



Abschlussbericht



Abschlussbericht ADLONET

Förderkennzeichen: 20Q1948A
Projekt Akronym: ADLONET
Projekt Titel: Advanced Loads Monitoring Network
Förderlinie: Nationales Luftfahrtforschungsprogramms LuFo VI-1,
Förderlinie KMU
Projektdauer: 01.06.2021 – 31.08.2024
Titel: Abschlussbericht ADLONET
Autor(en): Willem Gropengießer, Stephan Adden
Beitragender IBK-Innovation GmbH & Co. KG
Partner:
Datum: 10. Juli 2025
Status: final

Verbundführer:
IBK Innovation GmbH & Co. KG
Hein-Saß-Weg 36
21129 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	4
Liste der Abbildungen	5
Überblick	6
1. Kurze Darstellung der Aufgabenstellung	7
1.1 Gesamtziel des Vorhabens	7
1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	8
1.3 Wissenschaftliche und / oder technische Arbeitsziele des Vorhabens	8
2. Darstellung der Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
2.1 Wirtschaftliche Voraussetzungen	9
2.2 Technische und wissenschaftliche Voraussetzungen	10
3. Darstellung zur Planung und zum Ablauf des Vorhabens	11
3.1 Projektstruktur	11
3.2 Meilensteinplanung	14
4. Darstellung des wissenschaftlichen und technischen Standes, an den angeknüpft wurde	15
4.1 Stand der Wissenschaft und Technik	15
4.2 Bisherige Arbeiten von IBK	16
5. Darstellung zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen	18
5.1 Verbundpartner	18
5.2 Unterauftragnehmer	19
6. Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse	20
6.1 HAP 0: „Projektmanagement“	20
6.2 HAP 1: „Konzeption“	20
6.2.1 AP 1.1 „Analyse der Hard- und Softwareanforderungen (Echtzeit)“ (06/2021-08/2021)	20
6.2.2 AP 1.2 „Systemkonzeption (Sensoren, Rechner, Schnittstellen)“ (07/2021-11/2021)	21
6.2.3 AP 1.3 „Testspezifikation und Performanzindikatoren“ (10/2021-11/2021)	34
6.3 HAP 2: „Entwicklung Lastenüberwachungsnetzwerk“	35

6.3.1	AP 2.1 „Lernfähiges Beobachternetzwerk“ (12/2021-05/2024)	35
6.3.2	AP 2.2 „Kamerabasierte Deformationssensorik“ (12/2021-03/2023)	39
6.3.3	AP 2.3 „Sensornetzwerk“ (12/2021-05/2023)	39
6.3.4	AP 2.4 „Intelligente Fusions- und Analysefunktionen zur Lastüberwachung und Identifikation“ (12/2021-05/2024)	40
6.3.5	AP 2.5 „Integration und Optimierung des Netzwerks“ (12/2022-08/2024)	42
6.4	HAP 3: „Erprobung und Bewertung“	43
6.4.1	AP 3.1 „Aufbau Prüfstände und Anpassen des Versuchsträgers“ (12/2021-08/2023)	43
6.4.2	AP 3.2 „Erproben und Validieren von Teil- und Gesamtsystem (Labor, Windkanal, Flugversuch)“ (12/2021-08/2024)	43
6.4.3	AP 3.3 „Bewertung von Teil- und Gesamtsystem“ (06/2023-08/2024)	47
7.	Veröffentlichungen	50
7.1	Veröffentlichungen / Vorträge	50
7.2	Diplomarbeiten / Studienarbeiten	50
7.3	Erfindungsmeldungen / Patente	50
8.	Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur	51

Abkürzungen

Akronym	Vollständige Bezeichnung
ANFIS	Adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem
AP	Arbeitspaket
AWGN	additives weißes Gaußsches Rauschen (engl. additive white Gaussian noise)
BMWi	Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMS	Dehnungsmessstreifen
DOC	Direct Operating Cost
FuE	Forschung und Entwicklung
HAP	Hauptarbeitspaket
HM	Hauptmeilenstein
IBK	Ingenieurbüro IBK-Innovation GmbH & CoKG
KMU	Klein-, Mittleren Unternehmen
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
OEM	Original Equipment Manufacturer
TUHH	Technische Universität Hamburg
UKF	Unscented Kalman Filter

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Vorgehen in AdloNet.....	9
Abbildung 2: Übergeordneter Projektstrukturplan	11
Abbildung 3: Zeit- und Meilensteinplan	15
Abbildung 4: Darstellung der Verbundpartnerorganisation.....	18
Abbildung 6: Sensorkonzept für den Windkanalprototypenflügel.	21
Abbildung 7: Positionierung der MEMS Drucksensoren im Tragflächenquerschnitt.	22
Abbildung 8: Hardwarekonzept zur Kommunikation mit den MEMS Drucksensoren.	22
Abbildung 9: 2D CFD Druckverteilung an Wortmann 63-137 Profilquerschnitt für unterschiedliche Anströmwinkel alpha.	23
Abbildung 10: Reduzierte Modulare Testplattform zur Qualifizierung der MEMES Drucksensoren.	23
Abbildung 11: Messung des statischen Luftdrucks mit drei MEMS Drucksensoren: oben FXPS7115D4, Mitte BMP180, unten BMP280.	25
Abbildung 12: Druckdaten von drei MEMS Drucksensoren: FXPS7115D4 oben, BMP180 Mitte, BMP280 unten. Druckänderung durch Luftanströmung zwischen $t = 0$ s bis 1 s am BMP280 und $t = 1$ s bis 1,5 s am BMP180 und FXPS7115D4.	26
Abbildung 13: Entworfenen MEMS Luftdrucksensorplatine bestückt mit einem FXPS7115D4 Luftdrucksensor.....	27
Abbildung 14: Entworfenen MEMS Luftdrucksensorplatine: Lagenaufbau	27
Abbildung 15: Schaltplan für die entworfene MEMS Luftdrucksensorplatine.....	28
Abbildung 16: Modulare Testplattform zum Programmieren und Testen der MEMS Luftdrucksensoren.....	29
Abbildung 17: Werkzeug zur Programmierung und zum Testen der MEMS Luftdrucksensoren	30
Abbildung 18: Tragflächenprofil einer MEMS Messstation zur Integration zwischen zwei Tragflächenrippen	31
Abbildung 19: MEMS Sensoranbindung in ein 3D-gedrucktes Tragflächenprofil.....	31
Abbildung 20: Integrierte MEMS Luftdrucksensoren in einem 3D-gedruckten Tragflächenprofil	32
Abbildung 21: 3D-gedrucktes Tragflächenprofil einer MEMS Luftdrucksensor Messstation	32
Abbildung 22: 3D-gedrucktes Tragflächenprofil einer MEMS Luftdrucksensor Messstation. Seitenansicht hinterer Teil	33
Abbildung 23: 3D-gedrucktes Tragflächenprofil einer MEMS Luftdrucksensor Messstation. Seitenansicht vorderer Teil.....	33
Abbildung 24: Systeme zur Reduktion struktureller Lasten eines Flugzeugs mittels eines Lastenreglers basierend auf geschätzten strukturellen Lasten	36
Abbildung 25: Kombiniertes aerodynamisches VLM und FE Strukturmodell (rot: FE-Modell, blau: VLM-Modell).....	36
Abbildung 26: Aufbau eines ANFIS-Netzwerks nach [8]	37
Abbildung 27: Querkraftschätzung mittels ANFIS Lastenschätzer. Messung (grün), Schätzung (blau).....	38
Abbildung 28: Biegemomentschätzung mittels ANFIS Lastenschätzer. Messung (grün), Schätzung (blau).....	38
Abbildung 29: Torsionsmomentschätzung mittels ANFIS Lastenschätzer. Messung (grün), Schätzung (blau).....	39
Abbildung 30: Rekonstruktion der Profildruckverteilung aus verrauschten Druckdaten an einzelnen MEMS Sensor Positionen mithilfe eines ANFIS Netzwerkes für $\alpha = 0^\circ$	41
Abbildung 31: Luftdrucktest der MEMS Sensoren im 3D-gedruckten Tragflächenprofil	44

Abbildung 32: Ergebnisse des ANFIS Netzwerks zur Rekonstruktion bzw. Prädiktion der Druckverteilung C_p aus Druckmessdaten (rot „+“) aufgetragen gegen die „wahre“ C_p Verteilung aus XFOIL Simulation für die entsprechenden Anstellwinkel (schwarz gestrichelt) und künstlich verrauschte Trainingsdatendruck (blau).....	45
Abbildung 33: Ergebnisse der nachgelagerten aerodynamischen Parameteridentifikation des Auftriebsbeiwertes C_l und des Momentenbeiwertes C_m aus mittels einem ANFIS Netzwerk rekonstruierten Druckverläufen aus MEMS Druckmessungen im Vergleich mit simulierten Daten aufgetragen gegen den Anstellwinkel.	46

Überblick

AdLoNet ist ein nationales Forschungsprojekt im Rahmen von LuFo 6.1, dessen Ziel die Entwicklung eines fortschrittlichen Sensor- und Beobachternetzwerks zur Überwachung von Fluglasten ist.

Die bisherigen Methoden zur Lastüberwachung liefern nicht die erforderliche Genauigkeit und Robustheit, um als zuverlässige Quelle für die Optimierung von Inspektions- und Wartungsvorgängen sowie zur Lastenkontrolle eingesetzt zu werden. Lastenbeobachter sind beispielsweise im hohen Lastbereich ungenau und Lastsensoren können degradieren oder ausfallen. Damit fehlt die Grundlage, um Inspektionsvorgänge effektiv zu verbessern und eine präzise Lastenregelung durchzuführen. Mit der weiteren Steigerung der Effizienz von Flugzeugen mit immer leichteren Flügelstrukturen steigt jedoch der Bedarf nach einer genauen und zuverlässigen Lastenüberwachung und Lastenregelung. Aus diesem Grund wurde im Verbundprojekt AdLoNet ein Netzwerk – bestehend aus komplementären Lastsensoren und Lastenbeobachtern – entwickelt, das die Vorteile der jeweiligen Technologien vereint und durch Datenfusion eine robuste Überwachung von Lasten und Lastverteilungen mit hoher Genauigkeit ermöglicht.

Als Verbundpartner im Projekt AdLoNet gelten DLR, TUHH und IBK. In diesem Projekt legt die DLR einen Schwerpunkt auf die Entwicklung der echtzeitfähigen Deformationsmessung, während die TUHH den Schwerpunkt in den Bereichen Sensornetzwerk, Datenfusion und Erprobung hat. IBK legt hierbei den Schwerpunkt auf Filterverfahren der Lastendaten mit KI-basierten Methoden zur Lastüberwachung bzw. Lastkontrolle.

1. Kurze Darstellung der Aufgabenstellung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

IBK ist ein Dienstleister für die Luftfahrtindustrie und zeichnet sich durch große Erfahrung insbesondere im Bereich Struktur- und Lastenanalysen aus. In diesem Projekt verfolgte IBK eine Methodenentwicklung, welche durch KI-Methodeneinsatz die heutigen und zukünftigen Technologiemöglichkeiten anschließen soll. Dabei wurden zunächst die intelligenten Methoden zur Datenfusion und Datenanalyse von Lasten entwickelt. Danach wurden die innovativen Methoden und Algorithmen zur Strukturlastüberwachung und Datenmanagement entwickelt. Die Methoden wurden mittels komplementärer Sensorsignale zur Lastüberwachung auf einer existierenden Flugzeugtragfläche erprobt. Ziel der Lastüberwachung zur Lastkontrolle war es, eine möglichst genaue und zeitaufgelöste Kenntnis über die Belastung eines Flugzeuges zu erhalten. Hierfür müssen die genutzten Lösungen sehr effizient, somit einfach, robust aber trotzdem genau sein. Im vorliegenden Fall mit der Randbedingung der Nutzung zur Lastkontrolle bzw. auch zur späteren Auswertung der Lashistorie (bspw. für statistische Betrachtungen, Ableitung von Fatigue-Beanspruchungen) muss das System permanent arbeiten und somit echtzeitfähig sein. Auf die Echtzeitfähigkeit wurde durch geschickte Wahl des KI-basierten Verfahrens und durch Beachtung des Rechenaufwandes in der Umsetzung des Filterverfahrens entsprechend Rücksicht genommen.

Im Verbund erfolgte eine starke Interaktion mit den Projektpartnern DLR und TUHH. Wie bereits erwähnt, das DLR beschäftigte sich vor allem mit der Entwicklung einer echtzeitfähigen Deformationsmessung, während sich die TUHH mit den Bereichen Sensornetzwerk, Datenfusion und Erprobung beschäftigte.

Die reale Implementierung der entwickelten Methoden geschah auf einem Flugversuchsträger, der durch die TUHH betrieben wird. Dies ermöglichte eine Demonstration der Funktionsfähigkeit der Systeme. Das erreichte Level der Innovation ermöglicht keine direkte Vermarktung des Ergebnisses. Im Rahmen von AdLoNet wurde lediglich die Entwicklung eines Lösungsprototyps sowie ein proof-of-concept im Flugversuch mit der Infrastruktur der TUHH angestrebt. Eine weitergehende Industrialisierung des Systems muss direkt in der Kundeninfrastruktur erfolgen und auf diese entsprechend angepasst werden. Es sind also nachfolgende R&T Aktivitäten notwendig um den Übertrag von einem langsam fliegenden Flugversuchsträger (UAV) hin zu einem transsonisch-operierenden Flugzeug nach CS25 zu machen. Die notwendigen technischen Errungenschaften hierfür konnten aber in AdLoNet entwickelt werden.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Als Förderpolitisches Ziel wurde maßgeblich das Ziel „Leistungsfähige und effiziente Luftfahrt“ in AdLoNet unterstützt.

Das Eigeninteresse von IBK im Verbund AdLoNet zielte auf die Entwicklung einer Infrastruktur ab, auf deren Basis effiziente Strukturlastüberwachungslösungen sowie entwurfsunterstützende Modellidentifikationen möglich sind. Die exakte Identifikation und Charakterisierung von Überlastevents ermöglichen die effiziente Organisation von Wartungsarbeiten, zum einen zeitlich (wie lange darf das Flugzeug noch fliegen) und zum anderen lokal (wo ist und welche Aktion durchzuführen). Dies reduziert signifikant die direkten Betriebskosten (DOC), sowohl durch Aufwandsreduktion beim Betreiber als auch durch weniger Aktivitäten beim Hersteller. Moderne Methoden arbeiten hierbei modellbasiert. Die dafür notwendigen Modelle sind anhand von Tests zu validieren. Beide Aktivitäten waren in AdLoNet vorgesehen. Die Arbeiten sind relevant, was dadurch belegt wird, dass IBK in den letzten Jahren Kunden im Entwurf ähnlicher Systeme unterstützt hat. Die hier im Verbund mit der TUHH und dem DLR erarbeitete Lösung bietet neben den oben genannten Vorteilen auch die Möglichkeit, unterschiedliche Messsensoren (physikalisch sowie virtuell) zu fusionieren und damit die industriell benötigte hohe Genauigkeit zu erzielen, um den positiven Einfluss auf die Effizienz der fliegenden Flotte umzusetzen. Außerdem bietet sie eine effiziente, echtzeitfähige und qualitativ hochwertige, kontinuierliche Lastüberwachung. Sie kann eine bedarfsorientierte Wartung beim Flottenmanagement ermöglichen. Dies wiederum würde einen weiteren deutlichen Fortschritt hinsichtlich Kostenreduktion mit sich bringen.

1.3 Wissenschaftliche und / oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Folgende technische Teilziele, seitens IBK, werden adressiert:

1. Aufbau einer Infrastruktur als Vorbereitung intelligenter Methoden zur Datenfusion und Datenanalyse mit dem Ziel der
 - automatischen Verwaltung, Aufbereitung und Verdichtung von Messdaten
 - Detektion von lastenrelevanten Ereignissen und Aufbereitung dieser als Trainingsdaten
2. Entwicklung von innovativen lernfähigen Methoden und Algorithmen zur Strukturlastüberwachung und Datenfusion unter Verwendung
 - der oben eingeführten Infrastruktur und
 - von maschinellem Lernen

Das Vorgehen als solches und damit Logik der beiden Bausteine sind in der Abbildung 1 im Detail dargestellt.

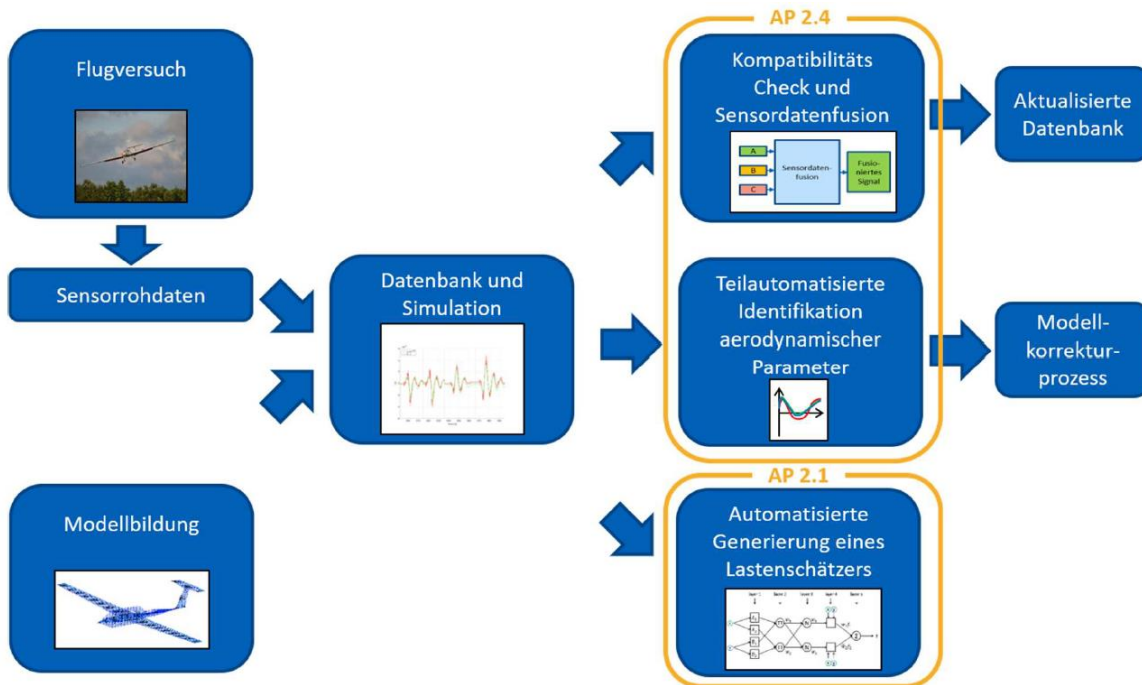


Abbildung 1: Vorgehen in AdLoNet

In AP 2.1 erfolgte die Entwicklung eines KI-basierten Verfahrens zur Fusion unterschiedlicher Sensoren (physikalisch wie virtuell) zur Ermittlung von Lasten. Dieses enthält ebenfalls einen automatisiert generierten Lastenschätzer basierend auf einer Infrastruktur, welche Flugversuchsdaten und modellbasierte Simulationen enthält. Die Entwicklung des Prozesses zum Aufbau der Datenbank war ein wesentliches technisches Ziel seitens IBK. Dieser Prozess ermöglicht bei Updates der Daten eine automatisierte Anpassung der Datenbank. Als Zweitnutzung besteht auch die Möglichkeit über die Filter Methode des AP 2.4 einen Modellkorrekturprozess zu implementieren.

Das zweite technische Ziel war die oben genannte automatische Generierung von Lastenschätzern, welche auf Basis von KI-basierten Lösungen durch maschinelles Lernen anhand von Daten der Datenbank erfolgte. Das Ergebnis ist eine performante und robuste Implementierung des Lastenschätzers, die echtzeitfähig ist.

