Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

# FELDVERSUCHE MIT LASERSTRUKTURIERTEN OBERFLÄCHEN

Die Feldversuche wurden im Rahmen des Forschungsprojekt NICE durchgeführt. NICE war ein kooperatives Forschungsprojekt der Technischen Universität Wien und des technischen Büro Energiewerkstatt Verein mit dem Ziel mittels Femtosekundenlaser mikro- und nanostrukturierte Oberflächen zu erzeugen, welche Eiswachstum an Windkraftanlagen verzögern bzw. verhindern.

Das Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms "Energieforschung" durchgeführt (Projektnummer 871733).

### 1. Statische Feldversuche

Das Forschungsprojekt NICE hatte das Ziel nanostrukturierte Oberflächen für die herausfordernde Anwendung im Bereich Windenergie zu entwickeln. Dazu wurden bestehende Technologien für die Oberflächenbearbeitung weiterentwickelt und die Eignung der Strukturen für die Anwendung an Windkraftanlagen getestet. Neben Labortests und dynamischen Belastungstests an den Rotorblättern von Kleinwindkraftanlagen, wurden behandelte Oberflächen an einem stark vereisungsgefährdeten Windkraftstandort über längere Zeiträume der Witterung ausgesetzt. Der gegenständliche Bericht beschreibt Aufbau, Methodik und Ergebnisse der Bewitterungsversuche im Freiland.

### Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau diente der Dokumentation des Vereisungsverhalten auf stationären (unbewegten) Oberflächenproben. Um den Einfluss der Versuchsaufbauten möglichst gering zu halten, wurde eine Probenhalterung aus Edelstahl auf einem 6 m hohen Masten mit 1 m Ausleger in exponierter Lage montiert (vgl. Abbildung 1). Die Vereisungs- und Abtauvorgänge an den Proben wurden durch eine hochauflösende Kamera optisch im 10 Minuten Takt aufzeichnet. Das Bildmaterial wurde durch einen Datenlogger gesammelt und mittels Mobilfunk übertragen. Ein mit der Kamera synchron geschalteter Weißlichtscheinwerfer sorgte für die optimale Ausleuchtung des Versuchsaufbaus. Vor dem Probenhalter war ein Wärmestrahler angebracht, der es ermöglichte die Proben künstlich abzutauen und Vereisungsvorgänge zu wiederholen.

Des Weiteren wurde am Probenhalter ein Vereisungssensor der Firma Eologix installiert. Diese Geräte werden als Stand der Technik zur Eisüberwachung an Großwindkraftanlagen eingesetzt. Der Vereisungssensor erfasste mittels kapazitiver Messung die Dicke der Eisschicht sowie Basisdaten zu den Vereisungsbedingungen im direkten Umfeld der Proben und übermittelte die Daten ebenfalls mittels Mobilfunk.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 1: Aufbau des stationären Feldversuchs



Abbildung 2: Stationärer Feldversuch (Quelle: Energiewerkstatt Verein)

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

### Analyse der Vereisungs- und Enteisungsprozesse

Im Zuge der Analyse der Vereisungs- und Abtauprozesse wurde eine visuelle Beurteilung des Vereisungsprozesses der einzelnen Proben durchgeführt. Ziel war eine qualitative Einteilung des Vereisungsfortschritts der Probenoberflächen in sieben Bewertungskategorien. Für die weitere Interpretation der Vereisungen wurden die Art der Vereisung beurteilt und der fortschreitende Vereisungsprozess mit meteorologischen Umgebungsdaten analysiert. Auf Basis dieser Auswertungen konnten neben einem Vereisungsprofil für die unterschiedlichen Oberflächen auch Verbesserungen für die Oberflächenbearbeitung und den möglichen Anwendungsbereichen abgeleitet werden.

#### Art der Vereisung

Klareis ist eine glatte, kompakte, durchsichtige und fest anhaftende Eisablagerung unbestimmter Form und Oberfläche. Klareis entsteht bei Lufttemperaturwerten zwischen 0 und -3 °C durch langsames Anfrieren von unterkühlten Wassertröpfchen. Klareis kann zu extrem schweren Eislasten führen.

Raueis entsteht aus dem Niederschlag von körnigen Partikeln bei hohen Windgeschwindigkeiten und einer Lufttemperatur von typischerweise -2 bis -10 Grad Celcius. Im Vergleich zu solidem Klareis ist es von eher lockerer Konsistenz und aufgrund von Lufteinschlüssen undurchsichtig. Das Eiswachstum schreitet typischerweise gegen die Windrichtung voran. Durch das teilweise Schmelzen und Wiedergefrieren der Partikel verkleben diese je nach herrschenden Temperaturen unterschiedlich stark.

