

## LABELO

Laserstrukturierte Anti-Eis Beschichtung für Luftfahrt-Oberflächen

<b>Programm / Ausschreibung</b>	TAKE OFF, TAKE OFF, TAKEOFF Ausschreibung 2021	<b>Status</b>	laufend
<b>Projektstart</b>	01.10.2022	<b>Projektende</b>	31.12.2025
<b>Zeitraum</b>	2022 - 2025	<b>Projektlaufzeit</b>	39 Monate
<b>Projektförderung</b>	€ 1.032.766		
<b>Keywords</b>	Anti-Eis; SLIPS; HMDSO-Beschichtung; Laserstrukturierung; Simulation Vereisung		

### Projektbeschreibung

An Luftfahrzeugen auftretende Vereisung von aerodynamischen Elementen kann das Flugverhalten negativ beeinflussen und je nach Eisanlagerung sogar zum Strömungsabriss führen. Daher sind Strategien zur Vereisungsprävention (anti-icing) und Enteisung (de-icing) wesentlich beim Betrieb von Fluggeräten. Zur Enteisung von Tragflächensektionen (meist die Vorderkante) werden verschiedene aktive Systeme verwendet. Pneumatisch versorgte, flexible Gummimatten (Boots) verändern bei Detektion von Eis durch Einleiten von Luft die Oberfläche und sprengen es dadurch ab. Thermische Systeme erwärmen bestimmte Zonen, um diese eisfrei zu halten oder angelagertes Eis zu schmelzen. Sie werden entweder elektrisch beheizt oder mit Zapfluft aus dem Triebwerk versorgt. Bei chemischen Systemen wird ein Anti-Eis-Fluid auf die Flügeloberfläche gepumpt und ein dünner Film erzeugt, der die Eisbildung verhindert. Jedes dieser Systeme hat Nachteile: Zur thermischen Enteisung wird viel Energie benötigt, pneumatische Systeme sind sehr wartungsintensiv und beeinflussen die Aerodynamik negativ und chemische Enteisung führt zu einer zusätzlichen Gewichtsbelastung und einer begrenzten Einsatzdauer.

Ziel dieses Projekts ist es widerstandsfähige und hochwirksame passive Anti-Eis-Oberflächen durch die Kombination von drei Schlüsseltechnologien zu entwickeln und das Anwendungsgebiet von Anti-Eis Beschichtungen auf Propeller zu erweitern. Diese Erweiterung ist nicht nur für die bemannte Luftfahrt, sondern auch für die unbemannte Luftfahrt (Drohnen/Multikopter) von großer Bedeutung, wo vorhandene Energie und Gewicht insbesondere bei elektrisch betriebenen Drohnen einen bedeutenden Einfluss auf die Gesamtperformance haben. Die erste der drei Schlüsseltechnologien ist die Laserstrukturierung mittels Femtosekundenlaser, welche es ermöglicht, einerseits feine Nanostrukturen (LIPSS) und andererseits poröse Mikrostrukturen zu erzeugen. Diese Strukturen können die Oberflächeneigenschaften maßgeblich verändern und einen superhydrophoben oder eisphoben Effekt bewirken. Um diese Effekte zu verstärken, werden als zweite Schlüsseltechnologie funktionelle Nano-Beschichtungen auf Basis von Silanen eingesetzt. Die dritte Schlüsseltechnologie ist die Plasmabeschichtung, bei der zur Steigerung der Beständigkeit eine Hexamethyldisiloxan-Schicht (HMDSO) mittels Plasma appliziert wird. Weiters werden auf Basis der Laserstrukturierung auch regenerative Slippery Liquid Infused Porous Surfaces (SLIPS) untersucht. Dem negativen Effekt des Entleerens der SLIPS-Oberfläche wird durch eine aktive Fluidnachförderung entgegengewirkt. Dazu werden Mikrokanäle in die strukturierten Oberflächen lasergebohrt, und zwar so, dass diese von der Rückseite mit geringen Mengen verschiedener Fluiden versorgt werden können. Dies können SLIPS Öle

sein oder auch Enteisungsfluide. Umweltaspekte, wie die biologische Abbaubarkeit und Wiederverwertbarkeit der verwendeten Beschichtungsmaterialien, werden dabei berücksichtigt.