2. Darstellung der Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

2.1 Wirtschaftliche Voraussetzungen

Die guten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind die wesentliche Motivation für die Mitwirkung im Projekt seitens IBK. Die hier dargestellten Themen sind seit längerer Zeit Teil der Aktivitäten die IBK im Dienstleistungsgeschäft anbietet und die nachgefragt werden. Innovative Technologien mit

zu entwickeln ist per se immer hilfreich vor diesem Hintergrund. Konkrete wirtschaftliche Voraussetzungen sind bereits gegeben durch erfolgte Gespräche mit potentiellen Kunden. Der Themenkomplex der Auswertung und Nutzung von in-service Daten, sei es on-board oder offline in großen Zentren ist eine der großen Herausforderungen für die Zukunft. Diese Daten sind die Basis für die erfolgreiche Entwicklung zukünftiger Flugzeuge. Das detaillierte Verständnis über Belastungen ist hierbei der Schlüssel zu einem erfolgreichen Entwurf, da zu konservative Lasten direkt zu einem konservativen Entwurf führen. Aktuell ist IBK in diese Aktivitäten bei einem Kunden eingebunden, Lösungen aus dem AdLoNet Projekt können hierbei die Grundlage für weitere Aktivitäten sein.

2.2 Technische und wissenschaftliche Voraussetzungen

Die geplanten technische Themenpunkte sind komplex, die Optimierung von Wartungssituationen durch verbesserte Lastüberwachung ist ein Thema, bei dem mehrere Disziplinen zusammenspielen und komplexe Modelle und Simulationen notwendig sind um einfache, robuste, schnelle Lösungen zu erzeugen. Die Komplexität der Aufgabe war daher auch maßgebend für die Auswahl der Verbundpartner um die technischen und wissenschaftlichen Voraussetzungen zu erfüllen:

- Die Firma IBK-Innovation hat mehr als 25 Jahre Erfahrung im Bereich der Berechnung von Lasten für Flugzeuge, insbesondere hierbei in der Simulation von Flugzeugen. Der Hintergrund im spezifischen Bereich Lastüberwachung wurde hier bereits dargestellt. IBK hat gegenüber den akademischen Partnern eine detaillierte Sicht über die Notwendigkeiten und Randbedingungen im industriellen Prozess und hat insbesondere im Bereich der Auswertung von in-service Daten in den letzten Jahren deutliche Fortschritte für Kunden erzielt.
- Das Institut für Flugzeug-Systemtechnik der TUHH ergänzt die Luftfahrtkompetenzen um spezifische Hintergründe im Bereich der Versuchstechnik und der Systeme. Mit dem FST der TUHH verbindet IBK eine lange, fruchtbare Kooperation die auch seitens der Kunden als positiv angesehen wird. Das Institut hat einen ausgewiesenen Hintergrund im Bereich der Lastüberwachungen (siehe Aktivitäten von Dr. Halle und Dr. Montel) und unterstützt den Verbund mit ausgewiesenem Expertenwissen.
- Das Institut Aerodynamik und Strömungstechnik, Abteilung Experimentelle Verfahren des DLRs beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit innovativen Messmethoden um Strömungszustände im Windkanal und in Flugversuchen zu erfassen. Das DLR ist über seine Infrastruktur und seine Kompetenz prädestiniert die komplexen Messungen zur Deformationsanalyse, die innerhalb von AdLoNet notwendig sind, um die schnellen Methoden abzuleiten, zu liefern.

Die wesentlichen Projektherausforderungen hinsichtlich benötigter Kompetenzen waren daher durch die Wahl der Partner bereits abgedeckt.

3. Darstellung zur Planung und zum Ablauf des Vorhabens

3.1 Projektstruktur

Abbildung 2 zeigt den Aufbau des Projektes AdLoNet sowie die Untergliederung der Hauptarbeitspakete und der jeweiligen Hauptarbeitspaket-/Arbeitspaketleiter.

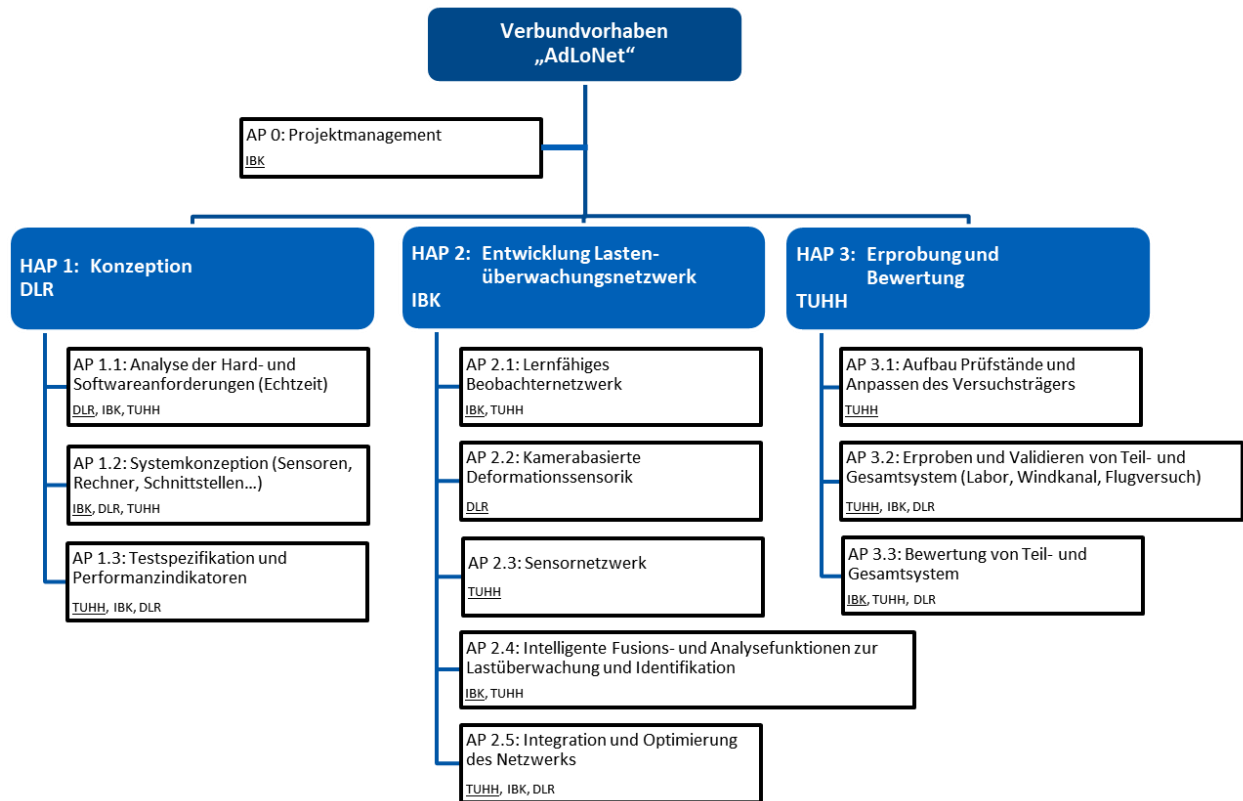


Abbildung 2: Übergeordneter Projektstrukturplan

Das Projekt ist grob gegliedert in drei technische Arbeitspakete sowie das Projektmanagement. HAP1 hat sich schwerpunktmäßig um Fragen der Konzepte und Anforderungen gekümmert und hierbei sichergestellt, dass über alle Partner hinweg Transparenz diesbezüglich vorliegt. HAP2 beinhaltet die eigentlichen technischen Entwicklungen über alle notwendigen Themenbereich hinweg, während HAP3 die Erprobung und Bewertung auf unterschiedlichen Ebenen beinhaltet.

Technische Vorgehensweise:

In AdLoNet arbeitete IBK an zwei technischen Themenkomplexen, einem „lernfähigen Beobachternetzwerk“ und an einer Methode zur Identifikation von aerodynamischen Lasten im Sinne einer „intelligenten Fusions- und Analysefunktion“. Da die TUHH einen Unscented Kalman Filter (UKF) Ansatz für die beiden Fragestellungen gewählt hat, wurde von IBK ein Adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem (ANFIS) untersucht.

Die Lernfähigkeit des Beobachternetzwerkes wurde durch die Anpassung einer modelbasierten Lastenschätzung an die realen Lasten durch die Fusion mit unterschiedlichen Messungen erreicht. Um dieses Netzwerk auch für eine effektive Lastenkontrolle in zukünftigen Projekten einsetzen zu können wurde die Echtzeitfähigkeit dieses Systems gewährleistet.

Die Intelligenz der Fusions- und Analysefunktion zeigt sich in der Berücksichtigung der Charakteristiken (Rauschen, Messungenauigkeiten) der unterschiedlichen Sensortypen beim Training der Netzwerke und ermöglicht eine bestmögliche Identifikation von aerodynamischen Lasten.

HAP1: „Konzeption“

Nach Absprache mit den Partnern wurde beschlossen, in AdLoNet neben konventionelle Methode zur Strukturlastermittlung mittels DMS nach Skopinski sowie Fiber Bragg Gitter und neben dem Deformationssensor des DLR zusätzlich auch MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) Sensoren zu adressieren. Diese MEMS haben über lokale Druckmessungen an der umströmten Tragfläche ebenfalls lastrelevante Informationen geliefert. MEMS-Sensoren sind vergleichsweise klein und kompakt und versprechen eine deutliche Verbesserung auch hinsichtlich der aerodynamischen Messungen im Flugversuch verglichen mit herkömmlichen Ansätzen.

IBK hat eine Sensorqualifizierung von MEMS-Sensoren durchgeführt mit dem Ziel, die gewonnen Erkenntnisse über die Charakteristik dieser Sensoren in den APs 2.1 und 2.4 einzubringen. Aufgrund der federführenden Mitwirkung bei diversen Windkanalversuchen in F&E Projekten (u.a. ETRIOLLA, ESICAPIA, POLITE, PRODIGE, G-FLIGHTS) waren die erforderlichen Kenntnisse bzgl. Messaufbauten und der Datenaufbereitung bereits vorhanden, so dass sich die Untersuchung in AdLoNet auf die Charakteristik der MEMS Sensoren fokussiert hat und der Materialaufwand hierfür gering war. Neben der Qualifizierung der MEMS-Sensoren wurde in HAP 1 insbesondere an den Schnittstellen der einzelnen Modulkomponenten gearbeitet.

Die Integration der MEMS Sensoren erfolgte über ein Adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem (ANFIS). Auf Grundlage eines künstlichen neuronalen Netzes werden darin die Daten der Drucksensoren kombiniert und mit weiteren Messgrößen Informationen zu verteilten Lasten an spezifischen Komponenten des Flugzeuges, wie den Tragflächen, gewonnen. Darüber hinaus handelt es sich bei dem von IBK entwickelten ANFIS Netzwerk um eine Methode, die für die Identifikation aerodynamischer Modellparameter verwendet werden kann. Dies wurde basierend auf den Messdaten der Flug- und Windkanalkampagne umgesetzt und eine Korrektur des aerodynamischen Modells vorgenommen.

IBK hat bzgl. der Lastenüberwachung auf den Aktivitäten aus G-FLIGHTS aufgebaut und erweitert das bereits zum Einsatz gekommene System zur Lastschätzung aus flugphysikalischen

Parametern hinsichtlich einer Fusion mit weiteren Sensoren. Dies erfolgte unter Verwendung von neuronalen Netzen, welche die Komplexität des bestehenden Ansatzes deutlich erhöht haben. Um den Flugcomputer für seine primären Aufgaben einzusetzen, wurde die Berechnung des Netzes auf eine zusätzliche Hardware ausgelagert, die sich leicht ins das Rechnerkonzept der Dimona integrieren ließ und aus einem Raspberry Pi besteht.

HAP 2: „Entwicklung Lastenüberwachungsnetzwerk“

HAP 2 wurde von IBK geleitet. Das bereits in dem LuFo Projekt G-FLIGHTS zum Einsatz gekommene System zur Lastenschätzung wurde in AdLoNet wie oben beschrieben erweitert.

Das ANFIS Netzwerk, das im Rahmen der Lastenregelung eingesetzt wurde, sollte nicht nur möglichst genau sein, sondern auch performant, robust und verhältnismäßig einfach in der Implementierung. Dies begründet sich dadurch, dass Flugcomputer sehr hohen Sicherheitsanforderungen genügen müssen und die Rechenleistung dadurch zwangsläufig gegenüber herkömmlichen Rechnern reduziert ist.

Aufgrund der erforderlichen Echtzeit-Fähigkeit des Systems wurde untersucht, ob das ANFIS Netzwerk in Richtung eines tiefen neuronalen Netzes erweitert werden kann oder die Fusion über ein vorgeschaltetes probabilistisches Netzwerk realisiert werden kann.

In AdLoNet erfolgte die erste Auslegung des Schätzers nicht basierend auf gemessenen Signalen, sondern auf Simulationen. Über die Fusion mit Sensoren können so Zusammenhänge berücksichtigt werden, die durch das in der Simulation verwendete Modell gezielt nicht abgebildet sind. In Bezug auf die Verwertung der Ergebnisse ermöglicht dies die Komplexität eines aeroelastischen Modells verhältnismäßig einfach zu gestalten und über Sensoren die Genauigkeit der Schätzung zu erhöhen.

Im Rahmen der Datenfusion ist eine modulare Testumgebung zum Einsatz gekommen, die es IBK ermöglicht hat das System ausgiebig und mit einem überschaubaren Umfang von Sensoren zu testen, bevor es für den AdLoNet Versuchsträger hochskaliert wurde. Auch die Probleme, die durch Messrauschen oder den Ausfall von Signalen entstehen, konnten hierdurch vorab untersucht werden.

In AP2.4 adressierte IBK Intelligente Fusions- und Analysefunktionen zur Lastüberwachung und Identifikation. Hierfür wurde ein ANFIS Netzwerk verwendet. Die Verwendung dieses Netzwerks stützt sich auf Vorarbeiten von IBK aus dem LuFo Projekt ProWinGS. In dem ProWinGS Abschlussbericht wurde die Entwicklung wie folgt motiviert: „Eine wesentliche Weiterentwicklung bestand darin, dass nun zusätzlich zur Identifikation der aerodynamischen Beiwerte eine Anpassung der aerodynamischen Verteilungen (Amplitude und Druckpunkt über Spannweite) möglich ist.“ Im Rahmen dieses AP wurde hinsichtlich dieser Intention das in G-FLIGHTS durch IBK erzeugte Modell des Flugversuchsträgers erweitert.

Dabei war es das Ziel, durch eine umfangreichere Modellierung aerodynamischer Effekte an einzelnen Komponenten eine präzisere Aussage über entstehende strukturelle Lasten abzubilden. Diese zusätzlich berücksichtigten Effekte entsprechen den Zielgrößen der Messungen der MEMS Drucksensoren, die durch IBK in diesem Projekt erstmalig zum Einsatz kamen.

Unter Verwendung des ANFIS Ansatzes zur Rekonstruktion der aerodynamischen Last wurden mit Hilfe der MEMS und weiterer lastabbildender Sensorgrößen verbesserte Aussagen über auslegungsrelevante strukturelle Lastgrößen gewonnen. Ebenfalls wurde sich die Methode dazu genutzt, Parameter für den oben beschriebenen Modellansatz zu identifizieren und somit eine Anpassung der detaillierten aerodynamischen Beschreibung vorzunehmen.

HAP3: „Erprobung und Bewertung“

In diesem HAP wurden Versuche zur Erprobung der Systeme der APs 2.1 und 2.4 sowie die Auswertung der darin erzeugten Ergebnisse durchgeführt. Diese Versuche fanden im Labor und im Windkanal statt. Die Ergebnisse haben zum einen der Generierung weiterer Daten zur Verbesserung der Systeme gedient und wurden den genannten Arbeitspaketen wieder zugeführt. In AP 3.3 wurden auf Grundlage dieser Daten schließlich auch die Bewertung und Abschlussbetrachtung durchgeführt.

Dabei ging es für IBK in AP 3.2 darum, sich auf verschiedenen Ebenen von der korrekten Funktionsweise der Systeme zu überzeugen. In Laborversuchen wurde sich zunächst vergewissert, dass die in AP 2.5 integrierten Systeme korrekt und sicher funktionieren und mit dem Flugcomputer interagieren.

So wurden die in AP 1.2 ausgewählten MEMS Sensoren in Zusammenhang mit dem in AP 2.4 entwickelten Netzwerk und dem zugehörigen Lastmodell zu einer korrekten Ermittlung von Druckverteilungen an der Versuchstragfläche eingesetzt. In Windkanalversuchen ließ sich dies gegenüber einem spezifischen Strömungsreferenzzustand sicherstellen. Aus den Windkanaldaten wurde mit Hilfe dieser Sensoren eine Anpassung des aerodynamischen Modells vorgenommen.

In AP3.3 schließt sich die Aus- und Bewertung der erzielten Ergebnisse an.

3.2 Meilensteinplanung

Abbildung 3 zeigt den Zeit- und Meilensteinplan. Es wurden insgesamt fünf Meilensteine definiert, welche die wesentlichen Projektfortschritte kennzeichnen:

- MS1 wurde erreicht, als die Konzeptionsphase (HAP1) abgeschlossen war. Zu diesem Zeitpunkt waren Detailfragen geklärt, das Vorgehen war abgestimmt und die technischen Arbeitspakete konnten starten.
- MS2 wurde erreicht, als die wesentlichen Entwicklungen zum Sensornetzwerk und zur kamerabasierten Deformationsanalyse abgeschlossen waren.
- MS3 kennzeichnet die Verfügbarkeit des Versuchsträgers.
- MS4 lag am Projektende (parallel zu MS5) und wurde erreicht, als die Gesamtverfügbarkeit des Systems zur Lastüberwachung vollständig entwickelt wurde.
- MS5 wiederum wurde nach Abschluss der Demonstration und Bewertung des Lastüberwachungssystems erreicht.

MS4 und MS5 lagen am gleichen Zeitpunkt, da das Erreichen von MS5 (die Demonstration) eine Teilvoraussetzung für MS4 war.

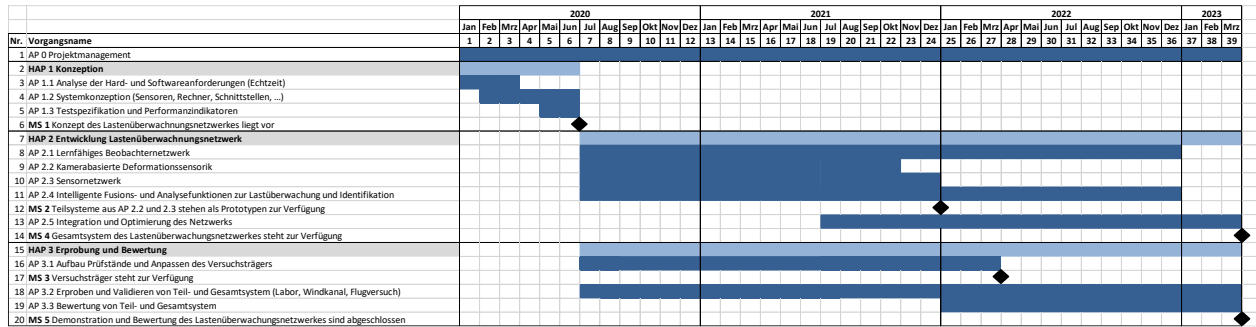


Abbildung 3: Zeit- und Meilensteinplan

4. Darstellung des wissenschaftlichen und technischen Standes, an den angeknüpft wurde

4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

IBK hat sich im Eigenantrag schwerpunktmäßig mit dem industriellen Stand der Technik auseinandersetzen, d.h. Systeme, die aktuell im Einsatz sind oder kurz vor dem Einsatz sind darzustellen. Naturgemäß sind Universitäten und Forschungseinrichtungen insbesondere dann, wenn eigene Infrastruktur (wie Versuchsflyer) vorhanden sind weiter in ihren Möglichkeiten. Den wissenschaftlichen Stand der Technik haben daher die Partner schwerpunktmäßig dargestellt.