Mischeis ist eine Kombination aus Klareis und Raueis. Es entsteht, wenn sowohl größere als auch kleinere unterkühlte Wassertröpfchen bei sehr niedrigen Temperaturen zwischen -10 °C und -15 °C und Wind gefrieren. Hierbei werden Raueispartikel in das Klareis eingebettet und bilden eine harte und grobkantige Masse.



Tabelle 1: Arten von Vereisung

Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Visuelle Kategorisierung nach dem Vereisungsgrad

Als Ausgangspunkt für die visuelle Auswertung wurden die Bilddateien nach dem Grad der Vereisung in die Kategorien null bis sechs unterteilt. Die Auswertungen wurden manuell anhand von Beispielbildern und einer Charakterisierung des Vereisungszustandes durchgeführt. Eine zusätzliche Auswertung mittels Bilderkennungssoftware diente einer Verifizierung der manuellen Auswertung. Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die Vereisungskategorien und die Charakterisierung.

#### Vereisungskategorie 0:

Auf den Proben ist keine Eisbildung erkennbar.



#### Tabelle 2: Vereisungskategorie 0

### Vereisungskategorie 1:

Beginn einer Eisbildung durch kleinste Eispartikel. Um eine Probe in den Vereisungsgrad 1 einzuteilen, muss die Größe der Eispartikel minimal sein und nur vereinzelt auf der Probe sichtbar sein.



#### Tabelle 3: Vereisungskategorie 1

#### Vereisungskategorie 2:

Die Größe der Eispartikel ist vergleichbar mit der ersten Kategorie, jedoch ist eine höhere Anzahl zu beobachten. Auch eine minimal ausgeprägte zusammenwachsende Eisstruktur ist erkennbar.





Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Vereisungskategorie 3:

Größere Eispartikel, welche auch als Eiskörner klassifiziert werden können. Die kantigen Eisstrukturen sind flächendeckend oder nahezu flächendeckend und mäßig erhöht.



#### Tabelle 5: Vereisungskategorie 3

#### Vereisungskategorie 4:

Im Vergleich zur Vereisungskategorie 3 sind die Eiskörner deutlich größer ausgebildet.



Tabelle 6: Vereisungskategorie 4

### Vereisungskategorie 5:

Ähnlich dem Vereisungsgrad 4 sind auf der vereisten Fläche großgewachsene Eiskörner zu sehen. Die Eiskörner heben sich jedoch in Größe und Volumen von Vereisungskategorie 4 ab.



Tabelle 7: Vereisungskategorie 5

Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Vereisungskategorie 6:

Flächenmäßig große oder komplette Vereisung mit großgewachsenen Eisteilen. Erhebliches Massenwachstum im Vergleich zu Kategorie 5.



#### Tabelle 8: Vereisungskategorie 6

#### Softwaregestützte Bilderkennung

Zusätzlich zur manuell-visuellen Auswertung wurde ein Bilderkennungsprogramm verwendet. Ziel war es die Ergebnisse der manuell-visuellen Auswertung ressourceneffizient zu prüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Das verwendete Bilderkennungsprogramm ImageJ ist ein Open-Source-Programm, welches vielfach in der medizinischen und wissenschaftlichen Bildanalyse genutzt wird. Das Programm ist insbesondere für die Vermessung von Strukturen auf kontrastreichen Bildaufnahmen geeignet. Nach Selektion der Bilder wurde die weitere Auswertung der prozentuellen Vereisung mit der Anwendung Auto Threshold durchgeführt.

#### Bearbeitungsschritte in ImageJ

Schritt 1: Manuelle Auswahl der zu analysierenden Bilder

**Schritt 2:** Mit der Funktion "Region of Interest" (ROI) wird ein Bildbereich für die nachfolgende Auswertung selektiert. Hierfür wurde die Konstruktor-Methode PolygonRoi verwendet, welche aus den Koordinatenwerten eine polygonale Region of Interest erzeugt.

**Schritt 3:** Für die Anwendung der Funktion AutoTreshold ist es nötig, das Originalbild in ein 8-Bit oder 16-Bit Schwarz-Weiß-Bild umzuwandeln. In diesem Fall wurde die Ausgabe in ein 16-Bit-Bild ausgewählt, da die Qualität der Bilder sehr hoch war.

