Sachbericht Teil I – Kurzbericht

(gemäß Nr. 6.6 BNBest-BMBF 98 und 11.6 NKBF 98)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
RWTH Aachen University	**01DS24002B**

Ressort: BMBF, Referat 224, Profil: Technologie- und Innovationsförderung

ecoTRANS
Verbundvorhaben: Entwicklung von leistungssteigernden Beschichtungen für Anwendungen in der Schifffahrt und Luftfahrt

Teilvorhaben:

Experimentelle Qualifizierung leistungssteigender Beschichtungen

Laufzeit des Vorhabens:

01.04.2024– 30.09.2024

Autoren: Dr.-Ing. Ralf Hörnschemeyer
Sebastian Hille, M.Sc.

Datum: 31.10.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Dr. Ralf Hoernschemeyer
Digital unterschrieben von Dr. Ralf Hoernschemeyer
Datum: 2024.10.31 15:42:15 +01'00'

Unterschrift Projektleiter

Im Rahmen des Projekts ecoTRANS werden innovative, bioinspirierte Oberflächen (Riblets) entwickelt, um die Effizienz und Nachhaltigkeit von Verkehrssystemen im Luft- und Seeverkehr zu verbessern. Ziel ist es, Technologien vom Labor in den industriellen Einsatz zu überführen. Das Konsortium strebt die Entwicklung von drei Demonstratoren an:

1. Ein Rotorblatt für ein eVTOL.

2. Die Oberfläche eines Leichtflugzeugs.

3. Den Rumpf eines Schiffes.

Die texturierten Oberflächen sollen den Energieverbrauch um 5-10 % reduzieren. Um dies zu erreichen, wird die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet, von der Simulation und Optimierung bis hin zur Herstellung und Automatisierung des Beschichtungsprozesses. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele sind die

- Identifizierung und Optimierung von Strukturgeometrien zur Verringerung des Strömungswiderstands,
- Entwicklung von Produktionstechnologien für mikrotexturierte Beschichtungen,
- Prüfung und Leistungsbewertung der Demonstratoren in realen Anwendungen.

Das Projekt gliedert sich in insgesamt sechs Hauptarbeitspakete (HAP), die jeweils spezifische Arbeitspakete (AP) umfassen: Zunächst sind in HAP 1 die Anforderungsspezifikationen und Randbedingungen für die Prüflinge und deren Betriebspunkte zu definieren. Dadurch ergeben sich die Eingangsparameter für nachfolgende Simulationen und konkrete Auslegung der Riblets in HAP 2 sowie den Designraum für HAP 4. HAP 3 befasst sich mit der Entwicklung von Produktionstechnologien. Dabei werden Transferfolien zur effizienten Übertragung mikrostrukturierter Oberflächen entwickelt, indem die Materialkompatibilitätsmatrix definiert, Werkzeuge mittels Nanoimprint-Lithographie hergestellt und Folien durch strukturierte Polymerfolien im Nanoimprint-Verfahren produziert werden. Abschließend werden Transferexperimente zur Ermittlung optimaler Prozessparameter durchgeführt. In HAP 4 werden effiziente Automatisierung im großtechnischen Maßstab, robotergestützte Applikationsversuche und automatisierte Prozesse der Handhabung entwickelt. Dies betrifft beinhaltet insbesondere Tests der Materialhandhabung. In HAP 5 geht es um die experimentelle Messung und Bewertung der Leistungsfähigkeit der Ribletoberflächen im jeweiligen Anwendungsbereich: maritim und aeronautisch. Tests für maritime Anwendungen sind sehr spezifisch, da mehrere Faktoren die Wirksamkeit einer Antifouling-Beschichtung beeinflussen können, darunter die Wassertemperatur und der Salzgehalt, verfügbare Nährstoffe, Hydrodynamik und Organismen, die je nach Meeresgebiet stark variieren können. Aus diesem Grund wird BSN zwei Tests in der realen Umgebung durchführen. Bzgl. der eVTOL-Propeller sind die Rotoren mit fester Steigung ausgeführt und der Auftrieb und die Steuerbarkeit werden durch Änderung der Drehzahl gewährleistet. Der stationäre Betrieb ist die Ausnahme. Daher soll der gesamte Betriebsbereich getestet werden. Es sind Leistungs- und Drehmomentmessungen über die Drehzahl und insbesondere bei Drehzahländerungen mit und ohne Beschichtung durchzuführen. Alle Prüfungen sind von analytischen Untersuchungen zu begleiten. Die analytischen Modelle sind durch die Prüfungen zu validieren und zu kalibrieren.

Aufgrund des vorzeitigen Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber konnte das Projekt seitens des Instituts für Luft- und Raumfahrtsysteme lediglich das HAP 1 mit begleitet werden, dessen Ergebnisse hier zusammengefasst werden:

Die erforderlichen Eingabedaten für die Simulationen (HAP 2) umfassen CAD-Geometrien, Einströmgeschwindigkeiten und -richtungen sowie Fluidtemperaturen. Für Propelleranwendungen sind Drehzahlen (rpm) besonders wichtig. Es wird erwartet, dass Riblet-Strukturen eine Reibungsreduzierung von etwa 3 % erzielen können. Herausforderungen bestehen bei hohen Spitzen-Machzahlen (0,6 bis 0,7), da sehr kleine Riblet-Strukturen schwer herzustellen sind. BASF und Lufthansa haben herstellbare Strukturgrößen von etwa 50 µm bestätigt.

Typische eVTOL-Propellerdesigns wurden recherchiert, um geeignete Propeller auszuwählen. Die Geometrie eines Propellers wird durch Durchmesser, Profil, Drallverteilung und Sehnenlängenverteilung definiert; diese Parameter sind entscheidend für die aerodynamische Leistung. Ein Beispiel ist ein Schwerlast-eVTOL-Propeller mit einem Radius von 3,25 m, einer Drehzahl von 396 rpm und einem NACA6412-Profil. Das maßgeschneiderte Propellerdesign für den Airbus Vahana umfasst Fixed Pitch- und Verstellpropeller mit einem Radius von 0,75 m bei einer maximalen Drehzahl von 5500 rpm und einem Clark-Y-Profil. Betriebsbedingungen eines eVTOL-Propellers hängen stark vom Missionsprofil ab.

Mit Blick auf die maritimen Anwendungen wurden zwei Arten von Testumgebungen für maritime Anwendungen besprochen. Zum einen bewegliche Schiffe, bei denen es sich um private Schiffe im täglichen Einsatz mit Geschwindigkeiten zwischen 8 und 20 Knoten (durchschnittlich etwa 15 Knoten) handelt. Diese Testumgebung ermöglicht es, reale Betriebsbedingungen zu simulieren. Zum anderen stationäre Rumpfdummys, die zur Überprüfung des Bewuchses im Dock dienen und eine kontrollierte Umgebung zur Bewertung der Antifouling-Eigenschaften der Beschichtungen bieten. Die Wassertemperaturen variieren saisonal stark zwischen ca. 13 °C im Winter und ca. 25 °C im Sommer, was unterschiedliche Herausforderungen an das Material stellt. Wichtige Bedenken umfassen das Drapieren beziehungsweise Verformen der Patches sowie deren Anwendung und Haftung auf flachen Böden versus gekrümmten Oberflächenbereichen wie Radien am Schiffsrumpf.

Bezüglich der Oberflächenstrukturierungstechniken wurde besprochen, dass Mikrostrukturen mittels eines Transferzylinders oder einer Rolle hergestellt werden können und auf flexible Folien oder Kunststoffplatten übertragen werden können, welche dann auf gekrümmte Oberflächen drapiert werden können. Wenn der Zylinder so gestaltet ist, dass er der makroskopischen Form entspricht, können Strukturen direkt auf komplexe Oberflächen gerollt werden – dies wäre besonders für Propeller anwendbar, sofern CAD-Geometrien bereitgestellt werden. Ob eine Folie verwendet werden kann oder nicht hängt stark von der Form der Mikrostrukturen ab; bei großen Krümmungen wie Schiffsrümpfen wäre ein direkter Rolltransfer schwieriger umzusetzen.

Nach dem Ausstieg aller durch das BMBF geförderten Projektpartner aufgrund des Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber, wird das Projekt bei den Partnern Bionic Surface Technologies GmbH (Österreich) und B Solutions (Montenegro) weitergeführt.