Wie eingangs berichtet sind Lastüberwachungssysteme notwendig, um Situationen, die in-service bei der Benutzung des Flugzeuges auftreten, zu bewerten. Als Restriktion dieser Systeme ist zu bemerken, dass diese auf der gleichen Hardware laufen, auf der auch diverse andere Systeme laufen, die nicht direkt für die Flugsteuerung gedacht sind. Es ist also wesentlich, dass die dort verwendeten Lösungen sehr effizient sind, da sie parallel zu anderen Applikationen funktionieren müssen. Darüber hinaus sind Computer, die in Flugzeugen eingebaut werden, diversen Randbedingungen unterworfen. Beispielsweise sind die Strahlungslevel, denen diese Computer ausgesetzt werden, andere als bei handelsüblichen, nichtfliegenden Geräten. Hinzu kommt, dass erwartet wird, dass diese Computer sehr lange funktionieren und wenig Wartung benötigen. Bedingt dadurch erfolgen keine Updates der Hardware, die dort verwendete Hardware ist zwar robust, aber nicht ansatzweise Stand der Technik. Mit jedem neuen Flugzeugentwicklungsprojekt wird Hardware aktualisiert, aber laufende Projekte werden in der Regel aus Sicherheitsgründen nicht oder nur sehr selten aktualisiert. Die Anforderungen an eine einfache Lösung sind demnach extrem hoch, da wenig bis gar keine Rechenkapazität frei ist.

Bestehende Lastüberwachungsmethoden sind daher vergleichsweise einfach. Basierend auf einem Schwellwert (beispielsweise der vertikalen Beschleunigung) wird ein Signal gegeben oder nicht. Das Überschreitungslevel bestimmt die Art des Signals. Es folgt ein kaskadierender Prozess

mit unterschiedlichen Entscheidungsebenen bei dem nach Art von Checklisten gewisse Parameter um das signalgebende Event eingeordnet werden, bis eine Entscheidung getroffen wird. Je nach Signal kann die Entscheidung direkt vor Ort oder aber erst nach Rücksprache mit dem Hersteller getroffen werden. Der große Vorteil dieser Systeme ist die hohe Robustheit und Schnelligkeit, der große Nachteile ist der nachfolgende Kaskadierungsprozess zur Bewertung und demnach auch die hohe Anzahl an Fehlalarmen, welche in ihrer Nachverfolgung Kosten verursacht. Insbesondere letzteres öffnet Raum für Innovationen.

Wesentlich für die Motivation von AdLoNet waren neben dieser Tatsache Innovationen in Bereichen, die mit Lastüberwachungssystemen zusammenhängen. Beispielsweise erkennen Hersteller mehr und mehr den Wert der in-service aufgezeichneten Daten. Diese Daten erlauben Rückschlüsse wie Flugzeuge in der Realität verwendet werden und ermöglichen es so Annahmen aus dem Entwurf zu hinterfragen.

Im Rahmen von Digitalisierungs- und Big-Data Strategien entstehen aktuell Infrastrukturen die Innovationen in diesem Bereich unterstützen. Beispielsweise hat Airbus mit Pilot-Airlines Abkommen geschlossen und so sichergestellt, dass Flugdaten automatisch in eine Airbus Big-Data Lösung (Skywise) implementiert werden und dort zur Verfügung stehen. Ziel ist es, diese Daten automatisch auszuwerten und sowohl einzelne Flüge als auch Flüge gemeinsam betrachten zu können.

Dies eröffnet Möglichkeiten vielfältiger Art. Liegen Daten in der beschriebenen Art und Weise vor, so lassen sich diese nutzen, um beispielsweise on-board, d.h. fliegende Lastbeobachter deutlich effizienter zu trainieren und dafür zu sorgen, dass diese bereits mit hoher Qualität funktionieren. Solche Systeme könnten auch wesentlich einfacher aktualisiert werden, da sich die Charakteristik des Beobachters per se nicht ändert, sondern lediglich Details. Eine deutlich erhöhte Flexibilität ist daher möglich.

AdLoNet ist durch diese Situation motiviert und zielte darauf ab, Systeme in der beschriebenen Art aufzubauen und diese Methodik als Basis für zukünftige Lösungen, die dann spezifisch an Anforderungen aus der Industrie angepasst werden, zu vermarkten.

4.2 Bisherige Arbeiten von IBK

IBK ist seit mehr als 20 Jahren im Bereich Lasten/ Aeroelastik kommerziell aktiv, dies beinhaltet auch die Bearbeitung mehrere Projekte im Unterauftrag von Kunden in den Bereichen

- Auswertung von Flugversuchsdaten
- Auswertung von in-service Daten
- Entwicklung von Lastabminderungssystemen
- Entwicklung von Lastüberwachungssystemen
- Durchführung und Auswertung von Tests im Labormaßstab/ Windkanal

Besonders hervorzuheben sind in den Vorarbeiten verschiedene Teilprojekte:

- Im Projekt E2BLAS hat IBK in Kooperation mit der Universität in Magdeburg an der Entwicklung von Lastabminderungssystemen auf Basis von Model-Predictive Control gearbeitet. Ein starker Fokus der Aktivitäten lag auf dem Bereich Echtzeitfähigkeit des verwendeten Systems. Diese Echtzeitfähigkeit wurde im Rahmen von E2BLAS im Windkanal in Mailand getestet, indem dort ein elastisch skaliertes Modell mit Böen angeregt wurde und die Echtzeitfähigkeit des funktionierenden Lastabminderungssystems demonstriert werden konnte. Bestandteil eines MPC-Systems ist ein sehr stark vereinfachtes Modell des Flugzeuges mit den entsprechenden Steuerflächen. Die Steuerflächenpositionen werden hierbei in jedem Zeitschritt bezüglich der Anströmung unter Berücksichtigung eines Prädiktionshorizontes (d.h. einer Annahme über die Entwicklung der Anregung des Flugzeuges) optimiert. Die Optimierung erfolgt unter der Maßgabe der Lastenreduktion, die Lasten werden auf Basis des vereinfachten Modells berechnet.
- In dem Lufo-Projekt G-FLIGHTS (Ende 09/2019) hat IBK Lastabminderungssysteme entwickelt, die auf Basis von Lastenschätzern das Lastabminderungssystem eines Flugzeuges steuern. Im Gegensatz zu aktuell verwendeten Eingangsgrößen wie beispielsweise Beschleunigungen ermöglicht die Verwendung von Lasten eine optimierte Regelung, da Beschleunigungen nicht per se zu hohen Lasten führen. Lastschätzer und Lastüberwachungssysteme sind nicht identisch, aber verwandte Technologien. Beide sollen auf Basis von Messdaten zu einem bestimmten Zeitpunkt die dazugehörigen Lasten liefern.
- Ebenfalls im Rahmen von G-FLIGHTS hat IBK einen bereits bestehenden Prototyp zur Identifikation der aerodynamischen Kennwerte aus Flugversuchsdaten heraus weiterentwickelt. Dieser wird seither verwendet, um Aerodynamik-Modelle mit Flugversuchsdaten zu korrigieren.
- Im Unterauftrag von Airbus hat IBK ein Lastabminderungssystem basierend auf Fuzzy-Logik entwickelt, dessen Wirksamkeit im Rahmen von Simulationen unter Verwendung von Flugdaten gezeigt werden konnte.
- Im Projekt INFLIGHT kooperierte IBK mit den Universitäten in Magdeburg und Braunschweig und hat in einem Flugversuch die Wirksamkeit eines LIDAR-Systems, d.h. einer vorausschauenden Strömungsmessung in Verbindung mit einem MPC-Regler demonstriert. Das dort verwendete Flugzeug war ein Kleinflugzeug und wurde für diesen Fall entsprechend aufgerüstet.

Diese Auswahl an Vorarbeiten deckt die Projekte in jüngster Vergangenheit ab, ist aber nicht vollständig. IBK hat über einen Zeitraum von fast 15 Jahren Technologien zur effizienten Auswertung von in-service Daten entwickelt, mit dem Ziel Ermüdungsstatistiken abzuleiten. Die entsprechende Methodik ist aufwendig, da eine vollständige Flight-Path and Gust reconstruction durchgeführt wird. Daneben hat IBK den Flugversuch der A350-900 durch Teilnahme am sogenannten „Yellow-Team“ personell unterstützt.

Insgesamt liegt im Themenkomplex Lastüberwachung, Lastabminderung und Auswertung von Flugversuchen bzw. in-service Daten somit eine große Erfahrung vor.

5. Darstellung zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen

5.1 Verbundpartner

Der Verbund AdLoNet besteht aus drei Partnern dem KMU IBK, dem Forschungszentrum DLR und der Universität TUHH. Vorrangig führte jeder der beteiligten Projektpartner Tätigkeiten auf seinem besonderen Kompetenzbereich durch.

Seitens IBK wurde die bereits etablierte Kooperation mit der TUHH, insbesondere mit dem Institut für Flugzeug-Systemtechnik weitergeführt. Diese Kooperation wurde im Rahmen von Entwicklungsaktivitäten für die Firma Airbus aufgebaut und hat aktuell eine Historie von >10 Jahren.

IBK kooperiert ebenfalls bereits lange mit verschiedenen DLR-Instituten, dies schließt Aktivitäten mit dem Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik ein (beispielsweise im den Projekten UHURA, AfloNEXT sowie in unterschiedlichen Cleansky-Projekten). Die Implementierung des DLRs in diesen Verbund hat die Aktivitäten der anderen Partner bereichert, da mit der Deformationsmessung ein messtechnische Innovation auf dem Flugversuchsträger der TUHH eingesetzt wurde.

Die folgende Abbildung 4 stellt grob die Aktivitäten, Schwerpunkte und Rollen der unterschiedlichen Partner zusammen.

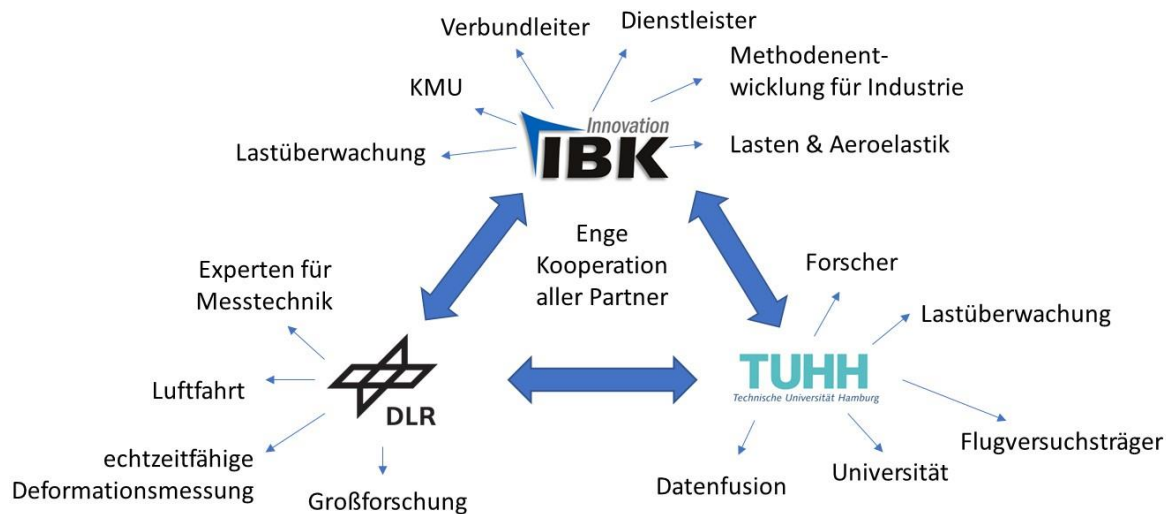


Abbildung 4: Darstellung der Verbundpartnerorganisation

Zusammenarbeit mit den Projektpartnern:

In HAP 1 hat IBK mit dem DLR und der TUHH eng bei der Konzeption und Spezifikation der Systeme zusammengearbeitet. Dies war wesentlich um aufeinander abgestimmte Systeme zu entwickeln. In HAP 2 erfolgte mit dem DLR ein enger Austausch über den Fortschritt der Deformationsmessung. Diese wurde vom DLR komplett eigenständig entwickelt. Wichtig war allerdings, dass die Einschränkungen der Methode allen Beteiligten bekannt sind. IBK und die TUHH haben in HAP 2 kooperiert und Modelle sowie Simulationsstände ausgetauscht um gegenseitige Sichtbarkeit des Fortschritts zu generieren.

In HAP 3 erfolgte die gemeinsame Auswertung der Teilsysteme (pro Partner jeweils die in der jeweiligen Verantwortung) sowie die gemeinsame Darstellung der Ergebnisse.

5.2 Unterauftragnehmer

Seitens IBK hat keine Einbindungen von Dritten stattgefunden.

6. Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

6.1 HAP 0: „Projektmanagement“

Mit allem Projektbeteiligten wurden regelmäßige, zweiwöchentliche Telefonkonferenzen gehalten, die seitens IBK geleitet wurden. Hierin wurden Fortschritte im Projekt besprochen und kommende Aufgaben verteilt. Die Telefonkonferenzen trugen darüber hinaus dazu bei sich auf kurzem Weg abzusprechen und das Verständnis über Arbeiten der anderen Partner zu fördern. Die Kommunikation unterstützte die zielgerichtete Bearbeitung der Projektinhalte und förderte die Zusammenarbeit.

Die persönlichen Projekt-Meetings des ADLONET-Projektes wurden nach Bedarf abgehalten. Gegenüber dem Projektträger wurden regelmäßig die aktuellen Stände des ADLONET-Projektes berichtet.

6.2 HAP 1: „Konzeption“

Im HAP 1: „Konzeption“ wurden in AP 1.1 die Anforderungen an die Hard- und Software sowie die Randbedingungen durch den Flugversuchsträger definiert. In AP 1.2 erfolgte die Systemkonzeption für das Sensor und Beobachternetzwerk. In AP 1.3 wurden die Testspezifikationen und Kriterien zur Bewertung der Konzepte definiert.

Der Meilenstein *MS1 „Konzept der Lastüberwachungsnetzwerks liegt vor“* wurde mit der Verteilung der Konzeptbeschreibungen durch die Deliverables DP1-1.1, DP1-1.2, DP1-1.3 an alle Projektpartner erreicht. Hierbei ist anzumerken, dass die drei Dokumente zu einem Gesamtdokument zusammengefasst wurden.

6.2.1 AP 1.1 „Analyse der Hard- und Softwareanforderungen (Echtzeit)“ (06/2021-08/2021)

Ziel des APs war die Anforderungen an Hard- und Software zu definieren. Hierbei wurden Anforderungen des Versuchsträgers (Dimona der TUHH) sowie die Anforderungen an die notwendigen Softwaremodule (Lastenschätzer, Fusionslösungen), auch mit Bezug zur Echtzeitfähigkeit, und Anforderungen an die integrierten Sensoren (MEMS Drucksensoren, DMS, IMU, CamS) berücksichtigt.

Die im AP1.1 bearbeiteten Inhalte seitens IBK umfassen die Hardwareanforderungen an die MEMS Drucksensoren sowie die Softwareanforderungen an die Fusionsalgorithmen und an den Lastenschätzer.

Die Anforderungen wurden von allen Partnern zusammengetragen und in dem Deliverable DP1-1.1 zusammengefasst.

6.2.2 AP 1.2 „Systemkonzeption (Sensoren, Rechner, Schnittstellen)“ (07/2021-11/2021)

Ziel des APs war die Konzeption der Sensorsysteme für die prototypische Tragfläche festzulegen. Diese Systemkonzeption wurde von allen Partnern durchgeführt und die Konzepte in dem Deliverable DP1-1.2 zusammengefasst.

Die in diesem AP bearbeiteten Inhalte seitens IBK umfassen die Positionierung der MEMS Sensoren in der prototypischen Tragfläche. Die Tragfläche kann prinzipiell in vier Segmente unterteilt werden. Zu jedem der vier Segmente gehört eine Steuerfläche. Die Positionierung wurde dabei so gewählt, dass die Tragflächenquerschnitte, die mit MEMS Drucksensoren ausgestattet werden jeweils durch eine der Steuerflächen gehen, siehe Abbildung 5 in rot. Ein weiterer Querschnitt befindet sich außerhalb der vierten Steuerfläche, um den Druckverlauf in der Nähe der Tragflächenspitze abzubilden. Die fünf Messabschnitte wurden von innen nach außen mit LSM1 - LSM5 bezeichnet.

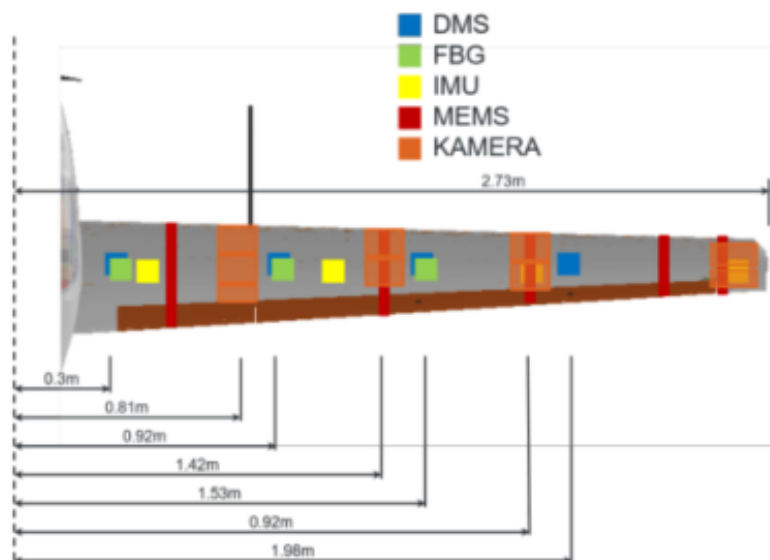


Abbildung 5: Sensorkonzept für den Windkanalprototypenflügel.

Innerhalb eines Tragflächenquerschnitts sind die MEMS Drucksensoren so verteilt, dass die typische Druckverteilung an einer Tragfläche möglichst gut gemessen werden kann. Das bedeutet, dass in Bereichen mit einem großen Druckgradienten (vgl. Abbildung 8) die Dichte der MEMS Drucksensoren höher ist, siehe Abbildung 6. Da im Bereich der Steuerflächen nicht genug Raum zum Einbringen der MEMS Sensoren vorhanden ist, wurden keine Drucksensoren in die Steuerflächen eingebracht. Das Konzept zur Installation der Sensoren im Querschnitt besteht aus zwei 3D-Druckteilen, in die die MEMS Sensoren integriert und verkabelt werden. Diese zwei

Profilhälften (vgl. Abbildung 6) wurden dann, ausgerüstet mit den Sensoren, von oben (blau) und unten (rot) um den Holm zwischen zwei Rippen verschraubt. Die 3D-Druckteile wurden von der Überspannung der in Holm-Rippen-Bauweise ausgeführten Tragfläche ausgespart.

