 <p>Leichtwerk AG</p>	<p><b>Report</b></p>	<p>Document Number: RP-AVA-SB1</p>
<p>Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0</p>	<p>Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON</p>	<p>Revision: A01 Date: 18.04.2024</p>

## Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON

# AVALLON - Auswirkung von Vereisung auf langsam fliegende Luftfahrzeuge sowie deren Operation und Navigation


## Vorhaben 1: AVALLON – Entwicklung des Eiswindkanalmodells und Entwick- lung einer Flugführungsstrategie

Gefördert im Luftfahrtforschungsprogramm LuFoV-3 durch das BMWK der Deutschen Bundesre-  
gierung aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2021 – 30.06.2024  
 Zuwendungsempfänger: Leichtwerk AG  
 Förderkennzeichen: 20Q1930A  
 Erstelldatum: 12.08.2024  
 Vorhabenleitung: Dr.-Ing. Martin Pietrek


Autoren: Dr.-Ing. Hans-Peter Ortwein, Dr.-Ing. Thomas Krüger




 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
1 Ziele / Aufgabenstellung .....	4
2 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
3 Wissenschaftlicher und Technischer Stand zu Beginn .....	5
4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
<b>II. Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>5</b>
1 Erzielte Ergebnisse .....	5
1.1 AP1.1 Definition der Demonstrationsszenarien in Bezug auf die Flugenveloppe .....	5
1.2 AP1.2 Definition der meteorologischen Randbedingungen .....	6
1.3 AP1.3 Knowhow-Transfer aus abgeschlossenen Projekten.....	7
1.4 AP1.4 Identifikation der Anforderungen an das EWK-Modell.....	7
1.5 AP 2.1 Auslegung und Design und AP 2.2 Konstruktion .....	8
1.6 AP 2.3 Fertigung und Montage .....	10
1.7 HAP 3.1 Vorbereitung.....	13
1.8 HAP 3.2 und HAP 3.3 Durchführung und Auswertung der EWK-Versuche .....	13
1.9 HAP4 Numerische Untersuchung des Eisaufbaus.....	15
1.10 AP 5.1 Identifikation kritischer Flugbedingungen und Ableitung von Flugführungsstrategien.....	15
1.11 AP 5.2 Entwicklung eines geeigneten HMI zur Darstellung von Vereisungsbedingungen .....	18
1.12 AP 5.3 Einbindung der entwickelten Flugführungsstrategien in das HMI .....	19
1.13 AP 5.4 Implementierung des HMI in eine bestehende GCS zur Missionsplanung .....	20
1.14 AP 5.5 Simulative Erprobung des HMI im Demonstrationsszenario und Optimierung .....	21
2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	21
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	21
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	22
5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	22
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	22
<b>III. Anhang .....</b>	<b>23</b>
1 Abbildungsverzeichnis.....	23
2 Tabellenverzeichnis .....	23
3 Abkürzungsverzeichnis.....	24

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

4 Literatur .....25

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

## I. Zusammenfassung

### 1 Ziele / Aufgabenstellung

In dem im Projekt AVALLON durch Leichtwerk Research bearbeiteten Vorhaben „Entwicklung des Eiswindkanalmodells und Entwicklung einer Flugführungsstrategie“ werden die im Folgenden beschriebenen technologischen Gesamtziele angestrebt. Die Ziele der Verbundpartner im gesamten Projekt stehen ebenso wie die Arbeits- und Ablaufpläne in enger Verbindung zu einander. Die gemeinsam gesammelten Erkenntnisse kommen dabei allen Partnern synergetisch zugute.

#### **Verständnis über Vereisung von langsam fliegenden Flugzeugen, insb. HAPS**

Das Projekt AVALLON soll anhand eines Eiswindkanalmodells mit realitätsnaher Strukturbaweise Erkenntnisse zu Qualität und Quantität der Vereisung von langsam fliegenden Luftfahrzeugen liefern. Die Untersuchungen sollen an einem repräsentativen Flügelmodell für die beispielhafte Klasse der High Altitude Pseudo Satellites (HAPS) durchgeführt werden.

#### **Entwicklung von Flugführungsstrategien und eines geeigneten HMI mit Assistenzsystem**

Eine bedeutende Innovation des Projekts ist die Erarbeitung eines Human-Machine-Interface (HMI) mit Assistenzsystem zur Unterstützung der Flugführung von UAVs unter (drohenden) Vereisungsbedingungen. Hierfür werden neuartige Strategien zur Trajektorienauswahl entwickelt und durch geeignete Interaktionsmöglichkeiten in das HMI eingebunden. Zur Umsetzung dieser Zielstellung müssen detailliertere Verfahren zur Auswertung verfügbarer Wetterdaten erstellt werden.

### 2 Planung und Ablauf des Vorhabens


Das Vorhaben AVALLON ist von den zwei Projektpartnern Institut für Strömungsmechanik der TU Braunschweig (ISM) und der Leichtwerk Research GmbH geplant und realisiert worden. Die Leitung lag bei der Leichtwerk Research GmbH, die im Laufe des Projektes ins Unternehmen Leichtwerk AG fusioniert wurde.

Durch die Pandemie im Jahr 2021 hat sich der Beginn des Projektes auf März 2021 verschoben. Der entsprechend verschobene Zeitplan konnte zunächst gut gehalten werden. Die Entwicklung und der Bau der Windkanalmodelle war im Rahmen des verschobenen Zeitplans pünktlich, so dass Windkanalversuche nach Plan oder bei Technikproblemen des komplexen Eiswindkanals zeitnah mit Ersatzterminen stattfinden konnten. Die Erstauswertung der ersten Versuchsserie konnte planmäßig stattfinden. Die weitere Auswertung konnte über den Rest des Projektes zusammen mit der fortschreitenden Verfahrensweiterentwicklung zu Photogrammetrie und numerischer Polaren Erstellung laufen.

Bei der Fusion der Leichtwerk-Research GmbH mit der Leichtwerk AG erfolgte ein reibungsarmer Übergang des Projektes. Im letzten Jahr des Projektes erfolgte eine Wiederaufnahme zunächst verworfener qualitativer Detailuntersuchungen in die Serie der Windkanaluntersuchungen.

Als Reaktion auf den Wegfall der Ground Control Station aus dem Referenzprojekt im Rahmen des AVALLON Projektzeitrahmens wurde ein vollwertiger Ersatz durch den UAV-Leitstand der Leichtwerk AG gefunden.

Verspätungen bei der Polarenerstellung der vereisten Profile und der Entwicklung eines Flugzeugperformance-Vorhersage-Verfahrens haben eine kostenneutrale Verlängerung nicht nur um die Verspätung im Projektbeginn um 3 Monate, sondern um 6 Monate nötig gemacht.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

### 3 Wissenschaftlicher und Technischer Stand zu Beginn

Die aktuell verfügbaren Vorhersagemöglichkeiten zum Eisaufbau bei Luftfahrzeugen sind in Ihren Fähigkeiten auf den Bereich der schnell fliegenden Verkehrsflugzeuge begrenzt. Durch die in diesem Projekt gewonnenen experimentellen und theoretischen Erkenntnisse können zukünftig Vorhersagen für langsam fliegende Flugzeugkonfigurationen erstellt werden können. Dies ist insbesondere bei der Zulassung entsprechender Luftfahrzeuge (z.B. UAV) von Bedeutung, da die Berücksichtigung von Vereisung unmittelbaren Einfluss auf die Betriebsführung hat. Hierfür wurden in experimentellen Untersuchungen anhand eines Eiswindkanals mit realitätsnaher Strukturgestaltung qualitative und quantitative Erkenntnisse zum Eisaufbau gewonnen werden.

Das Tragflügelmodell für den Eiswindkanal sollte in seiner Strukturbauweise weitestmöglich ein existierenden Flugzeugentwurf für ein UAV abbilden. Die dabei auftretenden Herausforderungen waren einerseits die Umsetzung einer geeigneten Skalierung großer Tragflügelquerschnitte auf die Abmessungen der vorhandenen Teststrecke sowie andererseits die Abbildung der Wärmekapazitätseigenschaften der originalen Flugzeugkonfiguration bei gleichzeitig hinreichend steifer und fester Konstruktion. Als Vorbild sollte eine aufgelöste Strukturbauweise dienen. Bei der Entwicklung eines Human-Machine-Interface (HMI) mit Assistenzsystem zur Unterstützung der Flugführung von UAVs unter (drohenden) Vereisungsbedingungen sollten neuartige Strategien zur Trajektorienauswahl entwickelt und durch geeignete Interaktionsmöglichkeiten in das HMI eingebunden werden. Dabei war es das Ziel, ein Assistenzsystem zu entwickeln, dass in der Lage ist, den Piloten bei der Prävention von Vereisungsbedingungen oder Umsetzung von Ernstfallprozeduren zu unterstützen.

### 4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Arbeit am Projekt AVALLON wurden Gespräche mit Vertretern des DWD geführt und Informationen mit dem Projekt OBeLiSK ausgetauscht. Dabei wurden Informationen zum Betrieb der Wettervorhersagen bzw. zu den Erfordernissen der Flugverkehrskontrolle gesammelt und ausgetauscht.

## II. Darstellung der Ergebnisse


### 1 Erzielte Ergebnisse

#### 1.1 AP.1.1 Definition der Demonstrationsszenarien in Bezug auf die Flugenveloppe

Die besondere Flugenveloppe eines HAPS definiert völlig andere Demonstrationsszenarien als übliche Vereisungsbedingungen in der Allgemeinen Luftfahrt oder der zivilen Transportluftfahrt.