Um die Leistungsfähigkeit der in LABELO entwickelten Anti-Eis Beschichtungen zu beurteilen, werden experimentelle Vereisungstests mit verschiedenen Probekörpern durchgeführt. Dazu wird das Benetzungs- und Enteisungsverhalten gemessen, sowie Untersuchungen in einer aerodynamischen Umgebung im Eiskanal durchgeführt. Ausgewählte eisphobe Oberflächen werden abschließend an Rotoren aufgebracht und an einem Rotorprüfstand hochgradig dynamischen Vereisungsbedingungen ausgesetzt. Hier liegt der Fokus auf dem Eis-Shedding, also dem Ablösen von akkumuliertem Eis, als Funktion der entstehenden g-Kräfte. Der Unterschied in den benötigten g-Kräften zwischen Referenz und Probe ist ein direktes Maß der Effizienz des neuen Systems. Neben den experimentellen Arbeiten wird die Eisentstehung und Anhaftung auch theoretisch betrachtet. Die numerische Simulation von Benetzungs- und Vereisungsvorgängen ist ein wichtiger Teil dieses Projekts. Dabei sollen bestehende Simulationsmodelle verbessert und erweitert werden, um künftig bessere Vorhersagen über Vereisungsprozesse und -verhalten machen zu können. Für die Validierung der Simulationen werden die Ergebnisse der experimentellen Versuche herangezogen.

## **Abstract**

Icing of aerodynamic elements on aircraft can have a negative effect on flight and, depending on the accumulation of ice, can even lead to stalling. Anti-icing and de-icing strategies are therefore essential when operating aircraft. Various active systems are used to de-ice wing sections (usually the leading edge). Pneumatically supplied, flexible rubber mats (boots) change the surface when ice is detected by introducing air and thereby blowing it off. Thermal systems heat certain zones to keep them free of ice or to melt accumulated ice. They are either electrically heated or supplied with bleed air from the engine. With chemical systems, an anti-icing fluid is pumped onto the wing surface, creating a thin film that prevents ice formation. Each of these systems has disadvantages: a lot of energy is required for thermal de-icing, pneumatic systems are very maintenance-intensive and have a negative effect on aerodynamics, and chemical de-icing leads to additional weight loading and a limited range in critical conditions.

The aim of this project is to develop resistant and highly effective passive anti-icing surfaces by combining three key technologies and to expand the field of application of anti-icing coatings to propellers. This is not only of great importance for manned aviation, but also for unmanned aviation (drones/multirotors), where the available energy and weight have a significant influence on the overall performance, especially in electrically operated drones. The first of the three key technologies is laser structuring using a femtosecond laser, which makes it possible to create nanostructures (LIPSS) on the one hand and porous microstructures on the other. These structures can significantly change the surface properties and cause a superhydrophobic or icephobic effect. To enhance these effects, functional nano-coatings based on silanes are used as a second key technology. The third key technology is plasma coating, in which an Hexamethyldisiloxane layer (HMDSO) is applied using plasma to increase durability. Furthermore, regenerative Slippery Liquid Infused Porous Surfaces (SLIPS) are also investigated on the basis of laser structures. The negative effect of emptying the SLIPS surface is counteracted by active fluid replenishment. For this purpose, micro-channels are laser-drilled into the structured surfaces in such a way that they can be supplied with small amounts of different fluids from the rear. This can be SLIPS oils or de-icing fluids.

Environmental aspects such as the biodegradability and recyclability of the coating materials used are taken into account. In order to assess the performance of the anti-ice coatings developed in LABELO, experimental icing tests are carried out with various test specimens. For this purpose, the wetting and de-icing behavior is measured, and investigations are carried out in an aerodynamic environment in the icing wind tunnel. Furthermore, selected ice-phobic surfaces are applied to rotors and subjected to highly dynamic icing conditions on a rotor test bench. The focus here is on ice shedding, i.e. the

detachment of accumulated ice, as a function of the resulting g-forces. The difference in required g-forces between reference and sample is a direct measure of the efficiency of the new system. In addition to the experimental work, ice formation and adhesion are also considered theoretically. The numerical simulation of wetting and icing processes is an important part of this project. Existing simulation models are to be improved and expanded in order to be able to make better predictions about icing processes and behavior in the future. The results of the experimental tests are used to validate the simulations.