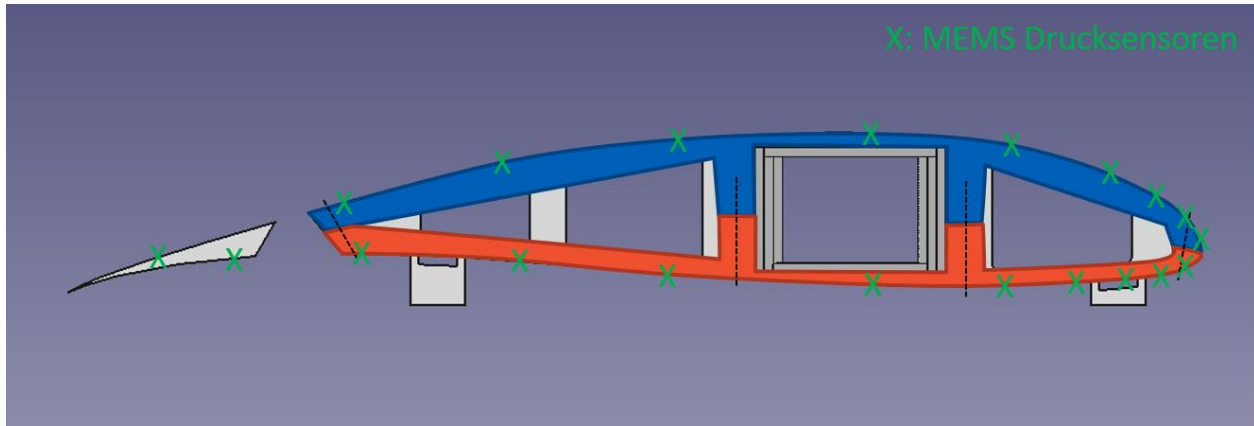


Abbildung 6: Positionierung der MEMS Drucksensoren im Tragflächenquerschnitt.

Die Daten der MEMS Drucksensoren werden über das I2C Bus Protokoll zusammengeschlossen, siehe Abbildung 7. Die Datenaufzeichnung und Datenverarbeitung zur Bestimmung des Druckpunktes und der Gesamtkraft im Tragflächenquerschnitt erfolgt auf dem Raspberry Pi. Die Übertragung der reduzierten Information über die Auftriebsverteilung auf der Tragfläche werden über ein CAN-Bus an den Flugcomputer weitergereicht, auf dem auch die Fusion mit weiteren Sensoren stattfindet.

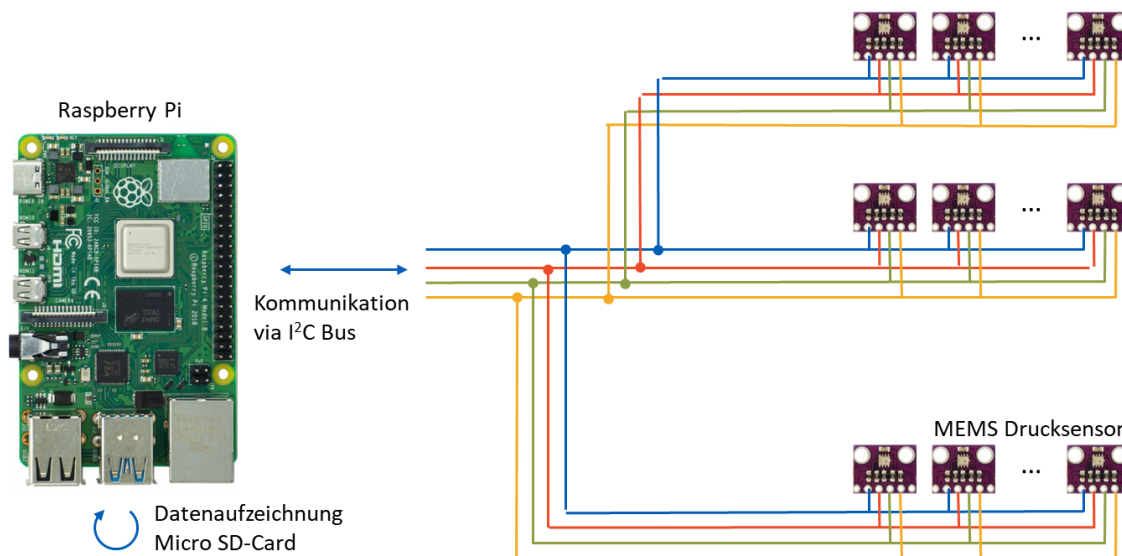


Abbildung 7: Hardwarekonzept zur Kommunikation mit den MEMS Drucksensoren.

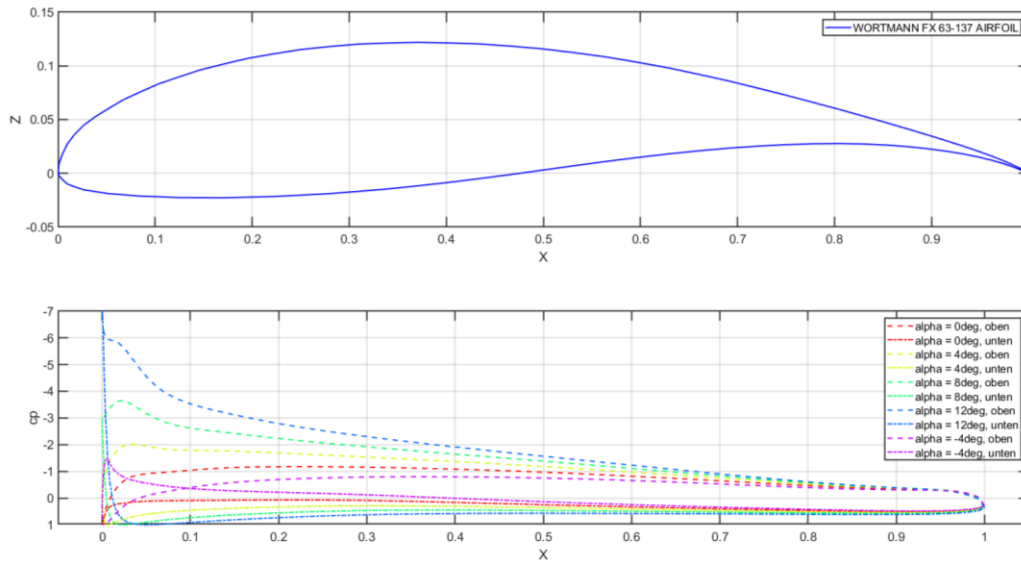


Abbildung 8: 2D CFD Druckverteilung an Wortmann 63-137 Profilquerschnitt für unterschiedliche Anströmwinkel alpha.

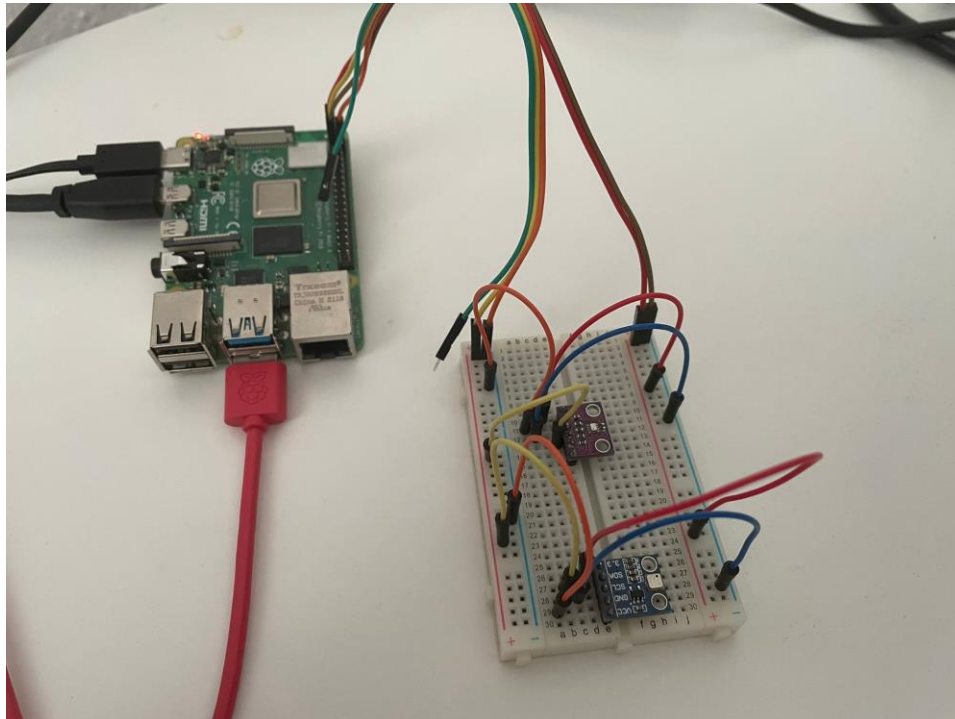


Abbildung 9: Reduzierte Modulare Testplattform zur Qualifizierung der MEMES Drucksensoren.

Für die Qualifizierung der MEMS Drucksensoren wurden 2D CFD Simulationen des verwendeten Tragflächenprofils Wortmann 63-137 mit unterschiedlichen Anströmbedingungen durchgeführt, siehe Abbildung 8. Durch die Simulationen kann der durch die Drucksensoren abzudeckende

Druckbereich abgeschätzt werden. Der Flugbereich wurde mit $-4^\circ < \alpha < 12^\circ$ für die Abschätzung gewählt. Der zu betrachtende Druckbereich der Simulationen liegt somit zwischen einem Druckbeiwert von $c_p = 1$ und $c_p = -7$. Daraus folgt ein absoluter Druckbereich bei ca. 40 m/s Fluggeschwindigkeit von ca. 94 kPa bis ca. 103 kPa. Dieser Druckbereich wird von den meisten gängigen MEMS Drucksensoren abgedeckt.

Für die Qualifizierung der Kommunikation zu den MEMS Drucksensoren wurde in einem Laborversuch eine reduzierte Testplattform aufgebaut (siehe Abbildung 9), die die Kommunikation über das I2C Bus Protokoll an zwei MEMS Drucksensoren erprobt. In der Abbildung 10 und der Abbildung 11 sind jeweils Zeitschriebe der beiden MEMS Drucksensoren BMP180 und BMP280 sowie des später ausgewählten Drucksensors FXPS7115D4 von NXP dargestellt. In Abbildung 10 ist der statische Luftdruck an beiden BMP Sensoren mit 100 Hz gemessen. Der gemessene Wert passt zu dem mittleren Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe mit 101,325 kPa. Der NXP Sensor wurde zu einem späteren Zeitpunkt aufgezeichnet und zeigt dadurch einen anderen statischen Luftdruck. In Abbildung 11 werden die beiden Sensoren nacheinander jeweils mit einem Luftstrom beaufschlagt. Die Änderung des Druckes in beiden Sensoren ist gut zu erkennen. Auch hier wurde der NXP Sensor zu einem späteren Zeitpunkt dem selben Test unterzogen.

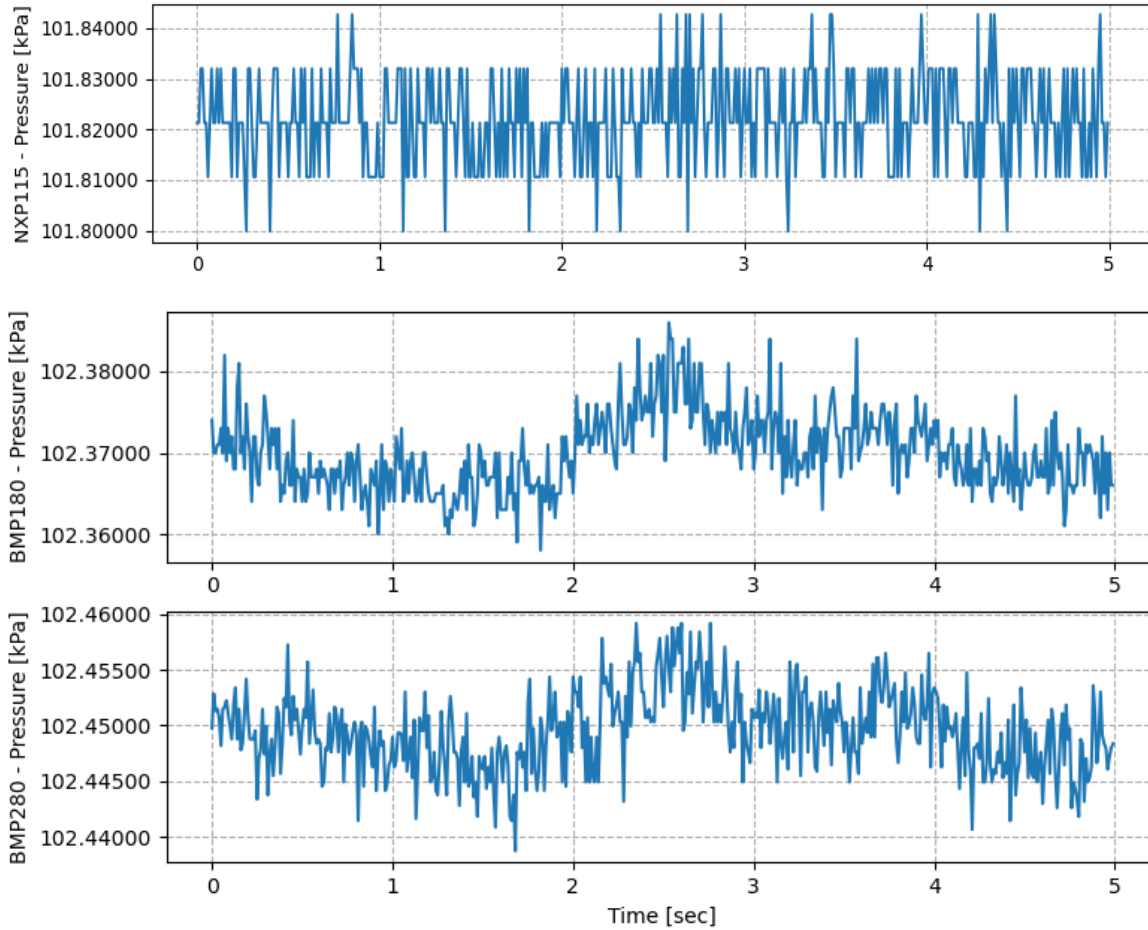


Abbildung 10: Messung des statischen Luftdrucks mit drei MEMS Drucksensoren: oben FXPS7115D4, Mitte BMP180, unten BMP280.

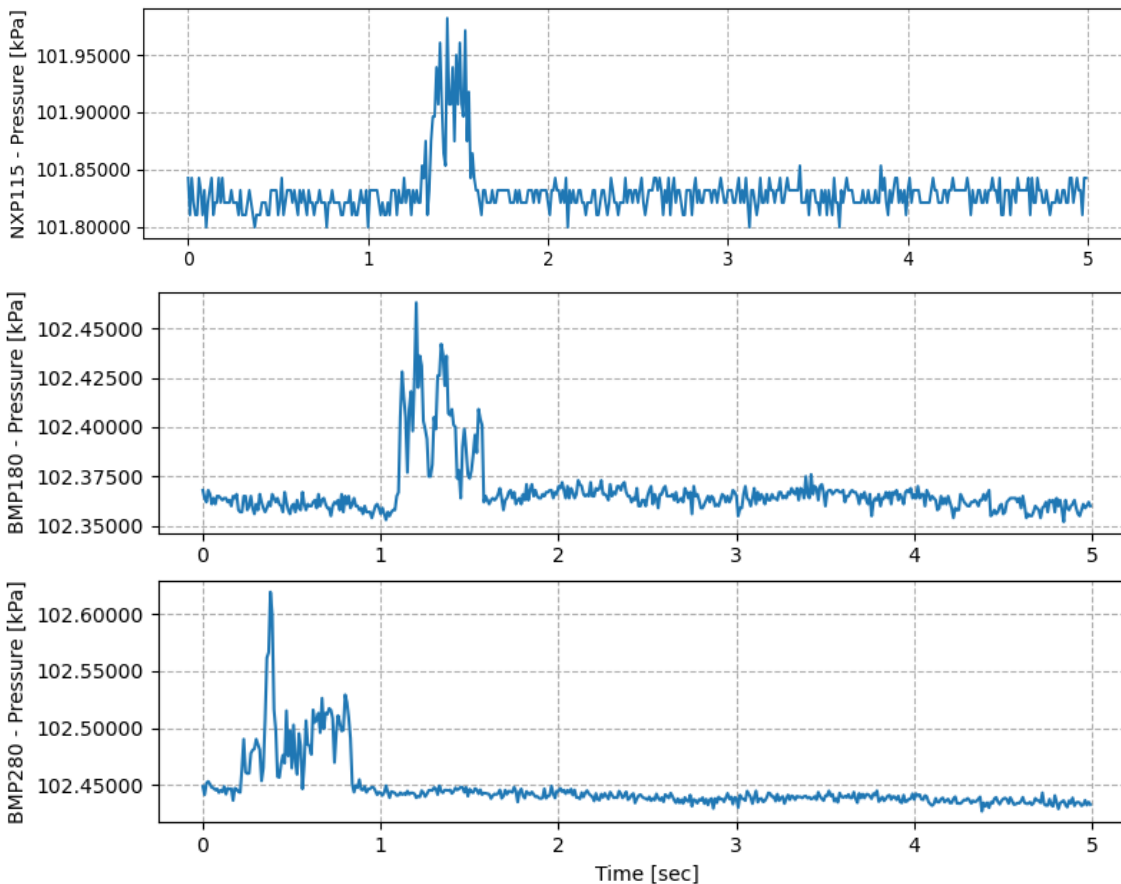


Abbildung 11: Druckdaten von drei MEMS Drucksensoren: FXPS7115D4 oben, BMP180 Mitte, BMP280 unten. Druckänderung durch Luftanströmung zwischen $t = 0$ s bis 1 s am BMP280 und $t = 1$ s bis 1,5 s am BMP180 und FXPS7115D4.

Der letzten Endes ausgewählte MEMS Luftdrucksensor ist der FXPS7115D4 von NXP [1]. Vorteil dieses Sensors gegenüber den meisten vergleichbaren Sensoren ist die Programmierbarkeit der Sensoradresse, die zum Ansprechen des Sensors notwendig ist. Der Vorteil der programmierbaren Adresse liegt in der Verkabelung der einzelnen Sensoren. Sensoren, die ab Werk mit einer vorprogrammierten Adresse versehen sind, lassen sich nur über eine sensorspezifische Verkabelung ansprechen. Die Anzahl der benötigten Kabel ist also direkt proportional zu der Anzahl der verwendeten Sensoren. Durch die programmierbare Adresse hingegen, kann auf ein Bus-System für die Sensoren zurückgegriffen werden, in dem jeder einzelne Sensor softwareseitig angesprochen werden kann. So werden lediglich 4 Kabel (2x Spannungsversorgung, 2x Datenleitung) benötigt.

Der Sensor selbst ist mit seinen Abmessungen von 4 mm x 4 mm x 2 mm sehr klein, siehe Abbildung 12. Da es sich bei dem Sensor aber um ein oberflächenmontiertes Bauelement (SMD) handelt, musste der Sensor auf eine kleine Leiterplatte montiert werden. Diese wurde von

IBK entworfen und vollständig montiert bestellt. Die Leiterplatte hat Abmessungen von 18 mm x 10 mm x 4 mm. Der Lagenaufbau der Leiterplatte ist in Abbildung 13 gezeigt und der Schaltplan der Leiterplatte ist in Abbildung 14 dargestellt.

