

## Schlussbericht

Sachbericht gemäß Nebenbestimmungen NKBF 98

Verbundprojekt

„HyMovDelce“

Hybrid Moveable Deicing Systems

**Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie**

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG)	Förderkennzeichen: 20Y1512E
Titel des Teilvorhabens: Innovative Heizlacke für Enteisungssysteme	
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.01.2017 bis: 31.03.2020 (verlängert bis 31.12.2020)	
Berichtszeitraum des Vorhabens: von: <b>01.01. 2017</b> bis: <b>31.12.2020</b>	

**Ersteller: Swetlana Schesler, Nadine Rehfeld**

**Ausgabedatum: 28.06.2021**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhalt

1 Kurzdarstellung.....	2
2 Eingehende Darstellung .....	4
2.1 Ergebnisdarstellung mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele und Verwendung der Zuwendung .....	4
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	7
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	7
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	7
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt anderer Stellen	8
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	8

## 1 Kurzdarstellung

Das im Verbundprojekt HyMovDelce angestrebte Gesamtziel „Umweltfreundliche Luftfahrt“, welches durch die Entwicklung sicherer und sparsamer Systeme zur Reduzierung der Eisbildung auf Tragflächen erreicht werden soll, stellt einen enormen Technologievorsprung dar. Dieser ermöglicht die Stärkung der technologischen Vorreiterrolle der deutschen Luftfahrtindustrie für ein sicheres, umweltfreundliches Luftverkehrssystem. Hierzu leistet das im Teilvorhaben „Innovative Heizlacke für Enteistungssysteme“ (HyMovDelce-E<sup>2</sup>-Lack) der Fraunhofer Gesellschaft entwickelte Heizschichtsystem einen wesentlichen Beitrag. Das für die Enteistung von Flügelvorderkanten im Flugbetrieb ausgelegte Heizschichtsystem mit einem kompatiblen Isolationsschichtsystem ist das technologische Gesamtziel der beteiligten Fraunhofer-Institute.

Die **Aufgabenstellung** in diesem Forschungsvorhaben war der multifunktionale Schichtaufbau mit einer auf Kohlenstoff basierenden, heizbaren Beschichtung sowie elektrisch und thermisch isolierenden Lackschichten. Ziel ist, deutliche Effizienzsteigerungen durch eine neue Generation von Eischutzsystemen zu erreichen. Dazu leisten das geringe Gewicht, geringe Bauhöhen und Nähe zu den zu beheizenden Oberflächen wesentliche Beiträge. Entwicklungsarbeiten hinsichtlich der Schichtformulierung und Applikation wurden geleistet, die von Funktionstests zur Optimierung der Schichten begleitet wurden. Eine Charakterisierung der entwickelten Schichten hinsichtlich der Energieeffizienz wurde in begleitenden Eis-Wind-Kanal-Tests des IFAM durchgeführt.

Das Teilvorhaben wurde unter den **Voraussetzungen** einer engen Abstimmung sowohl zwischen den beteiligten Fraunhofer Instituten IPA und IFAM als auch zwischen den Projektpartnern des Gesamtvorhabens „HyMovDelce“ durchgeführt. Regelmäßige Projekttreffen erlaubten einen fachlichen Austausch. Die eingeplante Labor- sowie Testinfrastruktur stand während des Vorhabens uneingeschränkt zur Verfügung.

Bei der **Planung und dem Ablauf des Teilvorhabens** innerhalb des Verbundprojektes (Abbildung 1) sind die Fraunhofer Institute am AP 1200 „Advanced Thermal IPS“: beteiligt. Hier wurden in Zusammenarbeit mit Mankiewicz GmbH, Bender GmbH, DLR und AGI Heizsystemen, bestehend aus elektrisch-leitfähigen, kontaktierten Heizschichten mit kompatiblen Isolationsschichten, entwickelt und für Tests in den weiterführenden Arbeitspaketen zur Verfügung gestellt.