Sachbericht Teil II – Schlussbericht

(gemäß Nr. 6.6 BNBest-BMBF 98 und 11.6 NKBF 98)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
RWTH Aachen University	**01DS24002B**

Ressort: BMBF, Referat 224, Profil: Technologie- und Innovationsförderung

ecoTRANS
Verbundvorhaben: Entwicklung von leistungssteigernden Beschichtungen für Anwendungen in der Schifffahrt und Luftfahrt

Teilvorhaben:

Experimentelle Qualifizierung leistungssteigender Beschichtungen

Laufzeit des Vorhabens:

01.04.2024– 30.09.2024

Autoren: Dr.-Ing. Ralf Hörnschemeyer
Sebastian Hille, M.Sc.

Datum: 31.10.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Dr. Ralf Hoernschemeyer
Digital unterschrieben von Dr. Ralf Hoernschemeyer
Datum: 2024.10.31 15:43:05 +01'00'
Unterschrift Projektleiter

Inhalt

Abkürzungen IV
Tabellen V
I. Kurzdarstellung der Aufgabenstellung 1
I.1. Aufgabenstellung und Ziele 1
I.2. Vorarbeiten und Fähigkeiten zu Projektbeginn 2
I.3. Geplanter Ablauf des Vorhabens 3
I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn 6
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7
II. Eingehende Darstellung des Vorhabens 8
II.1. HAP 1 – Beschreibung aller relevanten Details zu den Demonstratoren 8
II.2. HAP 2 – Simulation und Optimierung von Oberflächentopographien 12
II.3. HAP 3 – Entwicklung von Produktionstechnologien für bioinspirierte mikrotexturierte Beschichtungen 12
II.4. HAP 4 – Beschichtungsanlagen für die Musterübertragung 12
II.5. HAP 5 – Tests und Bewertung 12
II.6. HAP 6 – Verbreitung Nutzung Verwaltung 12
II.7. Soll-Ist-Vergleich der gesetzten Ziele 12
II.8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 13
II.9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 13
II.10. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 13
II.11. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt Dritter 13
II.12. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse 13
III. ReferenzenLiteraturangaben 14
Anhänge XV

Abkürzungen

ANOVIA ..... Einfaktorielle Varianzanalyse
AP ..... Arbeitspaket
BSN ..... B Solutions
BST ..... Bionic Surface Technologies GmbH
eVTOL ..... *electrical vertical take off and landing*
HAP ..... Hauptarbeitspaket
ILR ..... Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme
PLS ..... polyscale GmbH & Co. KG (Verbundkoordinator)
RWTH ..... Rheinisch Westfälische Technische Hochschule

Tabellen

Tabelle 1: Kurzübersicht über Verwendungsnachweis für Zuwendungen auf Ausgabenbasis mit PP 13

Tabelle 2: Balkenplan des Verbundvorhabens XV

I. Kurzdarstellung der Aufgabenstellung

I.1. Aufgabenstellung und Ziele

Im Rahmen des Projekts ecoTRANS werden neue Methoden und Produkte entwickelt, um die Effizienz und Nachhaltigkeit von Verkehrssystemen im Luft- und Seeverkehr zu verbessern. Innovative bioinspirierte texturierte Oberflächen, die sich in Laborumgebungen bewährt haben, werden für den industriellen Einsatz optimiert. Ein innovatives Produktionsprinzip zur Herstellung bioinspirierter Mikro¬strukturen für die Beschichtung von Flugzeug- und Schiffsteilen schließt die Lücke zwischen den im Labor erprobten Prinzipien und einer industriell anwendbaren Oberflächen¬beschichtungs-technologie.

Das Konsortium strebt die Entwicklung von drei hocheffizienten Demonstratoren zur Steigerung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit durch mikrotexturierte Beschichtungen an

1. ein Rotorblatt für ein senkrecht startendes und landendes Flugzeug (eVTOL)

2. der Oberfläche eines Leichtflugzeugs

3. dem Rumpf eines Schiffes.

Die texturierten Oberflächen in diesen drei Bereichen zeigen eine Reduktion des Energieverbrauchs in der Größenordnung von 5-10 %.

Um den Weg für eine Verwertung der Ergebnisse durch die beteiligten Partner zu ebnen, wird im Projekt die gesamte Wertschöpfungskette für eine Kommerzialisierung der Innovation betrachtet. Zunächst wird eine anwendungsspezifische Simulation und Optimierung von bioinspirierten Mikrotopographien durchgeführt. Basierend auf der weltweit führenden Kompetenz des Partners in der Simulation und Optimierung von Riblet-Strukturen - so genannten Haifischhäuten - werden für jede Anwendung ideale Mikrotopographien definiert. Basierend auf den Ergebnissen der Simulationen werden dann Transferfolien hergestellt. Mit Hilfe der Transferfolien ist es möglich, die Mikrostrukturen auf die Oberfläche der genannten Objekte abzubilden. Im Gegensatz zum Stand der Technik werden die Folien nicht auf die Oberfläche geklebt, sondern es wird eine Beschichtung auf der Oberfläche der Bauteile aufgebaut. Dazu werden spezielle Materialien entwickelt, die eine Strukturierung der Beschichtung ermöglichen. Nach dem Aushärten der Beschichtung können die Transferfolien von der Oberfläche abgelöst werden und die Strukturen verbleiben in der Beschichtung des Bauteils. Um den wirtschaftlichen Einsatz der Technologie in Zukunft zu gewährleisten, werden Konzepte zur effizienten Automatisierung des Transferprozesses im großtechnischen Maßstab entwickelt. Hierzu werden robotergestützte Applikationsversuche durchgeführt. Aus den Ergebnissen werden Konzepte für den automatisierten Transfer abgeleitet.

Durch die Einbeziehung von Endnutzern kann die ecoTRANS-Technologie in der Praxis demonstriert werden. Für Rotorblätter werden Prüfstandversuche durchgeführt, um die Effizienzsteigerung durch die ecoTRANS-Technologie zu demonstrieren. Für die Rotorblattanwendung wird ein Rotorblatt eines eVTOL mit der ecoTRANS-Technologie beschichtet, um anwendungsspezifische Oberflächenstrukturen zu erzeugen. Das Rotorblatt wird auf einem Prüfstand getestet, um den direkten Nachweis der Leistungssteigerung zu erbringen. Für die Festflügelanwendung an einem Leichtflugzeug wird die Oberflächentopographie auf der Oberfläche erzeugt und ein Testflug durchgeführt.

Der Nachweis der Eignung für maritime Anwendungen wird durch Tests unter relevanten Bedingungen mit Hilfe von Aufnähern auf dem Rumpf von Schiffen in verschiedenen Regionen und mit unterschiedlichen Einsatzarten erbracht.

Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

- Identifizierung und Optimierung von Strukturgeometrien zur Verringerung des Strömungswiderstands umströmter Körper in der Schifffahrt und Luftfahrt und Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Effizienzsteigerung.
- Entwicklung von Produktionstechnologien für bioinspirierte mikrotexturierte Beschichtungen. Transferfolien und Prozessinformationen für die Weiterverarbeitung durch Automatisierungsanlagen werden bereitgestellt (AP4). Muster mikrostrukturierter Bauteile (Rotorblätter, Musteroberflächen) werden für die Weiterverarbeitung in AP5 hergestellt.
- Prüfung und Leistungsbewertung in allen Bereichen der Demonstratoren. Für die Luftfahrtanwendung werden Tests an einem Rotorprüfstand durchgeführt und die Effizienzsteigerung nachgewiesen. Darüber hinaus wird untersucht, ob Flugversuche in vollem Umfang mit einem eVTOL möglich sind. Für maritime Anwendungen werden Testfelder auf dem Rumpf eines Schiffes installiert, um die Robustheit und den Verschmutzungsgrad zu bewerten.

I.2. Vorarbeiten und Fähigkeiten zu Projektbeginn

Die experimentelle Forschung am Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR) der RWTH Aachen University beschäftigt sich vor allem mit anwendungsnahen Technologien zur Strömungsbeeinflussung sowie der detaillierten Analyse von Wirbelströmungen. In jüngster Zeit wurden dabei Propeller bzw. Rotoren, zyklisch angeregte Klappensysteme sowie Wirbel-Objektinteraktionen mittels verschiedenster Messmethoden untersucht.

