle zu Messfehlern und eingeschränkter Zuverlässigkeit führen. Oder sie basieren auf Modellansätzen (Lastenbeobachter), die methodenspezifisch eine reduzierte Genauigkeit vor allem im Extrapolationsbereich aufweisen. Durch die Entwicklung eines komplementären Sensor- und Beobachternetzwerkes sowie den zugehörigen echtzeitfähigen Fusionsfunktionen können die Defizite der Sensoren (Alterung, Ausfall, Umwelteinflüsse) sowie die der Lastenbeobachter (Genauigkeit) kompensiert werden, und es wird eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Lastenüberwachungssystems ermöglicht.

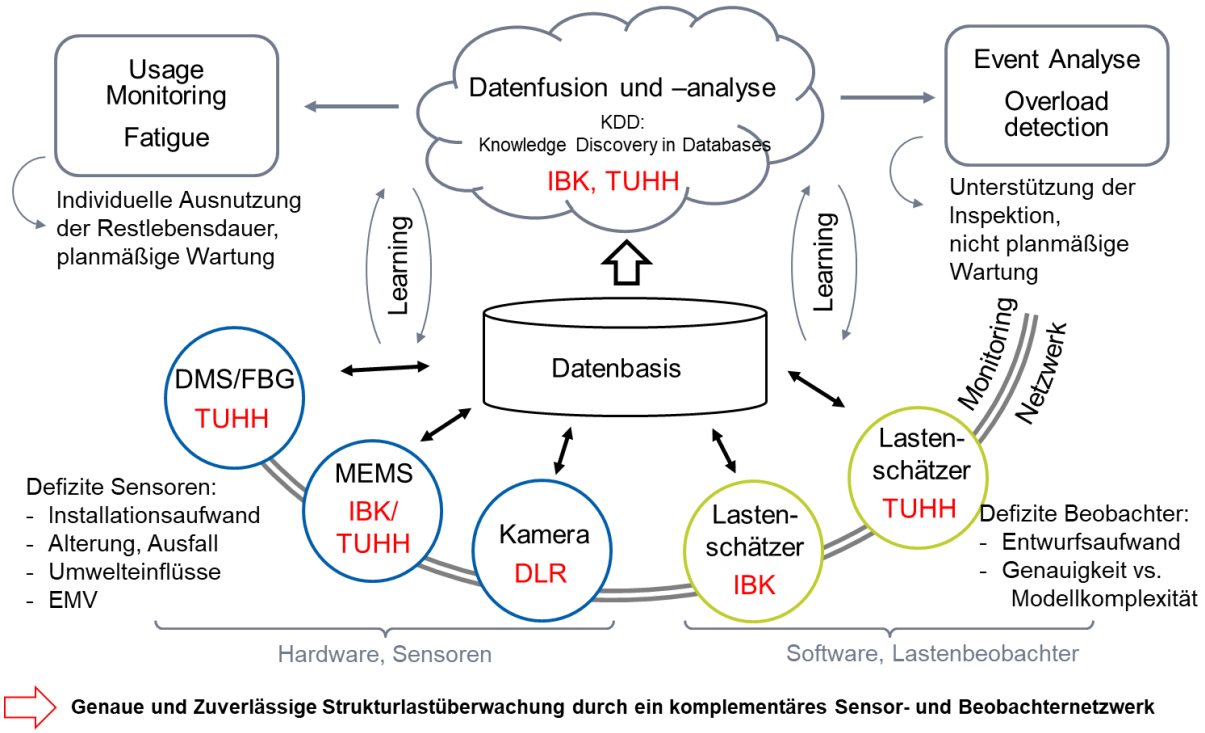

Abbildung 1: Aufbau und Funktionen des Sensor- und Beobachternetzwerkes zur Überwachung von Flugzeugstrukturlasten

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise des fortschrittlichen Sensor- und Beobachternetzwerks. Hinsichtlich der verwendeten Sensoren werden sowohl unterschiedliche Messgrößen aufgenommen, als auch unterschiedliche Messprinzipien eingesetzt, um jeweils defizitäre Eigenschaften (wie Alterung, Temperaturdrift, Ausfall, unzureichende räumliche oder zeitliche Auflösung) zu kompensieren.

Um geeignete, komplementäre Sensorkonzepte zu identifizieren kommen verschiedene Technologien zur Dehnungsmessung zum Einsatz, wie klassische Dehnungsmessstreifen und fortschrittliche Faser-Bragg-Gitter, ein Messverfahren zur kamerabasierten optischen Verformungsmessung und ein Messverfahren zur Erfassung des lokalen Profildrucks, beispielsweise mittels MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Die Sensoren werden insbesondere komplementär bezüglich des möglichen Installationsortes, der Messgenauigkeit und der Messauflösung, teilweise aber auch redundant im Sinne der Steigerung der Zuverlässigkeit des Messsystems eingesetzt. Prinzipiell wird dabei jedoch das Ziel eines möglichst minimalinvasiven Einsatzes von Sensoren verfolgt, um im Hinblick auf eine zukünftige reale Anwendung den Installations-, Kalibrierungs-, und Betriebsaufwand sowie die damit zusammenhängenden Kosten möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund wird zur Stützung des Sensornetzwerkes auch auf das vom DLR entwickelte, stereoskopische Kamerasystem zur optischen Deformationsmessung gesetzt. Seitens der Lastenbeobachter kommen sowohl physikalisch motivierte als auch datenbasierte Methoden zum Einsatz, die in einem hybriden Beobachteransatz kombiniert und mittels einer KI-basierten Methode unter Verwendung der komplementären Sensorsignale im Betrieb fortlaufend trainiert werden. Das Netzwerk soll zukünftig zudem im Kontext der aktiven Lastregelung eingesetzt werden. Aus diesem Grund ist Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten. Gegenüber dem Stand der Technik müssen aus diesem Grund die enthaltenen Lastenmodelle vereinfacht werden, ohne an Genauigkeit zu verlieren. Dies gelingt durch Fusion der beobachteten und gemessenen Lasten. Zur Lastereignisdetektion und Fatiguebewertung wird ein „Knowledge Discovery in Databases“-Prozess angeschlossen. Das Gesamtsystem wird an einem elektrisch angetriebenen UAV der TUHH erprobt.

Die Ziele des Teilvorhabens der TUHH sind:

1. Entwicklung eines **Sensornetzwerks** zur Messung von Lasten/Lastverteilungen im Flug
2. Weiterentwicklung einer hybriden Lastenbeobachtermethode im Sinne eines **Beobachternetzwerkes** mit dem Ziel insbesondere der Reduzierung der Komplexität und Beschleunigung der Methode
3. Entwicklung von **Datenfusions- und Datenanalysefunktionen** zum Aufbau eines Sensor- und Beobachternetzwerks für Event Analysen und Fatigue Monitoring
4. **Erprobung** und Validierung der entwickelten Methoden in Labor-, Windkanal-, und/oder Flugversuchen
5. **Veröffentlichung** der Ergebnisse im Rahmen wissenschaftlicher Konferenzen und Zeitschriften.

1.2. Planung und Ablauf

In Abbildung 2 ist der Projektstrukturplan des Verbundvorhabens AdLoNet dargestellt. Er gibt eine Übersicht über die im Verbund geplanten Teilvorhaben. Das Gesamtvorhaben untergliedert sich in die Hauptarbeitspakete (HAP) 1 bis 3. Diese sind wiederum in Arbeitspakete (AP) untergliedert. Die Anforderungsanalyse, Systemkonzeption und Testspezifikation erfolgt gemeinsam mit allen Verbundpartnern in HAP 1: Konzeption. Schwerpunktmäßig bearbeitet die TUHH darauf aufbauend in HAP 2 die Arbeitspakete zum lernfähigen Beobachternetzwerk (AP 2.1), Sensornetzwerk (AP 2.3), Fusions- und Analysefunktionen (AP 2.4) und Optimierung des Netzwerks (AP 2.5). In HAP 3 sind die Aufgaben, bis auf AP 3.1 (Anpassen des Versuchsträgers, nur TUHH) auf alle Verbundpartner verteilt. Das Projektmanagement (HAP 0) erfolgt durch den Verbundpartner IBK. Das AP 2.2 erfolgt durch das DLR. Der Projektpartner, der die Leitung eines AP's übernimmt, ist jeweils unterstrichen gekennzeichnet.

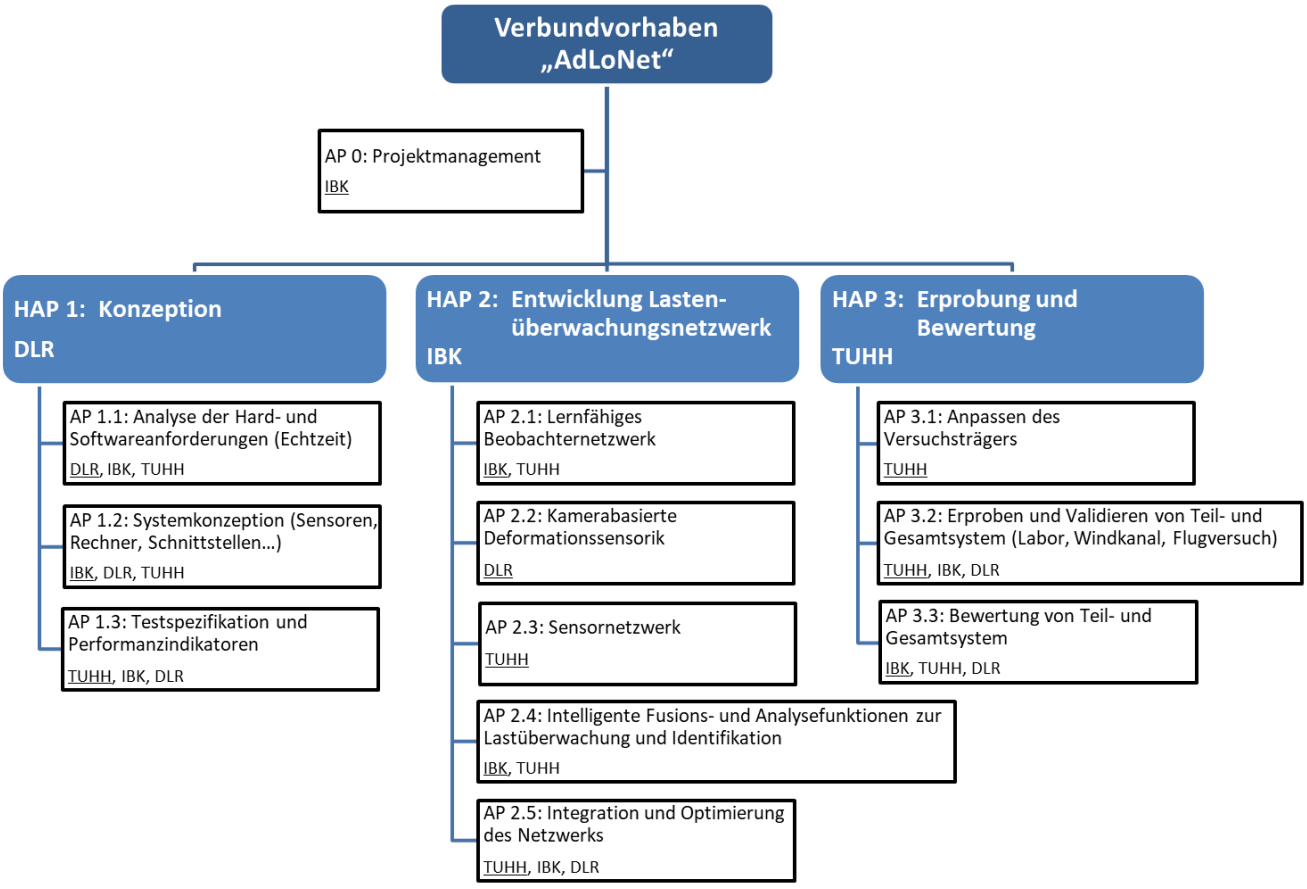

Abbildung 2: Projektstruktur und Arbeitspaketleitung

1.2.1. Zeitplan mit Meilensteinplanung

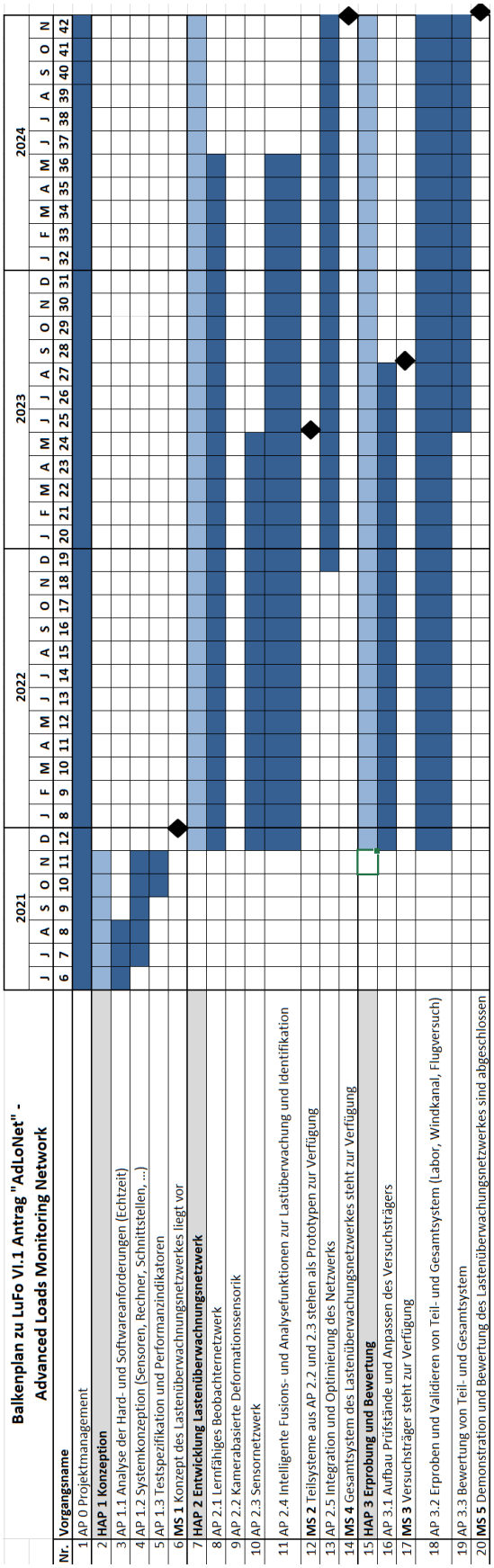

Abbildung 3: Zeit- und Meilensteinplanung

1.3. Technischer und wissenschaftlicher Stand

Etablierte physikalische (sensorbasierte) Methoden zur Lastenüberwachung basieren auf unterschiedlichen Messmethoden und einfachen Ansatzfunktionen [1,2]. Der Einsatz von Dehnungsmessstreifen zur sensorbasierten Erfassung der lokalen Lasten ist weitgehend etabliert. Zusätzlich existieren verschiedene Konzepte zur Strukturlasterfassung mittels MEMS Drucksensoren, Beschleunigungssensoren oder Fiber-Braggs [13,14,19,20]. Die Auflösung lokaler Lasteffekte und damit Erfassung des gesamten Lastzustands erfordert die Verteilung der Messsysteme, was die Systemkomplexität unweigerlich steigert. Neuartige Konzepte setzen zusätzlich auf den Einsatz von LIDAR Sensoren um Lasten durch Windböen frühzeitig vorhersagen zu können [16]. Durch die hohe Systemkomplexität, dem hohen Gewicht und der Fehleranfälligkeit durch Ausfall, Alterung oder Umwelteinflüssen eignen sich reine sensorbasierte Lastüberwachungskonzepte nur bedingt für eine wirtschaftliche Strukturlastüberwachung über den gesamten Flugzeuglebenszyklus.
Bei aufwändigeren Lastenbeobachter-Methoden [3,4,5,6] kommt ein detailliertes, flugphysikalisches Modell zur Simulation von Strukturlasten zum Einsatz [7,8]. Es werden physikalisch motivierte Methoden [8], reine datenbasierte Methoden [5,6,7] und hybride Methoden unterschieden [9]. Ein zusätzlicher Störgrößen-Beobachter erlaubt die Schätzung unbekannter Böengeschwindigkeiten. Auf diese Weise ist eine Aussage über auftretende Strukturlasten infolge von Flugmanövern sowie äußerer Störungen (Turbulenz) möglich [7,8]. Lastenbeobachter-Methoden weisen sich durch einen lediglich einmaligen Sensorbedarf zur Modellbildung, der Auflösbarkeit lokaler Effekte sowie der Übertragbarkeit auf gleiche Flugzeugmuster aus. Eine hohe Genauigkeit kann mit diesen Methoden nur dann erzielt werden, wenn hoch-präzise physikalische Modelle vorliegen, deren Entwicklung sehr zeit- und kostenintensiv ist.