**Schritt 4:** Für die Berechnungen des prozentuellen Anteils der Vereisung wird der AutoTreshold angewendet und die Ergebnisse inklusive Mittelwert und Standardabweichung ausgegeben.

**Schritt 5:** Die Bearbeitung einer großen Anzahl von Bildern wird mit dem Werkzeug Batch-Process ermöglicht. Die einzelnen Bereiche (Probeoberfläche) je Bilddatei wurden automatisch angesteuert und nach vordefinierten Kriterien ausgewertet. Für die Bearbeitung einer großen Anzahl an Bilddateien eignet sich der Einsatz eines entsprechenden Makros.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

### Methodenwahl für die Auswertung

In weiterer Folge wurden die Vereisungs- und Abtauprozesse gemeinsam mit den meteorologischen Daten statistisch ausgewertet und Zusammenhänge geprüft. Aus der in Abbildung 3 dargestellten Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Vereisung aller Oberflächenproben klar zu erkennen, dass es sich hier um keine Normalverteilung handelt. Dies war ausschlaggebend für die Methodenwahl bei den Paarvergleichen und schließt somit die Verwendung parametrischer Tests aus. Für die Prüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den Oberflächen wurden daher Kruskal-Wallis-Tests mit anschließendem Dunn-Bonferroni Posthoc Paarvergleichen durchgeführt. Das Signifikanzniveau betrug 0,05. Insgesamt wurden 1.561 hochauflösende Bilder ausgewertet.



Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Vereisung aller Oberflächenproben (N = 1561 Messzeitpunkte)

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

### Ergebnisse der statischen Feldversuche

Im ersten Winterhalbjahr 2020/2021 wurden neun unterschiedliche Oberflächenstrukturen mit stark hydrophoben Eigenschaften hinsichtlich einer präventiven Wirkung auf das Eiswachstum getestet. Basierend auf den Erkenntnissen fokussierte die Entwicklung eisphober Oberflächen auf vergleichsweise vereisungsträge Laserstrukturen (u.a. LIPSS, Gitter), wobei für die weitere Probenherstellung die Produktionsparameter variierten. Im zweiten Winterhalbjahr 2021/2022 umfasste der Feldversuch 17 unterschiedlich bearbeitete Oberflächen, welche überwiegend in doppelter Ausführung vorlagen und unterschiedlichen Positionen am Probenträger positioniert wurden. Die folgende Abbildung zeigt die Anordnung der Proben sowie die entsprechenden Oberflächenproben. Die weitere Ergebnisdarstellung fokussiert auf die Auswertungen des statischen Feldversuchs im Winterhalbjahr 2021/2022.