Die zivile Transportluftfahrt hat sich aus ökonomischen Gründen kontinuierlich in Richtung Allwettertauglichkeit entwickelt. Die ökonomische Notwendigkeit, bei jedem Wetter - auch unter Vereisungsbedingungen – Flugpläne erfüllen zu können hat zu umfangreichen technischen Maßnahmen geführt, die Enteisung und Vereisungsschutz ermöglichen. Umflogen werden nur Gebiete mittelschwerer bis schwerer vorhergesagter Vereisung und auch diese gefährden zumeist nicht die Durchführung eines geplanten Fluges. Zusätzliche Treibstoffreserven erlauben einen intensiven Einsatz von thermischer Enteisung, den Ausgleich von Performanceverlusten oder denoch zu fliegende Umwege.

In der allgemeinen Luftfahrt ist der Flug nach Instrumentenflugregeln aufgrund des hohen Aufwands an sich schon eher selten. Der Regelfall in der Allgemeinen Luftfahrt ist eher die Vermeidung von Vereisungsbedingungen und die Verschiebung von Flügen, wo keine Vermeidung vorhergesagter Vereisungsgebiete möglich ist.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

HAPS dienen kommerziellen Interessen, sollen also bei möglichst allen Wetterlagen einsatzfähig bleiben. Die geringen Masse- und Energiereserven, die sich aus den geforderten Flugleistungen ergeben, erschweren den Einbau von De- and Anti-Icing-Einrichtungen. Wenn darauf verzichtet werden könnte, würde zusätzliche Performance für die eigentliche Mission frei. Argumente für diese Möglichkeit sind:


- Praktische Vereisungsfreiheit in der Stratosphäre
- Durch große Reichweite gewisse Spielräume bei der Wahl der Auf-/Abstiegszeiten und Auf-/Abstiegsräume, die zur Vereisungsvermeidung innerhalb der Troposphäre genutzt werden können. Dies soll im HAP5 des AVALLON-Projekts untersucht, wobei Schnittstellen mit dem OBELISK-Projekt genutzt werden.
- Ungewöhnlich langsame Fluggeschwindigkeit, die zu anderen Vereisungsmustern als üblich untersucht führen kann. Dies wurde unter anderem im AVALLON-Projekt in den HAP1 - HAP4 untersucht.

Aus der Literaturrecherchen zur Vereisung und aus Gesprächen mit den Entwicklern des Referenz-HAPS wurde herausgearbeitet:

- In der Stratosphäre ist tatsächlich keine Vereisung der Zelle zu erwarten. Gefahren durch Ice Crystal Icing betreffen nur beheizte Elemente oder warme Triebwerksteile. Dies soll im Projekt AVALLON nicht untersucht werden.
  - o Demonstrationsszenarien werden sich daher dort auf die Missionsplanung konzentrieren. Es gilt immer sichere Abstiegszenarien vorzuhalten und Regeln zu erarbeiten, welche Risiken dabei tolerabel sind.
- Beim Aufstieg durch die Troposphäre sind die Optionen eines HAPS begrenzt:
  - o Zeitliche und räumliche Variationen des Flugweges sind – bedingt durch die langen Einsatzdauern und sowieso vorhandene Überlappungen des Einsatzes von mehreren Luftfahrzeugen – in gewissem Rahmen eine Option
  - o Durchsteigen von Vereisung ist nur in geringem Maße möglich. Geringe Leistungsreserven und fehlendes oder aus Gewichtsgründen leistungsschwaches Anti-Icing sind die Gründe. Die Optionen dabei wurden mit Forschungsergebnissen von AVALLON erarbeitet.
  - o Die Nutzung von Gebieten mit vorhergesagter leichter Vereisung bzw. geringer Vereisungswahrscheinlichkeit kann die Zeitfenster deutlich vergrößern. Dabei ist jeweils das Vorhandensein von belastbaren Alternativen und Fallbackoptionen eine Grundvoraussetzung. Im Fall von RPAS ist besonders die Wahl und die Verlässlichkeit von Sensorinformationen kritisch um frühstmöglich reagieren zu können. Die Erarbeitung und Zulassung von sicheren Verfahren müssten konkret für das jeweilige Luftfahrzeug erfolgen.
  - o In Betracht kommende Szenarien sind:
    - Einflug in Gebiete mit Vereisung; Degradation der Performance über die Zeit
    - Verlassen von Gebieten mit Vereisung; Abtauen und Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit über die Zeit
    - Anstellwinkel und Wölbungsklappenwinkel die im Windkanal getestet werden sollen ergeben sich aus der geplanten Klappenstellung im Steigflug, sowie der Klappenstellung zum effizienten Reiseflug. Dreidimensionale Umströmung des Tragflügels werden mit Traglinienverfahren auf 2-D-Profilumströmung umgerechnet. (RP-AVA-003)
- Beim Abstieg durch die Troposphäre steht der Betrieb eines HAPS ähnlichen Problemen wie beim Aufstieg gegenüber.

## 1.2 AP1.2 Definition der meteorologischen Randbedingungen

Der interne Bericht RP-AVA-002 fasst die meteorologischen Hintergründe und Randbedingungen die das referenzierte Luftfahrzeug beim Weg durch die Troposphäre erwartet zusammen. Durch Literaturrecherche konnten die

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

relevanten Wolkenparameter, deren Einfluss auf verschiedene Vereisungsarten und - anhand der Flugenveloppe - die Betriebszustände eines HAPS identifiziert werden, bei denen diese gefährlich werden können. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Untersuchung der Möglichkeiten zuteil, die in der Weiterentwicklung der Vorhersagemethoden der Meteorologie [1], [2], [3] liegen. Besonders im Bereich der Verbesserung der Vorhersagesicherheiten und der Verringerung von Overforecasting [3], [4], [5], [6], [7], [8] liegt großes Potential. Gebiete in denen genauer bekannt ist, dass die Algorithmen zu Overforecasting neigen, können – mit Hilfe verbesserter bodengestützter Sensorik, verbesserter Satellitensensorik, oder sogar der entsprechenden Ausstattung einer zukünftigen HAPS-Flotte – trotzdem für Missionen nutzbar machen. Bereits schon genaues, und in Zukunft noch detaillierteres Nowcasting soll kleinräumigeres Umfliegen von lokalen Vereisungsgebieten ermöglichen.

### 1.3 AP1.3 Knowhow-Transfer aus abgeschlossenen Projekten

Das Arbeitspaket Knowhow-Transfer war bei der Erarbeitung der Grundlagen und Randbedingungen sehr wertvoll. Die fachliche Diskussion von Erkenntnissen aus der Vereisungsforschung von WEA, die fachliche Diskussion mit Meteorologen des DWD, vermittelt durch das Projekt OBeLiSK und die Diskussion und Einordnung von Informationen aus der Literatur haben wesentliche Erkenntnisse für den weiteren Verlauf des Projektes gebracht.

### 1.4 AP1.4 Identifikation der Anforderungen an das EWK-Modell

AP1.1 bis AP1.3 führen direkt zur Definition der Anforderungen an das EWK-Modell. Der interne Report RP-AVA-003 "Requirements for AVALLON IWT-model" fasst die Anforderungen an das EWK-Modell – zusammen mit den Randbedingungen und Wegen zu Entscheidungen – zusammen. Die nötigen relativ großen Abmessungen des Modells haben zu einer neuen Forderung nach Druckmessbohrungen zur Beurteilung der Verblockung geführt. Dies soll durch den Bau eines weiteren Modells mit vereinfachtem Schalenaufbau erfolgen. Hier kann ein Know-How-Transfer aus der Leichtwerk AG genutzt werden. Ein Rosemount Vereisungssensor soll im thermodynamisch ähnlichen Modell integriert werden.


Ergebnisse der Arbeiten im HAP1 wurden zusammenfassend in einem Anforderungsdokument zusammengefasst. Anforderungen wurden formalisiert (Abbildung 1) niedergeschrieben:

<b>REQ-00023</b>	AP1.2 documents shall condense expertise of ISM icing-experts and meteorologists towards icing relevant for reference HAPS
Rationale:	Internal report
Acceptable Evidence:	
Applicable Standards/Satisfies:	
Comment:	

Abbildung 1 Beispiel für die Organisation der Anforderungen

Grundlegende Fragen an das Projekt sind nach [9]:

- Wie unterscheiden sich die Vereisungseigenschaften des HAPS von denen kommerzieller Transportflugzeuge und der allgemeinen Luftfahrt?
- Welche taktischen Möglichkeiten folgen aus diesen Erkenntnissen?
- Welche strategischen Möglichkeiten folgen aus diesen Erkenntnissen?

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

- Wie sind HAPS-Missionen in Bezug auf Vereisung zu planen
- Wie ist ein human machine interface (HMI) zu gestalten, das Fernpiloten die Möglichkeiten der taktischen Flugplanung einfach und intuitiv darstellt?

Zur Beantwortung sollen die Eiwachstumsrate, Eisformen und der zugehörige Flugleistungsverlust, der Zusammenhang zwischen Wolkenparametern und Eiwachstum und die Vorhersage der Vorwarnzeiten bei einer „sense and avoid“-Strategie eingegrenzt werden. Die dafür bestimmten Demonstrationsszenarien bearbeiten einerseits die Fälle ungeplanten Einflugs in Vereisungsbedingungen, als auch geplanten Einflug in vorhergesagte leichte Vereisung. Letzteres unter der Annahme, dass Verfahren etabliert werden, innerhalb derer der Einflug mit einem ungeschützten Luftfahrzeug in Vereisung [10] erlaubt und sicher ist.