Ein alternativer, an der TUHH entwickelter Ansatz zur Lastenüberwachung stellt die Lokalmodellnetz-Methode dar. Bei diesem datengetriebenen Ansatz wird die Modellstruktur nicht physikalisch hergeleitet, sondern zusammen mit den Modellparametern aus Messdaten identifiziert. Dabei wird die Abhängigkeit der Lastgrößen von den Flugzustands- und Steuergrößen über lokal-lineare Ansatzfunktionen (Lokal-Modell-Netze, LMN) abgebildet [9,10,11]. Die Methode zeichnet sich durch eine hohe Schätzgenauigkeit innerhalb des Flugbereiches aus, ist echtzeitfähig und benötigt eine verhältnismäßig kurze Entwicklungszeit. Im Gegensatz zu anderen Methoden, wie beispielsweise neuronale Netze [17,18], weisen Lokal-Modell-Netze eine interpretierbare Modellstruktur auf und ermöglichen damit Rückschlüsse auf physikalische Effekte. Die LMN-Methode wird im Rahmen vom LuFo V-2 Verbundvorhaben G-FLIGHTS seitens der TUHH angewendet, um Strukturlasten in Echtzeit als Grundlage für eine Lastenregelung zu schätzen. An der TUHH wurde zudem im Rahmen des LuFo V-1 Verbundprojektes ATLAS2Hybrid eine hybride Lastenbeobachter-Methode entwickelt und mit einem Ultraleichtflugzeug validiert [12]. Der hybride Lastenbeobachter vereint die positiven Eigenschaften der zugrundeliegenden physikalischen und datengetriebenen Lastenschätzmethoden und zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Robustheit gegenüber unbekannten physikalischen Effekten aus. Aus diesem Grund soll die hybride Lastenbeobachter-Methode im Rahmen des Verbundvorhabens AdLoNet zur Auslegung des Sensor- und Beobachternetzwerks verwendet werden. Durch die Entwicklung eines Sensor- und Beobachternetzwerks und dessen Kombination mit kontinuierlichen Fusions- und Analysefunktionen, geht das Verbundvorhaben AdLoNet in einem zentralen Bereich über den Stand der Technik hinaus.

Referenzliste:

[1] Ladda, V.; Meyer, H.J.: The Operational Loads Monitoring System, OLMS. Airbus Report. Veröffentlicht in: Defence Technical Information Center, 1991.

[2] Wallace, M.; Azzam, H.: Indirect approaches to individual aircraft structural monitoring. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2004.

[3] Bensch, L.; et al.: Verfahren zur Rekonstruktion von Böen und Strukturlasten bei Flugzeugen, insbesondere Verkehrsflugzeugen. Patent DE102005058081.5, 2005.

[4] Bensch, L.; et al.: Method for reconstructing gusts and structural loads at aircraft, in particular passenger aircraft. Internationales Patent WO2007/065659A1, 2007.

[5] MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Validation of a Model-Based Structural Loads Monitoring System using the Flight Test Aircraft UW-9 Sprint. In: AIAA Aviation. Dallas, 2015

[6] MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Validation of a nonlinear observer implementation for empennage loads estimation. In: CEAS Aeronautial Journal (2016). ISSN: 1869-5582.

[7] MONTEL, M.; et al.: Modellierung und Identifikation der Längsbewegung des Flugversuchsträgers UW-9 Sprint zur modellbasierten Beobachtung von Strukturlasten. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Bremen, 2011.

[8] MONTEL, M.: et al.: Identifikation der Seitenbewegung und Validierung des aerodynamischen Gesamtmodells für den Flugversuchsträger UW-9 Sprint. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Berlin, 2012.

[9] HARTLEIB, F.; MONTEL, M.; et al.: Entwicklung einer Strukturlastschätzung basierend auf Lokal-Modell-Netzen zur Ermittlung von Flügellasten. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Rostock, 2015.

[10] HALLE, M.; THIELECKE, F.: Flight Loads Estimation using Local Model Networks. In: 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Science. St. Petersburg, 2014

[11] HALLE, M.: Lokalmodell-Netz-Identifikation als Analyse und Bewertungsmethodik von Flugmanöverlasten, Dissertation. TUHH, 2015

[12] MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Efficient and Accurate Technology for Aircraft Loads Estimation (EAGLE). In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. München, 2017

[13] KRÜGER, W.R. et al.: Definition of a Comprehensive Loads Process in the DLR Projekt ILoads. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Braunschweig, 2016

[14] RAAB, et al.: Dynamic Flight Load Measurements with MEMS Pressure Sensors. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Aachen, 2020

[15] CUMNUANTIP, et al.: Methods for the Quantification of Aircraft Loads in DLR Project ILoads. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Braunschweig, 2016

[16] FEZANS, N. et al.: Gust load alleviation for a long-range aircraft with and without anticipation. In: CEAS Aeronaut Journal 10, 1033–1057., 2019

[17] JOENG S.H. et al.: Estimation of Maximum Strains and Loads in Aircraft Landing Using Artificial Neural Network. In: International Journal of Aeronautical and Space Sciences 21, 117-132. 2020

[18] REED, S.C.: Indirect aircraft structural monitoring using artificial neural networks. In: The Aeronautical Journal, Volume 112, Issue 1131, pp. 251 – 265. 2008
[19] SINSKE, J. et al.: HALO flight test with instrumented under-wing stores for aeroelastic and load measurements in the DLR project iLOADS. In: CEAS Aeronaut Journal 9, 207–218, 2018
[20] KRÜGER, W.R. et al.: Design and Wind Tunnel Test of an Actively Controlled Flexible Wing. In: International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics. Georgia, 2019

1.4. Voraussetzungen

Die TUHH beschäftigt sich seit vielen Jahren mit Themen der Strukturdynamik, Lastenüberwachung und Systemidentifikation. Im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsprojekten wie M-Fly, FTEG, PROWINGS, ATLAS2Hybrid, ELASTIK und G-FLIGHTS wurden in Zusammenarbeit mit Partnern wie Airbus, DMecS, FBZ und IBK Methoden zur Lastenschätzung [21,22,30,31,32,33,34], Lastenmessung und Lastenregelung sowie zur Lasten- und Modalanalyse entwickelt und im Rahmen von Promotionen [24,25,26,29] veröffentlicht. Unter anderem entwickelte die TUHH im Rahmen des LuFo-V.1-Projekts ATLAS2Hybrid eine hybride, modellbasierte Beobachter-Methode zur Ermittlung von Strukturlasten an Flugzeugkomponenten [40] in einem Post-Prozess, die als Grundlage für das Beobachternetzwerk dienen soll. Die TUHH verfügt über eine tiefgehende Expertise auf den Gebieten der Flugversuchstechnik [28], Instrumentierung [27], Versuchsdurchführung und Datenanalyse [23]. Die bestehende Entwicklungs- und Versuchsinfrastruktur ermöglicht es, Labor- und Flugversuche mit einem verfügbaren, skalierten Flugzeug (G-FLIGHTS-Dimona) durchzuführen. Die TUHH verfügt darüber hinaus eine tiefgehende Expertise und langjährige Erfahrung in der Auslegung und im Einsatz von Avionik [27,35,36,37,38], wobei an der TUHH sowohl low-cost als auch high-end Komponenten verwendet werden.

Referenzliste:

[21] MONTEL, M.; HAAR, J.; THIELECKE, F.: Implementierung eines Lasten-Beobachter-Verfahrens für den Flugversuchsträger UW-9 SPRINT. In: DLRK. Stuttgart, 2013
[22] HALLE, M.; THIELECKE, F.: Flight Loads Estimation using Local Model Networks. In: 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Science. St. Petersburg, 2014
[23] HAAR, J.; MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Flight Test Aircraft SPRINT for Loads Observer Assessment. In: International Workshop on Aircraft Systems Technologies. Hamburg, 2011
[24] GOJNY, M.: Systemtechnische Untersuchungen zur aktiven Regelung aeroelastischer Schwingungen bei Transportflugzeugen, Dissertation. TUHH, 2005
[25] SACHS, H.: Fault Investigation and Robust Failure Detection of Oscillating Aircraft Actuation Systems Using Analytical Redundancy, Dissertation. TUHH, 2009
[26] GÜLZAU, H.: Eine Methode zur Analyse der Dynamik von räumlichen Landeklappen-mechanismen in Fehlerfällen, Dissertation. TUHH, 2008

[27] KRINGS, M.; ANNIGHÖFER, B.; THIELECKE, F.: ULTRA - Unmanned Low-cost Testing Research Aircraft. In: ACC - American Control Conference. Washington, D.C., 2013
[28] NIEMANN, C.; MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Development of an Air Data System for an Unmanned Research Aircraft. In: DLRK. Augsburg, 2014
[29] HALLE, M.: Lokalmodell-Netz-Identifikation als Analyse und Bewertungsmethodik von Flugmanöverlasten, Dissertation. TUHH, 2015
[30] HALLE, M.; THIELECKE, F., LINDENAU, O.: Comparison of Real-Time Flight Loads Estimation Methods. In: CEAS Aeronautical Journal. 2014
[31] MONTEL, M.; RAM, M.; THIELECKE, F.: Nonlinear Observer Implementation for Empennage Loads Estimation. In: DLRK. Augsburg, 2014
[32] HAAR, J.; MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Entwicklung eines integrierten Modells zur Strukturlastschätzung für ein flexibles Flugzeug in der Transitionsphase Luft/Boden. In: DLRK. Stuttgart, 2013
[33] MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Validation of a Model-Based Structural Loads Monitoring System using the Flight Test Aircraft UW-9 Sprint. In: AIAA Aviation. Dallas, 2015
[34] MONTEL, M.; THIELECKE, F.: Efficient and Accurate Technology for Aircraft Loads Estimation (EAGLE). In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. München, 2017
[35] HALLE, M.; THIELECKE, F.: Tool Chain for Avionics Design, Development, Integration and Test. In: 1st Workshop on Avionics Systems and Software Engineering AVIOSE. Stuttgart, 2019
[36] HALLE, M.; THIELECKE, F.: Evaluation of the ASHLEY seamless tool-chain on a real-world avionics demonstrator. In: 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC). St. Petersburg. Florida, 2017
[37] ANNIGHOEFER, B.; IHLE, H.; THIELECKE, F.: An Easy-to-use Real-time AFDX Simulation Framework. In: 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, 2016
[38] ANNIGHOEFER, B.; IHLE, H.; THIELECKE, F.: Empirical Investigations on Avionics Scaling Laws. In: 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, 2016

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es gab keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundes.

2. Wissenschaftlich-Technischer Bericht

AP 1.1: Analyse der Hard- und Softwareanforderungen (Echtzeit)

In diesem Arbeitspaket sollten nach Vorhabensbeschreibung die Hardware- und Softwareanforderungen definiert und zusammen mit den Projektpartnern in einem gemeinsamen Spezifikationsdokument festgehalten werden. Die TUHH leistete Beiträge in den Bereichen Sensoren, Prototypenflügel für Labor- und Windkanalversuche, Flügelpaar für den Flugversuch, Versuchsflugzeug, Avionik und Auswerteelektronik.

Definition der Anforderungen an die Hardware und Software

Zu Projektbeginn wurden die Hardwareanforderungen definiert, insbesondere für einen Prototypenflügel mit erhöhter Sensoranzahl zur Erprobung im Labor- und Windkanal sowie für ein finales, minimalinvasiv bestücktes Flügelpaar für den Flugversuch. Hierfür wurden im Rahmen dieses Arbeitspakets die Anforderungen an die Flügelgeometrie sowie die notwendige Messsensorik definiert. Dabei orientieren sich alle geometrischen Abmaße an dem angestrebten Zielsystem eines 1:3 skalierten Modells einer HK36 Super Dimona, die bereits im Rahmen des LuFo V.2 G-Flights Projekts verwendet wurde. Zudem wurden Anforderungen an Avionik und Auswerteelektronik unter Berücksichtigung von Abfluggewicht, Gesamtmasse, Leistungs- und Gewichtsbedarf sowie an die Sensorik zur umfassenden Lastfallerfassung im Sensornetzwerk spezifiziert. Im Arbeitspaket AP1.1 wurden darüber hinaus die Softwareanforderungen an die Zielhardware (Avionik) sowie die anzuwendenden Methoden und Modelle (Lastenschätzer und Fusionsfunktionen) vor dem Hintergrund der angestrebten Echtzeitfähigkeit definiert. Ziel war eine Umsetzung der Software mittels Matlab/Simulink, wobei die Kompilierfähigkeit der Algorithmen auf der Zielhardware und die Unterstützung durch den Matlab Embedded Coder zentrale Anforderungen darstellten.

Erreichte Ziele

Gemäß der Zielsetzung wurden in diesem Arbeitspaket alle Anforderungen an die Hard- und Software in einem gemeinsamen Spezifikationsdokument der Projektpartner [43] zusammengefasst.

AP 1.2: Systemkonzeption (Sensoren, Rechner, Schnittstellen…)

In diesem Arbeitspaket sollten zunächst die genaue Spezifikation des Sensorsetups für den prototypischen Flügel erfolgen und erste Konzepte für den reduzierten Lastenbeobachter, die Fusionsalgorithmen sowie das Avionikkonzept abgeleitet werden.

Sensorkonzept für den Prototypenflügel im Windkanal

Das entwickelte Sensorkonzept für den Windkanalversuch ist in Abbildung 4 dargestellt und sah zunächst möglichst viele komplementäre Sensoren vor, um eine zielgerichtete Erprobung des Sensornetzwerks zu ermöglichen. Die nachfolgenden Messprinzipien wurden angewandt:

- Dehnungsmessstreifen (DMS)
- Fiber-Bragg-Sensoren (FBG)
- MEMS-Drucksensoren (MEMS)
- Kamerabasierte Deformationsmessung (CamS)
- Beschleunigungssensoren (IMU)

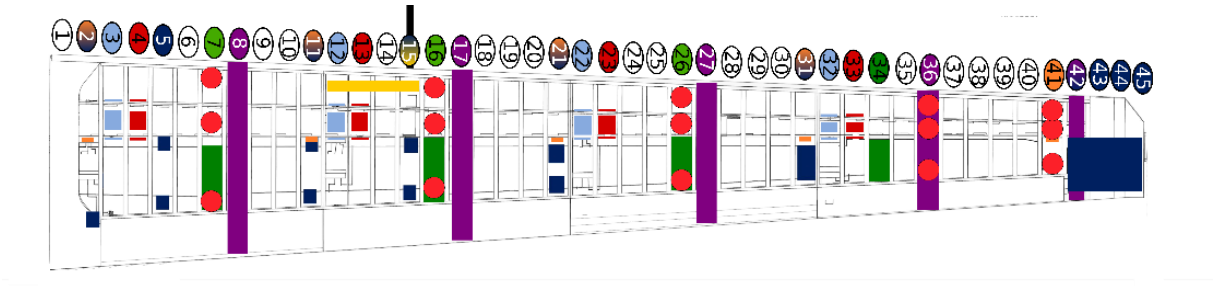

Abbildung 4: Sensornetzwerk des Prototypenflügels (blau: DMS, rot: FBG, orange: IMU, lila: MEMS, blau: Kameramarker, grün: Servoaktuator, gelb: Luftdatenmast, rot (Punkt): Lasteinleitungspunkt)

Avionikkonzept für das Versuchsflugzeug

Aufgrund des in AP1.1 ermittelten, erhöhten Bedarfs an Messsensorik und Auswerteelektronik für das Sensornetzwerk wird die erforderliche Zuladung des Versuchsflugzeugs im Vergleich zu bisherigen TUHH-Versuchsträgern signifikant steigen. Da das Referenzflugzeug aus dem G-Flights Projekt mit DMS-Sensorik und dSPACE MicroAutoBox II bereits das Maximalabfluggewicht von 25 kg erreicht, ist eine Erweiterung der Sensorik ohne Überschreitung des Gewichtslimits nicht möglich. Daher wurde in diesem Arbeitspaket ein gewichtsreduziertes Avionikkonzept konzeptioniert, das den Einsatz eines PixHawk-Autopiloten, eines Raspberry Pi zur Datenfusion und Lastenschätzung sowie ein NXP I/O-Board zur Sensoranbindung vorsieht. Die finale Erprobung und Verbesserung dieses Konzepts erfolgten im Rahmen von AP 3.1.

Konzeptionierung reduzierter Lastenschätzer und Fusionsalgorithmen

Im Rahmen von AP1.2 wurden erste Konzepte für einen reduzierten Lastenschätzer und Fusionsalgorithmen entwickelt und sollen schrittweise in den folgenden Arbeitspaketen mit Versuchsdaten optimiert werden. Der Lastenschätzer kombiniert einen physikalisch motivierten Lastenbeobachter (Erweiterter Kalman Filter) mit einem datengetriebenen Korrekturmodell (Abbildung 5). Durch die Nutzung linearer Entwurfsmodelle wird die Modellkomplexität sowie der Entwicklungsaufwand reduziert, was eine echtzeitfähige Überwachung von Strukturlasten ermöglicht und zukünftig eine leistungsfähige Lastenregelung ermöglichen kann. Die Robustheit und Zuverlässigkeit des Lastüberwachungsnetzwerks werden durch den komplementären Einsatz von Sensoren und modellbasiertem Beobachter schließlich verbessert.