In dem LuFo-Projekt E-DARIT wurde die Rekuperation von Energie mittels Propeller im Sinkflug erforscht. Dabei wurde die Effizienz mittels Kraftmessungen auf einem Propellerprüfstand im Windkanal ermittelt, sowie die akustischen Emissionen untersucht. Zudem wurde ein am Flugzeugflügel montierter Propellerprüfstand entwickelt, um anwendungsnahe in-situ Messungen durchführen zu können. Die detailliertere Strömungsmechanik von Rotoren wurde in DFG-Projekt TWIN-HELIX untersucht und mit CFD-Simulationen ergänzt. In einem Wasserkanal wurden mittels zeitaufgelöster, tomographischer PIV-Messungen die gegenseitige Beeinflussung zweier Wirbel im rotierenden System untersucht, wobei erfolgreich eine Reduktion der Geschwindigkeitsgradienten durch Aufweitung des Hauptwirbels herbeigeführt werden konnte. Geringere Strukturlasten und Schallemissionen können die positiven Folgen in der Anwendung sein. Im LuFo-Projekt BIMOD wurde die Möglichkeit einer Erhöhung des Maximalauftriebs zur Steigerung der Ökoeffizienz von Flugzeugkonfigurationen und die Anregung von Wirbelinstabilitäten mittels einer oszillierenden Hinterkantenklappe untersucht. In den Messungen im Wasserkanal wurden dabei Kraft- und PIV-Messungen kombiniert und ebenfalls mit CFD-Simulationen nachvollzogen. In einem weiteren DFG-Projekt, Interaktion von Nachlaufwirbeln mit Hausdächern, wurden im Wasserschleppkanal des ILR ebenfalls PIV-Messungen zur Untersuchung der destruktiven Sogwirkung von Nachlaufwirbeln auf Hausdächer erforscht. Weitere Expertise in der Technologiebewertung von Strömungsbeeinflussung zeigt das ILR in den LuFo-Projekten CATeW und AVACON, in denen sich auf die hybride laminare Strömungskontrolle (HLFC) für Tragflächen und Leitwerke zur Maximierung der Treibstoffeffizienz fokussiert wurde.

Diese Projektauswahl dokumentiert die breite Aufstellung sowie Erfahrung des ILR hinsichtlich der für das vorgeschlagene Projekt benötigten Expertise. Mit der Bewilligung eines Großgeräteantrags durch die DFG im Jahr 2021 steht dem ILR zudem modernste akustische, Kraft- und Strömungsmesstechnik zur Verfügung, die in den institutseigenen Wind- und Wasserkanälen eingesetzt werden kann.

I.3. Geplanter Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben ecoTRANS verfolgt das Ziel, leistungssteigernde Beschichtungen für Anwendungen in der Schifffahrt und Luftfahrt zu entwickeln. Der Ablauf des Vorhabens gliedert sich in mehrere eng miteinander verknüpfte Hauptarbeitspakete (HAP), die jeweils aus spezifischen Arbeitspaketen (AP) bestehen, die im Folgenden beschrieben werden. Einen Überblick über den zeitlichen Rahmen bietet das Balkendiagramm im Anhang (Tabelle 2).

Das **HAP 1 „Definition von Anforderungsspezifikationen und Randbedingungen“** umfasst zwei wesentliche Arbeitspakete:

AP 1.1 „Beschreibung aller relevanten Details zu den Demonstratoren“: Im ersten Schritt werden alle relevanten Anforderungen für die Entwicklung der Beschichtungstechnologien im Bereich der Luftfahrzeuge definiert. Dies beinhaltet eine Untersuchung darüber, auf welche Teile und Komponenten wie Rotoren/Propeller oder Bereiche mit grenzschichtinduzierten Problemen (z.B. Flügelkreuzungen) die Beschichtung aufgebracht werden soll. Zudem wird ermittelt, welche Technik am besten geeignet ist, um diese Beschichtungen in der Serienproduktion und Wartung aufzubringen. Hierbei müssen strenge Normen für die Luft- und Raumfahrt berücksichtigt werden, einschließlich flugmechanischer Auswirkungen, spezieller Fertigungsprozesse sowie Qualitätsmanagement.

AP 1.2 „Vollständige Auflistung der Anforderungen und Randbedingungen für die Entwicklung der ecoTRANS-Beschichtungen“: Parallel dazu erfolgt die Definition aller relevanten Anforderungen für die Entwicklung von Beschichtungstechnologien im maritimen Bereich. Schutzanstriche sind essenziell für den Erhalt von Schiffen in gutem Zustand, weshalb internationale Standards wie PSPC beachtet werden müssen. B Solutions sichtet hierzu aktuelle Literatur zum Stand der Technik und tauscht diese Informationen mit den anderen Partnern aus.

Die Ergebnisse aus AP 1.1 und AP 1.2 bilden wichtige Eingangsparameter für nachfolgende Simulationen in HAP 2 sowie den Designraum für Automatisierungseinrichtungen in HAP 4.

Basierend auf den Spezifikationen aus HAP 1 werden in **HAP 2 „Simulation und Optimierung von Oberflächentopographien“** umfassende CFD-Simulationen durch, um das Design des Übertragungsfilms mit der idealen Riblet-Geometrie in Abhängigkeit von der detaillierten Grenzschicht des Strömungsfelds und deren Auswirkungen zu bestimmen. Das Ergebnis ist eine Verteilung der erforderlichen (idealen) Riblet-Größe und anderer Variablen, die die Umströmung der benetzten Oberflächen, an denen die Riblets angebracht werden sollen, beschreiben. Für diese Oberflächen wird ein Vergleich mit und ohne Riblets durchgeführt und ein numerisches Ergebnis geliefert (prozentuale Effizienzsteigerung - siehe definierte KPIs). Im Allgemeinen wird jede Aufgabe in eine Referenzsimulation unterteilt, die die Betriebsbedingungen darstellt, unter denen die Mikrostrukturen optimiert werden. Das Riblet-Design und seine Auswirkungen auf die Leistung werden ebenfalls bewertet, und schließlich werden aus der Sicht des Materials der Verschleiß und die Verschmutzung des Materials analysiert, um zu bewerten, wie groß die Leistungssteigerung ist, wenn es zu einer Abweichung vom Ausgangszustand des Materials kommt.

AP 2.1 „Strukturdefinition für Starrflügler“: Für Starrflügelfahrzeuge wird zunächst eine Referenzsimulation durchgeführt, um repräsentative Flugzustände eines Düsenfluges zu modellieren. Basierend darauf wird das Riblet-Design entwickelt und seine erwarteten Auswirkungen auf die Leistung des Flugzeugs bewertet. Schließlich wird der Verschleiß sowie mögliche Verschmutzung analysiert, um deren Einfluss auf die Leistung zu bewerten.

AP 2.2 „Strukturdefinition für Drehflügelanwendungen“: Für Drehflügler erfolgt ebenfalls eine Referenzsimulation eines Hubschrauberfluges unter repräsentativen Flugzuständen. Das Rib-

let-Design wird entwickelt und dessen erwartete Auswirkungen auf die Leistung des Hubschraubers bewertet. Abschließend wird auch hier der Verschleiß sowie mögliche Verschmutzung analysiert.

AP 2.3 „Structure definition for maritime application“ erfasst die Anwendung zu Schiffsrümpfen, indem Referenzsimulation des Schiffes in einem repräsentativen Betriebszustand durchgeführt werden. Dies als Benchmark verwendend, wird das Riblet-Design vorgenommen und erwartete Auswirkungen auf die Leistung des Schiffes ermittelt. Zudem wird der Riblet-Verschleiß sowie Verschmutzung und deren Auswirkungen auf die Leistung betrachtet.Diese Simulationen liefern grundlegende Daten zur Optimierung mikrostrukturierter Oberflächenbeschichtungen.

In **HAP 3 „Entwicklung von Produktionstechnologien für bioinspirierte mikrotexturierte Beschichtungen“** werden nun, basierend auf den Ergebnissen der vorigen HAPe, Transferfolien entwickelt, welche es ermöglichen, mikrostrukturierte Oberflächen effizient auf andere Oberflächen übertragen. Die AP für die jeweiligen Anwendungsbereiche beinhalten alle folgende Schritte:

Definition der Materialkompatibilitätsmatrix: Ein großer Vorteil des ecoTRANS-Ansatzes zur Strukturierung von Oberflächen ist der Gestaltungsspielraum für Beschichtungsmaterialien. Allerdings muss die Kompatibilität des Materials der Transferfolien auf die Eigenschaften des Beschichtungsmaterials abgestimmt werden. Basierend auf den in Arbeitspaket 1 definierten Anforderungsspezifikationen wird eine Auswahl geeigneter Beschichtungen getroffen. Für diese Auswahl werden Formulierungen für geeignete Transferfolienmaterialien entwickelt und getestet. Die Kompatibilität von Beschichtungsmaterialien und Transferfolienmaterialien wird in einer Materialkompatibilitätsmatrix dokumentiert.