## 1.5 AP 2.1 Auslegung und Design und AP 2.2 Konstruktion

### Thermodynamisch repräsentatives Modell

#### Skalierung

Der Eiswindkanal des Instituts für Strömungsmechanik der TU Braunschweig hat einen Messquerschnitt, der Profile mit Dicken wie sie am referenzierten UAV eingesetzt werden auf eine Länge von etwa 0,5m beschränkt. Limitierend ist dabei die Kanalverblockung. Das gewählte Skalierungsverhältnis von 1:3 führt zu einer Länge von ca. 0,6m. Die einstellbaren Anstellwinkel sind dabei bereits begrenzt und die Rückwirkung der Kanalwände auf die Druckverteilung am Profil wird durch ein zusätzliches Druckmessmodell untersucht um den tatsächlichen Einfluss der Wände zu erfassen. Die charakteristische Schalenstruktur wird nicht im Verhältnis 1:3, sondern 1:2 ausgeführt, um deutlichere Unterschiede innerhalb der Struktur zu erreichen. Die Laminatdicken der Schalenstruktur werden nicht skaliert (Tabelle 1) um die Unterschiede in thermischer Leitfähigkeit und Kapazität möglichst deutlich darzustellen.

Die Modelle haben eine verstellbare Wölbungsklappe, die nicht in repräsentativer Leichtbauweise ausgeführt ist.

Die Skalierung macht eine Anpassung der Windkanalparameter nötig, die nach bewährten Methoden ( Methode nach Ruff siehe: [11], [12] ) vorgenommen wurde.


Tabelle 1 Skalierung des Modells

Geometrie	1:3
Schalen-Struktur	1:2
Laminatdicken	1:1
Flaps:	massiv/hartschaumgefüllt

#### Interfaces und Einbau

Für den Einbau konnte vom Projektpartner ISM eine detaillierte CAD-Struktur des Einbaubereiches (Abbildung 2) bereitgestellt werden, innerhalb derer alle mechanischen Schnittstellen definiert waren. Infolgedessen ging der erste Einbau ohne nennenswerte Anpassungen vonstatten.

Die Integration elektronischer Komponenten (Temperatursensoren und Eissensor) wurde mit Hilfe von auf kurzen Wegen abgestimmten Schnittstellen problemlos realisiert.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

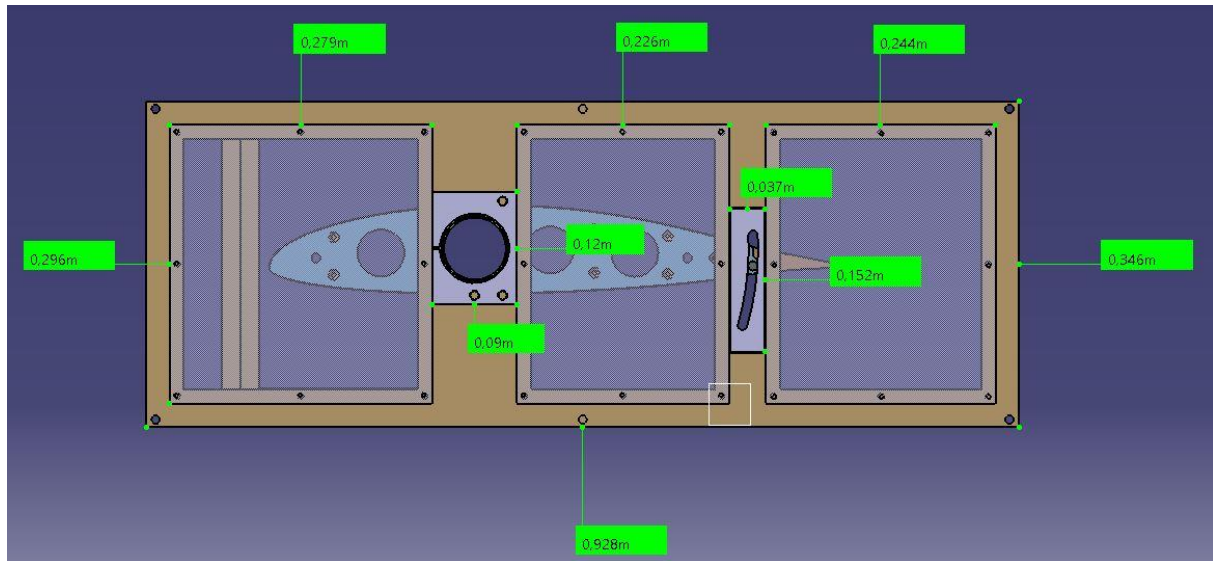



Abbildung 2 Screenshot aus dem CAD-Modell des Windkanals

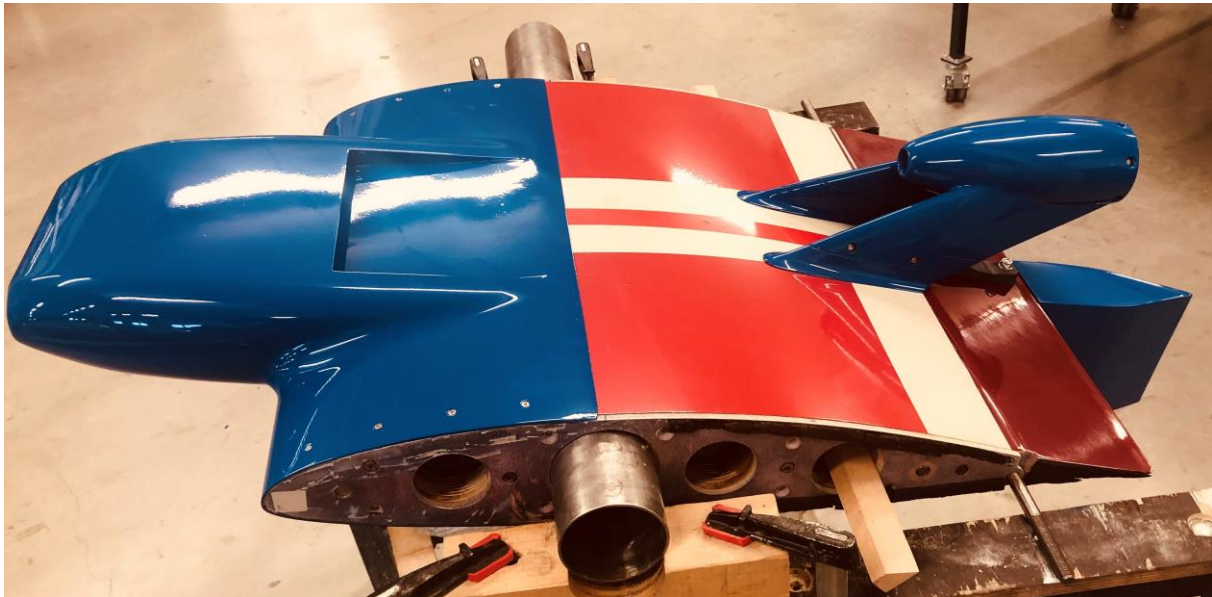
### Druckmessmodell

Das Druckmessmodell wurde in einer effizienten, bewährten Bauweise für steife und oberflächenpräzise Windkanalmodelle der Leichtwerk AG ausgelegt. Die kostengünstigen, aber aufgrund der geforderten Präzision dennoch robusten, gefrästen Negativformen erlaubten den Bau in den bereit benutzten Formen. Die präzise Fräsaufbereitung und die detaillierte CAD-Konstruktion ermöglichten die CNC-genaue Fertigung der Druckmessbohrungen durch einen Roboter (Abbildung 5).

### Detailmodelle

Es wurde Hinweise in der Literatur [13] gefunden, die den Einfluss des Widerstandes von Anbauten, Streben und Verkleidungen als größer beziffern, als bisher im AVALLON-Projekt angenommen. Deshalb wurden an zusätzlichen Anbauten (Abbildung 3) an das existierende Modell die Detailwiderstände des HAPS genauer untersucht.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024



*Abbildung 3 Gleichzeitige Montage aller drei Anbauten zu Vorführzwecken. Im Windkanal wird jeweils nur ein Modul montiert*

## 1.6 AP 2.3 Fertigung und Montage

### Thermodynamisch repräsentatives Modell


#### Fertigung und Montage – Finish, Instrumentierung und Einpassen in den EWK

Der Bau der Modelle erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Entwicklern des Referenzflugzeuges in der Leichtwerk AG. Daher konnten durch:

- die Anwendung gleicher Konstruktionsverfahren,
- die Nutzung gleicher Bauweisen und Verfahren.
- den Bau in derselben Umgebung wie das Vorbild,
- und der Nutzung derselben Materialien und Zulieferer

gleiche Eigenschaften der Schale in allen denkbaren Aspekten gewährleisten.

Das Vereisungsmodell ist mit einem Finish nach Vorgaben aus dem Entwicklungsteam des Referenzflugzeuges versehen. Die Farbe Rot (Abbildung 4) wurde davon abweichend zur besseren Kontrastierung des Eisansatzes gewählt.


 <p>Leichtwerk AG</p>	<p><b>Report</b></p>	<p>Document Number: RP-AVA-SB1</p>
<p>Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0</p>	<p>Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON</p>	<p>Revision: A01 Date: 18.04.2024</p>



*Abbildung 4 Vereiste Profilhase des Modells und vereister Sensorkorpus nach Vereisung in extremen Bedingungen. Der eigentliche Sensorfühler ist eisfrei, weil er automatisch elektrisch enteist wird. Die rote Farbe erleichtert die optische Auswertung*

#### **Druckmessmodell**

Das Druckmessmodell konnte dank bewährter Verfahren der Leichtwerk AG effizient mit schwerem GFK-Schalenaufbau, mit Roboterbohrtechnik und erprobtem Verfahren zum Oberflächenfinish erstellt werden. Alle Bohrungen von 0,3 mm Durchmesser konnten ohne Ausfall genutzt werden.