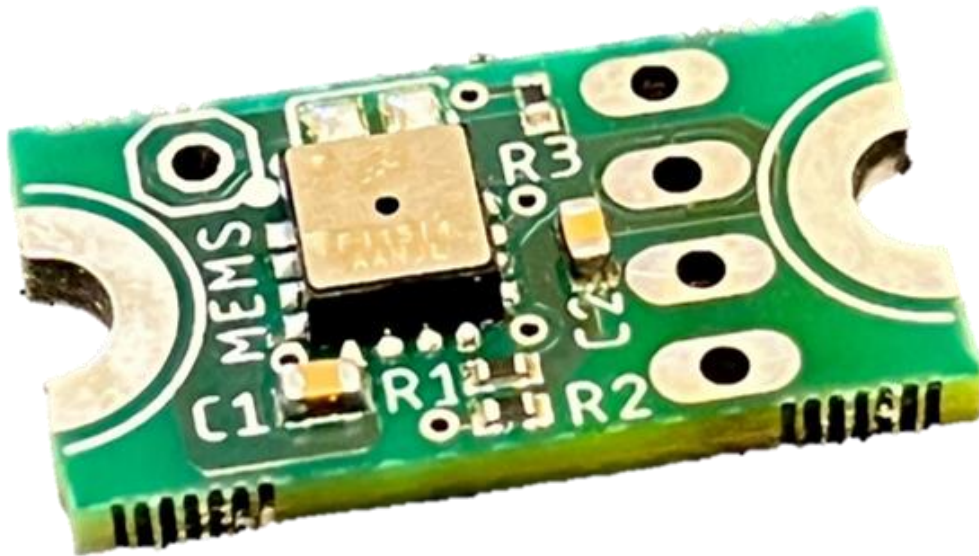


Abbildung 12: Entworfenere MEMS Luftdrucksensorplatine bestückt mit einem FXPS7115D4 Luftdrucksensor

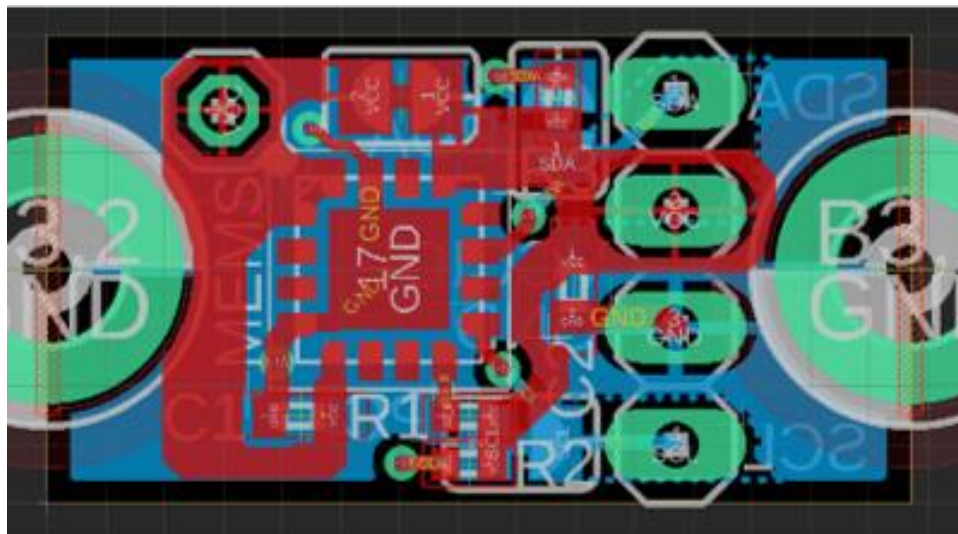


Abbildung 13: Entworfenere MEMS Luftdrucksensorplatine: Lagenaufbau

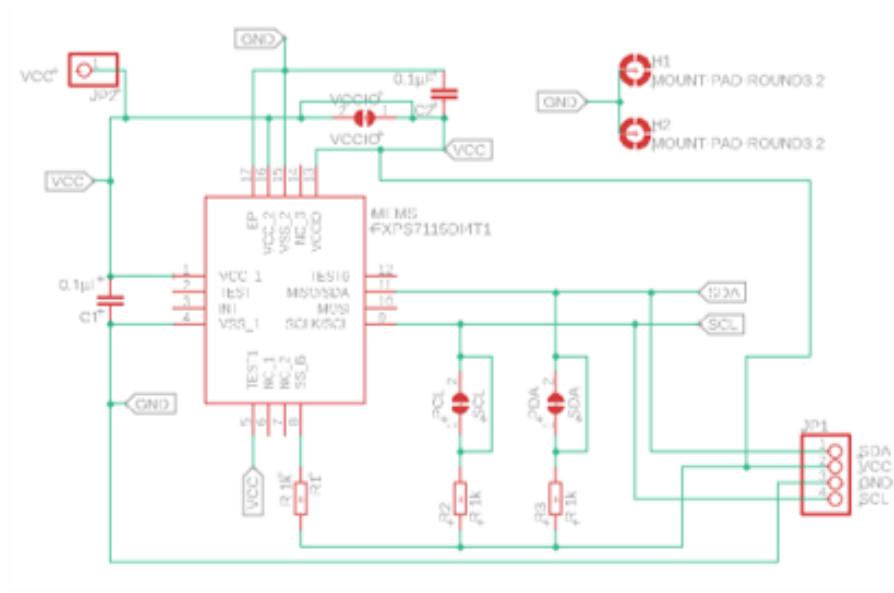


Abbildung 14: Schaltplan für die entworfene MEMS Luftdrucksensorplatine

Modulare Testplattform

Zum Programmieren der MEMS Luftdrucksensoren und zum anschließenden Testen wurde die modulare Testplattform (Abbildung 15) bestehend aus einem Raspberry Pi 4B (links im Bild) verwendet. Dieser einfache Aufbau erlaubt die Durchführung der Laborversuche und kann gleichzeitig im Verlauf des Projektes genutzt werden, um im Flugversuchsträger integriert zu werden. Das erstellte Werkzeug zum Programmieren und Testen der einzelnen MEMS Luftdrucksensoren (rechts im Bild), vgl. auch Abbildung 16, erlaubt den schnellen und einfachen Austausch der einzelnen Sensoren. Nachdem die individuellen Adressen der Sensoren programmiert wurden und ein erster Funktionstest durchgeführt wurde, wurden die Sensoren in die 3D-gedruckten Tragflächenprofile der Messstationen eingebaut.

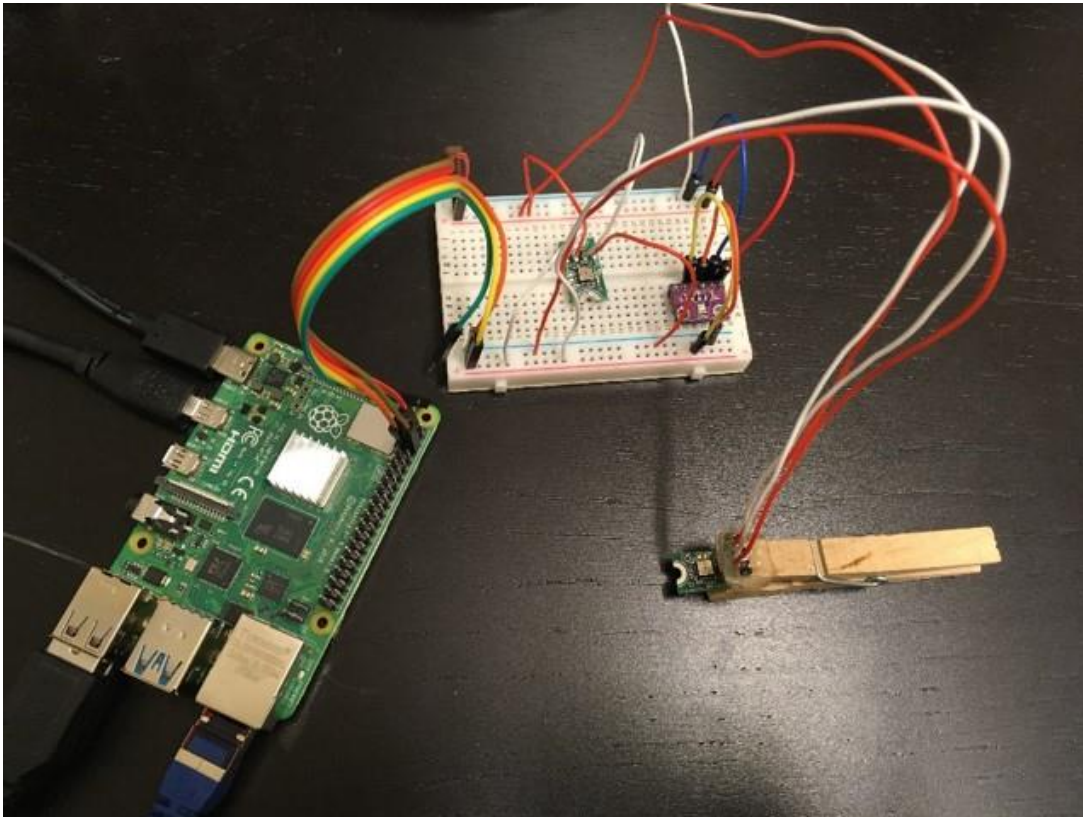


Abbildung 15: Modulare Testplattform zum Programmieren und Testen der MEMS Luftdrucksensoren

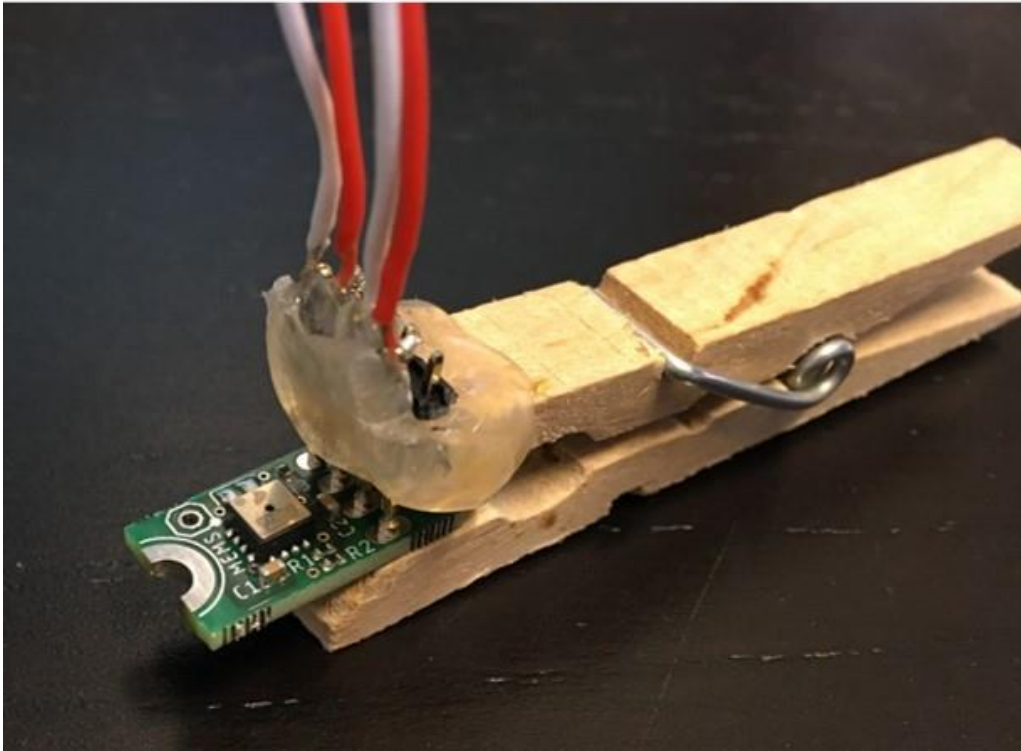


Abbildung 16: Werkzeug zur Programmierung und zum Testen der MEMS Luftdrucksensoren

Sensoranbindung

Die erstellten MEMS Luftdrucksensoren werden pro Messstation in ein 3D-gedrucktes Tragflächenprofil eingesetzt, siehe Abbildung 17. Das Tragflächenprofil wird zwischen zwei Rippen auf dem Holm der Tragfläche angebracht. Durch das 3D-gedruckte Profil können die MEMS Sensoren nah an der aerodynamischen Oberfläche der Tragfläche integriert werden. Außerdem erlaubt der 3D-Druck eine flexible und optimale Raumnutzung bei geringen Herstellungskosten.

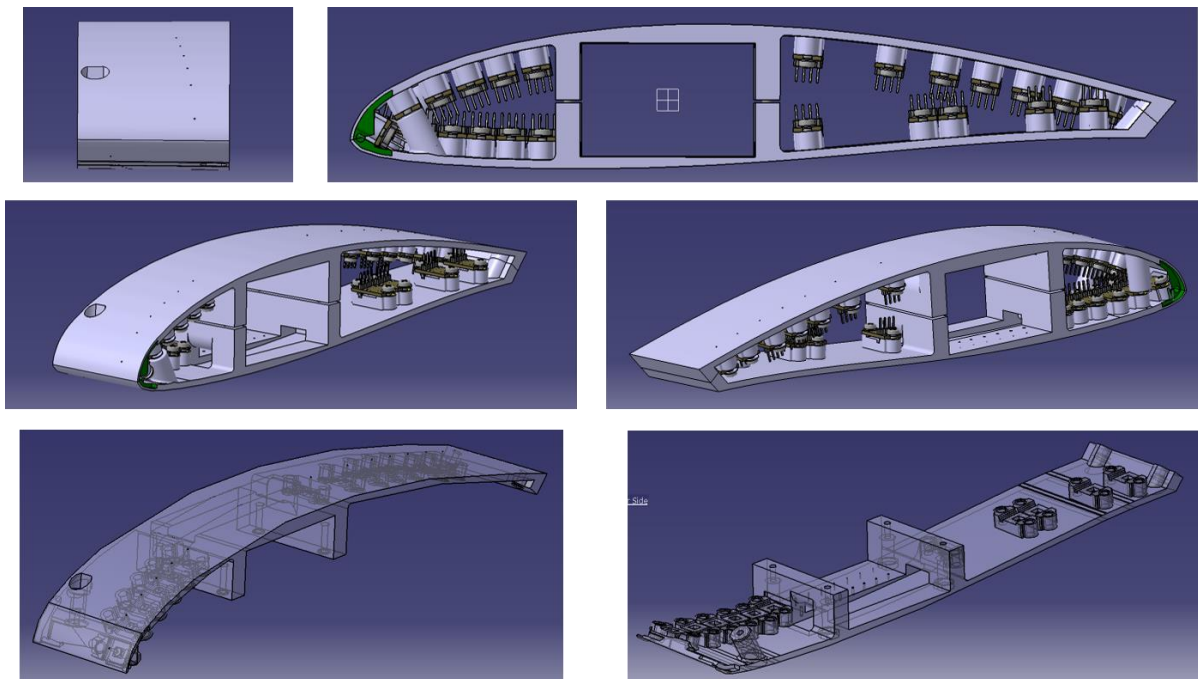


Abbildung 17: Tragflächenprofil einer MEMS Messtation zur Integration zwischen zwei Tragflächenrippen

Die MEMS Leiterplatten werden mit zwei Schrauben fixiert und der Sensor wird mit einem O-Ring (grün) gegen das 3D-gedruckte Bauteil luftdicht abgedichtet, siehe Abbildung 18.

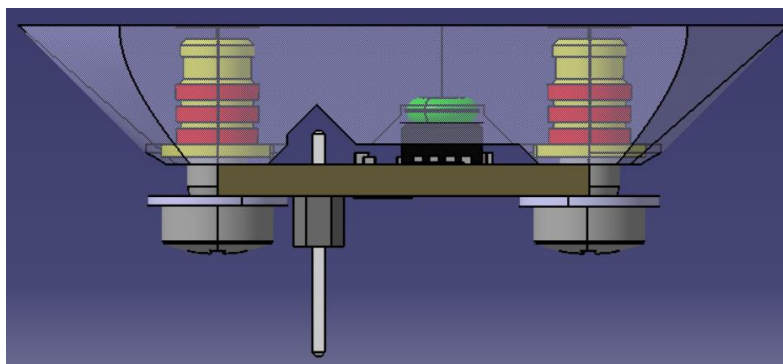


Abbildung 18: MEMS Sensoranbindung in ein 3D-gedrucktes Tragflächenprofil

In Abbildung 19, Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die MEMS Sensoren zu sehen, wie sie in den 3D-Druck des Tragflächenprofils integriert sind. Der 3D-Druck besteht aus zwei Hälften, der oberen aerodynamischen Fläche und der unteren aerodynamischen Fläche. Die beiden Hälften werden mit Schrauben verbunden und klemmen den Holm der Tragfläche in der Mitte ein. So ist eine exakte Positionierung des 3D-Drucks in der in Holm Rippen Bauweise ausgeführten Tragfläche möglich.

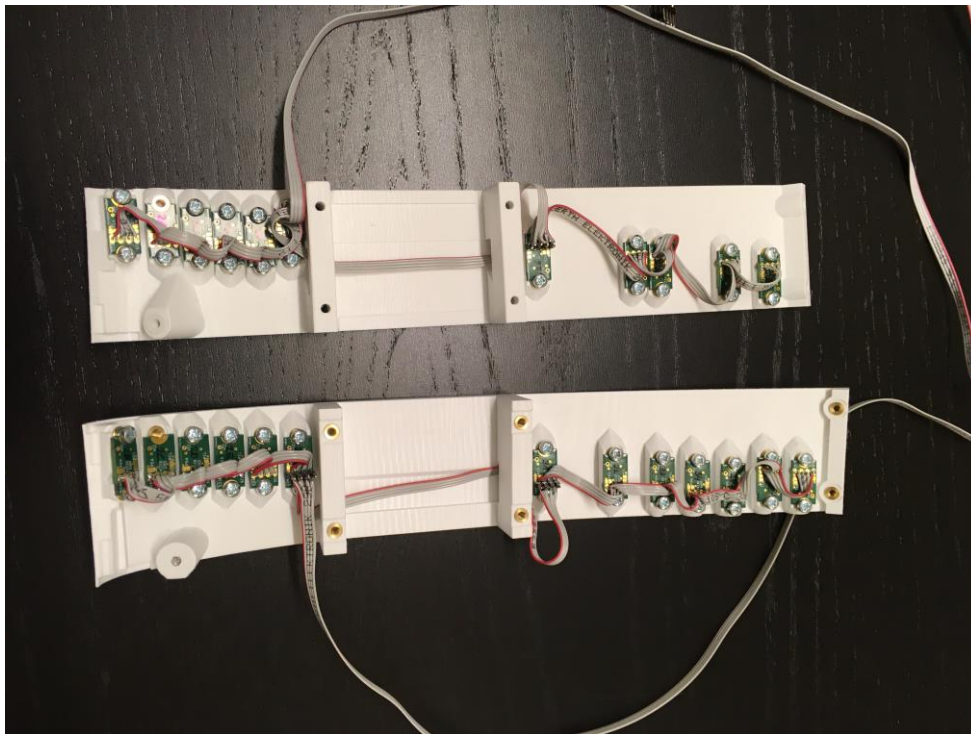


Abbildung 19: Integrierte MEMS Luftdrucksensoren in einem 3D-gedruckten Tragflächenprofil

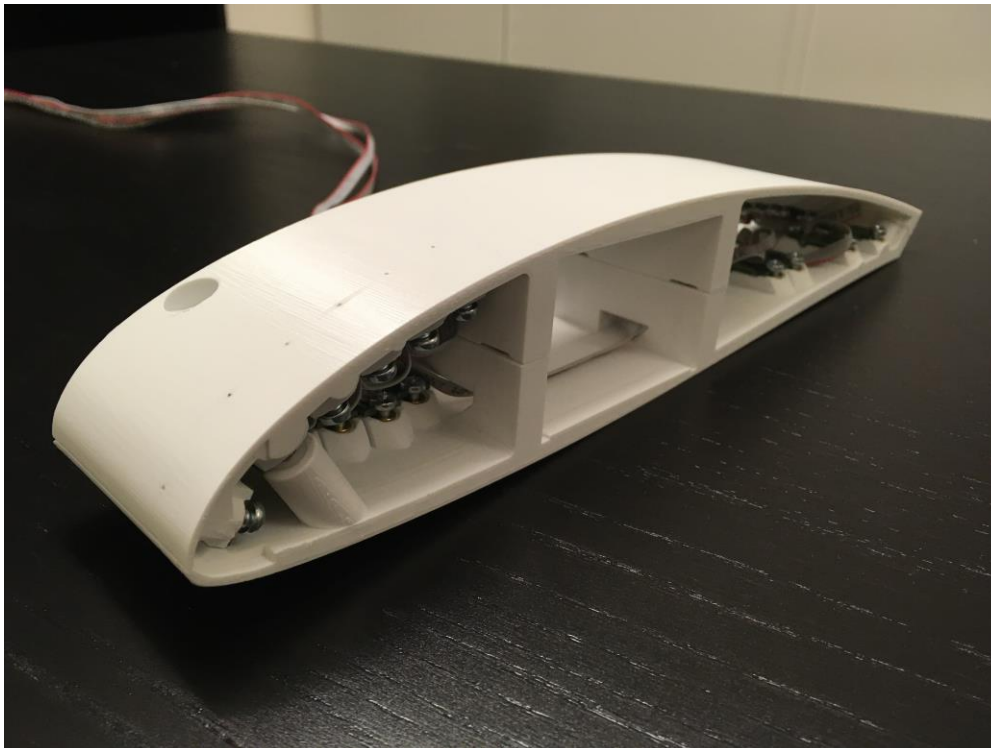


Abbildung 20: 3D-gedrucktes Tragflächenprofil einer MEMS Luftdrucksensor Messstation



Abbildung 21: 3D-gedrucktes Tragflächenprofil einer MEMS Luftdrucksensor Messstation. Seitenansicht hinterer Teil



Abbildung 22: 3D-gedrucktes Tragflächenprofil einer MEMS Luftdrucksensor Messstation. Seitenansicht vorderer Teil

Durch die Corona Pandemie und die dadurch verursachten Verzögerungen insbesondere bei der Hardwarebeschaffung sowie die deutlich gestiegenen Hardwarekosten wurde entschieden, von der geplanten fliegenden Versuchsplattform Abstand zu nehmen. Die Bauteile waren lange Zeit nicht lieferbar und wären zu einem Zeitpunkt im Projekt verfügbar gewesen, zu dem auch erste Ergebnisse durch Windkanaldaten zur Verfügung stehen. Die geplanten Kosten für die fliegende Versuchsplattform wurden für die Sensorbeschaffung und Sensorintegration in die Tragfläche genutzt. Die durch die fliegende Versuchsplattform nicht erzeugten Daten wurden durch zusätzliche Simulationen und Nutzung von Messdaten aus anderen Projekten kompensiert.