STATES	1	15		39		35		37	No.	26	2	4	
Sec. 41	14	1	-		-				-		1/	-	14
and the	N.		MERCE A	1	-				-		21	1	
Distant.		1		*	<b>BRAN</b>		1			-			
	9	23		8	1	12		6		21		32	All and a second
	70000	and the second second				Street, Spin		-		-			and the second second
100	10/2										the 1		and the second
TAK AT LE					1000	Day 1						1	- and the
and the states	13	JER.				10	and the	14		1 100		and the second	A ROAD
Spice		and the second second		23		10	24			34		30	amaga.
a street - 3						Trank					514	-	and the second of
ang the	-	204				1					211		And the second of
Reter	7	1	1				-			-	1	-	为之命 ?
Santan!	11	25		3				2		16	64 3	7	100 M
and a start of the	175 2					0							to Strant
C. P. S.	1 1		ZET						65	0.01			month
and an and	A DESCRIPTION OF	der an	100		BUR		1. A.				17-	C Del	11091 1
No. No.	5	27	-	36		33	1	38	-	24	-	Cost &	5-17/2
Here		-			1		60		1		-	Robert P	at the
2 8.00		No.	Bag				_		-		1000		ALC: NO
Probennummern				Oberflächenbearbeitung									2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
Proben 1	& 2				ernache	enbear	beitun	g					12 11
Proben 3 & 4				Stah	nl - ges	<b>enbear</b> l chliffen	beitun	g					20241
	& 4			Stah Stah	nl - ges nl - san	<b>enbear</b> l chliffen dgestra	<b>beitun</b> hlt	g					
Proben 5	& 4 & 6			Stah Stah Stah	nl - ges nl - san nl - san	<b>enbear</b> l chliffen dgestra ert	beitun hlt	g					
Proben 5 Proben 7	& 4 & 6 & 8			Stah Stah Stah Gelo	nl - ges nl - san nl - polie coat - u	enbearl chliffen dgestra ert inbearb	beitun hlt eitet	g					
Proben 5 Proben 7 Proben 9	& 4 & 6 & 8 & 10			Stah Stah Stah Gelo Stah	nl - gesi nl - san nl - san nl - polici coat - u nl - Drei	enbear chliffen dgestra ert inbearb ieck-Mil	beitun hlt eitet krostru	ig Iktur, 2	5 Puls	9			
Proben 5 d Proben 7 d Proben 9 d Proben 11	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12			Stah Stah Stah Gelo Stah Stah	nl - ges nl - san nl - polic coat - u nl - Dre nl - Dre	enbear chliffen dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil	beitun hlt eitet krostru krostru	ng Iktur, 2 Iktur, 6	5 Pulse	e			
Proben 5 d Proben 7 d Proben 9 d Proben 11 Proben 13	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 12 & 14			Stah Stah Stah Gelo Stah Stah Stah	nl - ges nl - san nl - polie coat - u nl - Drei nl - Drei nl - LIPS	enbear chliffen dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan	beitun hlt eitet krostru krostru	ig Iktur, 2 Iktur, 6 Itur, 24	5 Pulse Pulse	9			
Proben 5 o Proben 7 o Proben 9 o Proben 11 Proben 13 Proben 15	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 12 & 14 & 14 & 16			Stah Stah Stah Gelo Stah Stah Stah	nl - gesi nl - san nl - polic coat - u nl - Drei nl - Drei nl - LIPS	enbearl chliffen dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan SS-Nan	beitun hlt eitet krostru krostru ostruk	ı <b>g</b> ıktur, 2 ıktur, 6 :tur, 24 :tur, 18	5 Pulse Pulse Pulse	e			
Proben 5 o Proben 7 o Proben 9 o Proben 11 Proben 13 Proben 15 Probe 21	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 3 & 14 5 & 16			Stah Stah Stah Gelo Stah Stah Stah Stah Stah	1 - gesing   1 - sand   1 - politic   1 - politic   1 - politic   1 - Drein   1 - LIPS   1 - Bohn	enbearl chliffen dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan SS-Nan	beitun hlt eitet krostru krostruk ostruk ostruk	Ig Iktur, 2 Iktur, 6 Itur, 24 Itur, 18 Dostruktu	5 Pulse Pulse Pulse Pulse ur, 80 F	e			
Proben 5 Proben 7 Proben 9 Proben 11 Proben 13 Proben 15 Probe 21 Proben 23	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 12 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4			Stah Stah Stah Gelo Stah Stah Stah Stah Stah Stah	I - ges   I - san   I - polid   coat - u   I - Dreid   I - Dreid   I - Dreid   I - LIPS   I - Boh   I - Boh   I - Gitte   I - Gitte	enbearl chliffen dgestra ert ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan SS-Nan rmuste er-Mikro or Mikro	beitun hlt eitet krostru krostru kostruk ostrukt	19 14tur, 2 14tur, 6 1tur, 24 1tur, 18 10 15 10 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11	5 Pulse Pulse Pulse Pulse ur, 80 F Pulse	e Pulse			