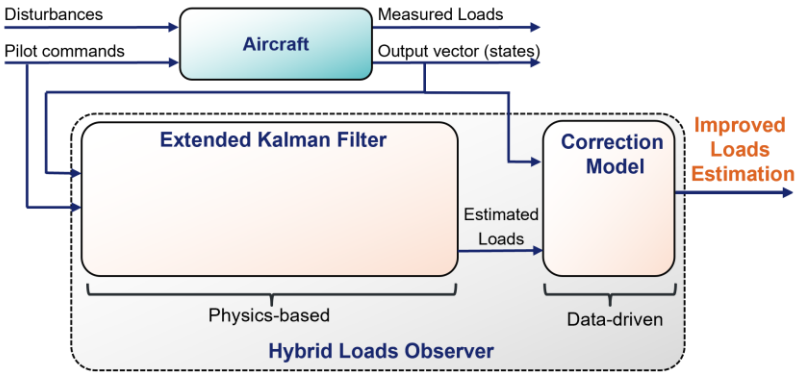

Abbildung 5: Reduzierter, hybrider Lastenbeobachter

Das initiale Fusionskonzept für den Windkanalversuch (Abbildung 6) sieht ein zentralisiertes Verfahren vor, bei dem kalibrierte, komplementäre Lastinformationen als Eingangssignale dienen. Ein vorgelagerter Zuordnungsprozess („Data Association“) gewichtet die Signale anhand eines Vierfach-Abstimmungsschemas nach ihrem Vertrauensniveau. Zusätzlich sind im Zuordnungsprozess Eventanalysen, wie das Überschreiten von Grenzlasten, vorgesehen.

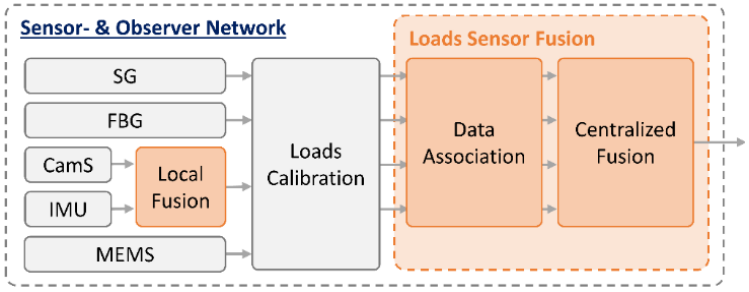

Abbildung 6: Fusionskonzept des Sensor- und Beobachternetzwerks

Erreichte Ziele

Gemäß der Zielsetzung des Vorhabens wurde in diesem Arbeitspaket die Systemkonzeption in einem gemeinsamen Spezifikationsdokument der Projektpartner [43] zusammengefasst.

AP 1.3: Testspezifikation und Performanzindikatoren

Im Rahmen von AP 1.3 wurden die Testspezifikationen für Versuche zur Modellbildung, Erprobung der Fusionsalgorithmen und des Sensornetzwerks sowie zur Auslegung und Validierung des reduzierten Lastenbeobachters definiert. Zudem wurden Bewertungskriterien für die Performanzanalyse des entwickelten Sensor- und Beobachternetzwerks festgelegt.

Spezifikation durchzuführender Versuche

Die spezifizierten Versuche können in die nachfolgenden 4 Hauptkategorien und jeweilige zugehörige Aktivitäten unterteilt werden:

1. Laborversuche
    a. Kalibrierung der Lastmesssensorik
    b. Kalibrierung, Einstellung und Inbetriebnahme des Flugzeugs
    c. Erprobung und Inbetriebnahme der Avionikplattform
2. Windkanalversuche
    a. Erprobung des Sensor- und Beobachternetzwerks
    b. Validierung des Lastenbeobachters auf Basis von Entwurfsmodellen
    c. Erprobung des Fusionskonzepts
    d. Kalibrierung des Luftdatenmasts
    e. Vermessung des Antriebssystems
    f. Stabilität und Steuereffektivität des Höhenleitwerks mit Kameraaufbau
3. Simulierte Flugversuche und Simulationsstudien
    a. Analytische Auslegung des Lastenbeobachters

   b. Auslegung hybrider Lastenbeobachter
   c. Erprobung Fusionierungsfunktionen und Eventanalyse
4. Reale Flugversuche
   a. Erprobung der neuen Avionikplattform
   b. Einstellung und Inbetriebnahme des Flugzeugs
   c. Auslegung hybrider Lastenbeobachter
   d. Erprobung & Optimierung Sensor- und Beobachternetzwerk

Bewertungskriterien für das Sensor- und Beobachternetzwerk

Die Bewertungskriterien orientieren sich am Stand der Technik und umfassen qualitative Auswertungen mittels normalisierter Cross-Plots der jeweiligen Lastgrößen sowie quantitative Kennzahlen wie den Theils-Koeffizienten und statistische Größen (Mittelwert, Standardabweichung, maximale Abweichungen).

Erreichte Ziele

Gemäß der Zielsetzung des Vorhabens wurden in diesem Arbeitspaket die Testspezifikation und Performanzindikatoren in einem gemeinsamen Spezifikationsdokument der Projektpartner [43] zusammengefasst.

AP 2.1: Lernfähiges Beobachternetzwerk

In Arbeitspaket AP 2.1 entwickelte die TUHH bisherige Methoden zur Schätzung von Flugzeugstrukturlasten weiter, mit Fokus auf die Echtzeitfähigkeit des hybriden Lastenbeobachters. Im Rahmen von AdLoNet wurde das bisher genutzte vollständige nichtlineare Modell erstmals durch ein linear-parameter-variantes (LPV) System als physikalische Modellgrundlage des Lastenbeobachters ersetzt. Dadurch konnte der Anteil komplexer Modelle reduziert und Echtzeitfähigkeit erreicht werden. Im Gegensatz zu etablierten Methoden erfolgte die Modellvalidierung nur in Teilbereichen, weshalb der reduzierte Beobachteransatz vorwiegend auf Entwurfsmodellen basiert und somit zukünftig eine ressourcenschonende sowie beschleunigte Entwicklung eines hybriden Lastenbeobachters ermöglicht.

Entwicklung nichtlineares Referenzmodell

Die Entwicklung des LPV Systems erfolgte im Rahmen von AP 2.1 durch Jacobi-Linearisierung und Ableitung von LTI-Modellen an vordefinierten Betriebspunkten. Es basiert auf linearisierten Zustandsraumdarstellungen des nichtlinearen Flugzeugmodells, abhängig von einem gemessenen, zeitlich variierenden Parametervektor p (Scheduling Vektor). Das hierfür benötigte nichtlineare Referenzmodell umfasst eine quasi-stationäre Streifenaerodynamik, ein Antriebs- und ein Strukturlastmodell und wurde mittels des teilautomatisierten Modellbildungsprozesses aus dem LuFo V-3 Projekt „ELASTIK“ parametriert. Ergänzt wird es durch Teilmodelle der internen Flugsimulationsbibliothek FLYSIM [50], um Pilotenkommandos, Aktuatordynamiken sowie Wind-, Turbulenz- und Atmosphäreneinflüsse abzubilden.

<u>Streifenaerodynamik</u>

Das quasi-stationäre Streifenmodell basiert auf den theoretischen Grundlagen von Herrmann [51]. Die Grundparametrierung wurde mithilfe des Software-Tools LIFTING_LINE [52] durchgeführt und hierfür die Streifendiskretisierung auf $\mathrm{n}_{\mathrm{Streifen,w}} =$

60 für den Flügel, $n_{Streifen,h} = 8$ für das Höhenleitwerk und $n_{Streifen,v} = 5$ für das Seitenleitwerk festgelegt. Die sich ergebenden lokalen Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte für spezifische Derivative sind beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt.

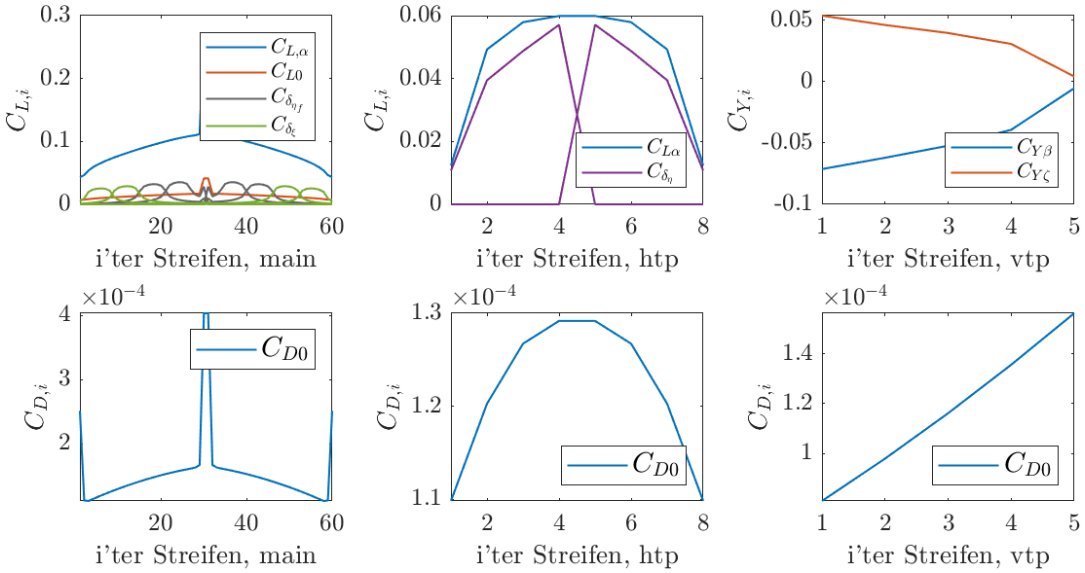

Abbildung 7: Aerodynamische Grundparametrierung mit LIFTING_LINE

Propellermodell (Antriebsmodell)

Die Schub- und Stützmomentenkennfelder wurden mit dem auf der Blatt-Element-Momenten-Theorie basierenden Propelleranalysetool XROTOR [53] sowie Windkanaldaten aus AP 3.2 ermittelt. Dafür wurden systematisch Betriebspunkte im Bereich von $V_A = 5$–40 m/s *und* $N_{prop} = 1500$–7500 1/min analysiert, durch Windkanaldaten ergänzt und über Look-up Tables im Referenzmodell integriert. Beispielhaft ist das ermittelten Schubkennfeld in Abbildung 8 dargestellt. Die erforderlichen lokalen Profildaten (bspw. Profilgeometrie, Einstellwinkel) des Propellerblatts wurden mit Hilfe eines 3D Scans an 11 radiale Profilsektionen bestimmt. Anschließend wurden diese Profilschnitte mit XFOIL [54] analysiert und als Eingangsgrößen für XROTOR genutzt.

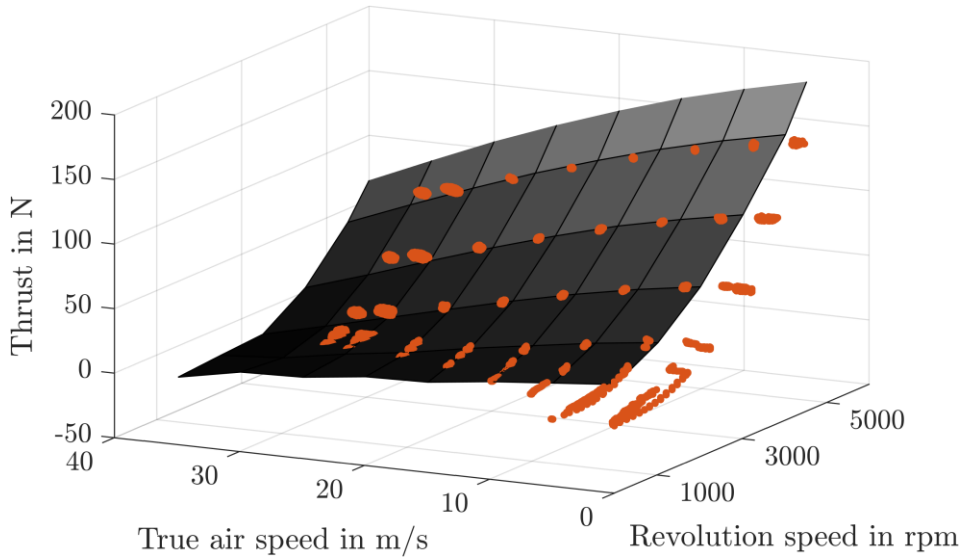

Abbildung 8: Schubkennfelder aus Windkanaldaten (orange) und XROTOR Analysen.

Strukturlastmodell

Die Modellierung der Strukturlasten basiert auf einem physikalischen Ansatz nach [55, 56], bei dem die lokalen Lasten an *k* vorher beschriebenen Lastbeobachtungspunkten ("LS") durch Berechnung der Summe der effektiven Kräfte und Momente unter Verwendung des Freikörperprinzips bestimmt werden. Zusätzlich werden die äußeren und Trägheitskräfte und -momente an *j* lokalen Massenpunkten ("MP") berücksichtigt.

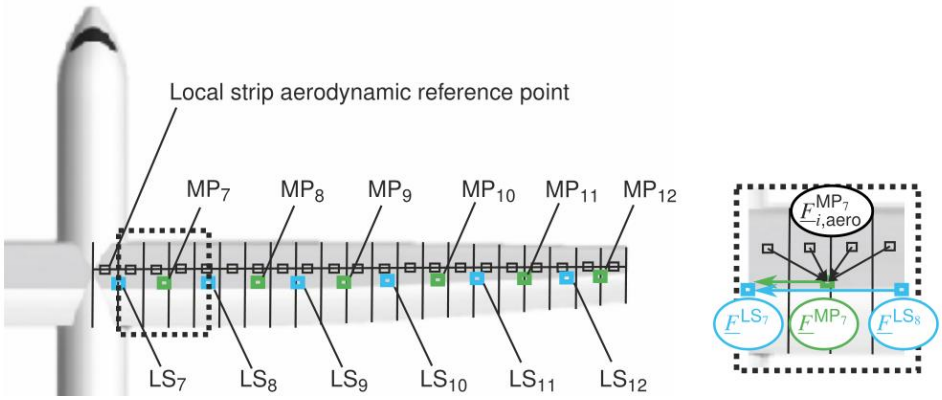

Abbildung 9: Kräfte, Momente & Lastüberwachungspunkte der Streifenaerodynamik

Abbildung 9 zeigt eine beispielhafte Verteilung von Massenpunkten und Lastbeobachtungspunkten für den rechten Flügel und wie die Kräfte und Momente am *i*-ten Streifen mit dem lokalen Massenpunkt zusammenhängen. Die Parametrierung des Strukturmodells basiert auf einen analytischen Prozess, der wichtige Strukturbauteile (bspw. Holm, Rippen und Beplankung), Punktmassen (bspw. Servoaktuatoren, Sensoren) und Kabelwege berücksichtigt.

Entwicklung des LPV-Systems

Im Kern des reduzierten Lastenbeobachters steht die Approximation des typischerweise eingesetzten nichtlinearen Modells mit einem LPV-System. Das LPV-System ist ein dynamisches System, das aus linearisierten Zustandsraumdarstellungen des nichtlinearen Flugzeugmodells in Abhängigkeit von einem gemessenen, zeitvariablen Parametervektor p (Scheduling-Vektor) besteht. Um den Gültigkeitsbereich auf den Betriebsbereich des Versuchsflugzeugs zu erweitern, werden diese linearen zeitinvarianten (LTI) Modelle unter Verwendung des Parametervektors interpoliert. Als dessen Grundlage wurde die so genannte Netzdarstellung eines LPV-Systems (Abbildung 10), unter Zuhilfenahme der Jacobi Linearisierung verwendet. Die Evaluierung der Approximationsgenauigkeit und Bestimmung notwendiger Scheduling Parameter erfolgte in Open-Loop Simulationen im Vergleich zum nichtlinearen Modell. Es werden 3 Scheduling Parametern verwendet: Wahre Fluggeschwindigkeit V_{TAS}, Hängewinkel Φ und Schiebewinkel β (vgl. Abbildung 11).

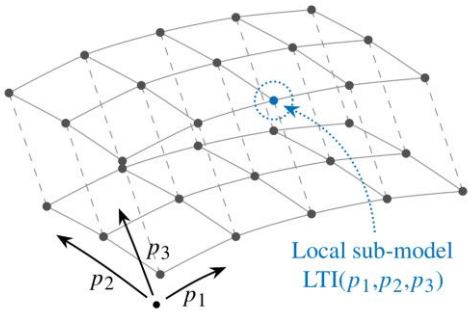

Abbildung 10: Netzdarstellung eines LPV-Systems nach [40,41]

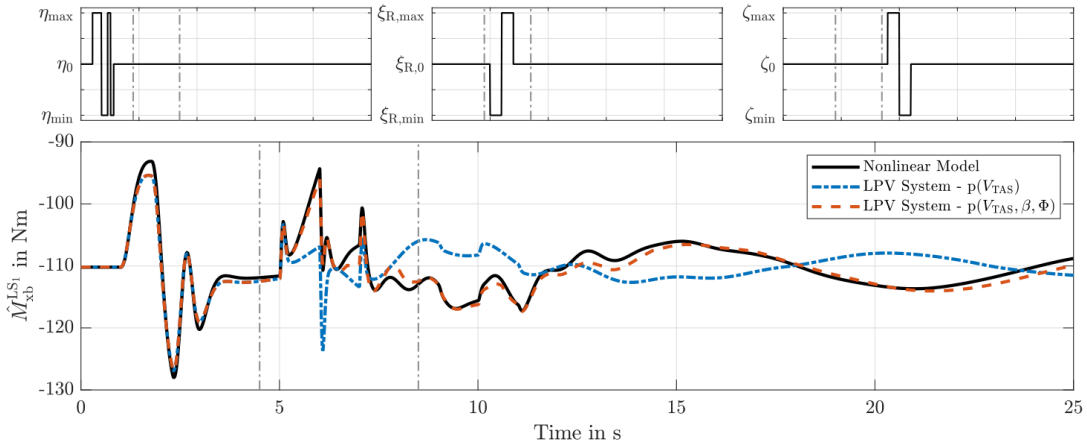

Abbildung 11: Approximationsgenauigkeit des LPV Systems nach [40,41]

Methode zur Stützung des Beobachters durch Sensorsignale und lernfähige KI-basierte Methode basierend auf LMNs

Der etablierte hybride Lastenbeobachter nach [55] basiert auf einem Luenberger Beobachter dessen Rückführverstärkungen unter Zuhilfenahme von Methoden der Parameterschätzung bestimmt werden und im Betrieb des Lastenbeobachters konstant sind. Als solches ist dieser Ansatz nicht anpassungsfähig hinsichtlich plötzlich auftretender Sensorfehler und eignet sich nur bedingt für eine kontinuierliche Fusion von Sensor- und Beobachterdaten. Deshalb wurde in AdLoNet erstmals ein hybrider Lastenbeobachter auf Grundlage eines erweiterten Kalman Filters umgesetzt, der eine gezielte und adaptive Berücksichtigung von Sensorinformationen durch Erweiterung des Rückführvektors y_s ermöglicht und dessen grundlegende Struktur in Abbildung 12 dargestellt ist. Die Auslegung erfolgt in AP 2.5 auf Grundlage von Messdaten aus AP 3.1. Die Lernfähigkeit des Ansatzes ist durch die fortlaufende Verbesserung des Korrekturmodells basierend auf im Betrieb gesammelten Messdaten des Sensornetzwerks gewährleistet.