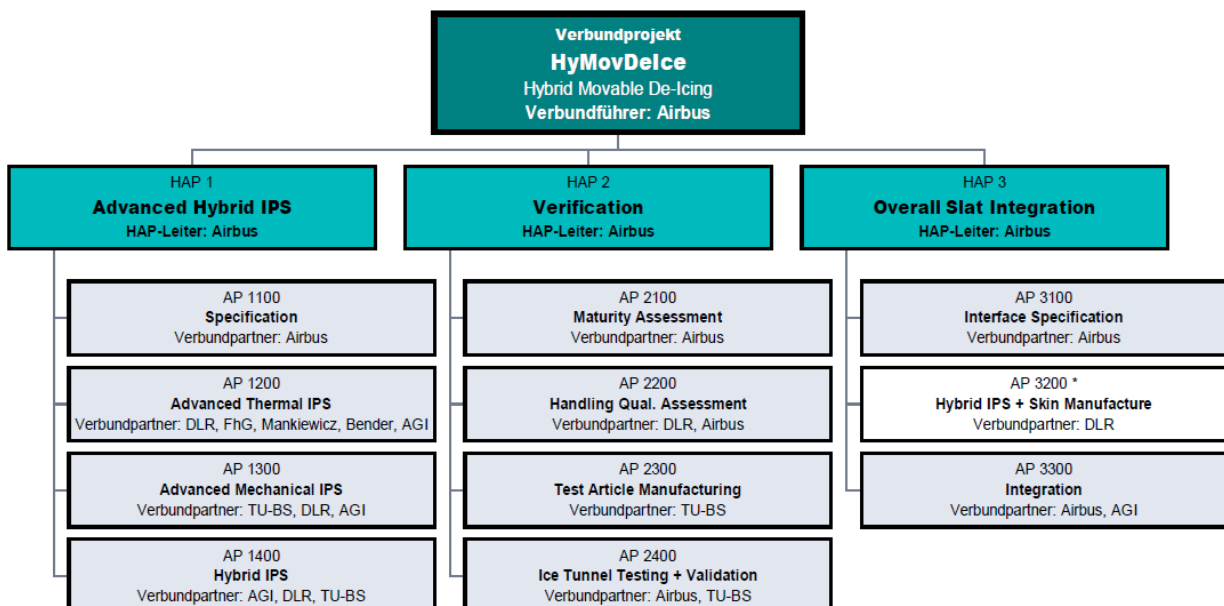


Abbildung 1: Gesamtüberblick der APs in HyMovDelce

In AP1200 wurden die folgenden Arbeiten für dieses Teilvorhaben wie folgt durchgeführt:

- AP1210 „Technische Anforderungen und Versuchsvorbereitung“ - Hier wurde ein detaillierter Anforderungskatalog mit den Projektpartnern erarbeitet. Dieser diente als Grundlage für die Entwicklung des Heizsystems sowie der Isolationsschichten. Das Arbeitspaket wurde im Quartal 3/2017 planmäßig abgeschlossen.
- AP1220 „Material- und Schichtentwicklung“ - Die Arbeiten umfassten die Materialentwicklung sowie die Erarbeitung der notwendigen Dispergierungs- und Applikationsverfahren. Rohstoffe wurden auf Ihre Tauglichkeit gescreent, Schichtformulierungen entwickelt und charakterisiert. Das Arbeitspaket wurde im Quartal 2/2018 abgeschlossen.
- AP1230 „Prozess- und Rezepturoptimierung“ - Erste Versuche im Eiswindkanal sowie in modellhaften Versuchen zum Betrieb der Heizelemente brachten Erkenntnisse zu notwendigen Optimierungen der Schichten sowie deren Einbindung in das Gesamtsystem (insbesondere elektrische Kontaktierung). Dies erfolgte in diesem AP, das im Quartal 1/2019 planmäßig abgeschlossen wurde.
- AP1240 „Evaluierung der Funktionalität und der Ergebnisse“ - Hier fanden umfangreiche Eiswindkanaltests am IFAM zu den Isolationsschichten sowie beim Projektpartner AGI zu den entwickelten Heizschichten statt. Die Ergebnisse flossen in die Bewertung der entwickelten Materialien ein und wurden für die Weiterführenden APs genutzt. Das Arbeitspaket wurde im Quartal 4/2020 abgeschlossen.