Proben 5 o Proben 7 o Proben 9 o Proben 13 Proben 13 Proben 15 Probe 21 Proben 23 Proben 25 Proben 27	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 12 & 14 & 15 & 16 & 24 & 24 & 26			Stah Stah Stah Gelo Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah	1 - ges     1 - san     1 - polid     1 - preid     1 - preid     1 - LIP     1 - Boh     1 - Gitta     1 - Gitta	enbearl chliffen dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan SS-Nan sS-Nan sS-Nan er-Mikro er-Mikro er-Mikro	beitun hlt eitet krostruk krostruk ostrukt ostrukt ostrukt	Ig Iktur, 2 Iktur, 6 Itur, 24 Itur, 18 Distruktur, 15 Iur, 29 Iur, 29	5 Pulse Pulse Pulse Pulse ur, 80 F Pulse Pulse	e			
Proben 5 of Proben 7 of Proben 9 of Proben 13 Proben 15 Probe 21 Proben 23 Proben 25 Probe 27 Proben 27	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 3 & 14 5 & 16 3 & 24 5 & 26 0 & 30			Stah Stah Stah Geld Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah	I - ges     I - san     I - polic     coat - u     coat - u     l - Drei     I - Drei     I - LIPS     I - LIPS     I - Boh     I - Gitta	enbearl dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil sS-Nan sS-Nan rmuste er-Mikro er-Mikro SS-Nan	beitun hlt eitet krostruk iostruk iostrukt ostrukt ostrukt	IS Iktur, 2 Iktur, 6 Iktur, 24 Iktur, 18 Dostruktu Iur, 15 Iur, 29 Iur, 29 Iur, 24	5 Pulse Pulse Pulse ur, 80 F Pulse Pulse Pulse	e			
Proben 5 of Proben 7 of Proben 9 of Proben 13 Proben 13 Proben 15 Probe 21 Proben 23 Proben 25 Probe 27 Proben 29 Proben 32	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 3 & 14 5 & 16 3 & 24 5 & 26 0 & 30 2 & 33			Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah	I - ges     I - san     I - polid     coat - u     coat - u     I - Drei     I - Drei     I - Drei     I - LIPS     I - LIPS     I - Gitta     I - Citta     I - LIPS     coat - Citta	enbearl dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan sS-Nan irmuste er-Mikro er-Mikro SS-Nan Gitter-Mi	hlt eitet krostruk ostruk ostrukt ostrukt ostrukt ostrukt ostrukt	Iktur, 2 Iktur, 2 Iktur, 6 Itur, 24 Itur, 18 Itur, 15 Itur, 29 Itur, 29 Itur, 24 Itur, 24 Itur, 24	5 Pulse Pulse Pulse ur, 80 F Pulse Pulse Pulse Pulse Pulse S Pulse	Pulse			
Proben 5 of Proben 7 of Proben 9 of Proben 13 Proben 13 Proben 15 Probe 21 Proben 23 Proben 23 Proben 25 Probe 27 Proben 32 Proben 34	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 3 & 14 5 & 16 3 & 24 5 & 26 9 & 30 2 & 33 4 & 35			Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah	1 - ges     1 - golid     1 - polid     2004 - u     1 - Drei     1 - LIPS     1 - Gitte     1 - Citte     1 - Gitte     1 - Citte     1 - Citte     1 - Citte     1 - LIPS     2004 - Citte     2004 - Citte	enbearl chliffen dgestra ert ieck-Mil ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan SS-Nan armuste er-Mikro sS-Nan Gitter-Mi Gitter-Mi	beitun hlt eitet krostruk ostruk ostrukt ostrukt ostrukt iskrostruk	14 14 14 14 14 14 14 14 14 14	5 Pulse Pulse Pulse ur, 80 F Pulse Pulse Pulse Pulse Pulse S Pulse 25 Pulse	e Pulse e			
Proben 5 of Proben 7 of Proben 9 of Proben 11 Proben 13 Proben 15 Probe 21 Proben 25 Probe 27 Proben 29 Proben 32 Proben 34 Proben 36	& 4 & 6 & 8 & 10 & 12 3 & 14 5 & 16 3 & 24 5 & 26 9 & 30 2 & 33 4 & 35 5 & 37			Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah Stah	1 - ges     1 - san     1 - polid     1 - polid     1 - polid     coat - u     1 - Dreid     1 - Gitta     1 - Gitta     1 - Gitta     1 - Gitta     1 - Citta     2 - Coat - Coat     2 - Coat - B	enbearl chliffen dgestra ert inbearb ieck-Mil ieck-Mil SS-Nan SS-Nan srmuste er-Mikro er-Mikro SS-Nan Gitter-Mi Gitter-Mi Bitter-Mi Bitter-Mi	beitun hlt eitet krostru krostruk ostrukt ostrukt ostrukt ostrukt krostruk krostruk	uktur, 2 uktur, 2 uktur, 6 tur, 24 tur, 18 ostruktur ur, 29 ur, 29 tur, 29 ur, 29 utur, 24 uktur, 2 uktur, 3 uktur, 2 uktur, 3 uktur, 4 uktur, 2 uktur, 3 uktur, 4 uktur, 4 uktu	5 Pulse Pulse Pulse Pulse Pulse Pulse Pulse Pulse 6 Pulse 5 Pulse 3 Pulse 3 Pulse	e Pulse e 0 Pulse			