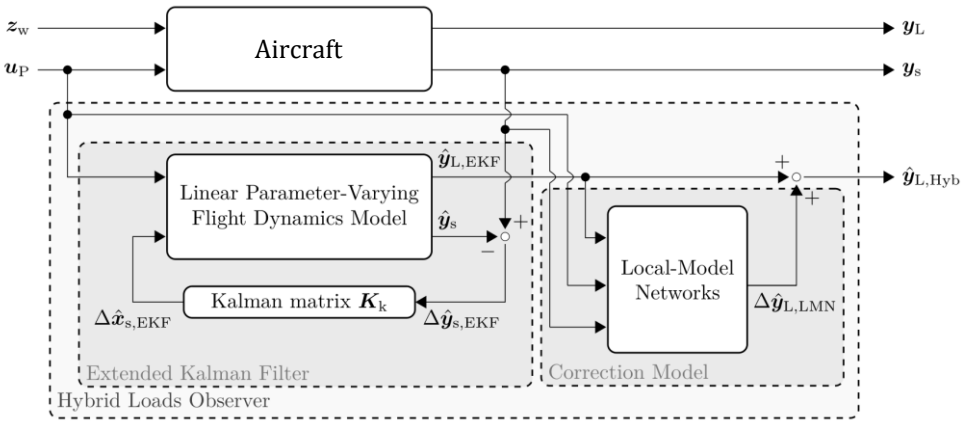

Abbildung 12: LPV-basierter erweiterter Kalman Filter mit Korrekturmodell nach [40,41]

Erreichte Ziele

Die Entwicklung des echtzeitfähigen hybriden Lastenbeobachters stellt ein Kernziel des Projekts dar. Erstmals wurde das bisher verwendete nichtlineare Modell durch ein

LPV-System ersetzt, wodurch die Komplexität reduziert und Echtzeitfähigkeit erreicht wurde. Die Ergebnisse wurden auf einer internationalen Konferenz [40] sowie in einem Fachartikel [41] veröffentlicht und damit die gesetzten Ziele erreicht.

AP 2.3: Sensornetzwerk

Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung eines Sensornetzwerkes zur Strukturlastüberwachung in einem Sensor- und Beobachternetzwerk, das verschiedene komplementäre Sensortypen wie Dehnungsmessstreifen, Faser-Bragg-Gitter, MEMS-Drucksensoren und Stereo-Kamerasysteme integriert. Dabei wurden die optimale Anzahl, Art und Positionierung der Sensoren für einen redundanten und minimalinvasiven Einsatz definiert. Die entwickelten Teilsysteme wurden in Prototypenflügeln integriert und in AP 3.2 und AP 3.3 im Labor- und Windkanalversuch getestet und bewertet.

Architekturentwurf für die verschiedenen Messsysteme

In AdLoNet wurden erstmals an der TUHH faseroptische Dehnungsmessstreifen (Fiber-Bragg-Gitter, FBG) zur Strukturlastmessung an einem Versuchsflügel eingesetzt, die komplementär zu den bisher typischerweise verwendeten Dehnungsmessstreifen genutzt werden. Da an der TUHH keine Erfahrungen im Einsatz von FBG's bestanden, wurde die Firma imc Test & Measurement GmbH im Unterauftrag eingebunden. Zur Erfassung typischer Strukturlasten wie Scherkräfte, Biege- und Torsionsmomente wurden einzelne Sensoren gemäß Abbildung 13 appliziert und zu einer Halbbrücke verschaltet. Zur Temperaturkompensation werden zusätzliche FBG's zur Temperaturmessung appliziert. Die Dehnungsmessstreifen werden zu Wheatstone'schen Vollbrücken nach [57] (Abbildung 13) verschaltet und brauchen keine Temperaturkompensation. Zusätzlich wurde mit dem Projektpartner IBK an dem Architekturentwurf der MEMS-Drucksensoren gearbeitet. Die TUHH leistet hierzu Beiträge im Bereich 3D-Druck und Sensorplatzierung. Ein eigenständiges Messsystem wurde im Hinblick der Ergebnisse aus AP 2.4 und AP 3.1 nicht weiterverfolgt und stattdessen die Verwendung qualitativ, hochwertiger inertialer Messeinheiten forciert.

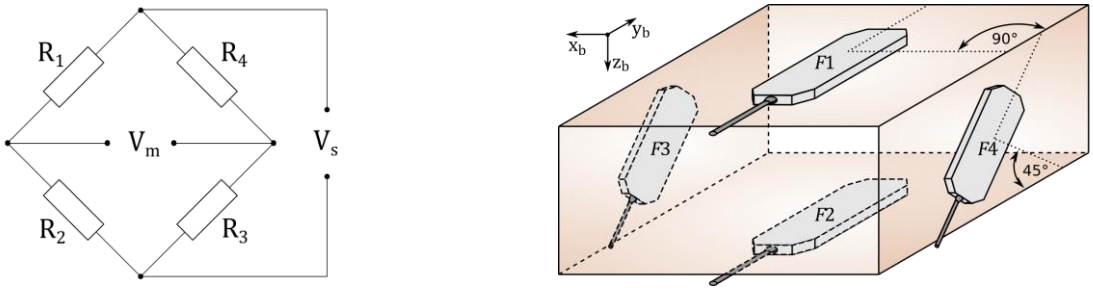

Abbildung 13: Verschaltung der Fiber-Bragg-Sensoren und Dehnungsmessstreifen

Architekturentwurf für das komplementäre Sensornetzwerk

Das Sensornetzwerk berücksichtigt verschiedene, komplementäre Sensortypen, dazu gehören Sensoren zur Dehnungsmessung (DMS und FBGs), Beschleunigungsmessung (IMUs), zur Druckmessung (MEMS, durch Projektpartner IBK) und zur Deformationsmessung (Stereo-Kamerasystem, durch Projektpartner DLR). Das Stereo-Kamerasystem besteht aus 2 Einzelkameras, die im Rumpf appliziert werden. Am Flügel werden an diskreten Messpunkten ArUco Marker eingesetzt. Ein erster Windkanalversuch auf Grundlage des initialen Flügelprototyps erfolgte im vierten Quartal 2022 im

Rahmen von AP 3.2. Anhand der Vorerprobung der intelligenten Fusionsfunktionen mit simulierten und Windkanaldaten (AP 2.4) wurde die Bedeutsamkeit qualitativer hochwertiger inertialer Messdaten (Beschleunigungen, Raten, Euler Winkel) herausgestellt. Das erarbeitete, initiale Sensornetzwerk sah diesbezüglich lediglich Low-Cost Lösungen vor, und wurde im überarbeiteten Flügelkonzept deshalb um AHRS-fähige IMUs der Firma SBG ersetzt (vgl. Abbildung 14).

Abbildung 14: MPU6050 Low-Cost IMU (links) und SBG Micro IMU mit AHRS Funktion (rechts)

Abbildung 15 stellt das finale Sensornetzwerk zur Vorerprobung im Windkanalversuch dar. Die Integration der neuen aktualisierten Sensorik erfolgte im Rahmen von AP 3.1. Ein weiterer Windkanalversuch auf Grundlage des finalen Flügelprototyps mit erweiterten Sensorkonzept erfolgte im vierten Quartal 2023 im Rahmen von AP 3.2.

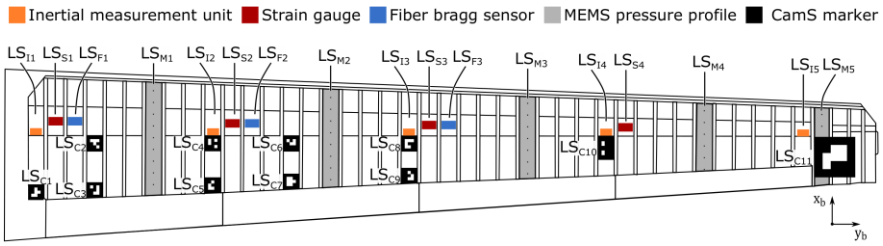

Abbildung 15: Finales Sensornetzwerk für die Vorerprobung im Windkanalversuch

Erreichte Ziele

Die Entwicklung des Sensornetzwerks stellte ein Kernziel der TUHH dar. Erstmals wurden an der TUHH faseroptische Sensoren zur Strukturlastmessung an einem Flügel erfolgreich eingesetzt. Erfolgreich wurden im Rahmen von AP 2.3 die Sensortechnologien der TUHH und der Projektpartner (CamS, MEMS Druckprofil) in den Prototypenflügel integriert. Anstelle der vorgesehenen MEMS-Druckmessprofile, forcierte die TUHH dabei allerdings den Einsatz hochwertiger inertialen Messeinheiten, da diese sich hinsichtlich Masse, Zuverlässigkeit, Signalgüte und Sensorinformationen als geeigneterer für den Einsatz im Sensornetzwerk und im Flugversuch herausgestellt haben. Die Entwicklung des Sensornetzwerks wurde im Rahmen einer nationalen Konferenz präsentiert.

AP 2.4: Intelligente Fusions- und Analysefunktionen zur Lastüberwachung

Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung und Implementierung einer geeigneten Fusionsstrategie zur Kombination komplementärer Signale aus dem Sensornetzwerk und den Lastenschätzern, um ein lernfähiges Netzwerk zur Lastenüberwachung zu realisieren. Dabei wurden Konzepte zur Erkennung und Kompensation sensorbedingter

Fehler sowie zur Analyse von Last- und Ermüdungszuständen umgesetzt. Ein teilautomatisierter Prozess zur Datenklassifikation und Wissensextraktion unterstützte die prädiktive Bewertung des Strukturzustands.

Im ersten Schritt erfolgte die Weiterentwicklung und Erprobung der entwickelten Fusionsstrategie anhand virtueller Flugversuche sowie von Windkanaldaten aus AP 3.2, wobei der Fokus auf der Untersuchung des Sensornetzwerks lag. Ergänzend dienten Laborversuche zur Ermittlung repräsentativer Sensormodelle mit realistischem Rauschverhalten. Gemäß der in AP 1.2 definierten Konzeption kommt ein vorgelagerter Zuordnungsprozess („Data Association“) zum Einsatz, der die komplementären Sensorsignale anhand eines Vierfach-Abstimmungsschemas nach deren Vertrauensniveau gewichtet. Dieses Verfahren ist ein etabliertes Instrument der industriellen Praxis, beispielsweise bei der Konsolidierung von Anstellwinkelsensoren. Das Ergebnis der Datenassoziation beeinflusst direkt die Messfehlerkovarianzen des Kalman-Filters während des Betriebs, sodass Signale mit geringerer Genauigkeit einen verminderten Einfluss auf die Schätzungen nehmen. Die initiale Erprobung dieser Fusionsstrategie erfolgte im Rahmen virtueller Flugversuche mit einem simulierten Sensorfehler am Dehnungsmessstreifen (DMS/SG). Durch die gezielte Datenassoziierung in Kombination mit dem Kalman-Filter können derartige Fehler zuverlässig erkannt und erfolgreich kompensiert werden (vgl. Abbildung 17). Die Ergebnisse dieser Erprobung wurden auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2023 [39] vorgestellt.

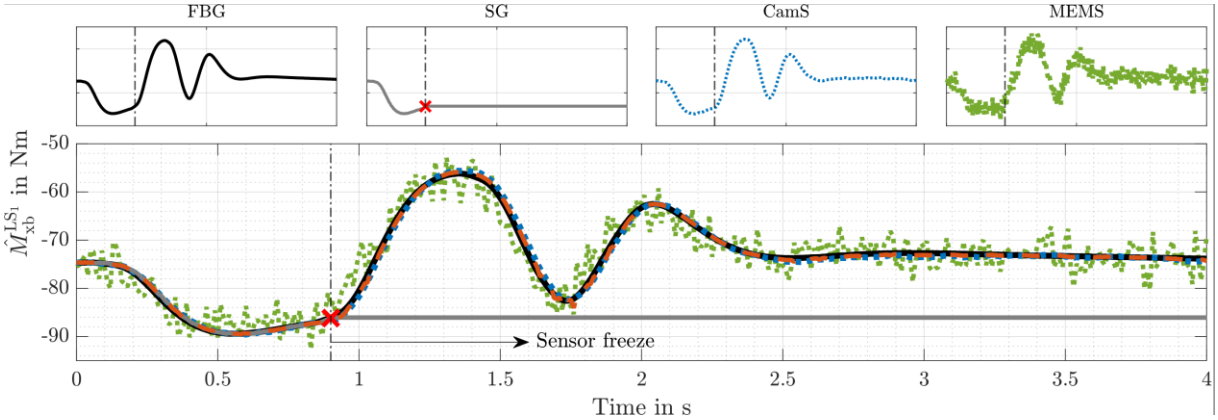

Abbildung 16: Ergebnisse der zentralisierten Lastfusion für das Biegemoment mit DMS-Fehler Kalman Filter (orange), Faser-Bragg-Sensor (schwarz), Dehnungsmessstreifen (grau), CamS (blau), MEMS (grün)

Zur Stabilisierung und Verbesserung der Genauigkeit der optischen Deformationsmessung wurde in [39] der Einsatz über die Spannweite verteilter IMUs als zielführend nachgewiesen. Die im initialen Prototypenflügel verwendeten Low-Cost-IMUs wiesen jedoch hohes Rauschen und mangelnde Robustheit mit Sensorausfällen auf. Mit verbesserter Sensorik (SBG Ellipse2 Micro) konnten diese Anforderungen im zweiten Prototypenflügel für den Windkanal und Flugversuch erfüllt werden. Außerdem ermöglichten die neuen IMUs erstmals die Erfassung lokaler Lagewinkel (AHRS) entlang der Tragfläche. Die Kombination dieser erhöhten Informationsdichte mit dem modellbasierten Kalman-Filter (vgl. AP 2.1) steigerte die Lastschätzgenauigkeit insbesondere vor dem Hintergrund der verminderten physikalischen Modellgüte durch die verwendeten Entwurfsmodelle, wie es beispielsweise in Abbildung 17 dargestellt wird.

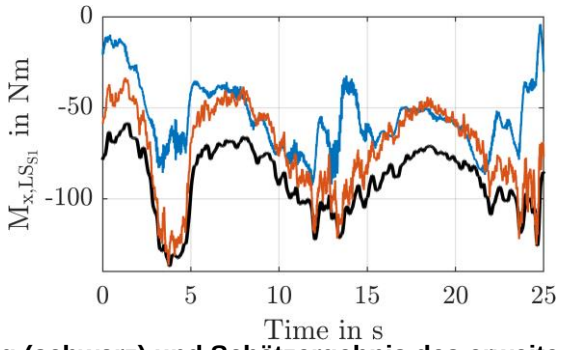

Abbildung 17: Messung (schwarz) und Schätzergebnis des erweiterten Kalman Filters mit (orange) und ohne IMUs (blau)

Im Rahmen von AP 2.4 wurde ein teilautomatisierter Prozess zur Datenklassifikation und Wissensextraktion vorbereitet, der Lastinformationen für die Überlastdetektion und Fatigue-Analyse bereitstellt. Um eine projektübergreifende Nutzung und eine zielgerichtete Weiterverwendung der AdLoNet-Daten in Folgeprojekten zu gewährleisten, wurde das formalisierte Datenbank-Schema der FST-internen Datenbank „intelligent Data Analytics and Management (iDAM) für AdLoNet adaptiert und angewendet. Als solche stellt die Datenbank Daten aus Windkanal- und Flugversuchen bereit und unterstützt damit die prädiktive Bewertung des Strukturzustands. Für die Datenverwaltung kamen PostgreSQL und DBeaver als Datenbankmanagement-Tool zum Einsatz. Die Datenverarbeitung erfolgte in Matlab, wobei insbesondere Analyseverfahren zur Bestimmung von Last-Zeit-Verläufen sowie eine Extremwertanalyse, exemplarisch an den Windkanaldaten, ergänzt wurden. Diese Analysen liefern wichtige Informationen zur Berechnung des Schadenszustands des Flügels, etwa im Rahmen von Überlastdetektion und Fatigue-Analyse. Ein Beispiel einer solchen Analyse ist in Abbildung 18 dargestellt.