Eine **detaillierte Beschreibung** der Arbeiten ist dem Abschnitt III dieses Berichtes zu entnehmen. Der auf den Arbeiten aufbauende **wissenschaftliche und technische Stand** stellte sich zum Projektstart wie folgt dar: Für die Enteisung von Flugzeugflügeln während des Fluges wurde und wird Triebwerkszapflucht eingesetzt, die in die vorderen Bereiche der Flügel geleitet wird. Mit der kontinuierlichen Effizienzsteigerung der Triebwerke sind alternative Systeme zur Flügelenteisung notwendig. Sichere und energiesparende elektrothermische Systeme erschienen hier neben mechanischen Ansätzen als die vielversprechendsten Systemlösungen, so dass die beteiligten Fraunhofer Institute in Ihrem Teilvorhaben an Schicht-basierten Widerstandsheizungen im Verbund mit thermischen Dämmmaterialien gearbeitet haben. Bzgl. CNT-basierter Heizschichten gab es bereits erste vielversprechende Erfahrungen zum Projektstart (z.B. WINDHEAT (EU-FP7) – Förderkennzeichen: FP7-SME-2012-1-34893), die während des Projektes vertieft und auf die Erfordernisse der technischen Anwendung angepasst werden sollten. Die durchgeführte Patentrecherche ergab Heizschichten basierend auf unterschiedlichen leitfähigen Materialien, es wurden jedoch keine Überschneidungen mit den geplanten dünn-schichtigen, vollflächigen Heizsystemen ermittelt. Hinsichtlich thermischer Dämmschichten lagen zwar Erfahrung aus anderen Anwendungsgebieten vor, die Nutzung zur Effizienzsteigerung bei Eisschutzsystemen für Flugzeugflügel wurde hingegen nicht untersucht. Eine Materialrecherche wurde zur Kontaktaufnahme zu den anbietenden Rohstoff- bzw. Schichtherstellern während des Projektes genutzt, um synergetische Effekte mit weiteren Industriepartnern zu nutzen. Die Material- sowie Applikationsentwicklungen basierten somit auf den Erfahrungen der Institute aus anderen Anwendungsbereichen und wurden in Kooperation mit den Projektpartnern auf die Bedarfe im Flugzeug angepasst. Dabei ermöglichte die enge, interdisziplinäre **Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern** die Ausweitung der Kompetenzen und gestattet eine fokussierte und anwendungsnahe Entwicklungsarbeit, deren Ergebnisse in diesem Bericht präsentiert werden.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Ergebnisdarstellung mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele und Verwendung der Zuwendung**

Innerhalb des Verbundprojektes waren die Fraunhofer Institute am AP 1200 „Advanced Thermal IPS“ beteiligt. Hier wurden in Zusammenarbeit mit Mankiewicz GmbH und Bender GmbH Heizsysteme bestehend aus elektrisch-leitfähigen, kontaktierten Heizschichten mit kompatiblen Isolationschichten entwickelt und für weiterführende Tests in Vereisungswindkanälen der Projektpartner AGI in Ottobrunn, DLR in Braunschweig sowie des Fraunhofer IFAM zur Verfügung gestellt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zu den einzelnen Arbeitspaketen dargestellt.

#### **Arbeitspaket 1210: Technische Anforderungen und Versuchsvorbereitung**

Im Rahmen des APs wurden die technischen Spezifikationen für die zu entwickelnden Materialien und Systeme in enger Absprache mit den Projektpartnern erstellt. Dies umfassten Definitionen zur Geometrie der Heizelemente für die Eiswindkanaltests auf den Flügelprofilen inkl. der erforderlichen Flächenwiderstände und Heizleistungen. Auf dieser Basis wurde dann das Heizsystem ausgelegt und die Heizschichtmuster für die Flügelprofile hergestellt und charakterisiert.

Für die zu entwickelnden kohlenstoffhaltigen Heizschichten wurden zunächst Konzepte für die elektrisch leitfähigen Funktionspartikel, die zum Schichtaufbau notwendigen Polymerbinder und Dispersionsmedien sowie mögliche Dispergierrouten zur Herstellung von Materialien mit homogener Partikelverteilung identifiziert. Auf dieser Basis erfolgte in den anschließenden APs die Auswahl der Funktionspartikel und der Additive mit denen die Versuchsreihe zur Ermittlung der Haftfestigkeit und Leistung durchgeführt wurden.