 <p>Leichtwerk AG</p>	<p><b>Report</b></p>	<p>Document Number: RP-AVA-SB1</p>
<p>Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0</p>	<p>Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON</p>	<p>Revision: A01 Date: 18.04.2024</p>

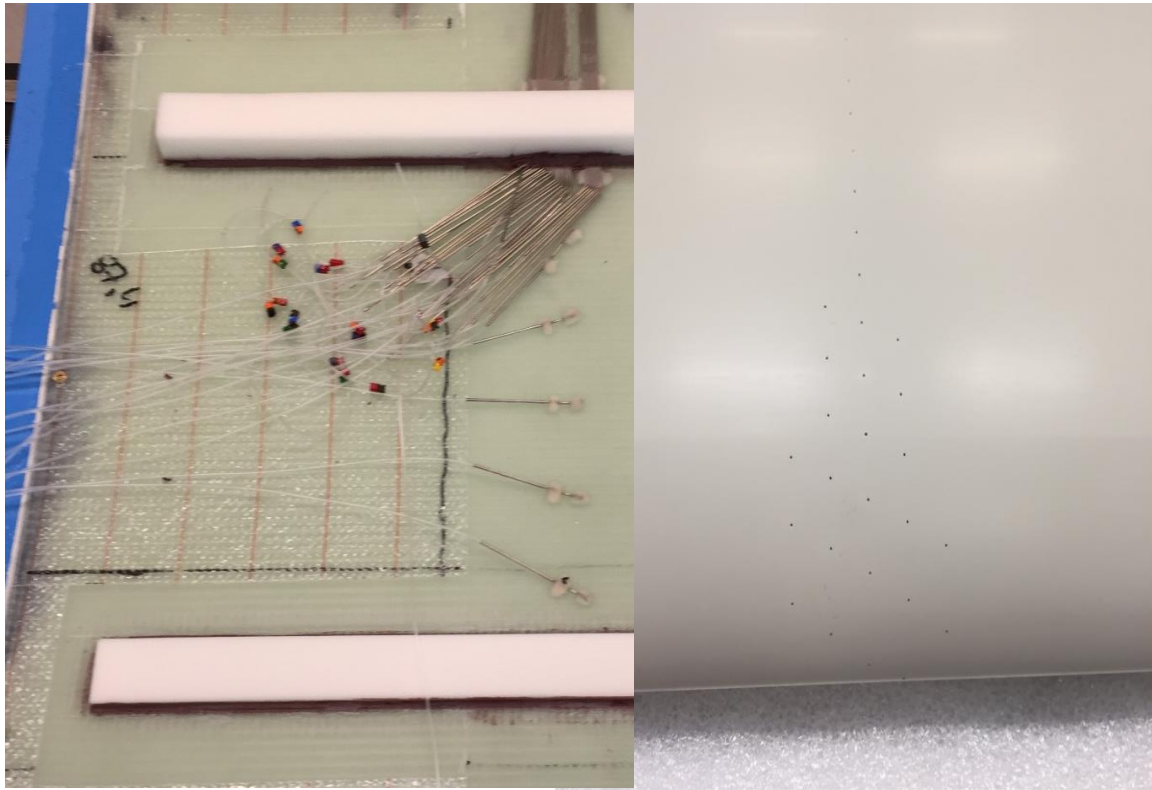


Abbildung 5 Druckmessbohrungen 0,3mm

### Detailmodelle – Bau und Festigkeitstests

Der Bau der Modelle wurde im 3D-Druck hergestellt und per Hand gefinisht und lackiert. Zur Absicherung des Windkanaleinbaus wurden die Bauteile vorab mit konservativ abgeschätzten Lasten (siehe z.B. Abbildung 6) getestet.

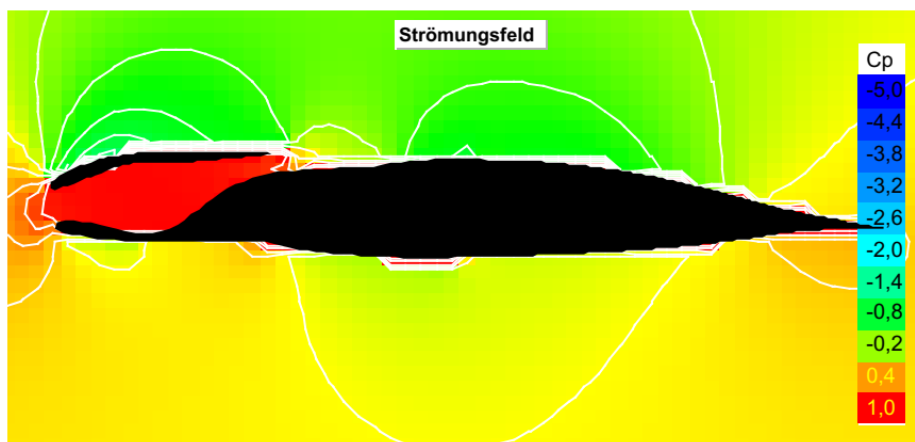



Abbildung 6 2D-Strömungsfeld im Schnitt der "Kühlernase" zur Abschätzung der Lasten im Windkanal [14]

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

### 1.7 HAP 3.1 Vorbereitung

Die Vorbereitung der Windkanalversuche und das Einpassen des Modells in die parallel am ISM gefertigten Windkanalseitenwände erfolgte dank guter Abstimmung über die Schnittstellen problemlos. Mit den in einer Testphase erarbeitete Handling-Prozeduren erwies sich das Modell als sehr gut im Vereisungsmessbetrieb handhabbar. Der Eissensor konnte bei Leichtwerk vorbereitet, mit Schnittstellen und Auswertesoftware versehen (Abbildung 7) und vor der Integration in den Windkanal getestet werden. Trotz sehr knapper Lieferung des Sensors und pandemiebedingte Personalausfälle im Hause wurde er rechtzeitig zu Beginn der ersten Vorversuchsmesskampagne erfolgreich in Betrieb genommen.

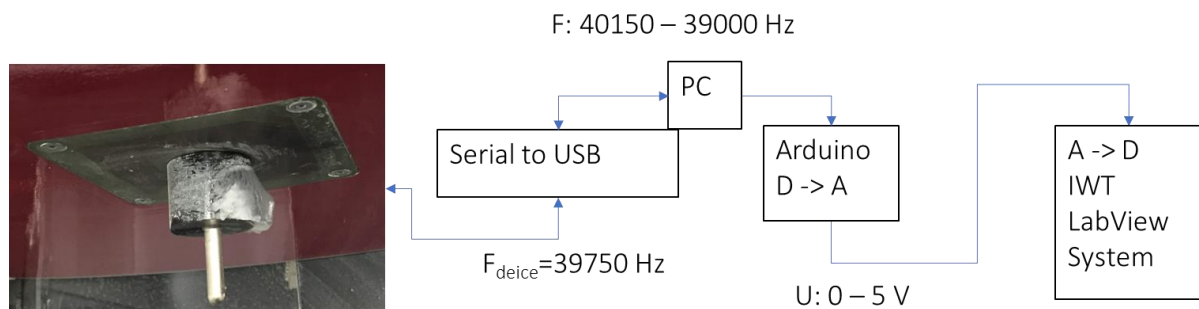


Abbildung 7 Sensor - Steuerung der Enteisung über PC und Schnittstelle zum Windkanal


### 1.8 HAP 3.2 und HAP 3.3 Durchführung und Auswertung der EWK-Versuche

#### Messkampagnen

Fünf Messkampagnen (04/2022, 11/2022, 03/2023, 08/2023, 04/2024) konnten durchgeführt werden. Durch die nötige Skalierung des Modells ergab sich eine Umrechnung der Wolkenparameter Flüssigwassergehalt und Mediantröpfengröße. Dabei wurden die Grenzen der Sprühdüsen des Eiswindkanals für einen großen Teil der typischen Parameter für leichte bis mittelschwere Vereisung unterschritten. Wie prinzipiell bereits in der Planung vorgesehen, dienen numerische Eisansatzmodellierungen zur Ergänzung der Ergebnisse in diese Bereiche.

#### Eissensor

Die Auswertung des Eissensor erfolgte durch Bestimmung des gültigen Bereichs der Messung (Ausschluss der Heizphase) und Extrapolation der Eisansatzrate während der Heizphase. Der geringe Durchmesser und damit Nassenradius des Sensors ist günstig gewählt um ein breites Spektrum an Tropfengrößen zu sammeln. Ein Beispiel bei dem durch große Tropfen und einen Anfrieranteil (freezing fraction) größer als 100% die Dicke am Profil gut übereinstimmt ist in Abbildung 8 gegeben. Die Ausgabe für kleinere Tropfenverteilungen muss jeweils auf die Profilgeometrie umgerechnet werden, was ein Nachteil des Messprinzips ist. Das Messergebnis bei geringerem Anfrieranteil (freezing fraction) stellt eine weitere Schwäche des Sensorprinzips dar, da Runback und Hornbildung nicht am Sensor messbar sind. Mit einem Datensatz zum Vereisungsverhalten des jeweiligen Profils ist aber eine Ermittlung der tatsächlichen Vereisung aus Sensordaten und Temperatur möglich. Dies genauer zu untersuchen und zu belegen könnte Thema weiterer Forschungsvorhaben sein.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

### Temperatursensoren in der Schale

Die Auswertung der Temperatursensoren erfolgt parallel zu jedem Versuch. Der Vergleich zweier ähnlicher Versuche mit unterschiedlichen Anstellwinkeln zeigt, dass die Bestimmung der Zone des Eisansatzes an der Profiloberfläche durch ortsaufgelöste Temperaturmessungen mit dem verwendeten Strukturaufbau gut darstellbar ist. Eine noch feinere Verteilung der Temperatursensoren ist technisch möglich und ergäbe eine genaue Darstellung der Vereisungszone.