6.2.3 AP 1.3 „Testspezifikation und Performanzindikatoren“ (10/2021-11/2021)

Ziel des APs war die Definition von Kriterien zur Bewertung der Performanz des entwickelten Sensor- und Beobachternetzwerks sowie die Definition der Testspezifikationen.

Die Spezifikationen für die Versuche wurden in vier Hauptkategorien unterteilt:

- Laborversuche
- Windkanalversuche
- Virtuelle Flugversuche und Simulationsstudien
- Reale Flugversuche

Seitens IBK wurden vor allem die Testspezifikationen für die Laborversuche, die Windkanalversuche und die realen Flugversuche mit den MEMS Drucksensoren definiert. Außerdem wurden die Umfänge der Simulationen zur Erprobung der Fusionsalgorithmen und des Lastenschätzers definiert. Des Weiteren wurde gemeinsam mit den anderen Partnern die Bewertungskriterien erstellt, auf deren Grundlage das Sensor- und Beobachternetzwerk zur Überwachung von Flugzeugstrukturlasten bewertet wird.

Die Anforderungen aller Partner wurden zusammengetragen und in dem Deliverable DP1-1.3: „Konzeptbeschreibung des Lastenüberwachungsnetzwerks: Testspezifikation und Performanzindikatoren“ festgehalten.

6.3 HAP 2: „Entwicklung Lastüberwachungsnetzwerk“

In diesem HAP wurde das Lastüberwachungsnetzwerk entwickelt. Dazu wurde in AP 2.1 ein Beobachternetzwerk auf Basis von Simulations- und Messdaten trainiert. Durch die Fusion von Modelldaten und Sensoren können dann Zusammenhänge berücksichtigt werden, die durch das in der Simulation verwendete Modell gezielt nicht abgebildet sind. Dies ermöglicht die Komplexität eines aeroelastischen Modells verhältnismäßig einfach zu gestalten und über Sensordaten die Genauigkeit der Schätzung zu erhöhen. In AP2.4 adressiert IBK Intelligente Fusions- und Analysefunktionen zur Lastüberwachung und Identifikation. Hierfür wurde ein Fusionsnetzwerk verwendet um mit den Druckmessungen der MEMS Sensoren und unter Berücksichtigung weiterer Messsignale anderer Sensoren die aerodynamischen Modellparameter zu identifizieren. Auf Grundlage eines aeroelastischen Modells konnten dann die strukturellen Lastgrößen ermittelt werden. In AP 2.5 erfolgte dann die Integration des Sensor- und Beobachternetzwerks sowie die Optimierung des Netzwerks zum Einsatz auf dem Flugmessrechner im Flugversuchsträgers.

6.3.1 AP 2.1 „Lernfähiges Beobachternetzwerk“ (12/2021-05/2024)

In diesem AP wurde das im LuFo Projekt G-FLIGHTS auf einem vergleichbaren Flugversuchsträger zum Einsatz gekommene System zur Lastenschätzung an die in ADLONET bestehenden Verhältnisse adaptiert. Die Adaption bzw. das Training des Lastenschätzers erfolgt auf Grundlage von Simulationen, die mit Hilfe eines Modells des Flugversuchsträgers erzeugt wurden. Dazu wurde das ebenfalls bestehende Aeroelastisches Modell aus dem LuFo Projekt G-FLIGHTS herangezogen und ebenfalls an die neuen Verhältnisse in ADLONET angepasst um die Trainingsdaten erzeugen zu können.

Da sich strukturelle Lasten nur mit sehr hohem Aufwand messen lassen, werden diese oft durch einfach zu messende flugmechanische Größen und ein möglichst detailgetreues Modell der Flugzeugstruktur bestimmt. Die strukturellen Lasten dienen häufig als Zielgröße für Regelungssysteme, z.B. Manöver- oder Böenlastabminderungssysteme (vgl. Abbildung 23), weshalb auf die möglichst exakte Lastenschätzung großen Wert gelegt wird. Bei konventionellen Lastenschätzern ist die Qualität der Schätzung abhängig von der Qualität des zu Grunde liegenden Strukturmodells. In diesem AP wurde ein lernfähiges Beobachternetzwerk als Lastenschätzer eingesetzt, welches durch Simulationsdaten und Messdaten trainiert wurde.

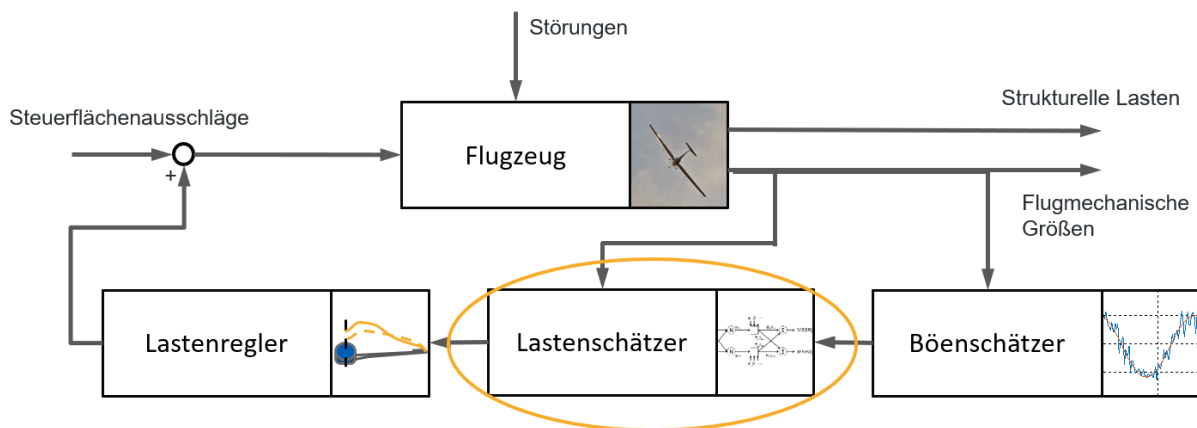


Abbildung 23: Systeme zur Reduktion struktureller Lasten eines Flugzeugs mittels eines Lastenreglers basierend auf geschätzten strukturellen Lasten

Das vorhandene aeroelastische Modell hatte grundsätzlich den gleichen Aufbau wie die in ADLONET verwendete Tragfläche (siehe Abbildung 24). Das Profil der Tragflächen und somit die Aerodynamik ist im Grunde gleichgeblieben. Der strukturelle Aufbau der Tragfläche hat sich nur teilweise geändert. Da die Tragfläche in einer Holm-Rippen-Bauweise aus Holz aufgebaut ist und die in ADLONET verwendeten Sensoren teilweise eine Versteifung von zwei oder mehr Rippen erfordern, wurde das strukturelle Modell nach den Bodenbelastungsversuchen neu identifiziert und angepasst. Des Weiteren wurden die Sensoren, die in der Versuchstragfläche eingebracht wurden auch im Modell abgebildet, um später die Schätzgenauigkeit der simulierten Daten durch Sensorfusion ausgleichen zu können.

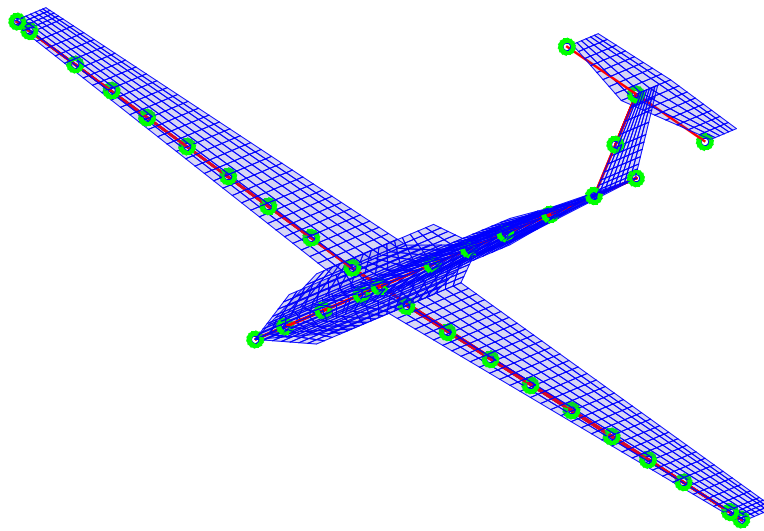


Abbildung 24: Kombiniertes aerodynamisches VLM und FE Strukturmodell (rot: FE-Modell, blau: VLM-Modell)

Als lernfähiges Beobachternetzwerk kommt ein Ansatz basierend auf einem ANFIS-Netzwerk (Adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem) zum Einsatz.

Aufbau der Infrastruktur für den ANFIS Lastenschätzer

Prinzipiell haben ANFIS-Netzwerke einen Aufbau, wie er in Abbildung 25 dargestellt ist. Darin wird in den ersten drei Schichten (layer 1 bis layer 3) eine Gewichtung der physikalisch motivierten Auswahl an Einflussgrößen vorgenommen. In der vierten Schicht wird für jede Region eine Berechnung der Zielgröße basierend auf einem linearen Regressionsansatz vorgenommen. Diese Zielgrößen werden entsprechend der Gewichtung aus den ersten drei Schichten in der fünften Schicht aufaddiert. Durch die Verwendung unscharfer Logik zur Aktivierung diverser charakteristischer Beschreibungen von Lasten aufgrund flugphysikalischer Größen ist mit dem ANFIS Lastenschätzer die Schätzung unterschiedlicher Lastarten und für verschiedene Laststationen möglich. Das Training der Gewichtung im Netzwerk kann mit Messdaten oder auch mit Simulationsdaten erfolgen.

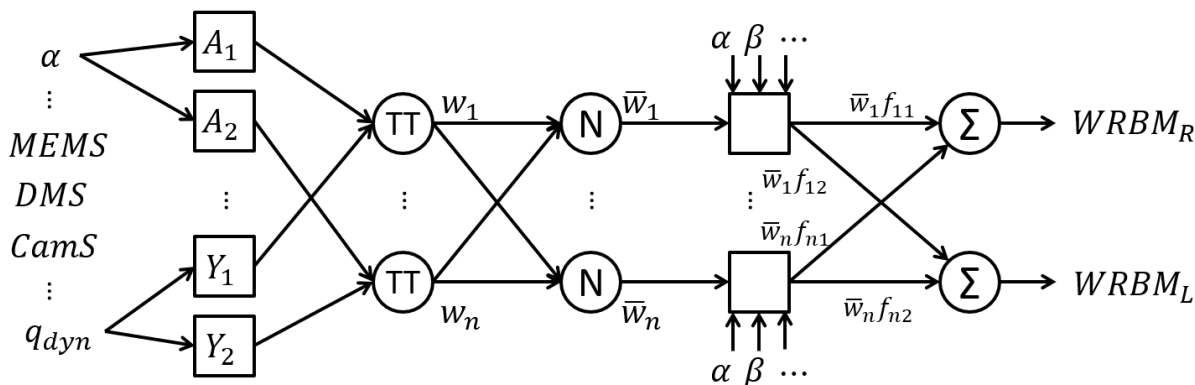


Abbildung 25: Aufbau eines ANFIS-Netzwerks nach [8]

Training und Ergebnisse des ANFIS Lastenschätzers

Mit Simulationsdaten des angepassten Aerodynamischen- und Strukturmodells wurde das Netzwerk anhand eines Trainingsdatensatzes auf einige der zur Verfügung stehenden Lastmessgrößen trainiert und die Schätzgüte gegen einen Validationsdatensatz aus Messdaten verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass der Ansatz für die Schätzung der verschiedenen Lastgrößen an einer Station der Struktur unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Daten sehr gut geeignet ist. In Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28 werden die unterschiedliche Lastgrößen, die Querkraft, das Torsions- und das Biegemoment, gezeigt. Die Schätzung (blau) bildet die entsprechende Messgröße (grün) mit hoher Genauigkeit ab. Dies zeigt sich in derselben Weise auch für die anderen verfügbaren Lastmessstationen.

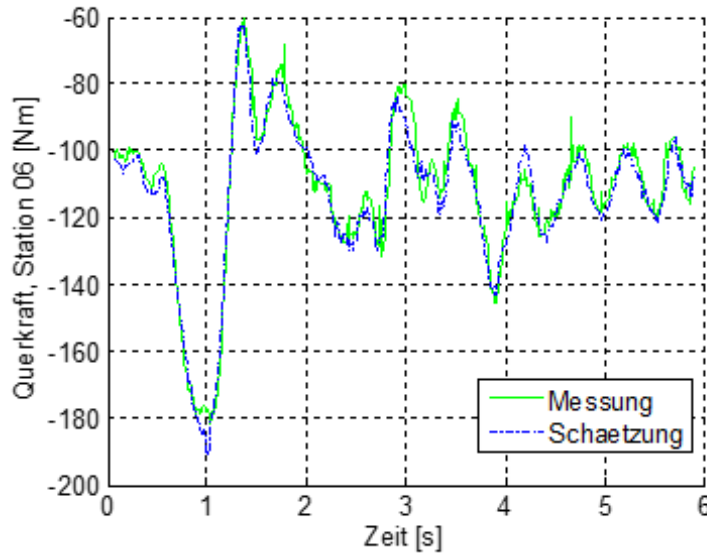


Abbildung 26: Querkraftschätzung mittels ANFIS Lastenschätzer. Messung (grün), Schätzung (blau).

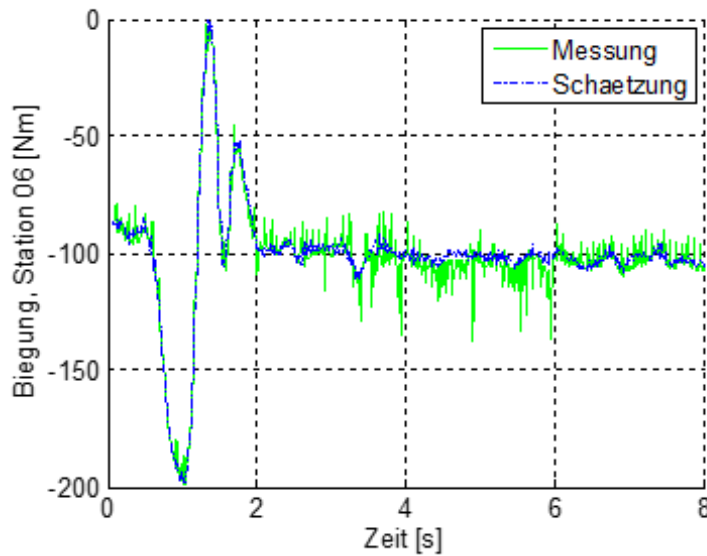


Abbildung 27: Biegemomentschätzung mittels ANFIS Lastenschätzer. Messung (grün), Schätzung (blau).

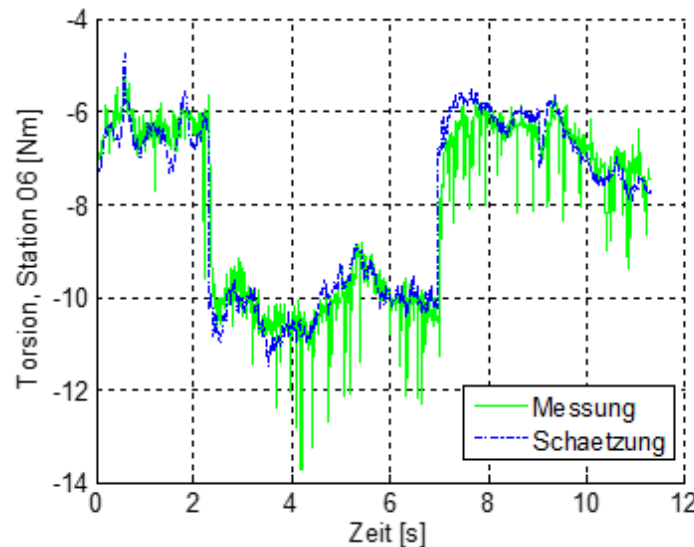


Abbildung 28: Torsionsmomentschätzung mittels ANFIS Lastenschätzer. Messung (grün), Schätzung (blau).

In diesem Arbeitspaket wurde ein System entwickelt, welches in der Lage ist, aus den in gängiger Weise aufgezeichneten Messwerten flugphysikalischer Parameter die Größe strukturelle Lasten abzuschätzen. Zu diesem Zweck ist ein bereits verfügbarer Ansatz basierend auf ANFIS-Netzwerken dahingehend erweitert worden, dass eine Schätzung mehrerer unabhängiger Größen möglich ist. Die Beibehaltung der physikalisch motivierten Berücksichtigung von Nichtlinearitäten für alle Lastgrößen erlaubt es dabei, den zusätzlich benötigten Rechenaufwand für die weitere Schätzgrößen auf ein Minimum zu reduzieren. In einer Validation gegen in Flugversuchen aufgezeichnete Daten konnte gezeigt werden, dass eine hohe Schätzgüte für alle Lastgrößen an verschiedenen Stationen der Struktur erreicht werden kann.

Die Arbeiten dieses APs wurden in Deliverable DP2-2.1: „Prototyp des Lernfähigen Beobachternetzwerks“ sowie Deliverable DP3-2.1: „Darstellung des Gesamtsystems des lernfähigen Beobachternetzwerks“ zusammengefasst und dokumentiert.

6.3.2 AP 2.2 „Kamerabasierte Deformationssensorik“ (12/2021-03/2023)

Dieses Arbeitspaket wurde vollständig vom DLR bearbeitet und ist im Bericht des Partners DLR im Detail dargestellt.

6.3.3 AP 2.3 „Sensornetzwerk“ (12/2021-05/2023)

Dieses Arbeitspaket wurde vollständig von der TUHH bearbeitet und ist im Bericht des Partners TUHH im Detail dargestellt.

6.3.4 AP 2.4 „Intelligente Fusions- und Analysefunktionen zur Lastüberwachung und Identifikation“ (12/2021-05/2024)

In diesem Arbeitspaket wurde eine Fusionsfunktion realisiert, um die in AP 1.2 ausgewählte Anordnung von MEMS Drucksensoren zu Messstationen zusammenzuführen. Diese Stationen sind jeweils in der Lage, die aerodynamische Last und den Druckpunkt der angreifenden Luftkräfte an der ausgewählten Position zu bestimmen. Unter Verwendung mehrerer MEMS Stationen und Berücksichtigung weiterer Messsignale anderer Sensoren kann mit der Fusionsfunktion auf Grundlage eines aeroelastischen Modells eine Fusion der Sensorsignale durchgeführt werden, die dazu geeignet ist, aerodynamischen Lastgrößen zu ermitteln.