Für die für den kompatiblen Schichtaufbau notwendigen Isolations- und Dämmmaterialien wurden über eine Recherche verschiedene Materialklassen zur Herstellung thermischer Dämmschichten identifiziert (Aerogele, Mikrohohlkugeln, Faserartige anorganische Füllstoffe, PU-Schaum). Ein Screening ergab eine breite Palette an Materialien, die sich für die Einarbeitung in Lacksysteme eignen. Es wurden Richtrezepturen für wasserbasierte als auch lösemittelbasierte Lacksysteme definiert, die sich für Reihenversuche in den weiterführenden APs eignen. Darüber hinaus wurden Probengeometrie und reproduzierbare Herstellungsprozesse erarbeitet, die ein effektives Materialscreening erlauben. Die Proben für den eigens konzipierten Teststand zur Bestimmung thermischer Dämmeigenschaften wurden definiert.

#### **Arbeitspaket 1220: Material- und Schichtentwicklung**

##### Beschichtung, Kontaktierung, Charakterisierung – Heizschicht

Auf der Konzeptbasis wurden verschiedenen Dispersionen für die Applizierung entwickelt, hergestellt und erworben. Die durchgeführten Arbeiten, insbesondere die Charakterisierung der Heizschichten führten zu wichtigen Erkenntnissen über die Zusammenhänge zwischen den Beschichtungsprozessen, den resultierenden Schichteigenschaften auf unterschiedlichen Substraten und der notwendigeren Kontaktierung des Heizelementes.

Um das Benetzungsverhalten der Dispersion auf den Substraten zu charakterisieren, wurden Messungen zur Bestimmung von Oberflächenspannung, Oberflächenenergie und Oberflächenrauheit der CNT-Dispersion durchgeführt. Die Messergebnisse wurden genutzt um verbesserte Schichteigenschaften zu erzielen (Haftung, Schichtkompatibilität, elektrische Leitfähigkeit).

Die Funktionsschicht sollte eine Mindestdicke von 70 – 100 µm aufweisen, um für die Kontaktierung vorgesehene Silberstreckgitter in das komplette System integrieren zu können. Dafür wurde die CNT Dispersion mit Füllstoffen modifiziert, um die Schichtdicke in den geforderten Bereich zu realisieren. Mithilfe verschiedener Versuchsreihe wurden die Einflüsse des Füllstoffes auf die elektrische Leitfähigkeit und den Schichtaufbau identifiziert.

Auf Empfehlung vom Projektpartner Mankiewicz GmbH wurde als Bindemittel wasserbasiertes und lösemittelbasiertes Epoxidharz, aus eigener Produktpalette, für die Modifizierung verwendet. Das Bindemittel wurde mit elektrisch leitfähigem Füllstoff Carbon Black dispergiert und auf einem PET-Substrat appliziert. Nach der Applizierung wurde die Schicht elektrisch charakterisiert. Da die elektrische Leitfähigkeit der Schichten mit Carbon Black nicht für die erforderliche Heizleistung ausreicht, wurden CNT-Partikel in das Bindemittelsystem eingearbeitet. Dabei wurden drei unterschiedlichen Dispergiervverfahren (Dissolver, Ultraschall-Sonotrode und Dreiwalzwerk) untersucht. Das Dreiwalzwerk erwies sich als geeignete Methode für die Dispergierung der CNT-Partikel in das Bindemittel. Hierzu wurden die notwendigen Prozessparameter für die Herstellung und Applizierung der Dispersion ermittelt.