Herstellung von Werkzeugen: Für die Produktion der Transferfolien mittels Nanoimprint-Lithographie werden mikrostrukturierte Werkzeuge benötigt. Basierend auf den Simulationsergebnissen werden Zeichnungen für die Werkzeuge (Trommeln) abgeleitet, und die Herstellung der Trommeln wird an Subunternehmer vergeben.

Produktion von Folien: Die Trommelwerkzeuge werden in einem Nanoimprint-Verfahren verwendet, um Polymerfolien zu strukturieren. Dementsprechend werden Prozesse entwickelt für:

- Das Beschichten des anwendungsspezifischen Transferfolienmaterials auf eine Trägerfolie
- Das Prägen und Aushärten des Materials

Erforderliche Prozessparameter wie Beschichtungsparameter, UV-Dosis, Prägekräfte, Bahntension und Walzendrücke werden abgeleitet.

Transferexperimente: Die produzierten Folien werden für den manuellen Mustertransfer für alle Zielanwendungen verwendet. Prozessparameter wie Aushärtezeiten, Ablösekräfte nach dem Aushärten und optimierte Beschichtungsdicken werden ermittelt. Diese Informationen dienen als Eingangsparameter für die Entwicklung der Automatisierungsausrüstung.

HAP 4 „Beschichtungsanlagen für die Musterübertragung“ konzentriert sich darauf Konzepte effiziente Automatisierung Transferprozesses großtechnischen Maßstab zu entwickeln Robotergestützte Applikationsversuche durchgeführt automatisierte Prozesse abzuleiten Dieses Paket stark abhängig Ergebnissen vorherigen Pakete insbesondere Handhabung Transferfolien betrifft. Das beinhaltet vorläufige Tests zur Materialhandhabung, Anwendungstests mit Materialien für jede Domäne, Produktion von Testmustern und Konzeptionelles Design der industriellen Beschichtungsausrüstung:

AP 4.1 Patches mit strukturierten Oberflächen: Basierend auf den Ergebnissen aus Arbeitspaket 3 und dem daraus resultierenden Design des Musterapplikationswerkzeugs wird BST eine geeignete Beschichtungsausrüstung evaluieren.

AP 4.2 Konzeptionelles Design des Beschichtungssystems: Die Beschichtungsausrüstung wird basierend auf einer Klebebandlösung der Firma Ferrobotics (Drittanbieter BST) modifiziert. Erste Tests liefern Informationen über die Anwendungs-Geschwindigkeiten und die Qualität der Beschichtung, um den Automatisierungsprozess weiter zu optimieren und ein konzeptionelles Design für eine industrielle Beschichtungsanlage zu erstellen.

In **HAP 5 „Tests und Bewertung“** geht es um die experimentelle Messung und Bewertung der Leistungsfähigkeit der Ribletoberflächen im jeweiligen Anwendungsbereich.

AP 5.1 Prüfung für maritime Anwendungen: Tests für maritime Anwendungen sind sehr spezifisch, da mehrere Faktoren die Wirksamkeit einer Antifouling-Beschichtung beeinflussen können, darunter die Wassertemperatur und der Salzgehalt, verfügbare Nährstoffe, Hydrodynamik und Organismen, die je nach Meeresgebiet stark variieren können. Aus diesem Grund wird BSN zwei Tests in der realen Umgebung durchführen:

1. Prüfung von Antifouling-Beschichtungen auf dem Schiffsrumpf. Die mirkostrukturierten Folienmuster werden auf eine spezielle Konstruktion aufgebracht, die an der Unterwasserhülle des Schiffes befestigt wird. Zu diesem Zweck werden Schiffe ausgewählt, die täglich im Einsatz sind, so dass die mirkostrukturierten Folienmuster den unterschiedlichen Wassertemperaturen, Wassertemperaturen, Hydrodynamiken und Meerestieren ausgesetzt sind.
2. Prüfung der Antifouling-Beschichtung auf einem Gitter mit Paneelen, das in 20-30 m Tiefe verankert ist. Diese Art der Prüfung simuliert den Zustand der Beschichtung des Schiffsrumpfes, wenn die Schiffe festgemacht sind. Die spezifischen Bedingungen in Bezug auf Wassertemperatur, Lichteinwirkung, Wasserlebewesen usw. werden zusätzlich zu den Beschichtungstests beitragen.

Die Prüfungen werden in 6-monatigen Abständen durchgeführt, wobei die Möglichkeit besteht, alle 3 Monate eine Zwischenprüfung vorzunehmen. Insgesamt werden zwei Sätze von mirkostrukturierten Folienmustern jeweils 6 Monate lang getestet. Aufgrund der jahreszeitlich bedingten Veränderungen der marinen Umweltbedingungen werden die mirkostrukturierten Folienmuster vorzugsweise alle 3 Monate untersucht.
Die Testfelder werden von PLS analysiert. Daher wird B Solutions Segmente aus den mirkostrukturierten Folienmuster herausschneiden und sie in einer geeigneten Pufferlösung an PLS schicken. Darüber hinaus wird BSN Ultraschalltests der Korrosion und regelmäßige ROV-Aufnahmen durchführen, die zeigen werden, wie sich die Verschmutzung im Laufe der Zeit entwickelt, sowie die Zugfestigkeit der mirkostrukturierten Folienmuster.

AP 5.2 Prüfung für Luftfahrtanwendungen: Nach Festlegung der Teile und Komponenten, auf die die Beschichtungen aufgebracht werden sollen, sind die entsprechenden Teile zu prüfen und die Ergebnisse entsprechend den festgelegten Anforderungen zu bewerten. Zumindest Hubpropeller (= Rotoren) müssen auf einem Prüfstand getestet werden.
In der ILR-Konfiguration des eVTOL sind die Rotoren mit fester Steigung ausgeführt und der Auftrieb und die Steuerbarkeit werden durch Änderung der Drehzahl gewährleistet. Der stationäre Betrieb ist die Ausnahme. Daher soll der gesamte Betriebsbereich getestet werden. Es sind Leistungs- und Drehmomentmessungen über die Drehzahl und insbesondere bei Drehzahländerungen mit und ohne Beschichtung durchzuführen. Alle Prüfungen sind von analytischen Untersuchungen zu begleiten. Die analytischen Modelle sind durch die Prüfungen zu validieren und zu kalibrieren.

AP 5.3 Schätzung der Effizienz durch datenanalytische Ansätze und Bewertung: In der Testphase des innovativen Materials wird eine komplexe Datenbank entstehen, die die Eigenschaften des Materials selbst, den entstandenen Bewuchs, aber auch die Eigenschaften des Schiffes, auf dem das mirkostrukturierter Folienmuster getestet wurde, beschreiben wird. Darüber hinaus können parallel zur Sammlung von Daten über die Tests selbst auch Daten über die Umgebung gesammelt werden, in der die Tests durchgeführt wurden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die geplanten Tests in einer realen Umgebung stattfinden. In Anbetracht der Tatsache, dass die Meeresumwelt durch eine Vielzahl von stochastischen Parametern gekennzeichnet ist, ist eine detaillierte statistische Untersuchung der kausalen Beziehungen zwischen den Messparametern und den Umweltparametern geplant. Die statistische Analyse wird mit dem Ziel durchgeführt, ein tieferes, wissenschaftliches Verständnis der Eigenschaften des getesteten Materials und seines Verhaltens in einer realen Umgebung zu erlangen, aber auch, um den Wert der beobachteten Parameter vorherzusagen, die das Verhalten des Materials charakterisieren, wenn es länger der Umwelt ausgesetzt ist. Die statistische Analyse wird mit einer hochentwickelten Software durchgeführt, die die Ergebnisse der Analyse visualisiert. Es ist geplant, fortgeschrittene Anpassungstechniken von kontinuierlichen probabilistischen Verteilungen, deskriptive Statistiken, ANOVA-Tests, Normalitätstests sowie Tests von statistischen Hypothesen, aber auch alle anderen statistischen und mathematischen Methoden zu verwenden, die sich je nach Art der gesammelten empirischen Daten als geeignet erweisen. Die Ergebnisse der statistischen Analyse werden der breiteren wissenschaftlichen Gemeinschaft durch die Veröffentlichung von Artikeln in führenden, frei zugänglichen wissenschaftlichen Zeitschriften vorgestellt, wodurch nicht nur ein Wissenstransfer von der Wissenschaft zur Industrie und allen interessierten Endnutzern stattfindet, sondern auch die Projektergebnisse einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden.