## **Endberichtkurzfassung**

Das Projekt LABELO erforschte und entwickelte die Grundlagen für passive Anti-Eis-Oberflächen für Flugzeug- und Drohnenanwendungen, um herkömmliche thermische, pneumatische und chemische Ice Protection Systems zu ersetzen und damit den Energiebedarf drastisch zu reduzieren. Kerntechnologien waren dabei einerseits die Femtosekunden-Laserbearbeitung zur Erzeugung mikro-/nanostrukturierter Oberflächen definierter Ausprägung und andererseits funktionelle Silan-Beschichtungen bzw. HMDSO-Plasmabeschichtungen zur Verstärkung der hydrophoben Oberflächeneigenschaften, der Reduktion der Eishaftung und Erhöhung der Beständigkeit. Zusätzlich wurden regenerative SLIPS-Oberflächen mit aktiver Fluidnachspeisung untersucht. Die Wirksamkeit der erzeugten Oberflächen wurde experimentell im Vereisungswindkanal und am im Zuge des Projekts entwickelten Vereisungs-Rotorprüfstand getestet und durch numerische Simulationen von Benetzungs- und Vereisungsprozessen ergänzt.

Ergebnisse:

Bestätigung der Anti-Eis-Funktionalität der Kombination aus lasergenerierten Mikro- und Nanostrukturen und dünnen funktionalen Beschichtungen.

HMDSO auf Laser Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) reduzierte die Eishaftung von 750 kPa auf 120 kPa (Edelstahlsubstrat).

Silancoating (Monolayer) auf Linien-Mustern reduzierte die Eishaftung von 620 kPa auf 60 kPa (Aluminium Substrat)

Erfolgreiche Durchführung von Experimenten im Vereisungswindkanal und Bestätigung der Anti-Eis-Eigenschaften der modifizierten Oberflächen an Tragflügelprofilen. Im Vergleich zur unbehandelten Oberfläche, konnten folgende Verbesserungen erzielt werden:

Verzögerung der initialen Eisbildung

Reduktion des Eisvolumens

Modifikation der Eisform (glatt anstelle von rau)

Zusätzlich zu den rein passiven Oberflächen wurde auch eine Kombination aus elektro-thermischen und passiven IPS

getestet. Bestes Ergebnis lieferte die Kombination aus „Cones“-Micro-/Nanostrukturen und einer Silanbeschichtung bei einer Heizleistung von ca. 0,3 W/cm<sup>2</sup> mit nahezu keiner Vereisung (hoher LWC, -10 °C, 20 m/s).

Aufbau und Nutzung eines Rotations-Vereisungsprüfstands zur Evaluierung der Wirkung von modifizierten Oberflächen auf die Eisbildung, Eisakkumulation und zentrifugalkraft-induziertes Shedding.

Experimentelle Evaluierung der Haltbarkeit gegenüber unterschiedlicher Beanspruchungen, denen Luftfahrtoberflächen ausgesetzt sein können: Sanderosion, Wasser, Enteisungsfluid, UV-Licht, Hydrauliköl. Beste Performance erzielten funktionale Silanbeschichtungen.

Wissenschaftliche Publikationen die im Zuge des Projekts LABELO erarbeitet wurden:

Fürbacher, R.; Hassler, W.; Steiner, H.; Neubauer, T.; Hufnagl, J.; Baca, L.; Kozomara, D.; Spalt, S.; Hinterer, A.; Liedl, G. Novel Passive Icephobic Surfaces – Experimental Investigations in a Small-Scale Icing Wind Tunnel; AIAA 2024.

<https://doi.org/10.2514/6.2024-4353>

Amon, J.; Gerstenbrand, M.; Kozomara, D.; Hassler, W.; Puffing, R.; Schweighart, S. Development of a Test Rig for Investigating Propeller and Rotor Icing; AIAA 2024. <https://doi.org/10.2514/6.2024-4113>

Fürbacher, R.; Liedl, G.; Grünsteidl, G.; Otto, A. Icing wind tunnel and erosion field tests of superhydrophobic surfaces caused by femtosecond laser processing; Wind 2024 . <https://doi.org/10.3390/wind4020008>

Fürbacher, R.; Grünsteidl, G.; Otto, A.; Liedl, G. Chemical and UV durability of hydrophobic and icephobic surface layers on femtosecond laser structured stainless steel; Coatings 2024 . <https://doi.org/10.3390/coatings14080924>

## **Projektkoordinator**

- Technische Universität Wien

## **Projektpartner**

- FH JOANNEUM Gesellschaft mbH
- INO GmbH
- Aerospace & Advanced Composites GmbH
- Österreichisches Institut für Vereisungswissenschaften in der Luftfahrt (AII)