#### Herstellung und Schichtcharakterisierung – Isolationsschicht

Die in AP1210 definierten Materialien wurden in Musterrezepturen eingearbeitet, um anschließend thermische Dämmeigenschaften bestimmen zu können. Hierzu wurden folgende Parameter berücksichtigt: Rohstoff-Art (Größe / Gestalt), Konzentration im Lacksystem, Art des Lacksystems (wässrig / lösemittelhaltig), Dispergierungsprozesse und Applikationsart, Schichtdicken. Die hergestellten Proben dienten zum einen der Charakterisierung der Schichten selbst, zum anderen wurde der am Fraunhofer IFAM neu eingerichtete Teststand zur Bestimmung der thermischen Dämmeigenschaften mittels dieser Proben verifiziert. Hierzu wurden beispielsweise Schichtdickenabhängige Effekte bei der thermischen Dämmwirkung nachgewiesen, Tests zur Reproduzierbarkeit der erhobenen Daten durchgeführt, und Einflussgrößen wie Testdauer, Starttemperatur, Auswertemethoden bestimmt. Anschließend wurden mit diesem Test aussichtsreiche Isolationsmaterialien /-schichten identifiziert, die sich für eine Weiterentwicklung und Tests im Eiswindkanal eignen. Darüber hinaus wurden Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse für die entwickelten Materialvarianten erarbeitet, um die für die anschließenden Tests im Vereisungswindkanal geeigneten Kandidaten und Schichtdicken auszuwählen. Final wurden Aerogele sowie acrylatbasierte Lacksysteme mit eingearbeiteten Mikrohohlkugeln für die weiterführenden Untersuchungen an Flügelprofilen ausgewählt. Um die Effektivität der entwickelten Materialien anwendungsnah untersuchen zu können, wurden Flügelprofile mit integriertem Heizsystem für Tests im Eiswindkanal des Fraunhofer IFAM konzipiert, aufgebaut und optimiert. Wesentliche Herausforderungen war das verwendete Heizsystem im Flügelprofil. Die Tests zeigten, dass sich die vom Fraunhofer IFAM verwendeten Heizmatten nur bedingt eignen und eine Bildung von Runback Eis nicht verhindern können. Zudem ist ein sehr gutes Wärmemanagement zu garantieren, um eine Überhitzung / Beschädigung des Heizsystems zu vermeiden – eine Herausforderung an den Gesamtschichtaufbau.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse hinsichtlich Materialeigenschaften (neben Wärmeleitfähigkeit z.B. Materialdichte, Druckfestigkeit) wurden die vielversprechendsten Materialien unter Einbeziehung der Applizierbarkeit auf den finalen Flügelprofilen ausgewählt: Neben einem Referenzprofil (Aluminium mit elektrischem Heizsystem ohne thermische Dämmschicht) wurden Aerogel-Schichten sowie Mikrohohlkugel-Schichten ausgewählt. Der Gesamtaufbau wurde in weiterführenden AP1230 optimiert, um für die abschließenden Tests in AP1240 vorbereitet zu sein.

### **Arbeitspaket 1230: Prozess- und Rezeptur-Optimierung**

#### Optimierung der Lackherstellung sowie Charakterisierung der Lacksysteme und Schichten

Arbeiten zu CNT-basierten Heizschichten in diesem AP hatten das Ziel, den Flächenwiderstand soweit zu reduzieren, dass die Anforderungen von 20 Ohm/Sq erreicht werden können. Die Erkenntnisse aus AP1220 sowie Ergebnisse der ersten Evaluierungsversuche in AP1240 wurden hierbei genutzt.

Ansteigende CNT-Anteile wurden in das in AP1220 ermittelte lösemittelbasierte EP-Bindemittel eingebracht (5, 10, 15, 20 bzw. 25 Gew. % CNT), appliziert und elektrisch charakterisiert.

Folgende Ergebnisse wurden dabei generiert:

- Herstellung sowie Applikation des EP-Lacksystemen mit unterschiedlichen CNT - Konzentrationen möglich. Elektrische Leitfähigkeit ist zwischen  $10^1$  –  $10^4$  Ohm/Sq realisierbar

- Aktive Zwischentrocknung nicht erforderlich – Applikation konnte in einem Schritt durchgeführt werden und Schichtdicken im Bereich von 1 bis 90 µm möglich
- Gute Kontrollierbarkeit des Schichtwiderstandes