Für die Bestimmung der aerodynamischen Last und des Druckpunktes der angreifenden Luftkräfte wurden die geometrische Lage der Druckmessbohrungen auf der Oberfläche des aerodynamischen Profils genutzt und über die Fläche integriert.

Zur Messung des Luftdrucks auf der Tragfläche wurde der digitale Absolutdrucksensor FXPS7115D4 von NXP verwendet. Wie in AP 1.2 oben dargestellt, wurde für die Verwendung in diesem Projekt eine kleine Leiterplatte erstellt, auf der die Sensoren montiert und verkabelt wurden. Die auf der Leiterplatte montierten MEMS-Drucksensoren sind auf der Ober- und Unterseite der Tragfläche in einem 3D-gedruckten Teil verteilt, das am Holm zwischen zwei Rippen befestigt ist. Gedruckte Druckbohrungen verbinden den MEMS-Sensor mit der Oberfläche des Flügels. Kleine O-Ringe dichten den MEMS-Sensor mit dem 3D-Druckteil ab.

Gemäß dem Konzept des Sensornetzwerks aus AP 1.2 hat der Prototypflügel fünf Messabschnitte in Spannweitenrichtung (LSM1 - LSM5) vgl. Abbildung 5, die mit 22 (an der Tragflächen-Wurzel) bis 14 (an der Tragflächen-Spitze) MEMS-Sensoren ausgestattet sind. Jeder Abschnitt erfasst die Druckverteilung um das Profil des Flügels. Unter Berücksichtigung aller fünf Sektionen kann die Druckverteilung im Profilschnitt auf jeder Sektion oder dem gesamten Flügel mit einem Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS) rekonstruiert werden.

Für das endgültige ANFIS-Setup wurden sowohl die einzelnen Druckmessungen als auch die Starrkörperbewegung und die Steuerflächenausschläge berücksichtigt. Das Training des Netzes wurde mit Simulationsdaten durchgeführt.

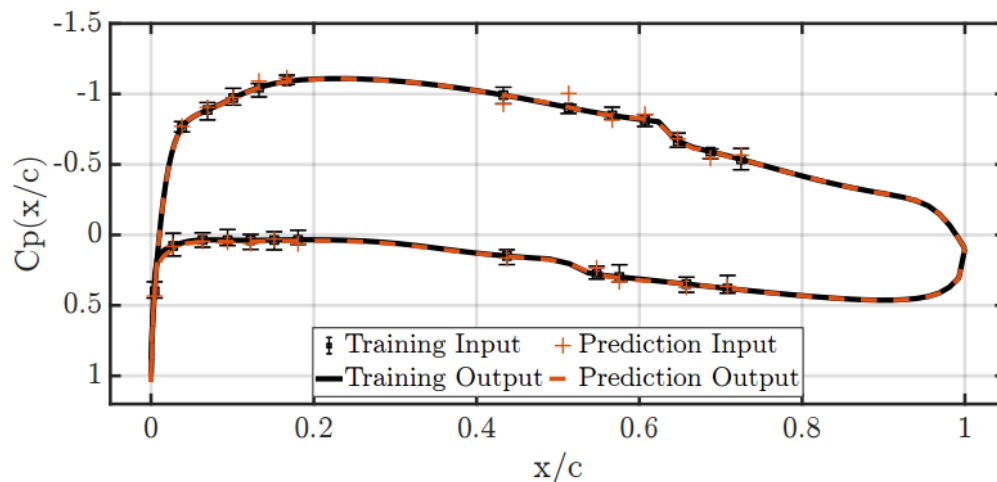
ANFIS Sensorfusion

Zur Rekonstruktion der Druckverteilung wurde die Fuzzy Logic Toolbox von MATLAB für die Modellierung eines ANFIS verwendet, das mit der subtraktiven Clustering-Methode [2] und 30 Epochen mit dem hybriden Trainingsalgorithmus und Standardeinstellungen generiert wurde.

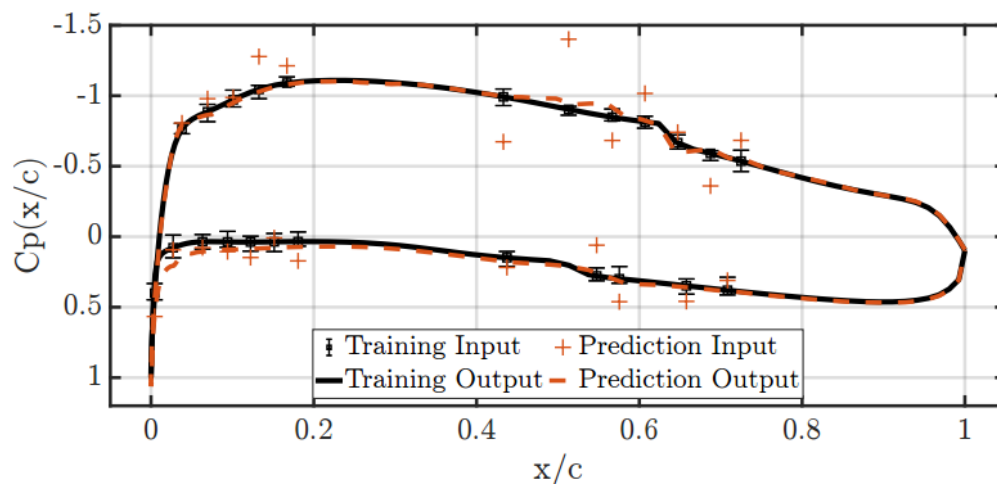
Die Eingangs- und Ausgangszugehörigkeitsfunktionen des ANFIS sind jeweils vom Gaußschen und linearen Typ. Das Training erfolgt mit einem verrauschten (additives weißes Gaußsches Rauschen (AWGN)) punktuellen Drucksignal an allen MEMS-Standorten als Eingabe und einer rauschfreien hochaufgelösten Druckverteilung an der Tragfläche als Ausgabe. Die Eingangs- und Ausgangsdrücke wurden mit XFOIL [3] synthetisch generiert. Die Datenbasis wurde pro Profilanströmwinkel $\Delta\alpha = 0,1^\circ$ in $\alpha_i \in [-10^\circ, 10^\circ]$ und je 10 verschiedenen Rauscheingängen erzeugt. Da das ANFIS nur einen Ausgang unterstützt, wurde eine Matlab-Struktur mit mehreren

ANFIS Netzwerken verwendet, um mehrere Ausgänge zu modellieren. Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse des trainierten ANFIS Netzwerks, das die Druckverteilung am Profilschnitt aus verrauschten Druckdaten an einzelnen MEMS Sensor Positionen mit 1σ AWGN (Abbildung 29a) und 5σ AWGN (Abbildung 29b) rekonstruiert.

Die erzielten Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der vorhergesagten und trainierten C_p -Verteilung auch bei hohem Rauschpegel (Abbildung 29b). Die Ergebnisse zeigen das Potenzial der Sensorfusion mit einem ANFIS Netzwerk zur Rekonstruktion der Druckverteilung. Die Anwendung mit realen Messwerten aus Windkanaldaten ist in AP 3.2 beschrieben. Zusätzlich wurden die Ergebnisse in einem gemeinsamen Paper auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2023 in Stuttgart veröffentlicht [4].



(a) Prediction input with $1 \times \sigma$ AWGN



(b) Prediction input with $5 \times \sigma$ AWGN

Abbildung 29: Rekonstruktion der Profildruckverteilung aus verrauschten Druckdaten an einzelnen MEMS Sensor Positionen mithilfe eines ANFIS Netzwerkes für $\alpha = 0^\circ$.

Identifikation von Modellparametern

Für die Identifikation der aerodynamischen Modellparameter wurde zum einen die im Projekt G-Flights entwickelte Methode zur Parameteridentifikation aus Flugversuchsdaten genutzt, zum anderen wurden die mit Hilfe der ANFIS Sensorfusion rekonstruierte Auftriebsverteilung und der daraus abgeleitete Auftriebsbeiwerte C_l und der Momentenbeiwerte C_m in das aerodynamische Modell aus AP 2.1 zurückgeführt.

Die Ergebnisse dieses APs sind in Deliverable DP4-2.4: „Identifizierte Modellparameter (zur Korrektur der aerod. Modells) und erfolgreiche Fusion“ dokumentiert.

6.3.5 AP 2.5 „Integration und Optimierung des Netzwerks“ (12/2022-08/2024)

In diesem Arbeitspaket wurden die in AP 2.1 und AP 2.4 entwickelten Systeme für die Anwendung auf dem Flugversuchsträger angepasst.

Die Systeme der APs 2.1 und 2.4 wurden bei IBK in der eigenen Infrastruktur aufgebaut. Für die Anwendung auf dem Flugversuchsträger wurden diese an die Umgebung des Projektpartners TUHH angepasst. Dabei wurden die speziellen Vorgaben des Flugmessrechners eingehalten, um die Integration vornehmen zu können. Die Interaktion mit den zusätzlichen Sensoren musste dabei ermöglicht werden, ohne die Echtzeitfähigkeit der Systeme zu gefährden.

Die Datenkommunikation zwischen den einzelnen Systemen wurde über eine CAN-Bus Schnittstelle umgesetzt. Die Verarbeitung der Daten und das Abfangen von Fehlern oder fehlenden Daten wurde softwareseitig umgesetzt, so dass es zu keinen Störungen im Systemablauf kommen kann.

Die bei IBK in Matlab aufgebauten ANFIS Netzwerke wurden zur Ausführung auf einem mitfliegenden Raspberry Pi vorbereitet. Dazu wurden die trainierten Netzwerke in eine Python Ausführungsumgebung portiert und die Ausführung in Echtzeit sichergestellt.

Die detaillierten Ergebnisse dieses APs wurden in den beiden von der TUHH federführend erstellten Deliverables DP4-2.5: „Bericht zur Integration des Sensor- und Beobachternetzwerks“ und DP5-2.5: „Bericht zur Optimierung des Netzwerks“ dokumentiert.

6.4 HAP 3: „Erprobung und Bewertung“

In diesem HAP wurden Versuche zur Erprobung der Systeme der APs 2.1 und 2.4 sowie die Auswertung der darin erzeugten Ergebnisse durchgeführt. Diese Versuche fanden im Labor, im Windkanal und in Form von Flugversuchen statt. Die Ergebnisse dienen der Generierung weiterer Daten zur Verbesserung der Systeme und werden den genannten Arbeitspaketen wieder zugeführt.

In AP 3.2 hat IBK dafür Sorge getragen, sich auf verschiedenen Ebenen von der korrekten Funktionsweise der Systeme zu überzeugen. In den Laborversuchen wurde sich zunächst vergewissert, dass die in AP 2.5 integrierten Systeme korrekt und sicher funktionierten und mit dem Flugcomputer interagieren konnten. Es wurde ebenfalls die Echtzeitfähigkeit nachgewiesen, indem sichergestellt wurde, dass einzelne Berechnungen innerhalb der Taktlängen der Sensorabfragen liegen.

Die in AP 1.2 ausgewählten MEMS Sensoren im Zusammenhang mit dem in AP 2.4 entwickelten Netzwerk und dem zugehörigen Lastenschätzer wurden hinsichtlich der korrekten Ermittlung von Druckverteilungen untersucht. In Windkanalversuchen ließ sich dies gegenüber einem spezifischen Strömungsreferenzzustand sicherstellen.

In AP3.3 schließt sich die Aus- und Bewertung der erzielten Ergebnisse an.

6.4.1 AP 3.1 „Aufbau Prüfstände und Anpassen des Versuchsträgers“ (12/2021-08/2023)

Dieses Arbeitspaket wurde vollständig von der TUHH bearbeitet und ist im Bericht des Partners TUHH im Detail dargestellt.

6.4.2 AP 3.2 „Erproben und Validieren von Teil- und Gesamtsystem (Labor, Windkanal, Flugversuch)“ (12/2021-08/2024)

In diesem Arbeitspaket wurden die Teilsysteme einzeln sowie im Zusammenspiel als Gesamtsystem im Labor und unter realen Bedingungen im Windkanal und Flugversuch untersucht und validiert. Die Ergebnisse des wurden in die technischen Arbeitspakete in HAP2 zurückgeführt und Anpassungen direkt umgesetzt. Die detaillierten Ausführungen sind in Deliverable DP5-3.2: „Konsolidierte Labor-, Windkanal- und Flugmessdaten“ zusammengefasst und dokumentiert.

Laborversuche

Die Erprobung der MEMS Luftdrucksensoren hat bei IBK mit der modularen Testplattform stattgefunden. Die MEMS Sensoren sind im 3D-gedruckten Tragflächenprofil eingebaut worden und auf Funktion sowie Luftdichtigkeit getestet worden. Abbildung 30 zeigt den Test auf Luftdichtheit der einzelnen Sensoren. Dazu wurde mittels eines Kolbens ein Unterdruck an der Oberfläche der Druckbohrung auf der aerodynamischen Oberfläche des 3D-gedruckten

Tragflächenprofil erzeugt. Auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden angegeben, auf der y-Achse der Druck in kPa. Der Unterdruck wurde jeweils für ca. 20 Sekunden gehalten. Die Messungen zeigen, dass der Unterdruck auf fast allen Sensoren ausreichend lange bestehen bleibt. Lediglich der erste Sensor p20 (lila, erster Peak) weist eine Undichtigkeit auf, die auch mit unterschiedlichen Mitteln nicht abgedichtet werden konnte. Das Problem wurde auf die 3D-gedruckte Druckbohrung eingegrenzt, die vermutlich innerhalb des 3D-Drucks undicht ist. Für weitere 3D-Drucke wurden Maßnahmen erarbeitet, um einer Undichtigkeit innerhalb des 3D-Drucks entgegen zu wirken. Dazu wurde die Wandstärke der gedruckten Druckbohrungen soweit erhöht, dass es zu keinen internen Undichtigkeiten kommen kann.

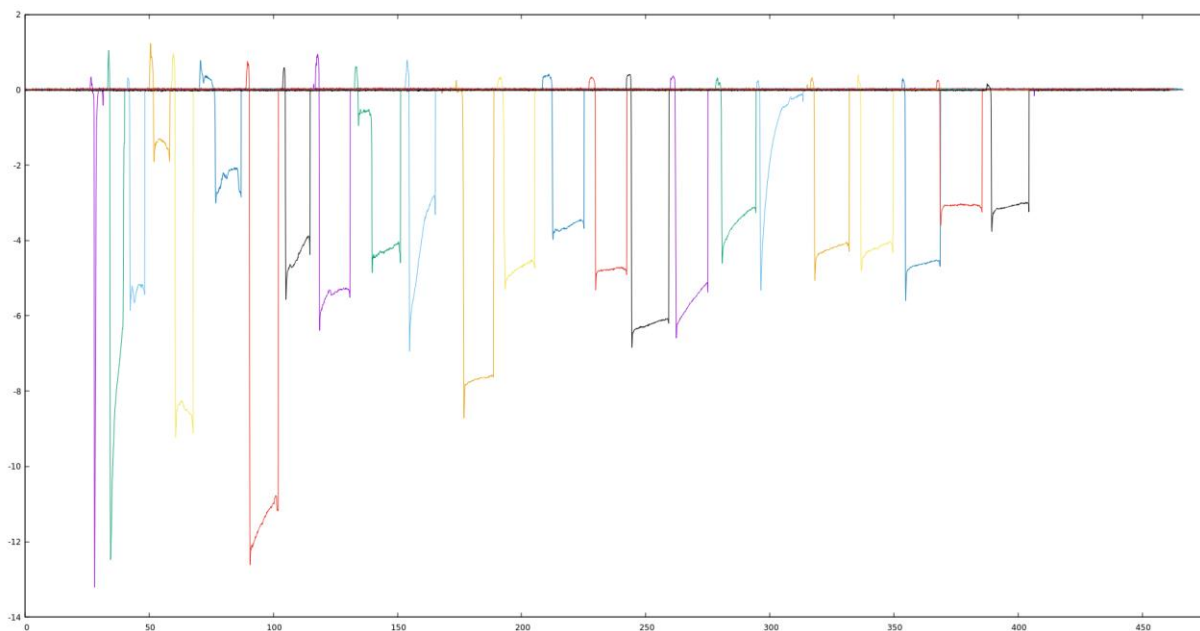


Abbildung 30: Luftdrucktest der MEMS Sensoren im 3D-gedruckten Tragflächenprofil

Windkanalversuche

Mit der prototypischen Tragfläche wurden Windkanalversuche durchgeführt. Dabei wurde die prototypische Tragfläche mit dem 3D-gedruckten und mit MEMS Drucksensoren ausgestatteten Profil ausgestattet. Die Daten der MEMS Drucksensoren wurden mit dem System aufgezeichnet, welches auch für den Flugversuch genutzt wird. Zum triggern der Aufzeichnung wurde von der TUHH in der Steuerungssoftware der prototypischen Tragfläche ein Trigger-Signal implementiert, sodass die Daten der MEMS Drucksensoren später mit den von der TUHH aufgenommen Sensordaten der prototypischen Tragfläche synchronisiert werden konnten.

Die Datenauswertung erfolgte bei IBK in einem zweiten Schritt nach der Windkanal Kampagne. Zur Auswertung wurden die Werte der einzelnen MEMS Drucksensoren sowie der lokale Anstellwinkel genutzt. Das trainierte ANFIS Netzwerk aus AP 2.4 kam zum Einsatz wobei der Anstellwinkel und die MEMS Drucksensorwerte als Input für die Prädiktion dienten. Abbildung 31 zeigt den C_p Verlauf, also die normierte Druckverteilung, auf dem Profil für die Druck- und

Saugseite für einige Anstellwinkel. Links oben ist das Ergebnis des ANFIS Netzwerks für eine Anstellwinkel $\alpha = -3,6^\circ$ mit den einzelnen MEMS Druckmesswerten in rot „+“ und dem Ergebnis des ANFIS Netzwerkes, der „Prädiktion“, in durchgezogen rot. Die schwarz gestrichelte Linie zeigt den „wahren“ XFOIL Cp Verlauf für diesen Anstellwinkel von $\alpha = -3,6^\circ$ und in blau sind zusätzlich die korrespondierenden verrauschten Trainingsdaten abgebildet. Auch für die weiteren abgebildeten Anstellwinkel $\alpha = -3^\circ$ (oben Mitte), $\alpha = -2^\circ$ (unten Mitte), $\alpha = -1^\circ$ (oben rechts) und $\alpha = 1^\circ$ (unten rechts) zeigen die Cp Ergebnisse des ANFIS Netzwerkes eine sehr gute Übereinstimmung mit den theoretischen simulierten Cp Verläufen. Das ANFIS Netzwerk kann also aus den einzelnen MEMS Messwerten die Druckverteilung auf dem Profil sehr gut rekonstruieren. Der untere linke Plot in Abbildung 31 sowie der linke Plot in Abbildung 32 zeigt den Auftriebsbeiwert C_l aufgetragen über den Anstellwinkel. In grün die theoretischen Ergebnisse der XFOIL Simulation und in schwarz die Ergebnisse der nachgelagerten aerodynamischen Parameteridentifikation aus AP 2.4. Insgesamt zeigt der Auftriebsbeiwert eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen, rekonstruierten und identifizierten Auftriebsbeiwerten und den simulierten Auftriebsbeiwerten für diese Anstellwinkel. Ebenso abgebildet in Abbildung 32 rechts der Momentenbeiwert C_m . Hierbei ist anzumerken, dass die Achseneinteilung auf den ersten Blick vermeintlich eine Divergenz erkennen lässt, tatsächlich ist die Übereinstimmung der gemessenen, rekonstruierten und identifizierten Momentenbeiwerte mit den simulierten Ergebnissen aber ebenfalls gut. Die maximale Abweichung beträgt lediglich ca. 7% für größere negative Anstellwinkel.