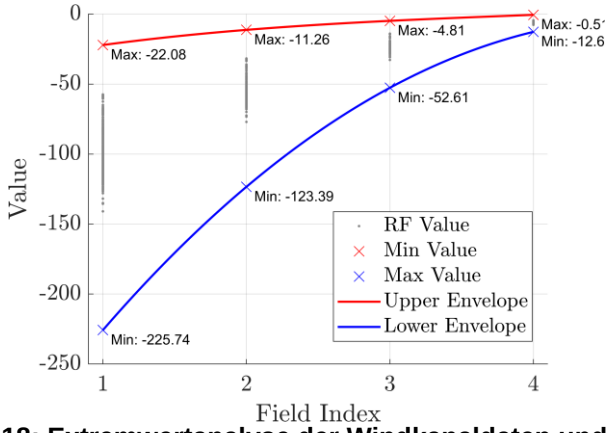

Abbildung 18: Extremwertanalyse der Windkanaldaten und Lastzyklen

Erreichte Ziele

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden die gesetzten Ziele erfolgreich erreicht. Es konnte eine geeignete Fusionsstrategie zur Kombination komplementärer Sensorsignale und Lastenschätzer entwickelt werden. Sensorbedingte Fehler wurden zuverlässig erkannt und durch den vorgelagerten Zuordnungsprozess mit Kalman-Filter erfolgreich kompensiert. Die Erprobung anhand virtueller Flugversuche, Windkanaldaten sowie Laborversuchen mit realistischen Sensormodellen bestätigte die Wirksamkeit des Ansatzes. Zudem wurde der Einsatz verbesserter IMUs zur Stabilisierung und Genauigkeitssteigerung der Deformationsmessung erfolgreich umgesetzt. Schließlich wurde

ein teilautomatisierter Prozess zur Datenklassifikation und Wissensextraktion implementiert, um die prädiktive Bewertung des Strukturzustands durch Analyse von Last-Zeit-Verläufen und Extremwertanalysen zu unterstützen.

AP 2.5: Integration und Optimierung des Netzwerks

Im Kontext von AP 2.5 erfolgte die Schrittweise Optimierung des Sensornetzwerks zunächst auf Grundlage der Erkenntnisse der Vorversuche und anschließend auf Grundlage der Flugversuchsdaten. Dies bedingte unter anderem eine Anpassung des Sensornetzwerks und der Fusionsarchitektur. Zusätzlich wurden im Rahmen von AP 2.5 alle notwendigen Systemkomponenten der Partner in das Versuchsflugzeug integriert.

Anpassung des Sensornetzwerks für den Flugversuch

Basierend auf den Windkanalversuchen zur Erprobung des Sensornetzwerks wurde für den Flugversuch das Sensornetzwerk weiterentwickelt und an die dortigen Randbedingungen hinsichtlich der Gesamtmasse angepasst. Während in der Vorerprobung bewusst verschiedene, komplementäre Sensoren eingesetzt wurden, verfolgt der Flugversuch einen minimalinvasiven Ansatz, der sowohl den zuverlässigen Betrieb des Sensor- und Beobachternetzwerks sicherstellt als auch eine zielgerichtete Validierung ermöglicht. Besonders bewährt hat sich dabei die Kombination aus optischer Deformationsmessung und lokalen. Durch die komplementäre Nutzung der Sensordaten können die Nachteile beider Sensorarten ausgeglichen werden: Die Drehraten und Beschleunigungen der IMUs werden im Rahmen der Sensorfusion eingesetzt, um die optische Deformationsmessung zu verbessern, während diese gleichzeitig das Langzeitverhalten der IMUs stabilisiert und eine präzise Nullpunktbestimmung ermöglicht. MEMS-Druckmessprofile werden aufgrund ihres hohen Komponentengewichts für den Flugversuch nicht berücksichtigt. Die finale Sensornetzwerkarchitektur umfasst zudem drei Lastüberwachungspunkte mit Dehnungsmessstreifen, die als Vollbrücken ausgeführt sind und Biegemomente, Torsionsmomente sowie Querkräfte erfassen. Auf Basis der Analyseergebnisse aus AP 3.2 wird auf den Einsatz von Faser-Bragg-Gittern (FBG) verzichtet. Die Aktivitäten der TUHH zur Anpassung des Sensornetzwerks für den Flugversuch sind in den Berichten [47] und [48] dokumentiert. Das finale Sensornetzwerk für den Flugversuch ist in Abbildung 19 dargestellt.

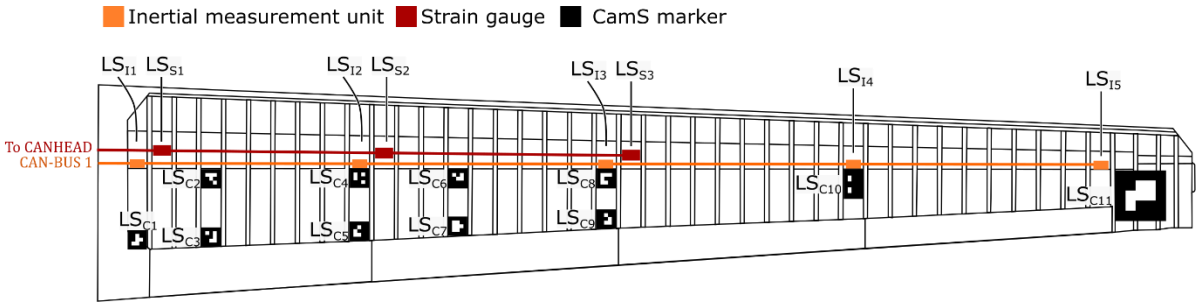

Abbildung 19: Architektur des finalen Sensornetzwerks für den Flugversuch

Anpassung der Fusionsarchitektur für den Flugversuch

Im Zuge der Anpassung des Sensornetzwerks wurde ebenfalls die Fusionsarchitektur an die Randbedingungen des Flugversuchs hinsichtlich der eingesetzten Sensortechnologien und Konsolidierungsfunktionen angepasst. Der in AP 2.1 entwickelte hybride

Lastenbeobachter bildet die Grundlage für die modifizierte Fusionsarchitektur des Sensor- und Beobachternetzwerks, wie in Abbildung 20 dargestellt. Zur Stabilisierung und Korrektur kleinerer Modellfehler des dynamischen Systems im Kalman-Filter werden kontinuierlich flugdynamische Messgrößen zurückgeführt. Die inertialen Messeinheiten übernehmen dabei eine doppelte Funktion: Sie stabilisieren die Kameradaten und verbessern die Schätzung elastischer Moden sowie die Erfassung von Störgrößen wie Böen und Turbulenzen. Zusätzlich werden Lastinformationen einer einzelnen Messstelle in der Flügelwurzel (DMS, LS_{S1}) zur Stabilisierung der Gesamtlastschätzung entlang des Flügels rückgeführt. Aufgrund der reduzierten Anzahl komplementärer Lastinformationen wird das bisher verwendete Vierfach-Abstimmungsschema durch eine Lokal Modell Netz-basierte Überwachungsfunktion („Watch-Dog“) im Rahmen der Datenassoziierung (Data Association) ersetzt.

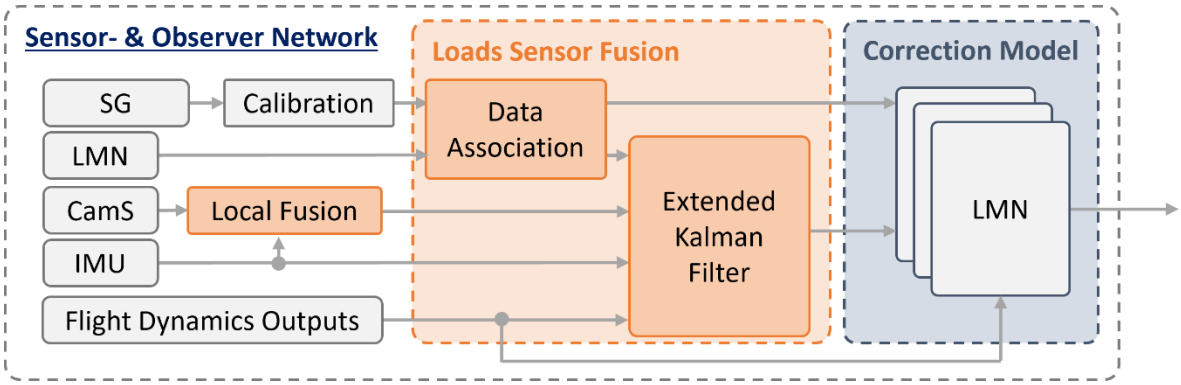

Abbildung 20: Fusionsarchitektur des Sensor- und Beobachternetzwerks für den Flugversuch

Optimierung des Netzwerks mit Flugversuchsdaten

Anhand der in AP 3.2 durchgeführten Flugversuche erfolgte die Optimierung des Netzwerks mit Flugversuchsdaten und damit formal der Abschluss des Arbeitspakets. Diese Optimierung beinhaltet im Wesentlichen drei Teilaspekte:

1. Auslegung des erweiterten Kalman Filters
2. Auslegung des datenbasierten Korrekturmodells
3. Auslegung der datenbasierten Überwachungsfunktion („Watch-Dog“)

1. Auslegung des erweiterten Kalman Filters

Im Kern der Auslegung des erweiterten Kalman Filters steht die Bestimmung der Mess- und Prozessfehlerkovarianzmatrizen. Die Prozessfehlerkovarianzmatrix wird hierfür unter Anwendung von Methoden der Parameterschätzung nach [58] auf Grundlage einer Ausgangsfehlermethode und eines gedämpften Gauss-Newton Algorithmus zur Lösung der Maximum Likelihood Kostenfunktion identifiziert. Die Messfehlerkovarianzen werden hierfür anhand der gemessenen Sensorsignale in den Vorwegen berechnet und konstant gehalten.

2. Auslegung des Korrekturmodells

Erstmals im Projekt erfolgte im Rahmen von AP 2.5 die Erweiterung des physikalischen Lastenbeobachters zu einem hybriden Lastenbeobachter auf Basis von Flugversuchsdaten. Das dafür erforderliche Korrekturmodell wurde unter Verwendung von Lokallmodellnetzen als Deltamodell mit folgenden Zielkriterium ausgelegt ($\hat{y}_{L,EKF}$: Lastschätzung des Kalman Filters, $y_{L,Mess}$: gemessene Last):

$$Y = \hat{y}_{L,EKF} - y_{L,Mess}$$

Abbildung 21 zeigt den Nominalfall des Sensornetzwerks ohne Sensorfehler und verdeutlicht die hohe Genauigkeit des Sensor- und Beobachternetzwerks auch an der nicht gestützten Messstelle LS_{S2}.

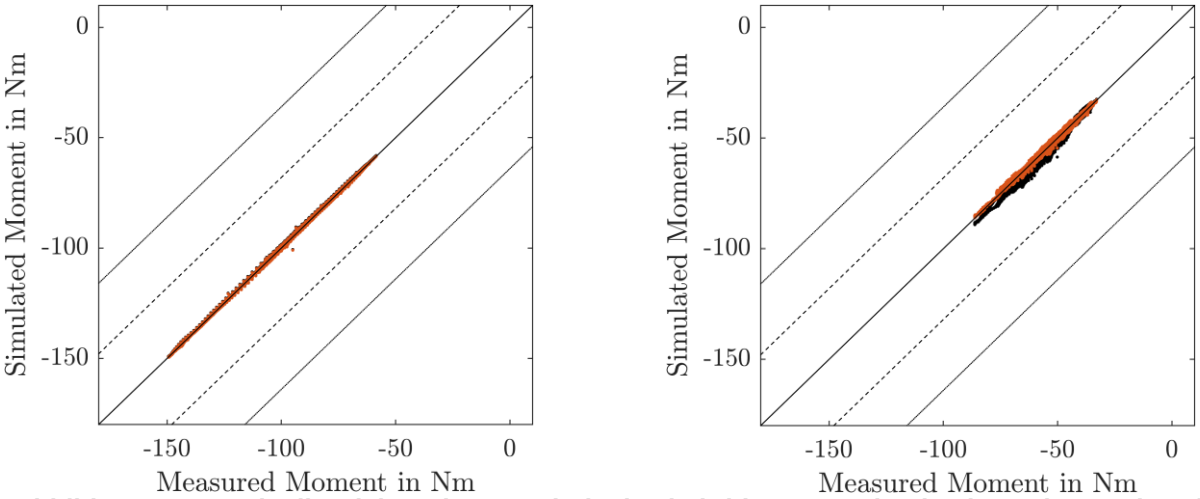

Abbildung 21: Nominalbetrieb: Schätzergebnis des hybriden Lastenbeobachters (orange) und des erweiterten Kalman Filters (schwarz) im Sensor- und Beobachternetzwerk an LS_{S1} (links) und LS_{S2} (rechts) am Beispiel des Biegemoments

Analog dazu zeigt Abbildung 22 die hohe Genauigkeit der Biegemomentenschätzung des hybriden Lastenbeobachters im Fehlerfall des Dehnungsmessstreifens.

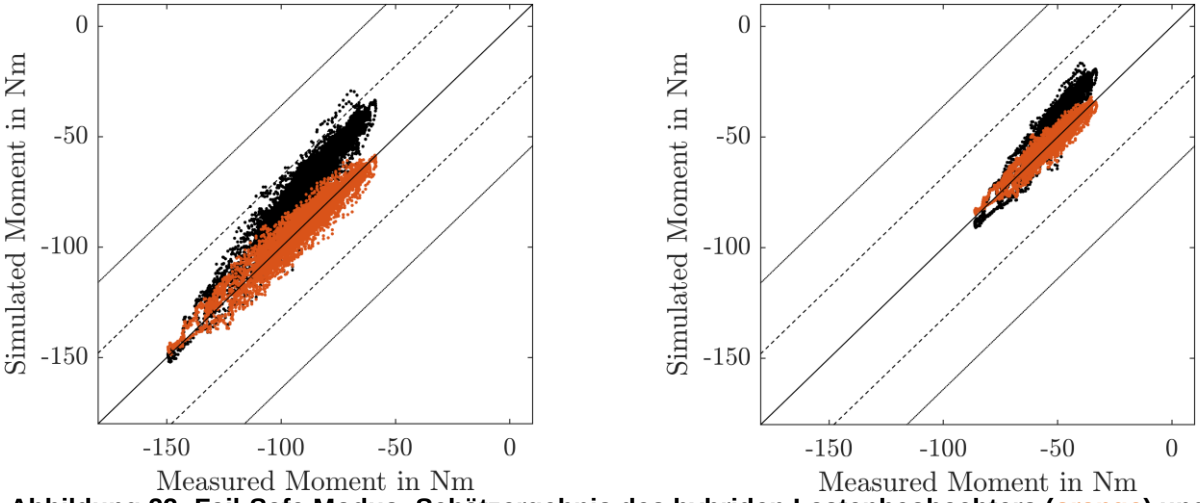

Abbildung 22: Fail-Safe Modus: Schätzergebnis des hybriden Lastenbeobachters (orange) und des erweiterten Kalman Filters (schwarz) im Sensor- und Beobachternetzwerk an LS_{S1} (links) und LS_{S2} (rechts) am Beispiel des Biegemoments

3. Auslegung der Überwachungsfunktion

Zur Überwachung des Dehnungsmessstreifens an LS_{S1} wurde ein Lokallmodellnetz eingesetzt, dass als reiner Lastschätzer agiert. Das Zielkriterium zur Auslegung lautete:

$$Y = y_{L,Mess}$$

Abbildung 23 stellt die Ergebnisse und hohe Genauigkeit der Überwachungsfunktion am Beispiel des Biegemoments an LS_{S1} dar.

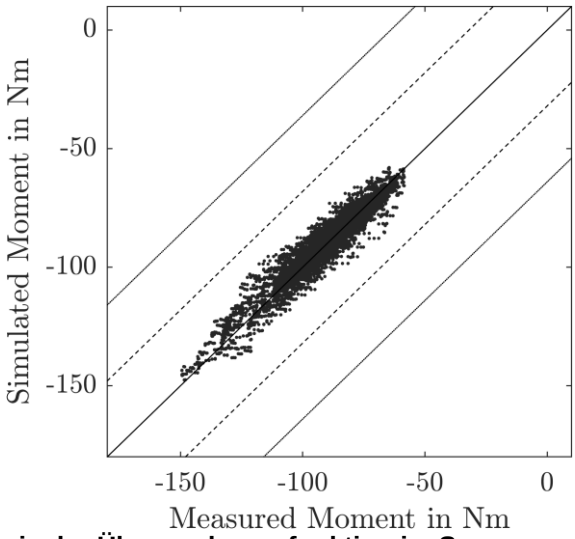

Abbildung 23: Schätzergebnis der Überwachungsfunktion im Sensor- und Beobachternetzwerk an LS_{S1} am Beispiel des Biegemoments

Erreichte Ziele

Im Arbeitspaket AP 2.5 wurden die zentralen Ziele zur Anpassung und Optimierung des Sensor- und Beobachternetzwerks anhand von Flugversuch erfolgreich erreicht. Aufbauend auf den Vorversuchen wurde zunächst eine minimalinvasive Sensornetzwerkarchitektur entwickelt, die die Randbedingungen an Gesamtmasse und die Anforderungen an Messgenauigkeit erfüllt, sowie im Fusionsalgorithmus verwendet werden kann. Dabei wurde von einem Einsatz der MEMS-Drucksensoren aufgrund ihres Gewichts abgesehen. Die finale Systemarchitektur umfasst drei Lastüberwachungspunkte mit Dehnungsmessstreifen, fünf verteilte AHRS-fähige IMUs sowie ein kamerabasiertes Deformationsmesssystem. Parallel wurde die Fusionsarchitektur zielgerichtet angepasst und ein hybrider Lastenbeobachter entwickelt, der flugdynamische Messgrößen zur Stabilisierung im erweiterten Kalman-Filter nutzt. Die Einführung einer lokalmodellnetzbasierten Überwachungsfunktion ersetzte erfolgreich das bisherige Vierfach-Abstimmungsschema zur Datenassoziierung, wodurch die Fehlerdetektion im Sensor- und Beobachternetzwerk trotz reduzierten Sensorsetup weiterhin garantiert wird. Die abschließende Optimierung des Netzwerks auf Basis der realen Flugversuchsdaten, einschließlich der Auslegung des erweiterten Kalman-Filters, eines datenbasierten Korrekturmodells sowie der Überwachungsfunktion, bestätigt die hohe Genauigkeit des entwickelten Sensor- und Beobachternetzwerks. Somit sind die definierten Ziele des Arbeitspakets vollumfänglich erfüllt worden.