Abbildung 4: Oberflächenproben im zweiten Winterhalbjahr (Fotoquelle: Energiewerkstatt Verein)

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Stahl-Oberflächen

Abbildung 5 zeigt die Vereisung der individuellen Stahlproben sowie die mittlere Vereisung aller Proben. Oberhalb der Diagonale liegende Proben weisen eine überdurchschnittlich starke Vereisung auf, während darunterliegende Proben im Durchschnitt schwächer vereisen. Die Auswertung zeigt, dass die Vereisungsprozesse bei den Proben 5 & 6 (Stahl - poliert) und den Proben 25 & 26 (Stahl - Gitter 29 Pulse) signifikant rascher waren als die der restlichen Proben. Bei einer durchschnittlichen Vereisung aller Proben von unter 2, zeigen diese Oberflächen bereits einen Vereisungsgrad von ca. 3. Gegenteilig dazu zeigen Probe 21 (Stahl-Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse) und die Proben 29 & 30 (Stahl-LIPSS-Nanostruktur, 24 Pulse) eine trägere Vereisung.

Der Dunn-Bonferroni-Posthoc Test ergibt, dass bei paarweisen Gruppenvergleichen mit der durchschnittlichen Vereisung (Diagonale in Abbildung 5) nur die Oberflächen 5 & 6 sowie 25 & 26 einen angepassten p-Wert kleiner als 0,05 (9,7\*E-6 bzw. 7,1\*E-5) aufweisen und sich somit signifikant vom Mittel unterscheiden. Probe 21 mit der höchsten Vereisungsresistenz unterscheidet sich zwar nicht signifikant von der mittleren Vereisung aller Proben, weist aber in den Paarvergleichen, mit Ausnahme von Proben 23 & 24 sowie den Proben 29 & 30, mit allen Oberflächen einen signifikanten p-Wert unter 0,05 auf.



Abbildung 5: Individuelle Vereisung der Stahlproben und mittlere Vereisung aller Stahloberflächen

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Gelcoat-Oberflächen

Bei Betrachtung der Gelcoat-Oberflächen in Relation zur mittleren Vereisung aller Proben (Stahl und Gelcoat) weist nur die Oberfläche der Proben 32 & 33 (Gitter-Mikrostruktur, 6 Pulse) eine durchgehend unterdurchschnittliche Vereisungsintensität auf. Die unbearbeitete Gelcoat-Oberfläche der Proben 7 & 8 sowie die bearbeiteten Proben 34 & 35 (Gitter-Makrostruktur 25 Pulse) und 36 & 37 (Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse) zeigen ein Vereisungsverhalten nahe dem allgemeinen Mittel (Abbildung 6).



Abbildung 6: Individuelle Vereisung auf Gelcoat und mittlere Vereisung aller Probenoberflächen

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Temperatur

Eis setzt sich an Rotorblättern in der Regel an, wenn die Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes liegt und Oberflächen mit unterkühltem Wasser (flüssiges Wasser bei Minusgraden) in Kontakt tritt. Alternativ dazu kann in der Luft enthaltener Wasserdampf bei Temperaturen des Rotorblattes unterhalb des Reifpunkts resublimieren und direkt in den eisförmigen Zustand übergehen, wodurch sich eine Reifschicht bildet. Vereisungsprozesse entstehen daher bevorzugt bei Temperaturen um den Gefrierpunkt, bei denen aufgrund von fehlenden Kristallisationskeimen noch ausreichend unterkühltes Flüssigwasser vorhanden ist. Bei besonders niedrigen Temperaturen ist dies weniger häufig der Fall und Luft allgemein deutlich trockener.

Abbildung 7 zeigt die durchschnittliche Vereisung der Stahl- und Gelcoat-Oberflächen in Relation zu den aufgetretenen Standorttemperaturen. Es zeigt, dass Vereisungsprozesse bei Temperaturen um den Gefrierpunkt einsetzen. Im Bereich zwischen 0 °C bis ca. -7 °C tritt die höchste Vereisungsintensität an den Oberflächen auf. Im Durchschnitt wird hier ein Vereisungsgrad zwischen 3 und 4 erreicht. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Bereich am ehesten der Fall einer vollkommenen Vereisung (Stufe 6) aller Proben eintritt. Im Temperaturbereich unter -7 °C fällt die Vereisungsintensität deutlich weniger stark aus, wobei der Vereisungsgrad im Mittel zwischen 2 und 2,5 liegt.