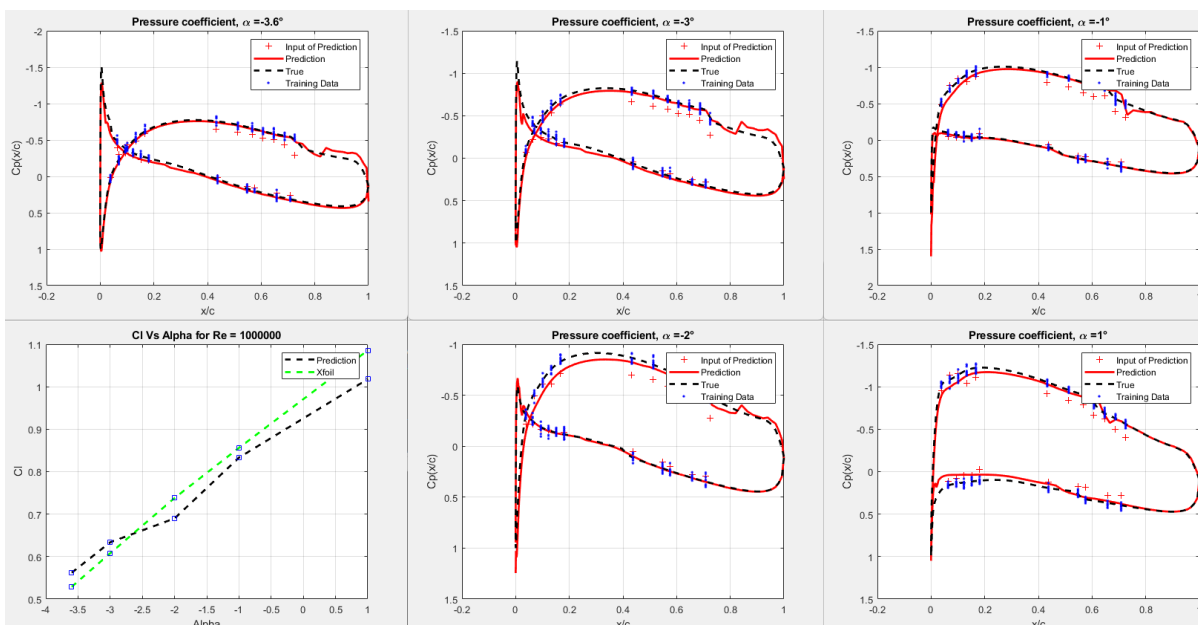


Abbildung 31: Ergebnisse des ANFIS Netzwerks zur Rekonstruktion bzw. Prädiktion der Druckverteilung C_p aus Druckmessdaten (rot „+“) aufgetragen gegen die „wahre“ C_p Verteilung aus XFOIL Simulation für die entsprechenden Anstellwinkel (schwarz gestrichelt) und künstlich verrauschte Trainingsdatendruck (blau).

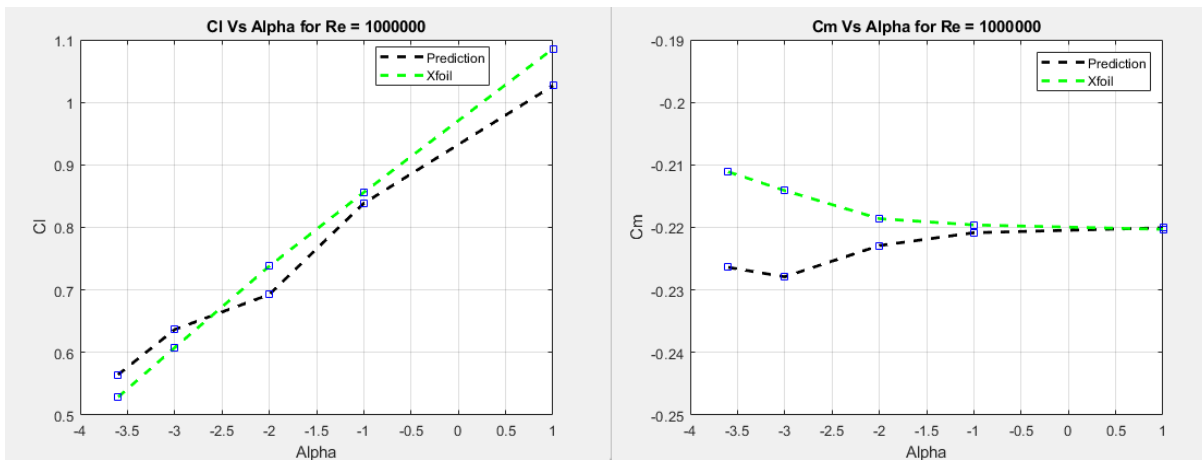


Abbildung 32: Ergebnisse der nachgelagerten aerodynamischen Parameteridentifikation des Auftriebsbeiwertes \bar{C}_l und des Momentenbeiwertes \bar{C}_m aus mittels einem ANFIS Netzwerk rekonstruierten Druckverläufen aus MEMS Druckmessungen im Vergleich mit simulierten Daten aufgetragen gegen den Anstellwinkel.

Flugversuche

Aufgrund des hohen Gewichts der MEMS Druckmessprofile und der Überschreitung des maximal zulässigen Fluggewichts des Flugversuchsträgers, wurde entschieden, nicht mit allen Systemen gleichzeitig zu fliegen. Der 4. Flugversuch diente dem kamerabasierten Deformationsmesssystem und der 5. Flugversuch war für die MEMS Druckmessprofile vorgesehen. Da der Flugversuchsträger leider im 4. Flugversuch beschädigt wurde und die Reparatur zu diesem späten Zeitpunkt im Projekt (kurz vor Projektende) nicht mehr möglich war, konnte eine mit MEMS Druckmessprofilen ausgestattete Tragfläche leider nicht im realen Flugversuch getestet werden. Die Teilsysteme (Kommunikation der Teilsysteme untereinander, Echtzeitauswertung der MEMS Drucksensoren, Rekonstruktion der Druckverläufe am Tragflächenprofil, Identifikation der aerodynamische Parameter sowie ANFIS Lastenschätzung) haben sich allerdings einzeln sowie im Verbund in Labor- sowie im Windkanalversuchen bewährt. Daher wären die abschließenden Flugversuche auf dem Flugversuchsträger vielmehr eine schöne Demonstration gewesen, mindert aber in keiner Weise die erreichten Ergebnisse und Ziele des Projektes AdLoNet.

6.4.3 AP 3.3 „Bewertung von Teil- und Gesamtsystem“ (06/2023-08/2024)

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Bewertung der in HAP2 entwickelten Ansätze zur schnellen Ableitung von Lastenschätzern und zur Sensorfusion. Basierend auf den Ergebnissen der Simulations- und Testaktivitäten wurde eine Datenbank aufgebaut, um die Trainingsdatensätze für die ANFIS Netzwerke erstellen zu können. Anschließend erfolgte die Ableitung des ANFIS Lastenschätzers sowie des Sensorfusionsnetzwerkes.

Die finale Bewertung wird hier diskutiert. Die Rückführung von Verbesserungen hat stetig während der Projektlaufzeit stattgefunden und Anpassungen wurden nach Möglichkeit direkt implementiert.

Bewertung der Teilziele

Seitens IBK wurden, wie eingangs erwähnt, folgende technische Teilziele adressiert:

1. Aufbau einer Infrastruktur als Vorbereitung intelligenter Methoden zur Datenfusion und Datenanalyse mit dem Ziel der
 - automatischen Verwaltung, Aufbereitung und Verdichtung von Messdaten
 - Detektion von lastenrelevanten Ereignissen und Aufbereitung dieser als Trainingsdaten
2. Entwicklung von innovativen lernfähigen Methoden und Algorithmen zur Strukturlastüberwachung und Datenfusion unter Verwendung
 - der oben eingeführten Infrastruktur und
 - von maschinellem Lernen

Die von IBK während des Projektes AdLoNet aufgebaute Infrastruktur umfasst eine Datenbank, in der Simulations- und Messdaten des Versuchsträgers, der Ultra Dimona der TUHH, vorhanden sind. Zum Beginn des Projektes wurden vor allem die Simulations- und Messdaten des vorangegangenen Projektes G-Flights genutzt, um die Datenbank schnell aufzubauen. Im weiteren Projektverlauf konnten dann zunächst weitere und neue Simulationsdaten, z.B. die XFOIL Ergebnisse der Druckverteilung auf der Tragfläche, und später auch die Messdaten der verschiedenen Messkampagnen aufgenommen werden. Die Verwaltung der Daten ist insofern automatisiert, dass die Daten anhand des Sensortyps, der Sensorposition und der zeitlichen Zugehörigkeit verarbeitet werden können. Zusätzlich zu den Gemessenen und simulierten Signalen wurden bereits auch aufbereitete und verdichtete Daten abgelegt. Neben der Markierung von definierten Manövern in den Daten sind zusätzlich die Ergebnisse von Lastenschätzern und entsprechenden lastrelevanten Ereignissen aus dem vorherigen Projekt in die Datenbank aufgenommen worden. Der Aufbau dieser Datenbank hat die notwendige Infrastruktur erzeugt, um die Entwicklung von innovativen lernfähigen Methoden zu ermöglichen. Die Entwicklung des Prozesses zum Aufbau der Datenbank war ein wesentliches technisches Ziel seitens IBK, welches erfolgreich erreicht wurde.

Das zweite Teilziel, nämlich die Entwicklung der Methoden und Algorithmen zur Lastüberwachung und Datenfusion unter Verwendung der neuen Infrastruktur und von maschinellem Lernen wurde erreicht, da mithilfe der aus der Datenbank erzeugten Trainingsdatensätze die Teilsysteme

trainiert und validiert werden konnten. Bei neuen Daten in der Datenbank konnten die Teilsysteme automatisch mit einem neuen Trainingsdatensatz aktualisiert werden.

Bewertung der Teilsysteme

Im Folgenden erfolgt die Bewertung untergliedert in die Teilsysteme MEMS Drucksensoren, ANFIS Sensorfusion, ANFIS Lastenschätzer.

MEMS Drucksensoren

Der Hardwareaufbau der MEMS Drucksensoren sowie die Anbindung an die Mess- und Auswertehardware besticht durch seinen einfachen Aufbau und die einfache Verkabelung im Bus-System. Die Integration der MEMS Drucksensoren in die Tragfläche gestaltete sich als etwas schwieriger. Durch die Bauhöhe der Sensoren ist die Integration zwingend innerhalb des Tragflächenprofils notwendig. Bei der Holm-Rippen-Tragflächenbauweise mit Bespannung, wäre eine Integration der MEMS Drucksensoren unter der Bespannung wünschenswert gewesen. Die Gewährleistung der ordnungsgemäßen Funktion der Sensoren und die Verhinderung eines Aufreißens der Bespannung wurden hier aber als zu großes Risiko eingeschätzt. Die gewählte Lösung war in der gewählten Ausführung leider gewichtsmäßig zu schwer. Verbesserungspotenzial ist also in der Integration der MEMS Drucksensoren in die Tragfläche zu finden, um eine leichte und einfache Integration zu erreichen. Insgesamt sind die erzielten Ergebnisse mit den MEMS Luftdrucksensoren mehr als zufriedenstellend. Ein Einsatz dieser Sensoren auch in anderen Projekten ist denkbar.

ANFIS Sensorfusion

Die Anwendung eines trainierten ANFIS Netzwerks zur Fusion der einzelnen MEMS Drucksensoren sowie weiterer flugdynamischer Größen hat sich als sehr gute Methode erwiesen. Die erzielten Ergebnisse zeigen das Potenzial der Sensorfusion mit einem ANFIS Netzwerk zur Rekonstruktion der Druckverteilung sowie zur anschließenden Bestimmung des Auftriebsbeiwertes und des Momentenbeiwertes. Der entstandene Aufwand in Bezug zum ANFIS Netzwerk ist allerdings das Training. Hierbei müssen die Trainingsdaten erzeugt werden, die zum einen den Input des Netzwerkes und zum anderen auch das Ergebnis des Netzwerkes widerspiegelt. Das Netzwerk kann dabei nur so gut sein, wie die Trainingsdaten, mit denen es trainiert wurde. Die Übertragbarkeit auf z.B. ein anderes Tragflächenprofil sind insofern gegeben, dass ein komplett neuer Trainingsdatensatz aufgebaut werden muss. Dies ist für eine Übertragbarkeit auf andere Situationen natürlich immer mit viel Aufwand verbunden. Für spezialisierte Anwendungen, bei denen dieser Aufwand gerechtfertigt ist, kann der Einsatz eines ANFIS Netzwerkes in Betracht gezogen werden.

ANFIS Lastenschätzer

Die erzielten Ergebnisse des ANFIS Lastenschätzers sind, wie oben gezeigt, sehr gut. Der ANFIS Lastenschätzer benötigt allerdings gegenüber herkömmlichen Lastenschätzer eine leicht erhöhte Rechenleistung für die Anwendung des ANFIS Netzwerkes. Allerdings kann der Lastenschätzer

auch auf mehrere Zielgrößen trainiert werden. Durch den definierten ANFIS Aufbau ist die Anzahl der auszuführenden Rechenoperationen abzählbar und nicht abhängig von der Komplexität des zugrunde liegenden Flugzeugmodells, welche sich insbesondere in nichtlinearen Flugzuständen drastisch erhöhen kann. Somit ist der Einsatz eines ANFIS Netzwerks bei rechenzeitlimitierten Ausführungen eigentlich zu bevorzugen. Die bei der ANFIS Sensorfusion (siehe oben) angebrachten Argumente bzgl. der Trainingsdaten lassen sich natürlich hier direkt übertragen. Nach erfolgtem Training für einen spezialisierten Anwendungsfall ist eine Implementierung auf einem Flugcomputer auch heutiger Bauart durchaus denkbar.

Bewertung des Gesamtsystems

Das von IBK in diesem Projekt entwickelte Gesamtsystem aus Datenbankinfrastruktur, MEMS Drucksensormessung, ANFIS Sensorfusion und ANFIS Lastenschätzung zeigt die Potentiale der Anwendung von neuen Methoden in der Luftfahrt. Die Erzielten Ergebnisse lassen sich durchaus auch auf größere CS25 Flugzeuge skalieren. Die zugrundeliegenden Daten der Datenbank können natürlich nicht skaliert werden. Vielmehr müsste für einen anderen Flugzeugtyp eine neue Datenbank mit Simulationsdaten, Messdaten und aufbereiteten Daten aufgebaut werden. Der Grundstein, nämlich die Infrastruktur hierfür, ist aber mit dem Projekt AdLoNet gelegt. Der Übertrag der Teilsysteme auf andere Flugzeuge ist durch den ANFIS Ansatz, der kein zugrundeliegendes Modell des zu betrachtenden Flugzeugs benötigt, direkt möglich, wenn die entsprechenden Flugzeugdaten in die Datenbank integriert werden. Das Gesamtsystem wird daher von IBK als starkes Werkzeug für die zukünftige Entwicklung von Methoden und Algorithmen zur Lastüberwachung und Datenfusion gesehen.

Spezifikation der nächsten Schritte zur Verwertung

Um die Verwertung der im Projekt AdLoNet erreichten Infrastruktur und Methodenentwicklung auch verwerten zu können, bedarf es noch einiger Restarbeit. Die Datenbank muss auf die individuellen Kundenanforderungen angepasst werden. Die Daten, die im Rahmen von Digitalisierungs- und Big-Data Strategien entstehen und aktuell gesammelt werden, müssen aufbereitet und integriert werden. Hierzu müssen die Schnittstellen geschaffen und angepasst werden, welches die Mitarbeit der möglichen Kunden erfordert.

Außerdem befindet sich die aufgebaute Infrastruktur aktuell in einer prototypischen Form. Für den Einsatz beim Kunden muss die Infrastruktur und auch die ANFIS Ansätze zur Datenfusion und Lastenschätzung industrialisiert werden. Eine Industrialisierung für die Datenbankinfrastruktur zu erreichen sollte mit überschaubarem Aufwand machbar sein. Um eine Industrialisierung der ANFIS Ansätze zu erreichen, muss sicherlich auch bei den Zulassungsbehörden ein Umdenken stattfinden, damit auch trainierte KI-basierte Methoden in der Luftfahrt Einzug halten können. Letztendlich hat auch dieses Projekt dazu einen Beitrag geleistet.

7. Veröffentlichungen

7.1 Veröffentlichungen / Vorträge

Gemeinsam mit den Verbundpartnern wurde ein Papier bei der DLRK 2023 mit dem Titel „Development and Testing of a Complementary Sensor Network for Robust Estimation of Maneuver and Gust Loads“ veröffentlicht [4].

7.2 Diplomarbeiten / Studienarbeiten

Es wurden bei IBK keine Diplom- oder Studienarbeiten im Rahmen dieses Projektes durchgeführt.

7.3 Erfindungsmeldungen / Patente

Seitens IBK wurden keine Patentmeldungen eingereicht.

8. Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

- [1] NXP Semiconductors, „nxp.com,“ NXP, [Online]. Available: <https://www.nxp.com/products/sensors/pressure-sensors/barometric-pressure-15-to-150-kpa/automotive-engine-management-and-fuel-efficiency-control-absolute-pressure-sensor-40-to-115-kpa:FXPS7115D4?fp=1>. [Zugriff am 24.04.2023].
- [2] S. L. Chiu, „Fuzzy model identification based on cluster estimation,“ *Journal of Intelligent & fuzzy systems*, p. 2(3):267–278, 1994.
- [3] M. Drela, „Xfoil: An analysis and design system for,“ in *Low Reynolds Number Aerodynamics, vol 54*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989.
- [4] O. Luderer, F. Thielecke, J. Wagner, T. Kirmse, W. Gropengießer und S. Adden, „Development and Testing of a Complementary Sensor Network for Robust Estimation of Maneuver and Gust Loads,“ in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023*, Stuttgart, 2023.
- [5] Z. Xianfei, F. Yunwen, X. Xiaofeng und Q. & Qiang, „Evaluate the crashworthiness response of an aircraft fuselage section with luggage contained in the cargo hold,“ *International Journal of Crashworthiness*, Bd. 22, Nr. 4, pp. 347-364, 2017.
- [6] Y. Chen, C. Li, P. Ghamisi, X. Jia und Y. Gu, „Deep Fusion of Remote Sensing Data for Accurate Classification,“ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Bd. 14, Nr. 8, 2017.
- [7] L. Jing, T. Wang, M. Zhao und P. Wang, „An Adaptive Multi-Sensor Data Fusion Method Based on Deep Convolutional Neural Networks for Fault Diagnosis of Planetary Gearbox,“ *Sensors*, Nr. 2, 2017.
- [8] J. Jang, „ANFIS: Adaptive-Neural-Network-Based Fuzzy Inference System,“ *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, May, 1993.
- [9] S. L. Chiu, „Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation,“ *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Bd. 2, pp. 267-278, 1994.
- [10] M. Drela, „XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils,“ *Lecture Notes in Engineering, Springer*, Bd. 54, 1989.
- [11] O. Luderer, F. Thielecke, J. Wagner, W. Gropengießer und S. Adden, „Development and Testing of a Complementary Sensor Network for Robust Estimation of Maneuver and Gust Loads,“ *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Stuttgart*, 2023.
- [12] J.-S. R. Jang, „ANFIS: Adaptive-Neural-Network-Based Fuzzy Inference System,“ *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Mai 1993.
- [13] F. Thielecke, O. Luderer, J. Wagner, T. Kirmse, W. Gropengießer und S. Adden, „Development and Testing of a Complementary Sensor Network for Robust Estimation of Maneuver and Gust Loads,“ Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., 2023.