Erste Versuche zur Reproduzierbarkeit des hergestellten Heizschichtmaterials zeigten einen Optimierungsbedarf, um Schichten mit definierten Flächenwiderständen nach Bedarf herstellen zu können. Als problematisch wurde die Lösemittelzugabe zur Einstellung der Spritzviskosität ermittelt. Daher wurden Versuchsreihen zum Einfluss des Lösemittel-Anteils sowie der Nass- und Trockenfilmschichtdicken durchgeführt. Aus den durchgeführten Versuchen und den daraus ermittelten Messergebnissen konnten die Zusammenhänge zwischen elektrischen Flächenwiderstand zu Nass- / Trockenfilmdicke sowie die Anzahl der Kreuzgänge beim Lackieren zur Nassfilmdicke aufgezeigt werden. Hierbei zeigte sich, dass sich über die Nassschichtdicke der gewünschte Flächenwiderstand mit einer definierten Schwankungstoleranz fertigen lässt. Der händische Sprühprozess ist jedoch für das Erreichen einer exakten Schichtdicke zu optimieren, idealerweise durch ein automatisiertes Auftragsverfahren (Lackierroboter). Für das Erreichen der Projektziele ist dies im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht erforderlich.

#### Optimierung des Testsystems für thermische Dämmschichten

Die erste Auswahl einer kommerziell erhältlichen Heizmatte zur Installation in den Testträger für thermische Dämmschichten in AP1220 war nicht erfolgversprechend für die finalen Tests im Eiswindkanal des Fraunhofer IFAM. Daher wurden zwei parallel verlaufende Routen in AP1230 untersucht: Die Entwicklung einer Kupfer-haltigen Schicht zur Widerstandsheizung sowie alternative, kommerzielle Heizsysteme zur Integration in das Flügelprofil. Die IFAM eigene Entwicklung zu Kupfer-haltigen Heizschichten zeigten sehr gute Heizleistungen; die Robustheit der Kontaktierung sowie die Regelung der Heizleistung waren jedoch im Vergleich zum identifizierten kommerziellen System mit Mäander-artiger Heizstruktur nicht stabil genug, sodass für den finalen Testaufbau auf Heizmatten der US Firma HeaterDesigns vertraut wurde. Die mit thermischen Dämmschichten ausgestatteten Flügelprofile wurden mit diesem Heizsystem ausgestattet und standen für das abschließende AP1240 zur Verfügung.

#### **Arbeitspaket 1240: Evaluierung der Funktionalität und der Ergebnisse**

In diesem Arbeitspaket wurden die CNT-basierten Heizelemente im Windkanal auf ihre Funktion getestet. Für die Herstellung der Heizelemente wurde von Fa. Airbus die erforderlichen Spezifikationen (Heizleistung, Maße) zur Verfügung gestellt. Die Heizelemente sind in unterschiedliche Zonen aufgeteilt. Mit diesen Daten und den Ergebnissen der vorangegangenen APs wurden die Heizelemente ausgelegt. Unter Absprache mit Fa. Airbus und Fa. Bender konnten so drei unterschiedlichen Varianten an Heizelementen für den Windkanaltest bei dem Projektpartner AGI festgelegt werden. Die Heizelemente wurden nach der in AP 1230 evaluierten Rezeptur hergestellt. Die Homogenität der gefertigten Schichten wurde mittels IR-Kamera überprüft. Die Aufnahmen zeigen eine ausreichend homogene Wärmeverteilung über die gesamte Fläche der Heizelemente. Die elektrische Kontaktierung erfolgte bei dem Projektpartner Fa. Bender. Die entwickelte und für die Enteisung von Flügelvorderkanten ausgelegte Heizsysteme wurden beim Projektpartner TU Braunschweig auf deren Funktionalität überprüft. Die finalen Vereisungstests im Windkanal bewiesen die Funktionsweise der CNT basierten Heizelemente, die eine Eisfreiheit der beheizten Bereiche erreichen konnten.

#### Evaluierung der thermischen Dämmschichten

Die Funktionalität der thermischen Dämmschichten wurde unter realitätsnahen Bedingungen im Eiswindkanal des Fraunhofer IFAM an Flügelprofilen (Aluminium-Grundkörper) mit folgendem Aufbau getestet: Aluminium-Profil → EP-Primer → Stripping-Folie → Dämmmaterial → PUR-Decklack → Heizelement. Zunächst wurde die Vergleichbarkeit der Heizelemente und integrierten Tempera-

tursensoren sichergestellt und Tests zur Reproduzierbarkeit der Temperaturdaten sowie der beobachteten Eisbildung durchgeführt. Anschließend wurden mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Flügelprofile folgende wesentlichen Erkenntnisse generiert:

- Der Einsatz thermischer Dämmschichten führte bei gleicher Heizleistung zu höheren Temperaturen an den Oberflächen der Heizelemente.
- Die inneren Temperatursensoren zeigten deutlich geringere Temperaturschwankungen während der Tests und einen fehlenden Wärmeabfluss in das Substrat.
- Auch bei max. Heizleistung ist die Bildung von Runback-Eis nicht vermeidbar. Damit ist eine Quantifizierung der beobachteten Effekte nicht möglich.
- Der geänderte Wärmeabfluss an thermisch isolierten Flügelprofilen führt zu einem geänderten Bedarf der Heizleistung und resultierte in den Tests am IFAM in partieller Überhitzung einzelner Heizzonen.

Die Ergebnisse der Eiswindkanalversuche an den mit thermischen Dämmschichten modifizierten Profilen haben deutlich deren Einfluss auf Temperaturentwicklungen und Vereisungsverhalten gezeigt. Diese waren nicht in jedem Fall wie erwartet: Insbesondere Eisbildungen, die durch die verminderte Wärmeweiterleitung bedingt waren, zeigen deutlich, dass für ein elektrothermisches System ein definiertes Wärmemanagement notwendig sind. Hierzu hat das Projekt erste Erkenntnisse geliefert.

Umfassende Arbeitsbeschreibungen können im Erfolgskontrollbericht eingesehen werden.

#### **Gegenüberstellung mit vorgegebenen Zielen und Ergebnisse:**

Die in der Vorhabenbeschreibung definierten Ergebnisse umfassten:

- Heizschichtsystem ausgelegt für die Enteisung von Flügelvorderkanten im Flugbetrieb
- Isolationskonzepte/Schichten zur Effizienzsteigerung thermischer Systeme
- Kompatibles Schichtsystem mit verbesserter Langzeitperformance
- Steigerung der technologischen Reife der Schichtsysteme
- Windkanal-Testergebnisse zur Verifikation der entwickelten Schichtsysteme

Aus den Ergebnisdarstellungen geht hervor, dass die im Antrag erwarteten Ergebnisse auch erhalten werden konnten und die Zielsetzung des Projektes damit erfüllt werden konnte.

## **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Der zahlenmäßige Nachweis wurde von der Fraunhofer Zentrale erstellt und am 06.05.2021 an den Projektträger verschickt.

## **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten zur Materialentwicklung und Applikationstechnik waren notwendig zum Erreichen der Projektziele. Die durchgeführten Tests eigneten sich in hohem Maße zur Überprüfung der technischen Eigenschaften der Systeme und lieferten damit wesentliche Erkenntnisse zur Herstellung energie-effizienter Heizschichtsysteme für Flugzeug-Eischutzsysteme. Die technologischen Herausforderungen (Materialanpassungen, Steigerung der Heizleistung, Verbesserungen der Reproduzierbarkeit und Robustheit) wurden gemeistert und Systemgrenzen (Heizleistung, Wärmemanagement) ermittelt. Die Risiko-behaftete F&E-Leistung brachte neue Fragestellungen u.a. zur Regelung, Kontrolle und elektrischer Kontaktierung der Heizleiter hervor, die es gilt, in Folgeprojekten zu bearbeiten. Aus Sicht der beteiligten Fraunhofer Institute sind die geleisteten Arbeiten daher in hohem Maße notwendig und angemessen gewesen.

## **2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Im Folgenden werden die über das Projektende hinausreichenden langfristigen Verwertungsperspektiven der erzielten Ergebnisse und eine Fortführung der Arbeitsinhalte dargestellt.



Die Fraunhofer Gesellschaft definiert ihren wirtschaftlichen Erfolg primär über den prozentualen Anteil bilateraler Projekte mit Industriepartnern. Innerhalb dieser Projekte fungieren die Fraunhofer Institute als F&E-Dienstleister, die Entwicklungsarbeiten nach den Vorgaben (technische Anforderungen und Spezifikationen) der Auftraggeber ausführen. Die Entwicklungspartnerschaft mit industriellen Partnern in einem öffentlich geförderten Projekt ist mit wirtschaftlichem Erfolg gleichzusetzen, da idealerweise eine engere Zusammenarbeit in der Zukunft genutzt werden kann.