AP 3.1: Aufbau Prüfstände und Anpassen des Versuchsträgers

Im Rahmen von AP 3.1 wird die notwendige Versuchsinfrastruktur für die geplanten Labor-, Windkanal- und Flugversuche aus AP 3.2 aufgebaut. Ziel war Aufbau von vier prototypischen Testflügeln. Durch eine bessere Vernetzung des Labor- und Windka-

nalversuchs und inkrementeller Umbaumaßnahmen wurden letztendlich nur drei Flügel benötigt. Einer für Labor- und Windkanalversuche sowie zwei finale Flügel für den Flugversuch. In AP 3.1 erfolgte die Integration der Sensorkonzepte in den Prototypenflügel, strukturelle Arbeiten zur Integration der Sensorik der Projektpartner, die Integration und Erprobung der Avionik sowie der Messsensorik und der Aufbau des Versuchsflugzeugs. Daneben erfolgten diverse Arbeiten zur Vorbereitung ergänzender Windkanalversuche, wie beispielsweise den Aufbau der Versuche zur Vermessung des Antriebssystems und zur Kalibrierung des Luftdatenmasts (vgl. AP 3.2). Die DMS-Integration übernahm die TUHH. Für die FBG-Installation und Inbetriebnahme wurde die imc Test & Measurement GmbH als Partner eingebunden ist.

Prototypenflügel für den Windkanalversuch

Der Flügelaufbau des Prototyps orientiert sich nah an den geometrischen und strukturellen Randbedingungen des Vorgänger LuFo V-2 Verbundvorhaben G-FLIGHTS gehalten, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten und Synergien in der Modellbildung ausnutzen zu können. Anders als in der Vorhabensbeschreibung vorgesehen, wurde deshalb anstelle einer Sandwichbauweise, eine Holm-Rippen Bauweise angestrebt. Zusätzlich ermöglicht dies eine gezieltere Vorgabe der Lastleitwege. Abbildung 24 zeigt die am Prototypenflügel verbauten Sensorpositionen der Kameramarker, FBG und DMS an ausgewählten Messstellen. Insgesamt wurden alle geplanten 4 Messstellen erfolgreich am Prototypenflügel installiert und in Betrieb genommen.

Abbildung 24: Aufbau des Prototypenflügels (links: Kameraunterbau, mitte: FBGs, rechts: FBGs und DMSs an Messstelle 1)

Gewichtsreduziertes Avionikkonzept für den Flugversuch

Das initiale Avionikkonzept aus AP 1.2 wurde im Rahmen von Laborversuchen relativ zum an der TUHH etablierten Konzept mit einer dSpace MicroAutoBox II evaluiert. Ein Teilergebnis dieser Studie ist in Abbildung 25 dargestellt und verdeutlicht, dass mit Hilfe der Raspberry Pis vergleichbare Rechenzeiten erreicht werden können. Für das finale Konzept wurde schließlich zwei Raspberry Pi 4B‘s verwendet. Von der Verwendung des NXP I/O-Boards wurde auf Grund der geringen Rechenleistung abgesehen.

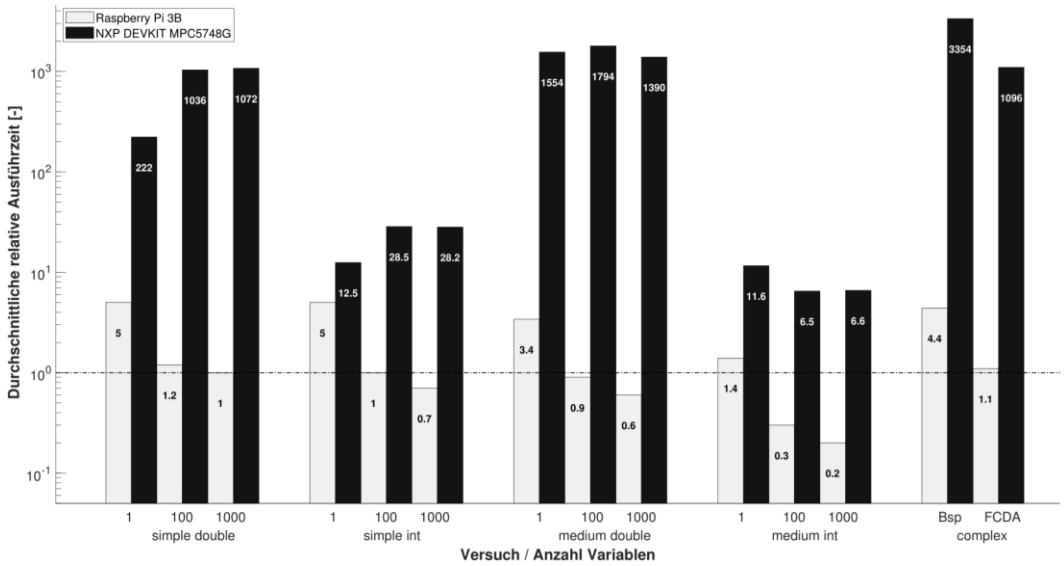

Abbildung 25: Komponentenvorerprobung - Vergleich der Ausführzeiten relativ zum bisherigen Konzept der MicroAutoBox II

Darauf aufbauend erfolgten umfangreiche Hardware Tests und Optimierungen am neu entwickelten gewichtsreduzierten Avionikkonzept (Abbildung 26) und erstmalig die Integration des Konzepts in das Versuchsflugzeug, sowie die Erprobung des Gesamtkonzepts an der finalen Messtechnik.

Abbildung 26: Gewichtsreduziertes Avionikkonzept im Feldtest

Der grundlegende Aufbau des finalen Konzepts ist in Abbildung 27 dargestellt. Als zentrales Element wird die Kombination aus zwei Raspberry Pi's und einem Pixhawk Flugregler umgesetzt und verfolgt den Grundgedanken einer dezentralen Verarbeitung von Steuerkommandos sowie Missionsgrößen des Versuchsflugzeugs (Pixhawk), der Messdatenerfassung und -aufbereitung (Raspberry Pi Nr. 1) und der Messdatenverarbeitung (Raspberry Pi Nr. 2). Als zentrale Kommunikationsprotokolle werden hierfür CAN-Busse zur Einbindung externer Sensorik und ein UDP-basierter Ethernet Standard eingesetzt, der Projektpartnerübergreifend einen Datenaustausch im gesamten Netzwerk garantiert und dadurch eine zeitsynchrone Datenerfassung der unterschiedlichen Messsysteme ermöglicht. Der Pixhawk Flugregler nimmt hierbei eine doppelte Rolle ein. Einerseits kann er als eigenständiger Flugregler agieren, andererseits fungiert er primär als Sensorplattform, die Navigationslösung, Steuerkommandos und flugdynamische Kenngrößen erfasst. Die Ergebnisse des Arbeitspakets wurden im Rahmen des Berichts in [47] dokumentiert.

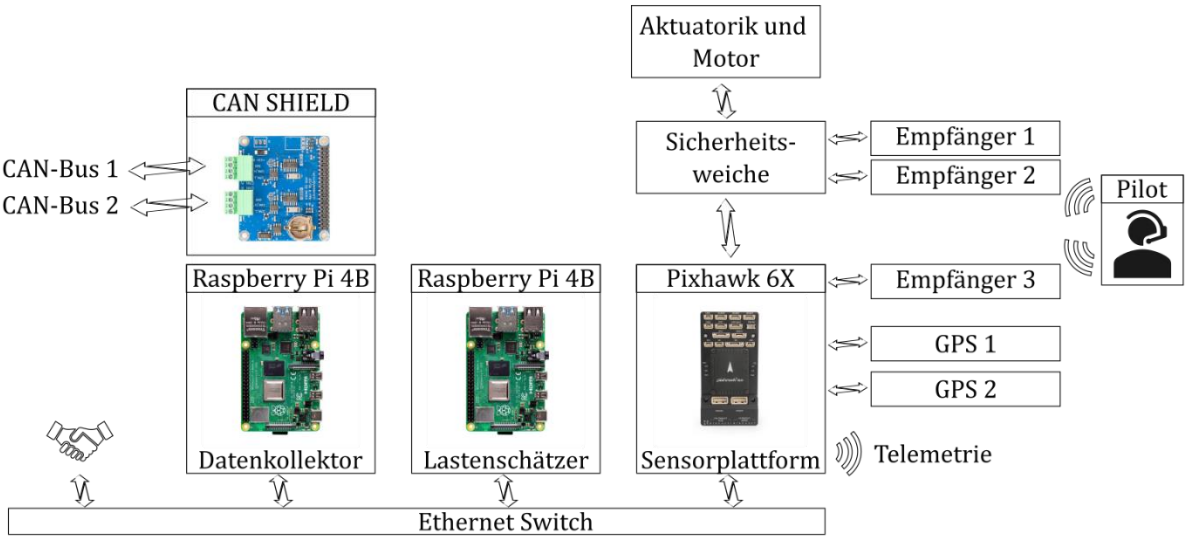

Abbildung 27: Grundlegender Aufbau und Architektur der finalen Avionik

Versuchsflugzeug LORAS-Dimona

Durch die Verzögerung des Projektstarts stand der Versuchsträger aus dem Vorgänger LuFo V-2 Verbundvorhaben G-FLIGHTS nicht wie in der Antragsphase geplant zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde als Technologieträger und Integrationsplattform zur Nachweisführung des in AdLoNet zu entwickelnden Sensor- und Beobachternetzwerks im realen Flugversuch das skalierte Versuchsflugzeugs „LORAS-Dimona“ eigens für das Projekt neu aufgebaut (Abbildung 28). Das skalierte Versuchsflugzeug basiert auf einem 1:3 Maßstabsgetreuen und handelsüblich erwerbbaren Modell einer HK36 Super Dimona. Um den Anforderungen des Projekts gerecht zu werden, wurden die Originalflügel mit eigens für das AdLoNet Projekt angefertigten Flügeln ersetzt. In diesem Arbeitspaket wurde der geometrische Aufbau des gesamten Flugzeugs und insbesondere der Flügel abgeschlossen, sodass der Versuchsträger planmäßig einsatzbereit für die Erprobung des Sensor- und Beobachternetzwerks im Flugversuch war. Die Ergebnisse des Arbeitspakets wurden im Rahmen des Projektberichts [47] zusammengefasst.

Abbildung 28: Skaliertes Versuchsflugzeug LORAS-Dimona

Erreichte Ziele

Im Arbeitspaket AP 3.1 wurde die notwendige Versuchsinfrastruktur für die Labor-, Windkanal- und Flugversuche erfolgreich geschaffen. Statt der ursprünglich geplanten vier Testflügel wurden durch eine bessere Vernetzung der Versuche und inkrementelle Anpassungen drei Flügel aufgebaut: ein gemeinsamer Prototyp für Labor- und Windkanalversuche sowie zwei finale Flügel für den Flugversuch. Die Integration der verfügbaren Sensorkonzepte, insbesondere der Dehnungsmessstreifen (DMS) durch die TUHH und der faseroptischen Sensoren (FBG) durch die imc Test & Measurement GmbH, erfolgte vollständig. Es wurde eine Holm-Rippen-Bauweise umgesetzt, die eine gezielte Vergleichbarkeit mit Vorgängerprojekten gewährleistet. Im Bereich Avionik wurde ein gewichtsreduziertes Konzept integriert, das auf der Kombination von zwei Raspberry Pi 4B und einem Pixhawk-Flugregler basiert. Hardwaretests im Labor-, Feld-, und Flugversuch bestätigten dessen Leistungsfähigkeit. Da der ursprünglich geplante Versuchsträger durch die Projektverzögerung nicht zur Verfügung stand, wurde mit dem skalierten Versuchsflugzeug „LORAS-Dimona“ eine geeignete Integrationsplattform für die Erprobung des Sensor- und Beobachternetzwerks im Flugversuch neu aufgebaut. Insgesamt wurden alle wesentlichen Ziele hinsichtlich des Aufbaus, der Integration und Inbetriebnahme der Versuchsinfrastruktur planmäßig erreicht.

AP 3.2: Erproben und Validieren von Teil- und Gesamtsystem

Ziel des Arbeitspakets AP 3.2 ist es, die Teilsysteme sowie das Gesamtsystem des zu entwickelnden Sensor- und Beobachternetzwerks anhand der in AP 1.3 definierten Labor-, Windkanal- und Flugversuchen zu erproben und zu validieren.

Laborversuche zur Kalibrierung der Lastmesssensorik

Die im Rahmen des Sensor- und Beobachternetzwerks geforderten Messgrößen der internen Strukturlasten werden über Dehnungsmessstreifen erfasst und mit Hilfe des Skopinskiverfahrens auf Strukturlasten kalibriert. Für die Kalibrierung wurden im Rahmen von AP 3.2 an definierten Lasteinleitungsstellen Kalibriermassen systematisch gemäß dem Vorgehen in [39] aufgebracht, die zugehörigen Dehnungen aufgezeichnet und Kalibrierfaktoren bestimmt. Abbildung 29 zeigt den zugehörigen Laboraufbau an der TUHH. Die Kalibrierung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vom DLR, um eine Korrelation mit der optischen Deformationsmessung zu gewährleisten. Sie wurde sowohl für den Prototypenflügel als auch den finalen Flügel durchgeführt. Die erreichte Genauigkeit für den Flugversuch wird in Tabelle 1 für jeden Lastüberwachungspunkt als mittlerer, absoluter Kalibrierfehler zusammengefasst.

Abbildung 29: Laborversuch während der Kalibrierversuche

Tabelle 1: Mittlerer, absoluter Kalibrierfehler der DMS für den Flugversuchsträger

Lastüberwachungspunkt	Mx in Nm	My in Nm	Qz in N
LS1	0.36	0.14	8.48
LS2	0.22	0.04	0.67
LS3	0.11	0.03	0.41

Windkanalversuche zur Kalibrierung des Luftdatenmasts und Vermessung des Antriebssystems

Für den Aufbau des Versuchsflugzeugs war die Kalibrierung des erforderlichen Luftdatenmasts notwendig, der wesentliche aerodynamische Kenngrößen misst. Die zugehörigen Messkampagnen wurden erfolgreich im Rahmen von ergänzenden Windkanalversuchen im Windkanal der TUHH abgeschlossen. Zusätzlich wurde das Antriebssystem des Versuchsflugzeugs vermessen, um die Genauigkeit des Antriebsmodells weiter zu verbessern. Der Aufbau beider Versuche ist in Abbildung 30 dargestellt.