HAP 6 „Verbreitung Nutzung Verwaltung“ befasst sich primär mit der Vermarktung der neu geschaffenen Produkte und beinhaltet Vorbereitungen von Druck der Werbematerialien, Präsentationen der Projektergebnisse, Veröffentlichung wissenschaftlicher Arbeiten, Projekttreffen und Wissensaustausch. Durch strukturierte Vorgehensweise stellt Projekt sicher jede Phase gut vorbereitet durch Erkenntnisse vorhergehenden Phasen unterstützt Die enge Verknüpfung zwischen einzelnen Arbeitsschritten ermöglicht effiziente Umsetzung innovativer Technologien praxisnahe Anwendungen

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Die Reduzierung des Strömungswiderstands durch Riblet-Strukturen, ein Konzept inspiriert von natürlichen Oberflächenstrukturen, hat sich als vielversprechende Möglichkeit zur erheblichen Verringerung des Strömungswiderstands erwiesen. Dieser Effekt wurde in verschiedenen Anwendungen demonstriert, einschließlich der Luft- und Schifffahrt. In einer Studie an einem kommerziellen UAV führte die Installation von Riblets optimaler Dimensionierung zu einer bemerkenswerten Reduzierung des Strömungswiderstands eines Flugzeugs um 3%.

Messtechnische Untersuchungen der Effektivität von Riblet-Oberflächen wurden in der Forschung mit verschiedenen Techniken durchgeführt, darunter stereoskopische PIV-, Hitzdraht- und Kraftmessungen und mit numerischen Simulationen ergänzt. Dadurch wurden bereits für einen breiten Parameterraum Erkenntnisse, bezüglich der Dimensionierung der Riblets, dokumentiert. Die Einblicke in die komplexen Strömungsmechanismen, die zur Reduzierung der Wandschubspannung führen, sind essenziell für die weitere Verfeinerung und für das Erreichen der Serienreife dieser Technologie. So konzentrieren sich die jüngsten Fortschritte auf die Feinabstimmung der Riblet-Größe und des Seitenverhältnisses, um eine weitere Reduzierung des Strömungswiderstands zu erreichen. [1]

Um den zusätzlichen Aufwand für die Anwendung zu rechtfertigen, besteht der weitere Forschungsbedarf bei der Riblet-Technologie darin, die Effizienz weiter zu steigern und gleichzeitig praktische Herausforderungen wie die Oberflächenwartung und die Anpassung an spezifische Applikationen zu adressieren. Dies beinhaltet die Erkundung neuer Materialien, die Erprobung in neuen Anwendungen und die Entwicklung nachhaltiger Wartungsstrategien.

Es gibt mehrere Forschungsarbeiten zur Verringerung des Luftwiderstands mit Hilfe von Riblets. Bei keiner dieser Arbeiten wurde jedoch ein Musterübertragungsverfahren verwendet (das von polyscale zum Patent angemeldet wurde), und bisher sind nur zwei Lösungen auf den Markt gekommen.

Im Luftfahrtsektor gibt es nur ein Produkt für Riblet-Folien, das seit kurzem auf dem Markt ist. Bei diesem Produkt handelt es sich um eine Folie, die auf der Außenfläche von Flugzeugen angebracht werden kann. Es wird exklusiv von der Lufthansa Technik GmbH vermarktet. Seit der Vorstellung der Technologie, die unter dem Markennamen Aeroshark [2]vermarktet wird, wird sie von mehreren Fluggesellschaften wie Lufthansa Cargo und Swiss Air schnell angenommen.

Das Prinzip der ecoTRANS-Lösung ist jedoch im Vergleich zu der genannten Lösung vorteilhaft, da keine zusätzliche Folie aufgebracht werden muss, was einerseits Gewicht spart und andererseits zu einer größeren Auswahl an Veredelungsmaterialien führt.

Auch im maritimen Bereich wurden bereits einige silikonbasierte Folien vorgestellt (z. B. von PPG Industries). Die Verbreitung dieser Technologie ist jedoch begrenzt, da die selbstklebenden Folien Probleme bei der Anbringung auf untergetauchten Bauteilen verursachen. Die ecoTRANS-Technologie wird die Herstellung strukturierter Oberflächen ermöglichen, ohne dass eine zusätzliche Folie auf den Schiffsrumpf geklebt werden muss.

Heute ist Lufthansa Technik in Zusammenarbeit mit der BASF [2] der einzige Anbieter von Riblet-Folien mit Luftfahrtzulassung auf dem Markt. Kunden sind heute Lufthansa Cargo und Swiss Air. Es wird erwartet, dass große Produktionsmengen folgen werden, da die veröffentlichten Daten ein hervorragendes Geschäftsmodell belegen, wenn man die Kosten für die Folienanwendung und die Treibstoffeinsparungen vergleicht. Das australische Unternehmen MicroTao [3] verfügt über eine eigene Technologie zur Herstellung von Riblet-Folien, die auf kontaktlosen Drucktechnologien basiert. Derzeit testet das Unternehmen die Verwendung seiner Folien in ersten Versuchen an Flugzeugen.

Nikkon kündigte Technologien zur Strukturierung des Flugzeuglacks an, um mit Hilfe von Ultrakurzpulslasern Riblet-Strukturen zu erzeugen. Der Vorteil der Technologie ist die Gestaltungsfreiheit der Riblets. Allerdings ist der Zeitaufwand (und die Kosten) für die Strukturierung eines ganzen Flugzeugs bisher viel zu hoch.

Im maritimen Bereich verfügt PPG Industries über die einzige kommerzielle Lösung auf dem Markt für Riblet-Folien, die auf einer selbstklebenden Silikonfolie basiert. Wie bereits erwähnt, gibt es noch Probleme, insbesondere bei größeren Schiffen, wo solche Strukturen bisher nicht eingesetzt werden können. [4]

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das hier beschriebene Teilvorhaben ist in ein Verbundvorhaben eingebettet, in dem mit den Projektpartnern polyscale GmbH & Co. KG (Koordinator, Deutschland), Bionic Surface Technologies GmbH (Österreich) und B Solutions (Montenegro) zusammengearbeitet wird. Darüber hinaus stand Darüber hinaus war dieses Teilvorhaben nicht in weitere Fördervorhaben eingebunden.

II. Eingehende Darstellung des Vorhabens

II.1. HAP 1 – Beschreibung aller relevanten Details zu den Demonstratoren

Im Rahmen des Hauptarbeitspakets 1 wurden alle relevanten Randbedingungen definiert, die sowohl die Eingangsparameter für die Simulationen (HAP 2) als auch den Designraum für die Automatisierungseinrichtungen der Anwendung (HAP 4) bestimmen. Einerseits durch Recherchearbeit, andererseits durch Workshops der Projektpartner wurden die relevanten Informationen zusammengetragen.

AP 1.1: Beschreibung aller relevanten Details zu den Demonstratoren

Bezüglich der **Ribletauslegung** wurden die erforderlichen Eingabedaten für die Simulationen festgelegt. Diese umfassen CAD-Geometrien, Einströmgeschwindigkeiten und -richtungen sowie Fluidtemperaturen. Besonders wichtig für Propelleranwendungen sind zudem die Drehzahlen (rpm). Es wird erwartet, dass durch den Einsatz von Riblet-Strukturen eine Reibungsreduzierung von etwa 3 % erzielt werden kann. Eine potenzielle Herausforderung besteht jedoch darin, dass bei hohen Spitzen-Machzahlen (0,6 bis 0,7), wie sie bei Hubschrauberrotoren auftreten können, die Riblet-Strukturen sehr klein werden könnten. Dies könnte ihre Herstellung erschweren oder gar unmöglich machen. Laut BASF und Lufthansa sind herstellbare Strukturgrößen von etwa 50 µm realisierbar [2].

Bzgl. der experimentellen Abbildung Luftfahrtanwendung wurden Typische eVTOL-Propellerdesigns recherchiert, um für das Projekt eine Auswahl geeigneter Propeller treffen zu können. Ebenso wurden Material, Anfertigung und Beschichtung, sowie deren Betriebsbedingungen erörtert.

Die Geometrie eines Propellers wird durch den Durchmesser, das Profil, die Verteilung des Dralls sowie die Verteilung der Sehnenlänge entlang der Spannweite definiert. Diese Parameter sind entscheidend für die aerodynamische Leistung und Effizienz des Propellers.