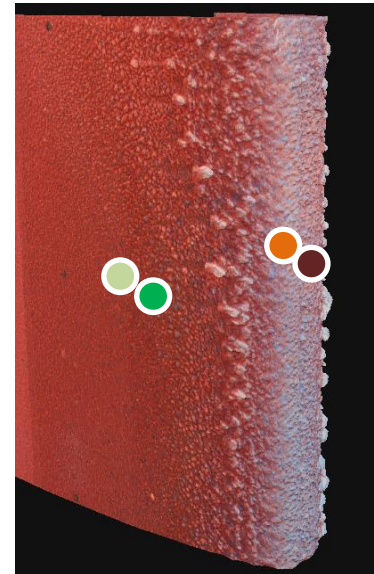
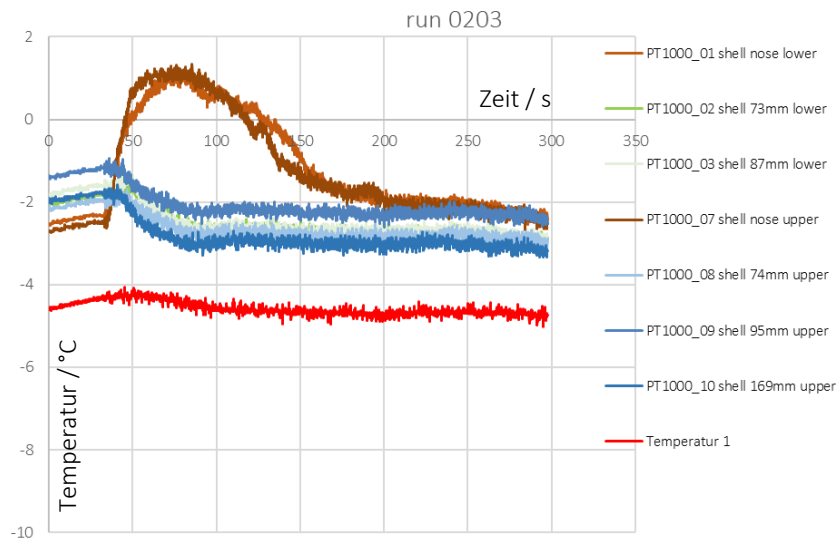



Abbildung 8: Temperaturmessungen an der Außenhaut erlauben die räumliche Eingrenzung des Vereisungsbereichs

### Untersuchung von Anbaustrukturen und Verschneidungen

Die Tests mit den Anbauten konnten am Ende einer Versuchskampagne zur Methodenverbesserung des ISM durchgeführt werden. Durch die Nutzung des mechanisch robusteren Druckmessmodells war der Umbau sehr schnell und einfach möglich.

Die Ergebnisse stützen die Annahme, dass die Detailwiderstandsverschlechterungen durch Vereisung zu einem größeren Anteil als zunächst geplant berücksichtigt werden sollen. Im Flugleistungsmodell wird der entsprechende Faktor an die Erkenntnisse angepasst gewählt. Im Verlauf der weiteren Entwicklung des UAV sollte die innere Luftführung der Kühlluft einlässe (Abbildung 9) auch im Hinblick auf Vereisung ausgelegt werden.

 <p>Leichtwerk AG</p>	<p><b>Report</b></p>	<p>Document Number: RP-AVA-SB1</p>
<p>Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0</p>	<p>Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON</p>	<p>Revision: A01 Date: 18.04.2024</p>



*Abbildung 9 Vereisung an der "Kühlernase". Die Verschneidung mit dem Flügel sammelt überproportional Eis. Sobald die innere Kühlluftführung bekannt ist, sind weitere Untersuchungen sinnvoll*


### 1.9 HAP4 Numerische Untersuchung des Eisaufbaus

Die numerische Auswertung der experimentell erstellten und numerisch errechneten Eisansatzformen beim Projektpartner ISM der TU Braunschweig ergibt unter anderem die in HAP 5 benötigten, errechneten Profilpolaren für den gewählten Flügelschnitt des Referenzflugzeuges. Dazu wurden experimentelle und numerische Verfahren weiterentwickelt.

### 1.10 AP 5.1 Identifikation kritischer Flugbedingungen und Ableitung von Flugführungsstrategien

Es wurden drei grundsätzliche Flugstrategien entwickelt:

1. Allen vorhergesagten Vereisungsgebieten ausweichen. Die Ergebnisse aus AVALLON dienen der Vorhersage des Einflusses beim unvorhersehbaren Einflug in nicht vorhergesagten Vereisungsbedingungen.
2. Eine flugzeugspezifische Vorhersage etablieren und – so wie die etablierte Vorhersage ADWICE nur Vereisung ab „LIGHT“ warnt - nur Vereisung umfliegen die in ihrer individuellen Wirkung auf das Flugzeug der FAR-Definition der Kategorie „LIGHT“ für PIREPs oder stärker entspricht. Dieses Vorgehen ist als spezielles Verfahren mit den Behörden zu verhandeln und mit dem Flugzeug zuzulassen.
3. Das Flugzeug zum beschränkten Einflug in bekannte Vereisungsbedingungen zulassen. Dazu ist einerseits eine Anpassung der Regulatorien nötig. Andererseits müssen die zugehörigen Betriebsverfahren entwickelt und mit dem Flugzeug zugelassen werden. Ein sicherer Einflug in bekannte Vereisung kann nur dann erfolgen, wenn:
  - a. Präzise Vorhersagen im Sinne von Nowcasts vorliegen, die auch aktuelle Satellitenbilder und Wolkenradar einbeziehen. Diese müssen eine genaue Vorhersage der Wolkenparameter entlang des Flugweges erlauben. Es existiert Potenzial die Vereisungsvorhersagen weiter auszubauen, wenn der entsprechende Kundenkreis dafür besteht. Die Art und Qualität der Vorhersage wird voraussichtlich zusammen mit den Betriebsverfahren des Flugzeugs zuzulassen sein.
  - b. Ein ausreichend präzises Modell der Flugzeugperformance unter diesen Verhältnissen existiert. Das im Rahmen von AVALLON entwickelte Modell muss dafür weiterentwickelt und am fliegenden Flugzeug überprüft und kalibriert werden. Flüge hinter „Ice-Tankern“ oder riskante instrumentierte Testflüge in realer Vereisung könnten zum Nachweis nötig sein.
  - c. Die kommerziell eingesetzten Flugzeuge umfangreich mit Sensorik ausgestattet sind.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

### Quelle für Wolkenparameter

Für die Umsetzungen der Strategien 2 und 3 ist die Kenntnis der Wolkenparameter im vorhergesagten Vereisungsgebiet nötig. Daher wurde ein Weg gesucht, um aus den sehr unpräzisen Informationen der Vereisungsvorhersagen sinnvolle Annahmen zu den Vereisungsparametern Temperatur, Tropfengrößenverteilung und Flüssigwassergehalt abzuleiten:

Der Literatur zum Vorhersageprodukt ADWICE des DWD und entsprechenden Referenzen ist zu entnehmen, dass sich die Vorhersage auf eine Tabelle des Air Weather Service AWS [15] bezieht. In dieser sind jeweils für cumuliforme (Mediantröpfchengröße 17µm) und stratiforme (Mediantröpfchengröße 14µm) Wolken bestimmten Bereichen von Flüssigwassergehalten bestimmte Vereisungsintensitäten LIGHT, MODERATE und SEVERE zugeordnet (Abbildung 10). Die Kategorie TRACE nutzt ADWICE nicht.


**TABLE 2. Icing categories for given LWC ( $\text{g m}^{-3}$ ) for stratiform (strat) and cumuliform (cumul) clouds (following Lewis 1947).**

LWC strat	LWC cumul	Icing category	Symbol
<0.11	<0.07	Trace	
0.11–0.69	0.07–0.50	Light	LGT
0.69–1.33	0.50–1.0	Moderate	MOD
>1.33	>1.0	Severe	SEV

*Abbildung 10 Wolkenparameter und Vereisungskategorien in ADWICE [16],*

Da die herausgegebenen Vereisungsintensitäten LIGHT, MODERATE und SEVERE einige Gültigkeit für die ursprüngliche Zielgruppe der typischen Luftfahrzeuge der kommerziellen Luftfahrt haben, nicht aber für die betrachteten HAPS (eine Hauptmotivation für das Projekt), muss diese Ausgabe für HAPS übersetzt werden. Hierfür wird ein pragmatischer Weg gewählt:

1. Die ausgegebenen Vereisungsintensitäten werden durch die historisch definierende Tabelle des AWS [15] zurück in LWC und MVD übersetzt. Dabei können die Inputs aus Empirie, Synoptik und Kalibrierung des Modells [1], [3], [4], [6], [16], [17], [18], [19] nicht betrachtet werden.
2. Die ermittelten Bereiche aus LWC und MVD werden als repräsentativ betrachtet und zusammen mit der vorhergesagten Temperatur ins Performancemodell des HAPS-Flügelprofils gespeist.
3. Das Performancemodell des Flügelprofils wird aus praktischen Gründen nur an relevanten Betriebspunkten erstellt. Dies sind beispielsweise die Anstellwinkel, Klappenstellung und die Fluggeschwindigkeit im Steigflug.
4. Durch die voraussichtlich eingeschränkte Bewegungsfreiheit eines erstens unbemannten und zweites „unpassend langsamen“ Verkehrsteilnehmers im kontrollierten Luftraum begründet die Konzentration auf wenige Konfigurationen: Aufstieg, Reiseflug im Transfer und Abstieg. Die Szenarien des „loitering“ zur Erbringung der kommerziellen Leistung finden in großen Höhen und ohne Eisansatz statt. Da diese Höhen mit relevant vereistem HAPS kaum erreicht und hinreichend lange gehalten werden können, liegt der Fokus auf der Untersuchung des Aufstiegs durch mögliche Vereisung. Die relativ geringe Variation von Geschwindigkeit und Anstellwinkel kann eine Beschränkung auf eine Konfiguration für die Vereisungsdaten erlauben.
5. Das Performancemodell wird mit weiteren Annahmen zur Zunahme von weiteren Luftwiderstandsanteilen und zu Propellerwirkungsgraden bei Vereisung erstellt und damit die möglichen Flugführungsstrategien evaluiert.
6. Die mittels der Modellierung vorhergesagten Flugleistungsverschlechterungen entlang bestimmter Flugwege ermöglicht die Evaluierung von Flugführungsstrategien.