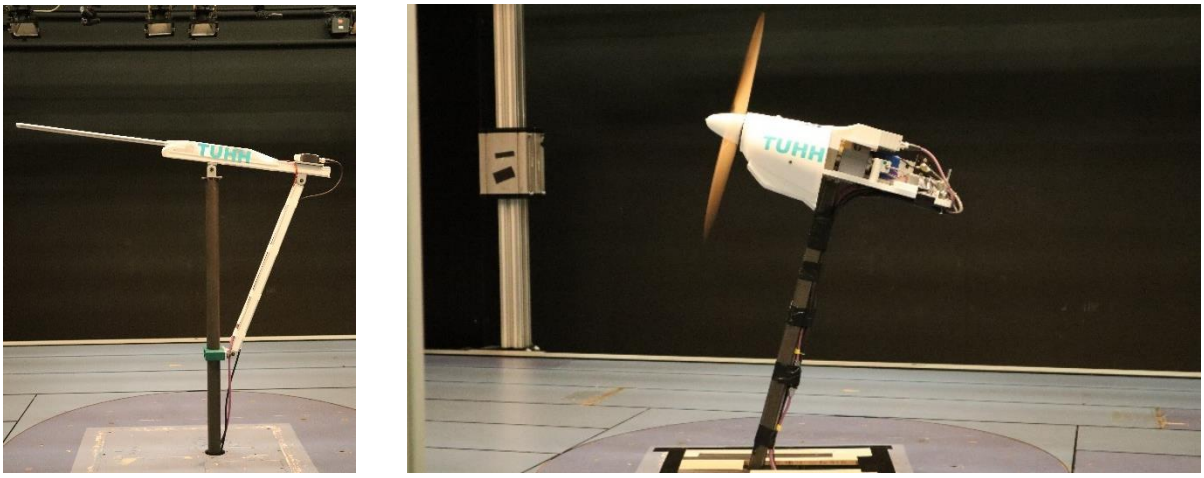

Abbildung 30: Kalibrierung des Luftdatenmasts und Vermessung des Antriebssystems

Windkanalversuche zur Erprobung des Sensornetzwerks

Es erfolgten zwei zentrale Messkampagnen zur Vorerprobung des Prototypenflügels im Windkanal der TUHH. Ziel der Versuchskampagnen war es die beteiligten Teilsysteme sowie das Gesamtsystem des zu entwickelnden Sensor- und Beobachternetzwerks zu erproben und zu validieren. Dabei wurden gleichzeitig erste Messdaten zur Modellierung der Lastenbeobachter und zur Auslegung des Sensor- und Beobachternetzwerks aufgezeichnet. Im Rahmen der ersten Messkampagne im Berichtsjahr 2022 erfolgte die Erprobung des initialen Konzepts unter Verwendung der Low-Cost inertialen Messeinheiten. Im der darauffolgenden Messkampagne im Berichtsjahr 2023 erfolgte die finale Erprobung des Prototypenflügels unter Verwendung der verbesserten, AHRS-fähigen inertialen Messeinheiten und des MEMS-Druckmessprofils. Der Versuchsaufbau des Prototypenflügels ist in Abbildung 31 dargestellt. Für die Erprobung wurde ein Szenario-basiertes Messverfahren eingesetzt, dass im Vorgänger LuFo V-3 Verbundvorhaben ELASTIK entwickelt wurde. Demnach wurden anhand des flugdynamischen Referenzmodells aus AP 2.1 realistische Manöver für einen 1-Freiheitsgradversuch abgeleitet. Die Ausgangsgrößen des Simulationsmodells dienten als Eingangsgröße des Prüfstands. Durch die dynamische Anstellwinkelverstellung konnten so realitätsnahe Lasten der Längsbewegung der AdLoNet-Dimona erzeugt werden.

Hierbei wurde mit Hilfe eines Echtzeitsystems ein Anstellwinkelkommando in Kombination mit einer spezifischen Klappenstellung kommandiert (vgl. Abbildung 32). Insgesamt wurden in der ersten Messkampagne 210 Einzelmanöver und in der zweiten Kampagne 670 Einzelmanöver aufgezeichnet und zur Erprobung der Fusionierung und Lastenschätzer eingesetzt.

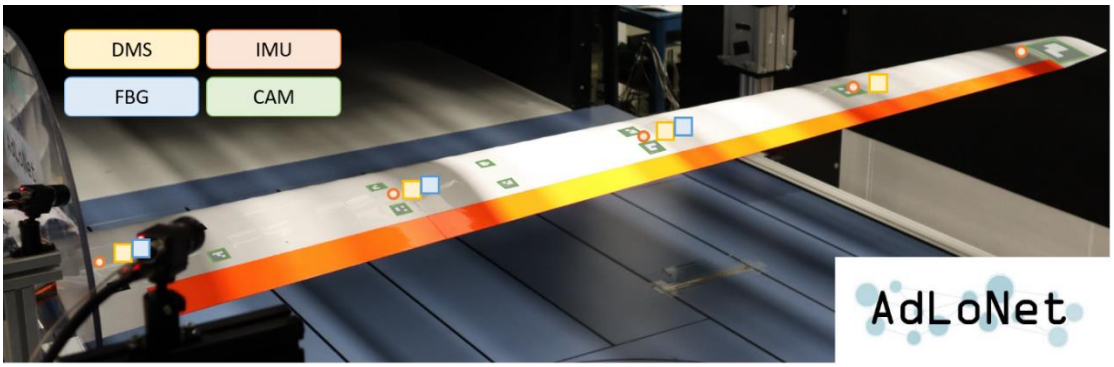

Abbildung 31: Prototypenflügel im Windkanal der TUHH

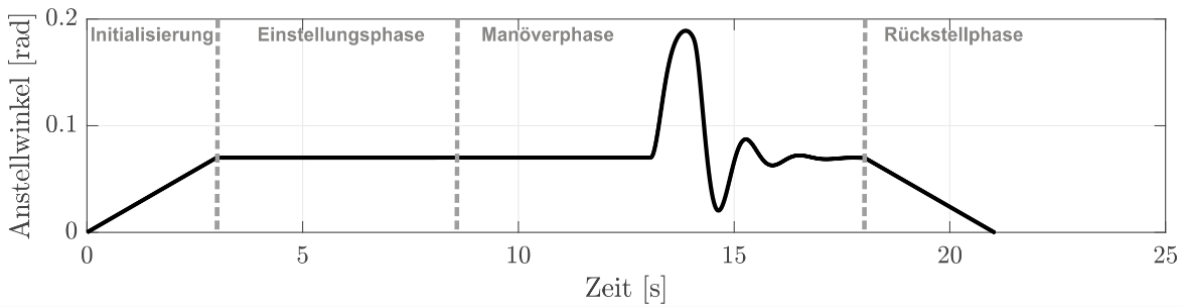

Abbildung 32: Exemplarischer Verlauf eines Anstellwinkelszenarios

Windkanalversuche zur Stabilität & Steuereffektivität des Höhenleitwerks

Da eine Beeinträchtigung der Längsstabilität und Steuereffektivität des Höhenleitwerks in Folge potentieller Wirbelbildung durch den Kameraaufbau im Flugversuch nicht auszuschließen war, wurden ergänzende Untersuchungen im Windkanal zur Integration des Kamerasystems vor der realen Flugversuchserprobung durchgeführt (Abbildung 33, rechts). Mit Hilfe eines einfachen Bindfadenversuchs wurde dabei die Strömung am Höhenleitwerk in 3 repräsentativen Geschwindigkeitsbereichen bei variierenden Anstellwinkeln gemäß Abbildung 34 überprüft und für unbedenklich für die Sicherheit im Flugversuch eingestuft.

Abbildung 33: Integriertes Kamerasystem CamS. Links: Final integriertes Kamerasystem im Flugversuch. Rechts: Kamerasystem im Windkanalversuch

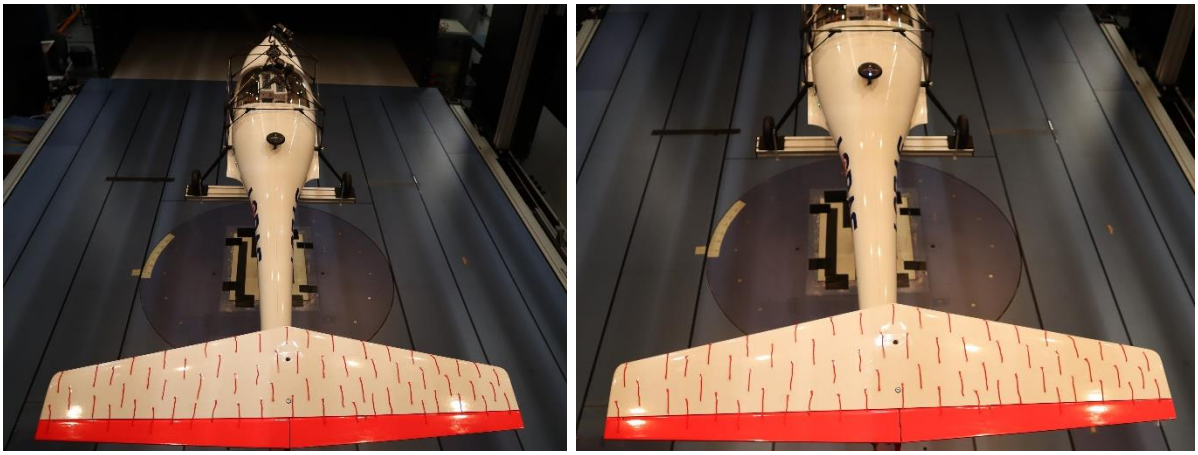

Abbildung 34: Leitwerksanströmung bei 15m/s (links) und 22.5m/s (rechts) bei α=10°

Flugversuche zum Einstellen des Versuchsflugzeugs und Erprobung des Sensor- und Beobachternetzwerks

Die Durchführung der Flugversuche erfolgte am 18. Juli 2024 und am 18.09.2024. Es wurden insgesamt vier Versuchsflüge durchgeführt von denen Versuch 1 und 2 primär der Einstellung des Flugzeugs (Schwerpunkt, Steuerflächen) und des Einfliegens des Piloten dienten. Im dritten Flugversuch wurden 11 klassische Manöver der Längs- und Seitenbewegung zur Anregung der Systemdynamik (Phygoide, Querruder-Dublette) und hoher Lastvielfache (Push-Over-Pull-Up) erflogen von denen 6 für die Erprobung, Auslegung und Auswertung des Sensor- und Beobachternetzwerks verwendet wurden. Der vierte Flugversuch am 18.09.2024 sah die gemeinsame Er-probung des Sensor- und Beobachternetzwerks mit dem DLR vor. Dieser konnte aber auf Grund einer Teilbeschädigung des Versuchsflugzeugs, in Folge von sporadischen Verbindungsproblemen zum Versuchsträger, nicht erfolgreich abgeschlossen werden (siehe Abbildung 35). Weitere Flugversuche wurden auf Grund der Be-schädigung des Flugzeugs zum Projektende nicht durchgeführt. Auf Grundlage der erfolgreichen ersten drei Flugversuche stellte dies allerdings keine Beeinträchtigung im Hinblick auf den zu erreichenden Nachweis des Sensor- und Beobachternetz-werks dar, und es wurde planmäßig die Bewertung des Gesamtkonzepts im Rahmen von AP 3.3 durchgeführt.

Abbildung 35: LORAS-Dimona Erstflug (links). Teilbeschädigung des Versuchsträgers (rechts)

Erreichte Ziele

Im Arbeitspaket AP 3.2 wurden die Teilsysteme sowie das Gesamtsystem des Sensor- und Beobachternetzwerks erfolgreich erprobt und validiert. In Laborversuche erfolgte

die Kalibrierung der Lastmesssensorik an Prototyp- und finalem Flügel mit hoher Genauigkeit. Windkanalversuche zur Kalibrierung des Luftdatenmasts und zur Vermessung des Antriebssystems sowie zur Erprobung des Sensornetzwerks bestätigten die Systemfunktionalität unter realitätsnahen Bedingungen. Zudem wurden auch Stabilitätsuntersuchungen des Höhenleitwerks mit integriertem Kamerasystem durchgeführt und als unbedenklich für den Flugversuch bewertet. Die Flugversuche im Juli und September 2024 dienten der Einstellung und Inbetriebnahme des Versuchsflugzeugs sowie der Erprobung des Sensor- und Beobachternetzwerks in realem Flugbetrieb. Trotz eines Abbruchs im letzten Versuch durch ein technisches Problem wurden die Ziele hinsichtlich der Nachweisführung des Sensor- und Beobachternetzwerks erfolgreich erreicht und die weitere Konzeptbewertung planmäßig eingeleitet.

AP 3.3: Bewertung von Teil- und Gesamtsystem

In diesem Arbeitspaket wird durch die TUHH gemäß Vorhabensbeschreibung die Bewertung des in AP 2.3 abgeleiteten Sensor- und Beobachternetzwerks sowie der in AP 2.4 entwickelten Fusionsfunktionen anhand der in AP 1.3 definierten Kriterien durchgeführt.

Erprobung & Bewertung des LPV-basierten Erweiterten Kalman Filters

Die Bewertung der Genauigkeit der Lastschätzung unter Verwendung der in AP 2.1 entwickelten LPV-Systemapproximation sowie die Auswirkungen von Modellierungsfehlern infolge der Nutzung von Entwurfsmodellen wurde in AP 3.3 eingehend untersucht. Abbildung 36 zeigt hierzu beispielhaft einen Vergleich zwischen der Lastschätzung des normalerweise eingesetzten nichtlinearen Modells und der des in AP 2.1 entwickelten LPV-basierten erweiterten Kalman-Filters im simulierten Flugversuch. Trotz der eingebrachten Modellfehler wurde eine hohe Genauigkeit der Lastschätzung erreicht. Ist das nichtlineare Modell ausreichend präzise bekannt, ist auch eine hohe Genauigkeit der vertikalen Windschätzung möglich. Die Ergebnisse dieser Studien wurden im Januar 2024 auf einer internationalen Konferenz [40] sowie in einer Fachzeitschrift im Januar 2025 [41] veröffentlicht.

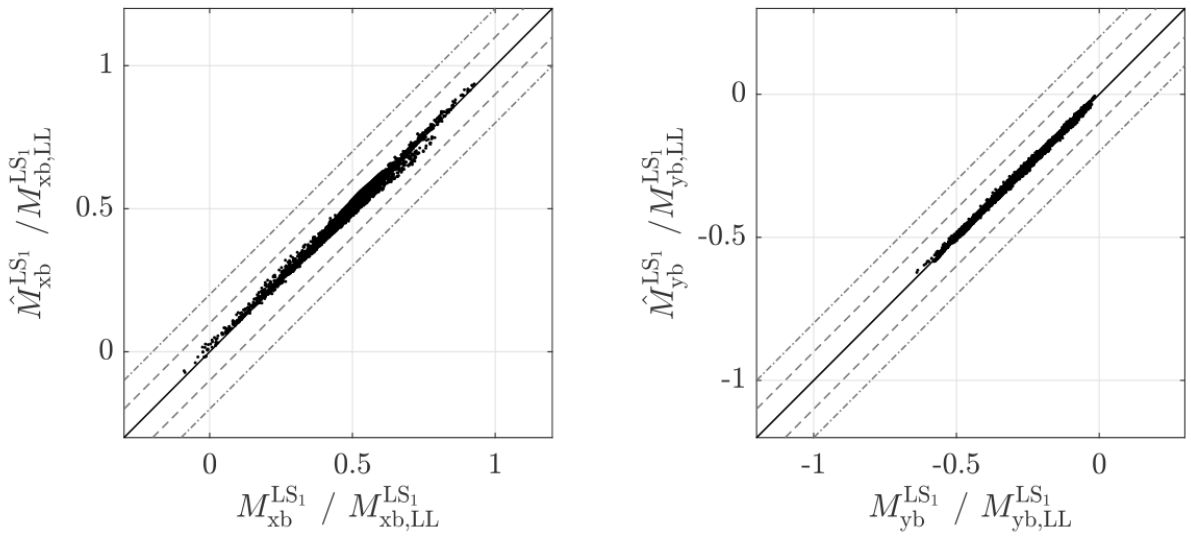

Abbildung 36: Vergleich Biegemoment zwischen nichtlinearem Modell und LPV basierten Erweiterten Kalman Filter

Bewerten der Sensortechnologien für den Flugversuch

Die komplementären dehnungsbasierten Messsysteme (DMS und FBG) zeigten in den Kalibrierversuche vergleichbare Genauigkeiten (vgl. [39]). Im Rahmen der Windkanalversuche erwies sich allerdings die bessere Temperaturkompensation der DMS-Vollbrücken insbesondere bezüglich der Querkraftmessung trotz lokaler Temperaturmessung an den FBG Messstellen als vorteilhaft. Dieser Effekt ist in Abbildung 37 dargestellt und ist maßgebend für die Wahl der DMS im Flugversuch. Der Einsatz der erweiterten IMU Sensorik mit lokalen Informationen zur Flügeldeformation (AHRS Funktion) erwies sich als vorteilhaft im Kontext des Sensornetzwerks. Insbesondere die vereinfachten Integrationsaspekte auch im Kontext einer späteren Industrialisierung, das Potential einer Lastkalibrierung auf Grundlage von Deformationsinformationen und das Zusammenspiel mit der kamerabasierten, optischen Deformationsmessung des DLRs erwiesen sich als vielversprechend und praxisorientiert für die Verwendung im realen Flugversuch. Die MEMS-Drucksensoren wurden auf Grund des hohen Komponentengewichts lediglich im Windkanalversuch eingesetzt.

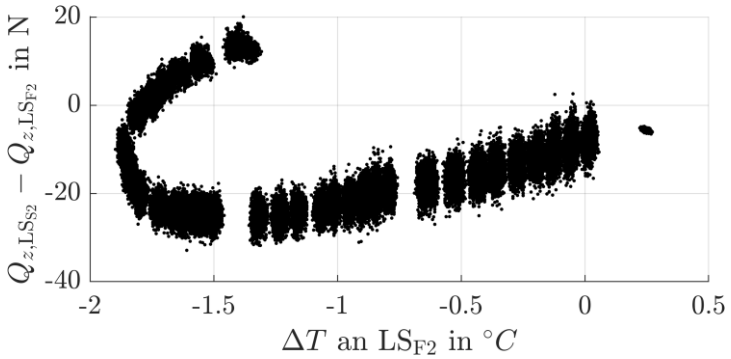

Abbildung 37: Temperatureinfluss auf Querkraftmessung der Fiber-Bragg-Sensoren

Erprobung und Bewertung des Gesamtsystems

Auf Grundlage der im Rahmen von AP 3.2 durchgeführten Flugversuche erfolgte die Bewertung des Gesamtsystems erstmalig unter Verwendung von realen Flugversuchsdaten des LORAS-Dimona Flugversuchsträgers. Die grundlegende Genauigkeit des LPV-basierten hybriden Lastenbeobachters wurde bereits anhand dessen Auslegung im Rahmen von AP 2.5 demonstriert. Im Vordergrund der Bewertung stand die Untersuchung des Gesamtsystems zunächst im Nominalbetrieb und dann unter Berücksichtigung von Sensorausfällen. Abbildung 38 zeigt drei exemplarische Testfälle, die untersucht wurden:

1. Nominalbetrieb
2. Fehlerfall: Ausfall der Biegemomentenmessung an LS_{S1} bei T = 6s
3. Fehlerfall: Ausfall der Biegemomentenmessung an LS_{S1} bei T = 10s

Die Ergebnisse der Studie sind im Zeitbereich am Beispiel des Biegemoments für LS_{S1} und LS_{S2} dargestellt und verdeutlichen die hohe Leistungsfähigkeit und Genauigkeit des Gesamtkonzepts. Demzufolge wird eine kontinuierliche, hochgenaue Bereitstellung der Lastinformationen selbst im Fehlerfall sichergestellt. Weiterführende Ergebnisse wurden im Rahmen des Berichts [48] zusammengefasst.