Ein Beispiel für das Propellerdesign und dessen Optimierung bietet der Fall eines Schwerlast-eVTOL. Bei dieser Studie wurden einfache (Xrotors) und hochpräzise (URANS) Werkzeuge zur aerodynamischen Analyse und Optimierung kombiniert. Der betrachtete Propeller ist sehr groß, mit einem Radius von 3,25 m, einer Drehzahl von 396 rpm und verfügt über ein NACA6412-Profil. Er erzeugt einen Schub von 39,5 kN bei einer Blattanzahl von vier bis sechs Blättern. Dieses Beispiel könnte als Referenz dienen, wenn ein Propeller von Grund auf neu ausgelegt werden muss. [5]

Das maßgeschneiderte Propellerdesign für den Airbus Vahana umfasst zwei Arten von Propellern, die in der Literatur vorgestellt werden: Fixed Pitch- und Verstellpropeller. Der Fixed Pitch-Propeller ist für eine Fahrzeugmasse von 725 kg ausgelegt und hat einen Radius von 0,75 m bei einer maximalen Drehzahl von 5500 rmp. Das verwendete Profil ist Clark-Y und der erzeugte Schub beträgt 922 N bei einer Blattanzahl von drei Blättern. Obwohl die Flugbedingungen eines Kippflügel-Flugzeugs sich stark von denen eines Multikopters unterscheiden, bietet dieses Beispiel wertvolle Einblicke in das Design kleinerer eVTOL-Propeller. [6]

Viele eVTOL-Studien verwenden Propeller, die bereits einige Zeit kommerziell verfügbar sind, aufgrund ihrer Datenverfügbarkeit. Die Firma APC bietet beispielsweise den weit verbreiteten APC18x8E-Propeller an, der einen Durchmesser von 45,7 cm hat. Diese Propeller werden häufig in UAVs eingesetzt und sind somit vergleichbar mit den Anforderungen an Volocopter-Propellern (Durchmesser ca. 2,3 m). Umfangreiche Daten zu solchen kommerziellen Propellern sind öffentlich verfügbar [7], einschließlich ihrer Schub-, Leistungs-, Fortschrittsverhältnisse sowie Effizienz unter verschiedenen Drehzahlen.

Die Betriebsbedingungen eines eVTOL-Propellers hängen stark vom Missionsprofil des jeweiligen Fahrzeugs ab [8]:

1. Start: Geschwindigkeit zwischen 0 bis 3 m/s bei einem Anströmwinkel von 0°.
2. Steigflug: Vertikale Geschwindigkeit von etwa 3 m/s bei einem Anströmwinkel θ1.
3. Reiseflug: Geschwindigkeit zwischen 70 km/h bis 130 km/h bei Multicopter-eVTOLs mit einem typischen Anströmwinkel θ2 (etwa 72° für ein typisches L/D-Verhältnis).
4. Sinkflug: Vertikale Geschwindigkeit nicht höher als im Steigflug (-1,5 m/s) bei einem Anströmwinkel θ3.
5. Vertikale Landung: Vertikale Geschwindigkeit zwischen -1,5 m/s bis zum Stillstand bei einem Anströmwinkel von etwa -180°.

Für den Reiseflug kann der Anströmwinkel θ_2 durch die Gleichung $\theta_2 = \arccos(D/L)$ berechnet werden; für typische Multicopter-eVTOLs liegt das Auftriebs-Widerstands-Verhältnis um etwa 3,3, was zu einem möglichen Anströmwinkel in der Reiseflugphase von rund 72° führt.

Beratend wurde der Propellerhersteller *Helix Carbon GmbH* hinzugezogen, der einschlägige Erfahrungen mit der Bestückung von eVTOL-Prototypen aufweisen kann. Dabei wurden u.a. Designunterschiede für die verschiedenen verschiedenen Flugzeugtypen erläutert. Für die Propellerauslegung gilt die Faustregel, ein kleiner Durchmesser führt zu einer größeren Profilsehne und umgekehrt. Für das Projekt ecoTRANS soll ein repräsentativer Propeller ausgewählt und getestet werden. Alternativ können auch zwei Propeller unterschiedlicher Planform zum Einsatz kommen, die beide jeweils einen Extrembereich des Designraums repräsentieren. Materialien wären hier CFK mit Gelcoat-Beschichtung, deren Dicke zwecks Transfers der Riblets noch festzulegen ist.

Übliche Betriebsbedingungen gängiger eVTOL-Propeller liegen zwischen 1900 und 2100 rpm, was durch den Propellerprüfstand des ILR abbildbar ist. (Bei Ottomotoren wird dabei ein 2:1-Getriebe zwischengeschaltet, um die Ausnutzung des optimalen Motorbetriebspunkts bei etwa 4000 rpm zu ermöglichen. Bei Elektromotoren ist dies nicht nötig.) Die Helix Carbon GmbH wird intern prüfen, welche eVTOL-Propellermodelle dem Projekt, einschließlich der CAD-Geometrien, bereitgestellt werden können. Helix zeigt großes Interesse an den Projektergebnissen und ist offen für weitere Zusammenarbeit bei vielversprechenden Resultaten.

Mit Blick auf die **maritimen Anwendungen** wurden zwei Arten von Testumgebungen für maritime Anwendungen besprochen:

1. Bewegliche Schiffe: Hierbei handelt es sich um private Schiffe im täglichen Einsatz mit Geschwindigkeiten zwischen 8 und 20 Knoten (durchschnittlich etwa 15 Knoten). Diese Testumgebung ermöglicht es, reale Betriebsbedingungen zu simulieren.
2. Stationäre Rumpfdummys: Diese Dummys dienen zur Überprüfung des Bewuchses im Dock und bieten eine kontrollierte Umgebung zur Bewertung der Antifouling-Eigenschaften der Beschichtungen.

Die Wassertemperaturen variieren saisonal stark zwischen ca. 13 °C im Winter und ca. 25 °C im Sommer, was unterschiedliche Herausforderungen an das Material stellt. Wichtige Bedenken umfassen das Drapieren beziehungsweise Verformen der Patches sowie deren Anwendung und Haftung auf flachen Böden versus gekrümmten Oberflächenbereichen wie Radien am Schiffsrumpf.

Ein weiteres Thema war das Verfahren zur Entfernung der Patches ohne Beschädigung der Schiffsrümpfe aus Aluminium oder GFK-Materialien sowie logistische Aspekte wie der sichere Versand der Proben von Montenegro nach Graz.

Bezüglich der **Oberflächenstrukturierungstechniken** wurde besprochen, dass Mikrostrukturen mittels eines Transferzylinders oder einer Rolle hergestellt werden können und auf flexible Folien oder Kunststoffplatten übertragen werden können, welche dann auf gekrümmte Oberflächen drapiert werden können.

Wenn der Zylinder so gestaltet ist, dass er der makroskopischen Form entspricht, können Strukturen direkt auf komplexe Oberflächen gerollt werden – dies wäre besonders für Propeller anwendbar, sofern CAD-Geometrien bereitgestellt werden.

Ob eine Folie verwendet werden kann oder nicht hängt stark von der Form der Mikrostrukturen ab; bei großen Krümmungen wie Schiffsrümpfen wäre ein direkter Rolltransfer schwieriger umzusetzen.

Für Antifouling-Anwendungen wird erwartet, dass der beste Effekt erzielt wird, wenn Mikrostrukturen direkt in eine Antifouling-Beschichtung eingerollt werden. Daher wurde vorgeschlagen, steife, beschichtete Hautstücke zu applizieren, die bereits gut der Form des Schiffsrumpfs angepasst sind und strukturiert werden können.