Abbildung 7: Mittlere Vereisung von Stahl- und Gelcoatoberflächen in Abhängigkeit von der Temperatur

Abbildung 8 und Abbildung 9 stellen die Vereisung der einzelnen Oberflächen in Relation zur allgemeinen durchschnittlichen Vereisung bei Temperaturen oberhalb bzw. unterhalb von -5 °C dar. Dadurch sollte überprüft werden, ob die Standorttemperatur ein entscheidendes Kriterium für das Vereisungsverhalten der einzelnen Proben bildet. Auffällig ist hierbei, dass die Proben 32 & 33 (Gelcoat, Gitter-Mikrostruktur, 6 Pulse) bei Temperaturen oberhalb von -5 °C eine deutlich geringere Neigung zu Vereisungen aufweisen als die restlichen Proben. Im Temperaturbereich unterhalb von -5 °C vereist Probe 21 (Stahl, Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse) später als der Durchschnitt (Abbildung 9).

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 8: Individuelle Vereisung in Relation zur mittleren Vereisung bei Temperaturen über -5 °C



Abbildung 9: Individuelle Vereisung in Relation zur mittleren Vereisung bei Temperaturen unter -5 °C

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

### Windrichtung

Die Hauptwindrichtung am Versuchsstandort ist Nordnordost. Entsprechend wurde der Probenträger mit 83° NNE der Hauptwindrichtung zugewandt ausgerichtet. Um den Einfluss unterschiedlicher Windrichtungen auf die Vereisungsprozesse zu untersuchen, wurde der Bilddatensatz mit den Windmessdaten verschnitten und getrennt nach Windanströmung von rechts bzw. von links des Probenträgers ausgewertet.

Die Datensatz mit Anströmung von Links (vorwiegend Nord) umfasste 1755 Werte, während für die Anströmung von rechts (vorwiegend Süd) lediglich 274 Werte vorlagen. Ein Vergleich der Vereisungsprozesse bei beiden Anströmungsrichtungen ergab, dass keine signifikanten Unterschiede vorliegen. Das stark schwankende Vereisungsverhalten der einzelnen Proben in Abbildung 11 beruht auf der geringen Anzahl an Messwerten.



### Tauprozesse

Zusätzlich zu den Vereisungsprozessen wurde auch das Abtauen der Oberflächen dokumentiert. In der folgenden Auswertung sind keine künstlich initiierte Abtauvorgänge mittels Wärmestrahler enthalten, sondern ausschließlich natürliche Abtauereignisse. Die Proben 5 & 6 (Stahl, poliert) sowie 25 & 26 (Stahl, Gitter-Mikrostruktur, 29 Pulse) tauen signifikant langsamer ab als der Durchschnitt. Ein günstiges Abtauverhalten zeigt Probe 21 (Stahl, Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse) sowie die Proben 32 & 33 (Gelcoat, Gitter-Mikrostruktur, 6 Pulse). Bei diesen Oberflächen handelt es sich um dieselben Proben, welche bereits durch verzögerte Vereisung positiv auffielen.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abtauende Standortbedingungen

Abbildung 12: Individuelles Abtauen versus mittleres Abtauen aller Proben

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Vergleich mit Referenzproben

Die folgenden Grafiken zeigen den paarweisen Vergleich von laserstrukturierten Oberflächen mit Oberflächen ohne Laserbehandlung. Im Fall von Stahl waren dies geschliffener, sandgestrahlter und polierter Stahl. Die Referenzprobe für Gelcoat entsprach der Oberfläche eines neuen Rotorblattes.

Der Vergleich von Probe 1 & 2 (Stahl, geschliffen) mit anderen Oberflächenproben zeigte, dass Probe 21 (Stahl, Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse) und die Proben 29 & 30 (Stahl, LIPSS-Nanostruktur, 24 Pulse) mit einem p-Wert unter 0.05 (4,6\*E-4) eine signifikant geringere Vereisung aufweisen. Im Vergleich mit den Referenzproben 3 & 4 (Stahl, sandgestrahlt), schnitt vor allem die Stahloberfläche, LIPSS-Nanostruktur, 24 Pulse (Proben 29 & 30) signifikant besser ab. Die Paarvergleiche mit den Stahl, poliert (Proben 5 & 6) zeigten, dass zwar alle anderen Stahloberflächen geringer vereisen. Signifikante Unterschiede gibt es jedoch nur zu den Proben 3 & 4, 25 & 26 sowie 27 & 21 (vgl. Abbildung 13 - Abbildung 15).



Abbildung 13: Individuelle Vereisung aller Stahlproben und Stahl geschliffen (Probe 1 und 2)

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 14: Individuelle Vereisung aller Stahlproben und Stahl sandgestrahlt (Probe 3 und 4)



Abbildung 15: Individuelle Vereisung aller Stahlproben und Stahl poliert (Probe 5 und 6)

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Das Vereisungsverhalten des unbearbeiteten Gelcoat unterscheidet sich nicht signifikant von den laserbearbeiteten Proben. Wie Abbildung 16 jedoch zeigt, weist ein Teil der bearbeiteten Oberflächen einen tendenziell langsameren Vereisungsprozess auf.