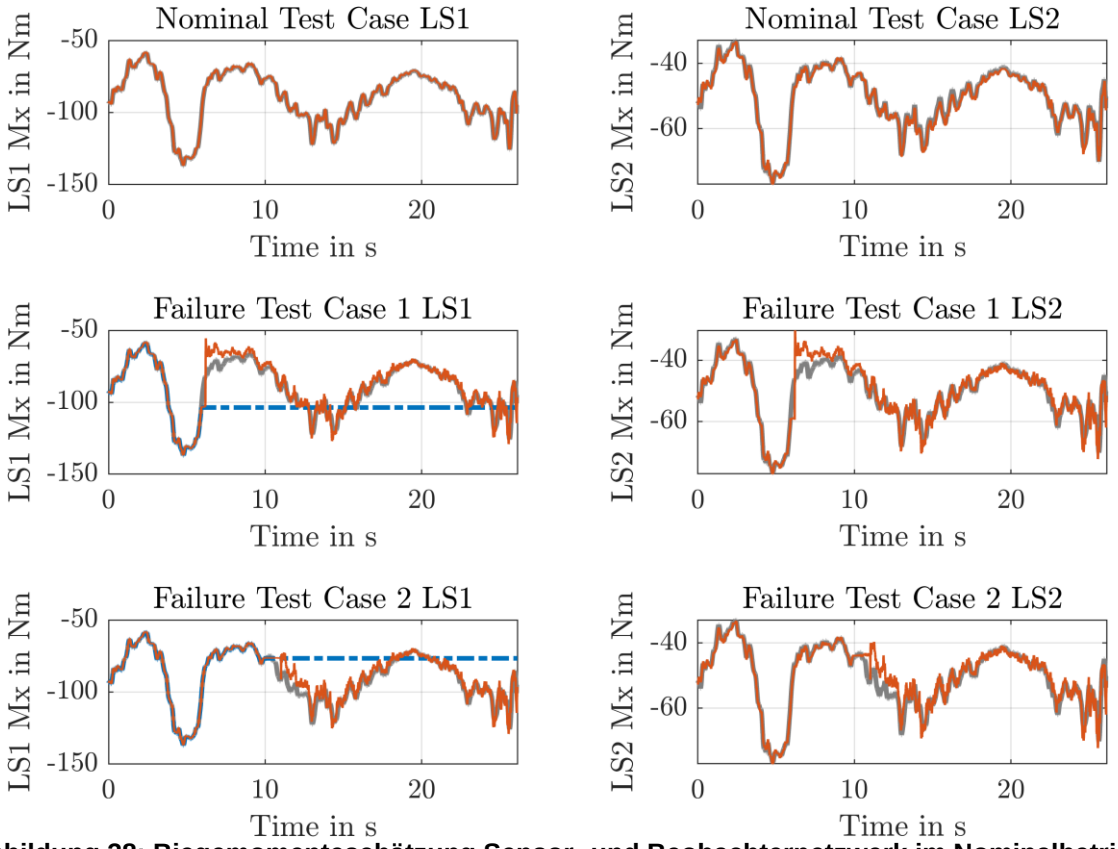

Abbildung 38: Biegemomenteschätzung Sensor- und Beobachternetzwerk im Nominalbetrieb und mit einfachen Sensorfehler des Dehnungsmessstreifens an LS_{S1}. LS_{S1} (links), LS_{S2} (rechts). Messwert (grau), Fehlerhafter Messwert (blau), geschätzter Wert (orange)

Erreichte Ziele

Im Arbeitspaket AP 3.3 wurde durch die TUHH die Bewertung des in AP 2.3 entwickelten Sensor- und Beobachternetzwerks sowie der Fusionsfunktionen aus AP 2.4 anhand der in AP 1.3 definierten Kriterien durchgeführt. Die Untersuchung des LPV-basierten Erweiterten Kalman-Filters in simulierten Flugversuchen zeigte, dass trotz Modellierungsfehlern eine hohe Genauigkeit der Lastschätzung erreicht werden kann. Zudem ist bei präziser Kenntnis des nichtlinearen Modells auch eine genaue Windschätzung gewährleistet. Diese Ergebnisse wurden auf einer internationalen Konferenz [40] sowie in einer Fachzeitschrift [41] veröffentlicht. Die Untersuchungen des Sensornetzwerks im Labor und Windkanal zeigen die Vorteile der dehnungsbasierten DMS-Sensorik sowie der erweiterten IMU-Sensorik mit AHRS-Funktion für den Flugversuch. Die MEMS-Drucksensoren kamen aufgrund ihres Gewichts nur im Windkanal zum Einsatz. Aufbauend auf den in AP 3.2 durchgeführten Flugversuchen wurde das Gesamtsystem erstmals mit realen Flugversuchsdaten erfolgreich bewertet. Dabei bestätigte sich die hohe Leistungsfähigkeit und Genauigkeit des hybriden Lastenbeobachters auch im Falle von Sensorausfällen, was eine kontinuierliche, verlässliche Lastinformation gewährleistet.

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

Ein Teil der geplanten Verwertung wurde bereits durch Publikationen im Rahmen der Projektlaufzeit umgesetzt. Des Weiteren erfolgt die Nutzung der Ergebnisse, sowie deren Weiterentwicklung entsprechend des Verwertungsplans im Rahmen von weiterführenden Projekten (FlexFuture & FlexFuture II) und weiteren Forschungstätigkeiten. Durch das Projekt wurde die Methodenkompetenz des Instituts auf dem Gebiet der Lastschätzung, Lastmessung und Sensorfusion weiter ausgebaut beziehungsweise aufgebaut, sodass die Ergebnisse auch für andere Forschungsthemen des Instituts nutzbar sind. Darüber hinaus fließen die Ergebnisse im Rahmen von Lehre und Weiterbildung ein. Weiterhin ist eine Veröffentlichung der Ergebnisse im Rahmen von Dissertationen angestrebt.

4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger wurde kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens mit demselben Fokus bekannt.

5. Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse der TUHH wurden durch drei Veröffentlichungen (Tabelle 2) dem nationalen und internationalen wissenschaftlichen Fachpublikum vorgestellt. Die Veröffentlichungen haben dabei verschiedene thematische Bereiche adressiert. Zunächst wurde die Entwicklung des Sensornetzwerks und das erste Konzept zur Sensordatenfusion auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress in Stuttgart [39] präsentiert. Die Entwicklung des LPV-basierten Lastenschätzers, dessen Erprobung in simulierten Flugversuchen und dessen Validierung im Windkanal wurde anschließend auf dem AIAA SciTech Forum and Exposition [40] präsentiert. Darauf aufbauend erfolgte die weiterführende Veröffentlichung der Ergebnisse im Journal of Aircraft [41].

Tabelle 2: Wissenschaftliche Veröffentlichungen der TUHH

[39] LUDERER, O., et al.: „Development and testing of a complementary sensor network for robust estimation of maneuver and gust loads“ In Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023, *(DLRK 2023)*. Stuttgart. 2023. DOI: 10.25967/610085

[40] LUDERER, O. und THIELECKE, F.: „Linear Parameter-Varying (LPV) system based hybrid loads observer using an uncertain aircraft model“ In American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA SciTech Forum 2024. Orlando. 2024. DOI: 10.2514/6.2024-2486

[41] LUDERER, O. und THIELECKE, F.: „Aircraft Load Estimation Using Linear Parameter-Varying System-Based Hybrid Observers“ In Journal of Aircraft. 2025. DOI: 10.2514/1.C037946

6. Liste der erstellten Dokumentation

[42] LUDERER, Oliver: „*Jahresbericht 2021*“, Projektbericht (FST-PB-2022-322), 2022.

[43] LUDERER, Oliver: „Konzeptbeschreibung des Lastenüberwachungsnetzwerks“, Projektbericht (FST-PB-2022-311), 2022.

[44] LUDERER, Oliver: „*Jahresbericht 2022*“, Projektbericht (FST-PB-2023-362), 2023

[45] LUDERER, Oliver: „*Jahresbericht 2023*“, Projektbericht (FST-PB-2024-385), 2024

[46] LUDERER, Oliver: „*Jahresbericht 2024*“, Projektbericht (FST-PB-2025-417), 2025

[47] LUDERER, Oliver: „Bericht zur Integration des Sensor- und Beobachternetzwerks“, Projektbericht (FST-PB-2025-405), 2025.

[48] LUDERER, Oliver: „Bericht zur Optimierung des Sensor- und Beobachternetzwerks“, Projektbericht (FST-PB-2025-407), 2025.

[49] LUDERER, Oliver: „*Abschlussbericht*“, Projektbericht (FST-PB-2025-421), 2025.

Tabelle 3: Erstellte Dokumentation der TUHH im Rahmen des Projekts AdLoNet

7. Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

Die folgende Auflistung der genutzten Fachliteratur enthält wesentlich genutzte Quellen. Die Liste ist in verschiedene fachliche Bereiche eingeteilt, die für die Arbeiten der TUHH und für die Erstellung dieses Berichts eine starke Relevanz hatten. Eine genauere thematische Zuordnung sowie weitere Quellen können den Berichten sowie den Veröffentlichungen entnommen werden.

[50] KREITZ, T.; BORNHOLDT, R., et al.: “*Simulation-Driven Methodology for the Requirements Verification and Safety Assessment of Innovative Flight Control Systems*”. In: SAE 2015 AeroTech Congress & Exhibition. SAE International, 2015. doi: 10.4271/2015-01-2478.

[51] HERRMANN, B.; THEIS, J., and THIELECKE, F.: “*Nonlinear System Identification of a UAV Model with Distributed Aerodynamics and Flexible Structure*”. In: CEAS Aeronautical Journal (2023). doi: 10.1007/s13272-023-00674-x.

[52] HORSTMANN, K.-H.: “*Ein Mehrfach-Traglinienverfahren und seine Verwendung für Entwurf und Nachrechnung nichtplanarer Flügelanordnungen*”. PhD thesis. Technical University of Braunschweig, 1987.

[53] Drela, M. and Youngren, H.: XROTOR Download Page. url: http://web.mit.edu/drela/Public/web/xrotor/ (visited on 05/01/2024).

[54] DRELA, M.: *“XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils”. In: Lecture Notes in Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 1989, pp. 1–12. DOI: 10.1007/978-3-642-84010-4_1.*

[55] MONTEL, M.: “*Hybride Beobachter-Methode zur Strukturlastüberwachung und deren Validierung mit Flugversuchsdaten*”. Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik. PhD thesis. Hamburg University of Technology, 2018. isbn: 978-3-8440-6354-7.

[56] LUDERER, O. und THIELECKE, F.: „*Validation of a Hybrid Loads Observer for a Subscale Test Aircraft with Distributed Electric Propulsion*“ In *Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2022)*. Stockholm. 2022.

[57] VOSS, A.; SOAL, K. I., et al.: "*Pre-Test of a Light-Weight CFRP Wing Segment of a High Altitude Platform for In-flight Load Measurements Based on Strains*". In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress DLRK. Bremen, Germany, 2021.

[58] JATEGAONKAR, R. V.: "*Flight Vehicle System Identification: A Time-Domain Methodology"*, Second Edition. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2015. isbn: 9781624102790. doi: 10.2514/4.102790.

Tabelle 4: Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau und Funktionen des Sensor- und Beobachternetzwerkes zur Überwachung von Flugzeugstrukturlasten 5
Abbildung 2: Projektstruktur und Arbeitspaketleitung 7
Abbildung 3: Zeit- und Meilensteinplanung 8
Abbildung 4: Sensornetzwerk des Prototypenflügels 14
Abbildung 5: Reduzierter, hybrider Lastenbeobachter 14
Abbildung 6: Fusionskonzept des Sensor- und Beobachternetzwerks 15
Abbildung 7: Aerodynamische Grundparametrierung mit LIFTING_LINE 17
Abbildung 8: Schubkennfelder aus Windkanaldaten (orange) und XROTOR Analysen. 17
Abbildung 9: Kräfte, Momente & Lastüberwachungspunkte der Streifenaerodynamik 18
Abbildung 10: Netzdarstellung eines LPV-Systems nach [40,41] 18
Abbildung 11: Approximationsgenauigkeit des LPV Systems nach [40,41] 19
Abbildung 12: LPV-basierter erweiterter Kalman Filter mit Korrekturmodell nach [40,41] 19
Abbildung 13: Verschaltung der Fiber-Bragg-Sensoren und Dehnungsmessstreifen 20
Abbildung 14: MPU6050 Low-Cost IMU (links) und SBG Micro IMU mit AHRS Funktion (rechts) 21
Abbildung 15: Finales Sensornetzwerk für die Vorerprobung im Windkanalversuch 21
Abbildung 16: Ergebnisse der zentralisierten Lastfusion für das Biegemoment mit DMS-Fehler 22
Abbildung 17: Messung (schwarz) und Schätzergebnis des erweiterten Kalman Filters mit (orange) und ohne IMUs (blau) 23
Abbildung 18: Extremwertanalyse der Windkanaldaten und Lastzyklen 23
Abbildung 19: Architektur des finalen Sensornetzwerks für den Flugversuch 24
Abbildung 20: Fusionsarchitektur des Sensor- und Beobachternetzwerks für den Flugversuch 25
Abbildung 21: Nominalbetrieb: Schätzergebnis des hybriden Lastenbeobachters (orange) und des erweiterten Kalman Filters (schwarz) im Sensor- und Beobachternetzwerk an $\boldsymbol{LSS1}$ (links) und $\boldsymbol{LSS2}$ (rechts) am Beispiel des Biegemoments 26
Abbildung 22: Fail-Safe Modus: Schätzergebnis des hybriden Lastenbeobachters (orange) und des erweiterten Kalman Filters (schwarz) im Sensor- und Beobachternetzwerk an $\boldsymbol{LSS1}$ (links) und $\boldsymbol{LSS2}$ (rechts) am Beispiel des Biegemoments 26
Abbildung 23: Schätzergebnis der Überwachungsfunktion im Sensor- und Beobachternetzwerk an $\boldsymbol{LSS1}$ am Beispiel des Biegemoments 27

Abbildung 24: Aufbau des Prototypenflügels (links: Kameraunterbau, mitte: FBGs, rechts: FBGs und DMSs an Messstelle 1) 28
Abbildung 25: Komponentenvorerprobung - Vergleich der Ausführzeiten relativ zum bisherigen Konzept der MicroAutoBox II 29
Abbildung 26: Gewichtsreduziertes Avionikkonzept im Feldtest 29
Abbildung 27: Grundlegender Aufbau und Architektur der finalen Avionik 30
Abbildung 28: Skaliertes Versuchsflugzeug LORAS-Dimona 30
Abbildung 29: Laborversuch während der Kalibrierversuche 31
Abbildung 30: Kalibrierung des Luftdatenmasts und Vermessung des Antriebssystems 32
Abbildung 31: Prototypenflügel im Windkanal der TUHH 33
Abbildung 32: Exemplarischer Verlauf eines Anstellwinkelszenarios 33
Abbildung 33: Integriertes Kamerasystem CamS. Links: Final integriertes Kamerasystem im Flugversuch. Rechts: Kamerasystem im Windkanalversuch 33
Abbildung 34: Leitwerksanströmung bei 15m/s (links) und 22.5m/s (rechts) bei $\boldsymbol{\alpha}$=10° 34
Abbildung 35: LORAS-Dimona Erstflug (links). Teilbeschädigung des Versuchsträgers (rechts) 34
Abbildung 36: Vergleich Biegemoment zwischen nichtlinearem Modell und LPV basierten Erweiterten Kalman Filter 35
Abbildung 37: Temperatureinfluss auf Querkraftmessung der Fiber-Bragg-Sensoren 36
Abbildung 38: Biegemomenteschätzung Sensor- und Beobachternetzwerk im Nominalbetrieb und mit einfachen Sensorfehler des Dehnungsmessstreifens an $\boldsymbol{LSS1}$. $\boldsymbol{LSS1}$ (links), $\boldsymbol{LSS2}$ (rechts). Messwert (grau), Fehlerhafter Messwert (blau), geschätzter Wert (orange) 37

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlerer, absoluter Kalibrierfehler der DMS für den Flugversuchsträger . 32
Tabelle 2: Wissenschaftliche Veröffentlichungen der TUHH 38
Tabelle 3: Erstellte Dokumentation der TUHH im Rahmen des Projekts AdLoNet ... 39
Tabelle 4: Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur 40