 <p>Leichtwerk AG</p>	<h2>Report</h2>	<p>Document Number: RP-AVA-SB1</p>
<p>Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0</p>	<p>Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON</p>	<p>Revision: A01 Date: 18.04.2024</p>

### Performancemodellierung

Zur Modellierung der Flugleistung sind für die zu den verschiedenen vorhergesagten Vereisungsintensitäten gehörenden Wolkenparameter Profilpolaren für das Windkanalmodell numerisch berechnet worden. Deren Verlauf über die Zeit wird mit einem annähernd parabolischen Korrekturterm zur Verschlechterung über die Zeit (siehe auch [20]) unter Vereisungsbedingungen angesetzt, dessen Koeffizienten an die jeweiligen Polaren des Windkanalmodells angepasst wurden. Der Verlauf des Fluges durch verschiedene Vereisungsintensitäten wird durch Aneinandersetzen der Korrekturterme im Zeitverlauf dargestellt. Ein Beispiel ist in Abbildung 11 gegeben.

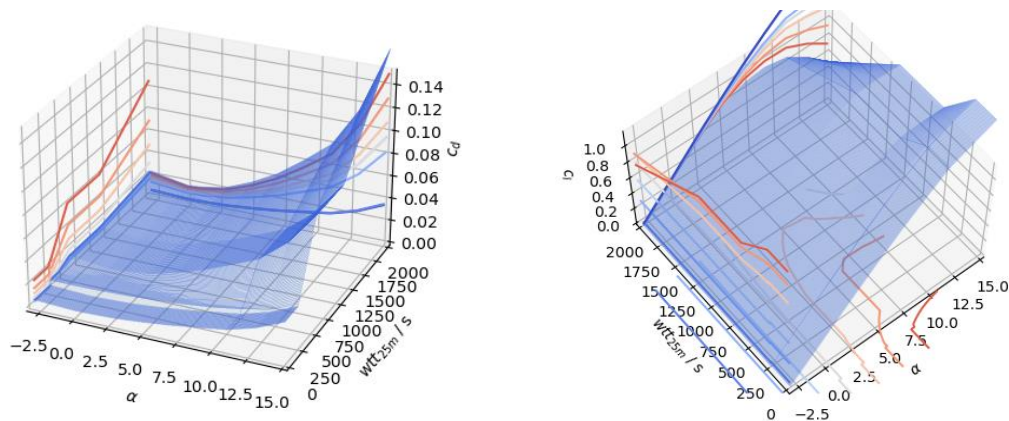



Abbildung 11 Profilpolarenzeitverlauf  $c_d$  und  $c_l$  über Anstellwinkel  $\alpha$ ; Zeitskala: Zeit im Windkanal – Beispiel-Zeitverlauf für Eisintensität „kein Eis“, „Moderate Icing“, „kein neues Eis“ gefolgt von „Light Icing“

Dieser Profilpolarenzeitverlauf ist Eingangsgröße für eine Flugleistungsabschätzung des gesamten Tragflügels unter Berücksichtigung von lokalen Flächentiefen und Anstellwinkeln und vereisungsbedingten Auftriebseinbußen (siehe Abbildung 12). Dabei wird die Zuordnung der Polare des Windkanalmodells zu den gegebenen Wolkenparametern zunächst mit den Ansätzen von Ruff aus [11] zurückskaliert. Die Einwirkzeit ist ebenfalls Teil der Skalierung. Bei der folgenden Skalierung auf größere und kleinere Flächentiefen (aufgrund der ähnlichen Profile am Tragflügel gleichgesetzt mit dem Nasenradius) wird nur noch die referenzierte Einwirkzeit als dominierender Faktor skaliert. Bei der Zuordnung entlang der Spannweite wird wiederum der lokale Anstellwinkel aus Schränkung und induzierter Anströmung berücksichtigt. Da auch der Auftriebsbeiwert reduziert wird, muss eine Nachführung des Anstellwinkels des Tragflügels erfolgen um weiterhin den gleichen Auftriebsbeiwert zu erreichen. Mit der errechneten Performanceverschlechterung lassen sich kritische Flugbedingungen ermitteln.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

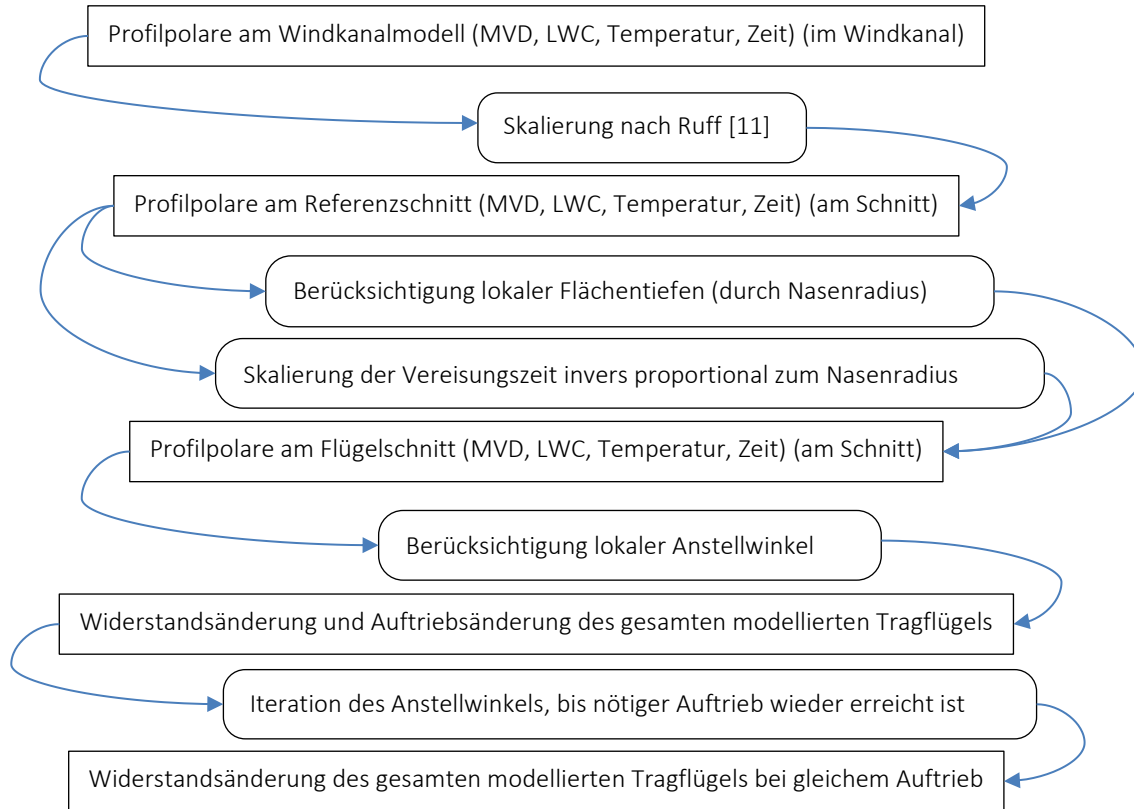


Abbildung 12 Flugleistungsmodellierung des Tragflügels unter Vereisung

### 1.11 AP 5.2 Entwicklung eines geeigneten HMI zur Darstellung von Vereisungsbedingungen

Zur Entwicklung des HMI wurde folgende Rollenverteilung in der GCS angenommen:


UAV-Pilot:

- Mehrere Luftfahrzeuge „steuern“ und überwachen
- ATC-Kontakt während der Flugdurchführung per Funk, Telefon und andere Kanäle
- Sicherstellung der Missionsziele
- Erstreaktion auf außergewöhnliche Ereignisse oder Notsituationen

Flugplaner:

- Flugplanung anhand von Missionen, Wettervorhersagen und Lufträumen
- Flugplanung mit ATC
- Vorbereitung der Daten für den Piloten
- Unterstützung der Piloten bei Änderungen während des Fluges

Die HMI für Flugplaner und Pilot soll grundsätzlich gleich aufgebaut sein, aber in verschiedenen Benutzerrollen verschiedene Module ausblenden oder in den Hintergrund rücken. Es soll jeweils kurzfristig mögliche sein, für Abstimmungen zwischen den Akteuren in die gleiche Rolle und danach schnell wieder in die eigentliche Rolle zurück zu wechseln. Die Durchlässigkeit für Benachrichtigung und Warnungen erhält die Situational Awareness des Piloten. Die Basisfunktionalitäten des HMI „Kartendarstellung“ und „Meteogramm des Flugwegs“ wurden daher zunächst für Pilot und Flugplaner gleichermaßen entwickelt und werden später in den jeweiligen Rollen mit verschiedenem Fokus genutzt.