Abbildung 16: Individuelle Vereisung von unbearbeitetem Gelcoat (Proben 7 & 8) und Gelcoat-Proben

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

### Zusammenfassung

Abbildung 17 zeigt den Vereisungsprozess aller untersuchten Oberflächen und die daraus resultierende mittlere Vereisung aller Proben als Gerade.



Abbildung 17: Individuelle Probenvereisung und mittlere Vereisung aller Proben

Für eine kompakte Darstellung wurde die Vereisungscharakteristik der Oberflächen in einer Reihung zusammengefasst. Diese zeigt, dass die laserbearbeiteten Proben überwiegend geringer vereisen als die Referenzproben. Oberflächen mit geringer Vereisung z.B. Probe 21 (Stahl, Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse) bilden nun die Basis für eine weitere Forschung und Entwicklung im Bereich Laserstrukturen mit eisphoben Eigenschaften.

Oberflächenstruktur	Mittlere Vereisung			
Stahl - Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse	Probe21	3.223		
Gelcoat - Gitter-Mikrostruktur, 6 Pulse	Probe32 & Probe33	3.259		
Stahl – LIPSS-Nanostruktur, 24 Pulse	Probe29 & Probe30	3.332		
Stahl - Gitter-Mikrostruktur, 15 Pulse	Probe23 & Probe24	3.378		
Gelcoat - Gitter-Mikrostruktur, 25 Pulse	Probe34 & Probe35	3.422		
Stahl - Dreieck-Mikrostruktur, 25 Pulse	Probe09 & Probe10	3.425		
Stahl – LIPSS-Nanostruktur, 24 Pulse	Probe13 & Probe14	3.498		
Stahl – LIPSS-Nanostruktur, 18 Pulse	Probe15 & Probe16	3.504		
Gelcoat - unbearbeitet	Probe07 & Probe08	3.521		
Stahl - Bohrmuster-Mikrostruktur, 200 Pulse	Probe38 & Probe39	3.533		
Stahl - Dreieck-Mikrostruktur, 6 Pulse	Probe11 & Probe12	3.538		
Stahl - geschliffen	Probe01 & Probe02	3.560		
Stahl - sandgestrahlt	Probe03 & Probe04	3.564		
Gelcoat - Bohrmuster-Mikrostruktur, 80 Pulse	Probe36 & Probe37	3.567		
Stahl - Gitter-Mikrostruktur, 42 Pulse	Probe27	3.582		
Stahl - Gitter-Mikrostruktur, 29 Pulse	Probe25 & Probe26	3.781		
Stahl - poliert	Probe05 & Probe06	3.820		

Tabelle 9: Reihung aller Oberflächen nach ihrer Neigung zu vereisen

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des stationären Feldversuchs......2 Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Vereisung aller Oberflächenproben (N = 1561Messzeitpunkte)......7 Abbildung 7: Mittlere Vereisung von Stahl- und Gelcoatoberflächen in Abhängigkeit von der Temperatur....11 Abbildung 8: Individuelle Vereisung in Relation zur mittleren Vereisung bei Temperaturen über -5 °C .........12 Abbildung 9: Individuelle Vereisung in Relation zur mittleren Vereisung bei Temperaturen unter -5 °C .......12 Abbildung 13: Individuelle Vereisung aller Stahlproben und Stahl geschliffen (Probe 1 und 2)......15 Abbildung 14: Individuelle Vereisung aller Stahlproben und Stahl sandgestrahlt (Probe 3 und 4)......16 Abbildung 15: Individuelle Vereisung aller Stahlproben und Stahl poliert (Probe 5 und 6)......16 Abbildung 16: Individuelle Vereisung von unbearbeitetem Gelcoat (Proben 7 & 8) und Gelcoat-Proben.....17 

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arten von Vereisung	3
Tabelle 2: Vereisungskategorie 0	4
Tabelle 3: Vereisungskategorie 1	4
Tabelle 4: Vereisungskategorie 2	4
Tabelle 5: Vereisungskategorie 3	5
Tabelle 6: Vereisungskategorie 4	5
Tabelle 7: Vereisungskategorie 5	5
Tabelle 8: Vereisungskategorie 6	6
Tabelle 9: Reihung aller Oberflächen nach ihrer Neigung zu vereisen	18