AP 1.2: Vollständige Auflistung der Anforderungen und Randbedingungen für die Entwicklung der ecoTRANS-Beschichtungen

Im Rahmen des HAP 1 wurden umfassende Anforderungen und Randbedingungen für die Entwicklung der Beschichtungen auf eVTOL-Propellern und Schiffsrümpfen definiert. Diese Parameter umfassen sowohl geometrische Eigenschaften als auch Betriebsbedingungen, um eine optimale Leistung der Riblet-Strukturen sicherzustellen.

eVTOL-Propeller

Parameter	Wert/Details
Geometrie	TBD
Durchmesser	0,75 m bis 3,25 m
Profil	NACA6412, Clark-Y
Blattanzahl	3 bis 6
Drallverteilung	Abhängig vom spezifischen Design
Sehnenlängenverteilung	Variiert je nach Propellerdesign

Betriebsbedingungen

Parameter	Wert/Details
Startgeschwindigkeit	0 bis 3 m/s bei einem Anströmwinkel von 0°
Steigfluggeschwindigkeit	Vertikale Geschwindigkeit von etwa 3 m/s bei einem Anströmwinkel θ_1
Reisefluggeschwindigkeit	70 km/h bis 130 km/h bei Multicopter-eVTOLs mit einem typischen Anströmwinkel θ_2 von ca. 72°
Sinkfluggeschwindigkeit	Vertikale Geschwindigkeit nicht höher als im Steigflug (-1,5 m/s) bei einem Anströmwinkel θ_3
Vertikale Landung	Vertikale Geschwindigkeit zwischen -1,5 m/s bis zum Stillstand bei einem Anströmwinkel von etwa -180°
Drehzahl	Übliche Betriebsdrehzahlen liegen zwischen 1900 und 2100 rpm

Schiffsrümpfe

Parameter	Wert/Details
Geometrie	Ist abzuschätzen, bzw. je nach zugesagtem Versuchs-Schiff vom Hersteller zu erfragen
Strukturgröße	Herstellbare Strukturgrößen ca. 50 µm

Betriebsbedingungen

Parameter	Wert/Details
Schiffsbewegungsgeschwindigkeiten	Private Schiffe im täglichen Einsatz mit Geschwindigkeiten zwischen 8 und 20 Knoten (durchschnittlich etwa 15 Knoten)
Wassertemperaturen	13 °C im Winter bis zu ca.25 °C im Sommer

Technische Details zur Fertigung

Die Mikrostrukturen können mittels eines Transferzylinders oder einer Rolle hergestellt werden. Diese Strukturen können auf flexible Folien oder Kunststoffplatten übertragen werden, welche dann auf gekrümmte Oberflächen drapiert werden können. Wenn der Zylinder so gestaltet ist, dass er der makroskopischen Form entspricht, können Strukturen direkt auf komplexe Oberflächen gerollt werden – dies wäre besonders für Propeller anwendbar, sofern CAD-Geometrien bereitgestellt werden.

Für Antifouling-Anwendungen wird erwartet, dass der beste Effekt erzielt wird, wenn Mikrostrukturen direkt in eine Antifouling-Beschichtung eingerollt werden. Daher wurde vorgeschlagen steife beschichtete Hautstücke zu applizieren die bereits gut Form Schiffsrumpfs angepasst sind strukturiert befestigt.

II.2. HAP 2 – Simulation und Optimierung von Oberflächentopographien

Nicht durchgeführt aufgrund des Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber.

II.3. HAP 3 – Entwicklung von Produktionstechnologien für bioinspirierte mikrotexturierte Beschichtungen

Nicht durchgeführt aufgrund des Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber.

II.4. HAP 4 – Beschichtungsanlagen für die Musterübertragung

Nicht durchgeführt aufgrund des Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber.

II.5. HAP 5 – Tests und Bewertung

Nicht durchgeführt aufgrund des Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber.

II.6. HAP 6 – Verbreitung Nutzung Verwaltung

Nicht durchgeführt aufgrund des Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber.

II.7. Soll-Ist-Vergleich der gesetzten Ziele

Aufgrund des Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber wurden lediglich die Zwischenziele des HAP 1 erreicht.

II.8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Eine Zusammenfassung über die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ist in der folgenden Tabelle 1 gegeben. Details sind dem zahlenmäßigen Nachweis selbst zu entnehmen.

Tabelle 1: Kurzübersicht über Verwendungsnachweis für Zuwendungen auf Ausgabenbasis mit PP

1	2	3	4
Position Gesamtfinanzierungsplan	**Entstandene Ausgaben** insgesamt bis einschl. 2024	**Anerkannte Ausgaben** insgesamt bis einschl. 2024	**Gesamtfinanzierungsplan**
0812	10.097,16		73.862,05
0817	0,00		0,00
0820	0,00		0,00
0822	0,00		9.601,80
0831	0,00		790,92
0834	0,00		0,00
0835	0,00		0,00
0843	0,00		1.200,00
0846	0,00		0,00
0850	0,00		5.020,00
Summe:	10.097,16		90.474,77

		Nachgewiesen	Anerkannt
14 Entstandene Ausgaben insgesamt **(Summe von Spalte 2)**		10.097,16	
15 Anteil Eigenmittel lt. Finanzierungsplan		0,00	
16 Mittel Dritter und Einnahmen lt. Finanzierungsplan ohne Zeile 17		0,00	
17 **Weitere** Mittel Dritter und Einnahmen ohne Zeile 16 (gem. NB)	17a) Gesamt 0,00	17b) Bundesanteil [1] 0,00	
18 Verbleibender Anteil des Bundes (14 ./. 15 ./. 16 ./. 17b)		10.097,16	
18a Projektpauschale		2.019,43	
19 Zahlung auf Anteil des Bundes		12.116,59	
20 Kassenbestand am 30.09.2024 (19 ./. 18 / 18a)		0,00	

II.9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war im vollen Umfang notwendig, um die dargestellten Ergebnisse zu erzielen.

II.10. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Zuge der Vorbereitungen auf AP 5.2, welches die Vermessung des Einflusses Riblet-Oberflächen auf die Leistung von Propellern bzw. eVTOL-Rotoren beinhaltet, wurden Konzepte zum sensorischen Ausbau des Propellerprüfstands des ILR entworfen. Diese Ergebnisse werden trotz Projektabbruch umgesetzt, um auch künftig ein breiteres Spektrum an Untersuchungen an Propellen durchführen zu können.

II.11. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt Dritter

keine

II.12. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

keine

III. ReferenzenLiteraturangaben

[1] Leitl, P. A., Flanschger, A., Ortiz de Viñaspre, I. u. Pereira, A.: Investigation of the impact of different riblet technologies and its application on a Boeing 777 airplane model. AIAA SCITECH 2022 Forum. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics 2022

[2] Mueller, J.-U.: Aeroshark, 2023. https://www.lufthansa-technik.com/en/aeroshark, abgerufen am: 30.10.2024.372Z

[3] Bilinsky, H. C.: Direct Contactless Microfabrication of 3D Riblets: Improved Capability, Metrology and Durability. AIAA Scitech 2019 Forum, 7-11 January 2019, San Diego, California. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics 2019

[4] Tian, G., Fan, D., Feng, X. u. Zhou, H.: Thriving artificial underwater drag-reduction materials inspired from aquatic animals: progresses and challenges. RSC advances 11 (2021) 6, S. 3399–3428

[5] Zhang, T., Barakos, G. N., Furqan u. Foster, M.: Multi-fidelity aerodynamic design and analysis of propellers for a heavy-lift eVTOL. Aerospace Science and Technology 135 (2023) 3, S. 108185

[6] Xia, X., Ma, D., Zhang, L., Liu, X.'a. u. Cong, K.: Blade Shape Optimization and Analysis of a Propeller for VTOL Based on an Inverse Method. Applied Sciences 12 (2022) 7, S. 3694

[7] Brandt, J. B., Deters, R. W., Ananda, G. K., Dantsker, O. D. u. Selig, M. S.: UIUC Propeller Data Site, Illinois, USA 2024. https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html, abgerufen am: 30.10.2024.215Z

[8] Cerny, M.: Aerodynamic Characteristics of Propeller Configurations under Non-Axial Inflow Conditions, Technische Universität München Dissertation. München 2022