 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

### 1.12 AP 5.3 Einbindung der entwickelten Flugführungsstrategien in das HMI

Es wurden drei Flugführungsstrategien untersucht. Strategie 1 liegt die Vermeidung jeglicher vorhergesagter Vereisung zugrunde, Strategie 2 betrachtet die Möglichkeit, eine individualisierte Vereisungsvorhersage zu etablieren und Strategie 3 erweitert dies durch die Simulation bewussten Einflugs in bekannte Vereisung zur Analyse möglicher Flugrouten.

Für die Einbindung der Strategie 1 erfolgt die Darstellung der Vereisungsvorhersage höhencodiert in der Kartendarstellung, Im betriebsmäßigen Einsatz erfolgt ein kontinuierliches Update der Vorhersage mit Nowcastdaten und Onboard-Sensormessungen, anhand derer der Pilot eine Gefahr für den sicheren Flugverlauf erkennen und den Flugplaner um Unterstützung bitten kann. Nach der Erstellung durch den Flugplaner und vorläufiger Abstimmung mit der ATC erfolgt die interaktive Darstellung von Alternativen. Dazu ist im realen Betrieb ein frühzeitiger interaktiver Austausch möglicher Alternativen mit der Flugsicherung vorzusehen um die Konflikte aus kurzfristig angefragten Flugwegänderungen zu antizipieren, wie sie bereits alltäglich bei Gewitterlagen auftreten. Diese kurzfristigen wetterbedingten Flugwegänderungen stellen eine Herausforderung an die Flugsicherung dar, die durch Vorausplanung abgemildert werden sollte.

Die Vorhersage der Flugzeugperformance ist innerhalb der Strategie 1 grundsätzlich nicht nötig, da ein Einflug in Vereisung ausgeschlossen wird. Die Erweiterung um eine Flugleistungsvorhersage anhand von Sensordaten und Nowcast beim unbeabsichtigten Einflug in Vereisung mit den Methoden aus Strategie 3 ist jedoch vorzusehen. Für die Einbindung der Strategie 2 können dieselben Module genutzt werden. Lediglich eine andere Zuordnung der Bereiche in denen sicher eine relevante Beeinträchtigung der Flugleistung sehr unwahrscheinlich ist, und die damit nicht als „bekannte Vereisung“ gewertet werden, ist nötig. Sinnvoll ist aber dennoch eine Darstellung der vorherzusehenden „irrelevanten Beeinträchtigung“ der Flugleistung und der Reaktion auf Sensormessungen. Strategie 3 zeichnet sich durch den geplanten Einflug in bekannte Vereisung aus. Zwingend ist hier die Darstellung des Verlaufs der Flugleistung entlang des Flugweges. Eine Verhandlung sicherer Grenzen und Sicherheitsmargen mit den zulassenden Behörden und Luftraumverantwortlichen muss die entsprechenden Teile eines zugelassenen Betriebskonzeptes ergeben. Das Vorhalten einer bestimmten Anzahl an Alternativen könnte Teil entsprechender Forderungen sein.


 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

### 1.13 AP 5.4 Implementierung des HMI in eine bestehende GCS zur Missionsplanung



Abbildung 13: HAPS Kontrollzentrum Bodenstation

Ursprünglich geplant war die Implementierung des HMI in die geplante GCS des Referenzflugzeuges. Durch Verzögerungen kommt die GCS dieses Referenzprojektes aber zu spät für AVALLON. Als Alternative ist bei der Leichtwerk AG aber ein weit entwickelter UAV-Leitstand UVCS (Abbildung 13) verfügbar, der bereits praktisch erprobt ist und im Rahmen von AVALLON weiterentwickelt wurde. Der UAV-Leitstand ist ein anpassbarer Leitstand für UAV, der eine Umgebung vergleichbar der geplanten GCS der hochfliegenden Plattform darstellt. In diese Umgebung konnte im Rahmen des Projektes AVALLON die HMI (Abbildung 14) eingebunden werden. Damit ist nicht nur das Projekt der referenzierten hochfliegenden Plattform direkt mit HMI und Strategien zur Behandlung von drohender Vereisung ausrüstbar. Die Ansätze können auch auf andere UAVs, die mit dem UAV-Leitstand kontrolliert werden, übertragen werden. Die Tools zur Erstellung individueller Polaren sind nun am ISM verfügbar.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

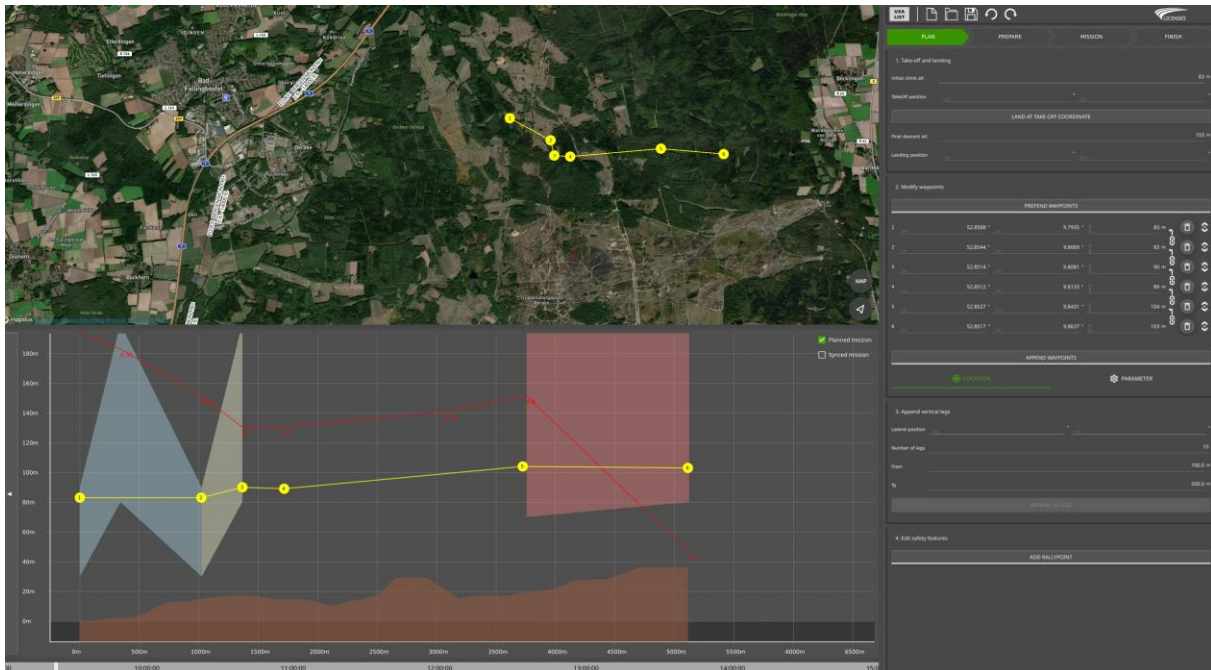


Abbildung 14 Vereisungsvorhersage entlang des Flugweges im HMI der GCS

### 1.14 AP 5.5 Simulative Erprobung des HMI im Demonstrationszenario und Optimierung

Mit der Implementierung des HMI in eine bestehende GCS zur Missionsplanung ist die simulative Erprobung und Optimierung möglich geworden. Der Optimierung sind aber durch den geringen Fortschritt des referenzierten HALE-Projektes Grenzen gesetzt. Ohne konkret verhandelte Betriebskonzepte sind viele Annahmen zu treffen, die eine Optimierung dann in die falsche Richtung laufen ließen. Deshalb musste sich die simulative Erprobung im Projektzeitrahmen noch auf einfache Fälle beschränken.


## 2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die nachfolgende Tabelle stellt die im Forschungsvorhaben durch Leichtwerk AG abgerechneten buchhalterischen Positionen dar. Hieraus ist ersichtlich, dass die kostenmäßig größte buchhalterische Position durch Personalkosten gestellt wird. Dies ist insofern begründbar, als die angemessene Bearbeitung der bewilligten Arbeitspakete primär mittels Personaleinsatz sichergestellt werden konnte.

Position	Beschreibung	Anteil
0837	Personalkosten	95%
0850	Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	3%
0813	Material	2%

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeitsanteile der Leichtwerk konnten durch den Einsatz von fachlich qualifiziertem Personal gelöst werden. Das eingesetzte Personal Leichtwerk AG umfasste Ingenieure für das Anforderungsmanagement, die Entwicklung

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

und Konstruktion der Windkanalmodelle sowie Fachmitarbeiter Bau der Modelle. Außerdem Ingenieure für das Anforderungsmanagement, die Entwicklung und Implementierung der Flugführungsstrategien. In Anbetracht der gewonnenen Projektergebnisse und des dafür notwendigerweise eingesetzten qualifizierten Personals erscheinen die geleisteten Arbeiten, und damit einhergehenden Kosten als angemessen.

#### **4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Der kommerzielle Betrieb von langsam fliegenden Luftfahrzeugen wird immer auch die Gefahr der Vereisung beinhalten. Die aktuell verfügbaren Flugwetterprodukte können die Anforderungen eines bemannten oder unbemannten Betriebes langsam fliegender Luftfahrzeuge hinsichtlich Vereisung nur teilweise erfüllen. Die Vorhersagen orientieren sich historisch bedingt an schnelleren Luftfahrzeugen.