Die im Projekt **HyMovDelce-E<sup>2</sup>-Lack** erhaltenen Erkenntnisse zu energieeffizienten, elektrisch-leitfähigen Heizschichtsystemen stellen einen großen Technologievorsprung dar und erfüllen einen signifikanten Beitrag zum Gesamtziel des Vorhabens: einer umweltfreundlicheren Luftfahrt. Die erzielten Forschungsergebnisse stellen für die zukünftig angestrebte Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emmission einen wichtigen Baustein dar. Die technologische Reife des Gesamtsystems wurde im Laufe des Vorhabens signifikant erhöht; insbesondere Erkenntnisse zur Prozessierung, dem thermisch-mechanischen Verhalten des Verbundaufbaus, der Kontaktierung, sowie der Langzeitperformance sind für die weiterführende Verwertung dieser Technologie entscheidend. Die positiven Ergebnisse werden die beteiligten Fraunhofer Institute in Abstimmung mit den Projektpartnern nutzen, um die entwickelten Heizschichtmaterialien in neue Flugzeugprogramme zu integrieren. Die hierfür erforderlichen Anpassungen können in einem Zeitraum von 3 bis 5 Jahren erfolgen.

Die wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse nach erfolgreichem Projektverlauf erfolgt dabei primär bei den Industriepartnern des Verbundes. Die angestrebten Forschungsergebnisse stellen eine ideale Basis für nationale Flugzeug- und Lackhersteller dar. Der Zuwachs an Wissen und Erkenntnissen an den Fraunhofer Instituten stärkt die Akquise-tätigkeit zur Einwerbung neuer Industrieprojekte im Flugzeugsektor. Es ergeben sich auch zusätzliche Möglichkeiten für Projekte in anderen Branchen wie der Windenergie oder weiteren Verkehrsmitteln (z. B. Automobil, Schienenfahrzeuge, Schiff). Die Marktpotentiale für die entwickelten Heizschichtsysteme werden dabei als ausgesprochen hoch eingeschätzt, da die Vereisung technischer Anlagen und Geräte in vielen Branchen massive negative Auswirkungen haben. Mögliche Endanwender außerhalb des Luftfahrtsektors sind führende deutsche Unternehmen wie VW, Mercedes, BMW, Enercon sowie Nordex. Für eine Produktumsetzung außerhalb der Luftfahrt werden nach erfolgreichem Projektabschluss ca. 3 Jahre erwartet, um Fertigungsanlagen sowie spezifische Produkttests zu erarbeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse können somit für ein breites Anwendungsfeld in zukünftigen Projekten genutzt werden.

## **2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt anderer Stellen**

Für den Bereich der elektrothermischen Flügeleisschutzsysteme sind nach Kenntnis der Fraunhofer Institute während der Projektlaufzeit Aktivitäten der Flugzeughersteller und deren Zulieferer unternommen worden, Heizmatten-basierte Technologien zu nutzen. Dieses sind nach unserer Ansicht die Wegbereiter für die Integration der in HyMovDelce entwickelten Schichtmaterialien und Systeme. Der Vorteil der Heizschichten gegenüber Heizmatten ist das deutlich geringere Gewicht im Vergleich zu Heizmatten. Damit wird dieser mögliche Fortschritt nicht als Konkurrenzlösung, sondern vielmehr als erste Generation für elektro-thermisch basierte Eisschutzsysteme angesehen.

## **2.6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Durch Corona-bedingte Ausfälle von Fachkonferenzen in 2020 / 2021 sind Fachvorträge bisher nicht erfolgt. Weder die EuropeanCoatingsShow noch die IntAirCoat fanden statt, bei denen mögliche Adressaten aus den Bereichen Rohstoffe und Lackhersteller oder Branchen wie Automobilindustrie oder Windenergie angesprochen werden können. Mit dem Erhalt der finalen Projektergebnisse aus den weiterführenden Arbeitspaketen wird nun geprüft, welche weiteren Veröffentlichungen (print oder oral) möglich sind.