Anhänge

Tabelle 2: Balkenplan des Verbundvorhabens

Work Packages			2024												2025												2026		
			Q1			Q2			Q3			Q4			Q1			Q2			Q3			Q4			Q1		
Task number	Task Name	WP Leader	Jan. 24	Feb. 24	Mrz. 24	Apr. 24	Mai. 24	Jun. 24	Jul. 24	Aug. 24	Sep. 24	Okt. 24	Nov. 24	Dez. 24	Jan. 25	Feb. 25	Mrz. 25	Apr. 25	Mai. 25	Jun. 25	Jul. 25	Aug. 25	Sep. 25	Okt. 25	Nov. 25	Dez. 25	Jan. 26	Feb. 26	Mrz. 26
1	Definition of requirement specifications and boundary conditions	Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme																											
1.1	Description of all relevant details of demonstra-tors (applications, materials, dimensions ....)																												
1.2	Complete list of requirements and boundary conditions for the development of the ecoTRANS coatings.																												
2	Simulation and optimization of surface topographies	Bionic Surface Technologies GmbH										M1																	
2.1	Structure definition for fixed wing application																												
2.2	Structure definition for rotary wing application																												
2.3	Structure definition for maritime application																												
2.4	Final report on estimated maximal efficiency enhancement potential (aeronatic)																												
2.5	Final report on material evaluation and expected efficiency enhancement potential (maritime)																												
3	Development of production technologies for bioinspired microtextured coatings	polyscale											M2																
3.1	Microstructured transfer film for use in fixed wing application																												
3.2	Microstructured transfer film for use in rotary wing application																												
3.3	Microstructured transfer film for use in maritime application																												
4	Coating equipment for pattern transfer	Bionic Surface Technologies GmbH																											
4.1	Patches with structured surfaces																												
4.2	Conceptual design for the coating system																												
5	Test and Evaluation	B Solutions															M3					M4							
5.1	Report on fouling pressure on micro structured patches (month 18, BSN)																												
5.2	Report on test bench experiments for rotor blades																												
5.3	Report on wear and behavior, self-cleaning be-havior and long-term stability (month 24, PLS)																												
6	Dissemination, exploitation and management	B Solutions																											
6.1	Promo materials																												
6.2	Organization of one international conference or workshop																												
6.3	Publication of 2 scientific papers in eminent international scientific journals																												

Milestone No.	Milestone Name	Due date/month
M1	Definition of target structures for all demonstrators	7
M2	Transfer films for all demonstrators	9
M3	Start of performance tests for all demonstrators	12
M4	Preliminary results from test experiments	18

Sachbericht Teil III – Erfolgskontrollbericht

(gemäß Nr. 6.6 BNBest-BMBF 98 und 11.6 NKBF 98)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
RWTH Aachen University	**01DS24002B**

Ressort: BMBF, Referat 224, Profil: Technologie- und Innovationsförderung

ecoTRANS
Verbundvorhaben: Entwicklung von leistungssteigernden Beschichtungen für Anwendungen in der Schifffahrt und Luftfahrt

Teilvorhaben:

Experimentelle Qualifizierung leistungssteigender Beschichtungen

Laufzeit des Vorhabens:

01.04.2024– 30.09.2024

Autoren: Dr.-Ing. Ralf Hörnschemeyer
Sebastian Hille, M.Sc.

Datum: 31.10.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Dr. Ralf Hoernschemeyer

Digital unterschrieben von Dr. Ralf Hoernschemeyer
Datum: 2024.10.31 15:43:49 +01'00'

Unterschrift Projektleiter

I. Wissenschaftlich-technische Erkenntnisse

Aufgrund des vorzeitigen Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber konnte das Projekt seitens des Instituts für Luft- und Raumfahrtsysteme lediglich das HAP 1 mit begleitet werden. Zwischenergebnisse sind dem Kurz- bzw. Schlussbericht zu entnehmen.

II. Verwertungsplan

II.1. Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Bisher sind keine Schutzrechtsanmeldungen geplant.

II.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Simulations- und Optimierungsdienstleistung

Die drei Anwendungsfälle werden jeweils neue Marktdurchdringungen für BST generieren. Für die allgemeine Luftfahrt können detaillierte Informationen über die weitere Effizienzsteigerung für zusätzliche überdachte Flächen, ein Optimum von minimaler überdachter Fläche zu maximalem Wert der Luftwiderstandsreduzierung erreicht werden. Dieses Optimum sollte für alle Flugzeugklassen innerhalb dieses Sektors ähnlich sein und ermöglicht es BST, den Kunden die wirtschaftlichste Lösung anzubieten. Bei Drehflüglern sind Oberflächenoptimierungen durch Mikrostrukturen in dieser Flugzeugklasse noch nicht erforscht worden. Es wird jedoch erwartet, dass die Riblet-Strukturen einen ähnlichen Einfluss haben werden wie in anderen Anwendungen. Diese Wirkung wird durch das Projekt ecoTRANS entfaltet werden. Für die Schiffsindustrie wird die Entwicklung einer innovativen Riblet-Anbringungsmethode das vorhandene Wissen über die direkte Anwendung von Riblets vertiefen.

Transferbeschichtungen und Transferfolien

Bei einer Boeing 777 wurden mit der Riblet-Technologie Treibstoffeinsparungen von etwa 1,1 Prozent erzielt. Dadurch wird der Treibstoffverbrauch um über 4.800 Tonnen reduziert. Um diese Energie- und CO2-Einsparungen zu erreichen, müssen pro Flugzeug fast 1.000 m² Oberfläche strukturiert werden. Berücksichtigt man die Anzahl der in Betrieb befindlichen Flugzeuge, die von der ecoTRANS-Technologie profitieren würden, so wird allein für die traditionellen mittleren und großen Verkehrsflugzeuge ein Volumen von 30 Millionen m² benötigt. Zusätzlich gibt es ein Marktpotenzial von 5 Millionen Quadratmetern für Rotorblätter für eVOTL. Im maritimen Bereich könnte das Absatzvolumen aufgrund der größeren zu strukturierenden Flächen und des enormen Energieeinsparpotenzials sogar noch höher sein. Bei einem großen modernen Containerschiff würde eine Verringerung der Mantelreibung um 5 % die Treibstoffkosten um 3 Millionen Dollar pro Jahr senken.

Ausrüstung für robotergestützte Anwendungen

Aufgrund der neuen Vorschriften für eine umweltfreundliche Schifffahrt steigt die Nachfrage nach Automatisierung stetig an. BST wird in der Lage sein, das im Projekt erworbene Know-how für die automatisierte robotergestützte Anwendung nach dem Projekt an Automatisierungsunternehmen zu lizenzieren. Damit eröffnet sich ein einzigartiger Markt für eine automatisierte Beschichtungsanlage für strukturierte Oberflächen, wodurch ein äußerst wertvolles Produkt geschaffen wird, das an Schiffsbauer oder Schiffsinstandhaltungsunternehmen verkauft oder vermietet werden kann.

Praktische Kompetenzen für das Design und die Chrakterisierung von funktionalen Oberflächen zur Widerstandsreduzierung

Das ILR wird Kompetenzen für das Design und die Charakterisierung von funktionalen Oberflächen zur Reduzierung des Luftwiderstands erwerben. Als Institut mit starken Verbindungen in die Industrie wird das ILR in der Lage sein, als Enabler für den Transfer der neuen Kompetenzen in die Industrie zu fungieren und die Übernahme der Projektergebnisse in Anwendungen außerhalb des ecoTrans-Projekts zu beschleunigen.

Maritime Sanierungsdienste auf der Grundlage der ecoTRANS-Technologie

Die Technologie des ecoTRANS-Projekts wird ein Antifouling-Produkt hervorbringen, das von BSN im Rahmen der Wartung von Schiffsrümpfen angeboten wird. Da BSN diese Art von Dienstleistung derzeit nicht anbietet, wird sie den bestehenden Kunden (Schiffseignern, Schiffsmanagern, Werften) angeboten, und es wird mit einer Marktdurchdringung von 5 % im ersten Jahr gerechnet. Zusätzlich werden 2 Ingenieure und ein weiteres Verwaltungspersonal eingestellt.

II.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse der Projektes ecoTRANS können direkt in praktische Anwendungen einfließen und somit zur Verbesserung der Effizienz und Leistungsfähigkeit von Flugzeugen beitragen. Die Erkenntnisse, Erfahrungen und insbesondere die geschaffene Forschungsinfrastruktur des um weitere Sensorik ausgerüsteten Propellerprüfstands bietet eine solide Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten und Innovationen.

II.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das ILR ist daran interessiert, die geschaffene Forschungsinfrastruktur des um weitere Sensorik ausgerüsteten Propellerprüfstands für künftige Projekte zu nutzen, sowie die geknüpften Kontakte zu den Unternehmen aufrecht zu erhalten, um weitere Entwicklungsarbeit zu Riblet-Strukturen durchzuführen.

III. Arbeiten ohne Lösung

Aufgrund des vorzeitigen Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber konnte das Projekt seitens des Instituts für Luft- und Raumfahrtsysteme lediglich das HAP 1 mit begleitet werden.

IV. Ergebnispräsentation

Aufgrund des vorzeitigen Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber bisher nicht erfolgt.

V. Einhaltung Kosten- und Zeitplanung

Aufgrund des vorzeitigen Widerrufs der Zuwendung durch den Fördergeber wurde das Projekt für den Zuwendungsempfänger frühzeitig zum 30.09.2024 beendet. In dieser Zeit wurde die Kostenplanung eingehalten.