Mit der experimentellen und numerischen Untersuchung des Eisaufbaus und der Ermittlung der Degradation der Flugleistung eines Beispielflugzeuges konnte gezeigt werden, wie ein sicherer Betrieb eines solchen Luftfahrzeuges in Vereisungsbedingungen ermöglicht werden kann.

Es konnte gezeigt werden wie ein HMI und angepasste Strategien die Planung und Flugführung unter solchen Bedingungen verbessern kann.


#### **5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es sind während der Durchführung des Projektes keine Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden, die in einem Ansatz für die Modellierung der Flugleistungsdegradation zusammen:

- Vorhersagen oder Nowcasts,
- einen Ansatz für den Verlauf der Vereisung über die Zeit,
- und zur verschiedenen Eisausbildung entlang eines Tragflügels mit veränderlichen Profilen,
- für Konfigurationen typisch für hochfliegende Plattformen integrieren.

#### **6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses**

- Baghel, A., Sotomayor-Zakharov, D., Knop, I., and Ortwein, H., "Detailed Study of Photogrammetry Technique as a Valid Ice Accretion Measurement Method," SAE Technical Paper 2023-01-1411, 2023, <https://doi.org/10.4271/2023-01-1411>
- Baghel, A., Sotomayor-Zakharov, D., Knop, I., and Ortwein, H., "Detailed Study of Photogrammetry Technique as a Valid Ice Accretion Measurement Method," SAE Technical Paper 2023-01-1411, 2023, <https://doi.org/10.4271/2023-01-1411>.
- Details über das Performancemodell sollen über die Demonstration des Systems für potentielle Kunden hinaus zunächst nicht veröffentlicht werden.

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024


### III. Anhang

#### 1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Beispiel für die Organisation der Anforderungen .....	7
Abbildung 2 Screenshot aus dem CAD-Modell des Windkanals .....	9
Abbildung 3 Gleichzeitige Montage aller drei Anbauten zu Vorführzwecken. Im Windkanal wird jeweils nur ein Modul montiert .....	10
Abbildung 4 Vereiste Profilnase des Modells und vereister Sensorkorpus nach Vereisung in extremen Bedingungen. Der eigentliche Sensorfühler ist eisfrei, weil er automatisch elektrisch enteist wird. Die rote Farbe erleichtert die optische Auswertung .....	11
Abbildung 5 Druckmessbohrungen 0,3mm .....	12
Abbildung 6 2D-Strömungsfeld im Schnitt der "Kühlernase" zur Abschätzung der Lasten im Windkanal [14] .....	12
Abbildung 7 Sensor - Steuerung der Enteisung über PC und Schnittstelle zum Windkanal.....	13
Abbildung 8 Temperaturmessungen an der Außenhaut erlauben die räumliche Eingrenzung des Vereisungsbereichs .....	14
Abbildung 9 Vereisung an der "Kühlernase". Die Verschneidung mit dem Flügel sammelt überproportional Eis. Sobald die innere Kühlluftführung bekannt ist, sind weitere Untersuchungen sinnvoll .....	15
Abbildung 10 Wolkenparameter und Vereisungskategorien in ADWICE [16], .....	16
Abbildung 11 Profilpolarenzeitverlauf $cd$ und $cl$ über Anstellwinkel $\alpha$ ; Zeitskala: Zeit im Windkanal – Beispiel-Zeitverlauf für Eisintensität „kein Eis“, „Moderate Icing“, „kein neues Eis“ gefolgt von „Light Icing“ .....	17
Abbildung 12 Flugleistungsmodellierung des Tragflügels unter Vereisung .....	18
Abbildung 13: HAPS Kontrollzentrum Bodenstation .....	20
Abbildung 14 Vereisungsvorhersage entlang des Fluggweges im HMI der GCS.....	21


#### 2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Skalierung des Modells .....	8
--	---

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

### 3 Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
ADWICE	Vereisungsvorhersage des DWD
ATC	Air Traffic Control
BSIWT	Braunschweiger Icing Wind Tunnel
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Controlled
DWD	Deutscher Wetterdienst
EWK	Eis Wind Kanal
GCS	Ground Control Station
HAPS	High Altitude Pseudo Satellite
HMI	Human Machine Interface
ISM	Institut für StrömungsMechanik
IWT	Icing Wind Tunnel
LWC	Liquid Water Content
MVD	Median Volumetric Diameter
PIREP	Pilot report

 <b>Leichtwerk AG</b>	<b>Report</b>	Document Number: RP-AVA-SB1
Hermann-Blenk-Str. 38 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 245405 0	Schlussbericht zum Verbundvorhaben AVALLON	Revision: A01 Date: 18.04.2024

## 4 Literatur

- [1] F. Kalinka, "ADWICE Icing Forecasts by DWD. Version 1.0." UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory, p. 46 data files, 1 ancillary/documentation file, 37 GiB, 2020. doi: 10.26023/4ZQT-P33D-4J0H.
- [2] T. Fowler, M. Chapman, B. Brown, and J. Mahoney, "CURRENT ICING POTENTIAL (CIP) SEVERITY INDEX," Jan. 2004.
- [3] M. S. Wandishin, B. Etherton, J. Hart, G. Layne, and M. A. Petty, "Assessment of the HiRes Current Icing Product (CIP) and Forecast Icing Product (FIP)," Boulder, trp-111513, 2013. [Online]. Available: <https://esrl.noaa.gov/fiqas/publications/articles/cip-fip-qa-pdt-report-trp-111513.pdf>
- [4] B. Brown, G. Thompson, R. Bruintjes, R. Bullock, and T. Kane, "Intercomparison of In-Flight Icing Algorithms. Part II: Statistical Verification Results," *Weather Forecast.*, vol. 12, pp. 890–914, Dec. 1997, doi: 10.1175/1520-0434(1997)012<0890:IOIFIA>2.0.CO;2.
- [5] M. Kelsch and L. Wharton, "Comparing PIREPs with NAWAU Turbulence and Icing Forecasts: Issues and Results," *Weather Forecast.*, vol. 11, no. 3, pp. 385–390, Sep. 1996, doi: 10.1175/1520-0434(1996)011<0385:CPWNTA>2.0.CO;2.
- [6] G. Thompson, R. Bruintjes, B. Brown, and F. Hage, "Intercomparison of In-Flight Icing Algorithms. Part I: WISP94 Real-Time Icing Prediction and Evaluation Program," *Weather Forecast.*, vol. 12, Dec. 1997, doi: 10.1175/1520-0434(1997)012<0878:IOIFIA>2.0.CO;2.
- [7] R. L. Bowyer and P. G. Gill, "Objective verification of global in-flight icing forecasts using satellite observations: Verification of WAFS icing forecasts using satellite observations," *Meteorol. Appl.*, vol. 26, no. 4, pp. 610–619, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/met.1788>.
- [8] B. G. Brown, J. L. Mahoney, R. Bullock, T. L. Fowler, J. Henderson, and A. Loughe, "Quality Assessment Report: Integrated Icing Diagnostic Algorithm (IIDA)."
- [9] "RP-AVA-003-Requirements for AVALLON IWT-model," AVALLON, RP-AVA-003, 2021.
- [10] R. K. Jeck, "A History and Interpretation of Aircraft Icing Intensity Definitions and FAA Rules for Operating in Icing Conditions," DOT/FAA/AR-01/91, 2001.
- [11] D. N. Anderson, "Manual of Scaling Methods," p. 78, 2004.
- [12] D. N. Anderson and J.-C. Tsao, "Overview of Icing Physics Relevant to Scaling," Rept-2003-01-2130, Aug. 2005. Accessed: Jun. 24, 2021. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050215167>
- [13] R. J. Ranaudo, K. L. Mikkelsen, R. C. Mcknight, and P. J. Perkins, "Performance degradation of a typical twin engine commuter type aircraft in measured natural icing conditions," presented at the Aerospace Sci. Meeting, Reno, NV, Jan. 1984. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19840005105>
- [14] "JavaFoil." Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm>
- [15] AWS AIR WEATHER SERVICE (MAC), "Weather forecasters' guide on aircraft icing - AWS/TR-80/001," 1980.
- [16] C. Leifeld, *Weiterentwicklung des Nowcastingsystems ADWICE zur Erkennung vereisungsgefährdeter Luft-räume*. in Berichte des Deutschen Wetterdienstes, no. 224. Offenbach am Main: Dt. Wetterdienst, 2004. Accessed: Jun. 30, 2022. [Online]. Available: [http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage/2010/07/02/file\\_6/3820348.pdf](http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage/2010/07/02/file_6/3820348.pdf)
- [17] A. Tafferner, T. Hauf, C. Leifeld, T. Hafner, H. Leykauf, and U. Voigt, "ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments," *Weather Forecast.*, vol. 18, no. 2, pp. 184–203, Apr. 2003, doi: 10.1175/1520-0434(2003)018<0184:AADAWS>2.0.CO;2.
- [18] F. Kalinka, K. Roloff, J. Tendel, and T. Hauf, "The In-flight icing warning system ADWICE for European air-space - Current structure, recent improvements and verification results," *Meteorol. Z.*, vol. 26, no. 4, pp. 441–455, 2017, doi: 10.1127/metz/2017/0756.
- [19] B. C. Bernstein *et al.*, "Current Icing Potential: Algorithm Description and Comparison with Aircraft Observations," *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 44, no. 7, pp. 969–986, Jul. 2005, doi: 10.1175/JAM2246.1.
- [20] K. Wang, Y. Xue, H. Tian, M. Wang, and X. Wang, "The Impact of Icing on the Airfoil on the Lift-Drag Characteristics and Maneuverability Characteristics," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, pp. 1–16, Jun. 2021, doi: 10.1155/2021/5568740.