



ANTIFREEZE BESCHICHTUNGEN FÜR ROTORBLÄTTER VON WINDENERGIEANLAGEN

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Konstantin Siegmann, ZHAW

Technikumstrasse 9, 8401 Winterthur, konstantin.siegmann@zhaw.ch,
www.impe.zhaw.ch

Giuseppe Meola, ZHAW

Technikumstrasse 9, 8401 Winterthur, giuseppe.meola@zhaw.ch,
www.impe.zhaw.ch

Martina Hirayama, ZHAW

Technikumstrasse 9, 8401 Winterthur, martina.hirayama@zhaw.ch,
www.impe.zhaw.ch

Impressum

Datum: 31. August 2009

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Projekt Nr.: 102660; Vertrag Nr.: 153445

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	1
1. Ausgangslage	2
2. Ziel der Arbeit	4
3. Methode	5
4. Ergebnisse	12
5. Diskussion	15
6. Danksagung	16
7. Literaturverzeichnis	17

Zusammenfassung

Vereiste Rotorblätter vermindern die Energieausbeute von Windenergieanlagen drastisch. Dazu kommen Gefahren für Personen durch den Eisabwurf. Es existieren noch keine überzeugenden Lösungen für die Vereisungsproblematik. Ein interessanter Ansatz ist die Verwendung einer Rotorblattbeschichtung, welche das Gefrierverhalten von Wasser beeinflusst. Wir beschreiben in diesem Bericht Tests an den von uns entwickelten Antifreeze-Beschichtungen. Es wird gezeigt, dass Wassertropfen auf den Antifreeze-Beschichtungen später gefrieren als auf unbehandeltem Glas. Dieser Effekt könnte zu einer Nichtvereisung von beschichteten Rotorblättern führen, da die Tröpfchen vom Flügel geblasen werden könnten bevor sie gefrieren. Zusätzlich wurde die Eisadhäsion auf Antifreeze-Beschichtungen gemessen. Eis haftet auf Antifreeze-Beschichtungen ungefähr gleich gut wie auf unbehandeltem Aluminium und besser als auf adhäsionsverringern Beschichtungen.

Abstract

Iced rotor blades drastically reduce the energy production of wind turbines. In addition, ice throw from the iced blades can be dangerous. There are yet no convincing solutions for the icing problem. An interesting approach is the use of a rotor blade coating. We have developed a coating which influences the freezing behaviour of water. In this report, we describe tests on the antifreeze-coatings developed by us. It is shown, that water droplets on the antifreeze coating freeze later than droplets on the untreated glass. This effect could lead to a non-icing of coated rotorblades, because the droplets could be blown of the blade before they can freeze. Additionally, the ice adhesion to the antifreeze coatings is measured. Ice adheres to the antifreeze coating about as good as to bare aluminium and better than to adhesion reducing coatings.

1. Ausgangslage

Mit einer Wachstumsrate von gegen 40% übertrifft die Windbranche sogar diejenige der Informationstechnologie. Der Bundesrat hat sich in seiner Energiepolitik das Ziel gesteckt mit dem Programm Energie Schweiz bis ins Jahr 2010 zusätzlich 500 GWh Strom aus neuen erneuerbaren Energien zu produzieren. Davon sollen 50-100 GWh aus Windkraftanlagen stammen [1]. In den Alpen wären die Windverhältnisse günstig, jedoch sind diese Standorte stark vereisungsgefährdet. Für Windenergieanlagen sind Vereisungen verheerend. Während eines Vereisungsereignisses wächst Eis an den Rotorblättern an und reduziert dadurch deren aerodynamische Effizienz und damit das Drehmoment, was die Energieausbeute abnehmen lässt (siehe Abbildung 1). Ein leichtes Vereisungsereignis kann genügend Oberflächenrauigkeit hervorrufen um die aerodynamische Effizienz beträchtlich zu reduzieren. Doch wenn die Vereisung stärker wird, dann reduziert sich das Drehmoment gegen Null, die Turbine hält an und der totale Leistungsausfall tritt ein. Wegen starker Vibrationen, hervorgerufen durch ungleichmässige Vereisung, können Windenergieanlagen ebenfalls aufhören zu rotieren. Diese Vibrationen können Eisbrocken ablösen und während des Ablösevorganges können sich die Vibrationen verstärken und zum Zusammenbruch der Turbine führen, falls sie nicht angehalten wird. In einigen Fällen, wenn grössere Eisbrocken weggeschleudert werden, muss die Windturbine angehalten werden um benachbarte Turbinen und Ortsansässige zu schützen [2].

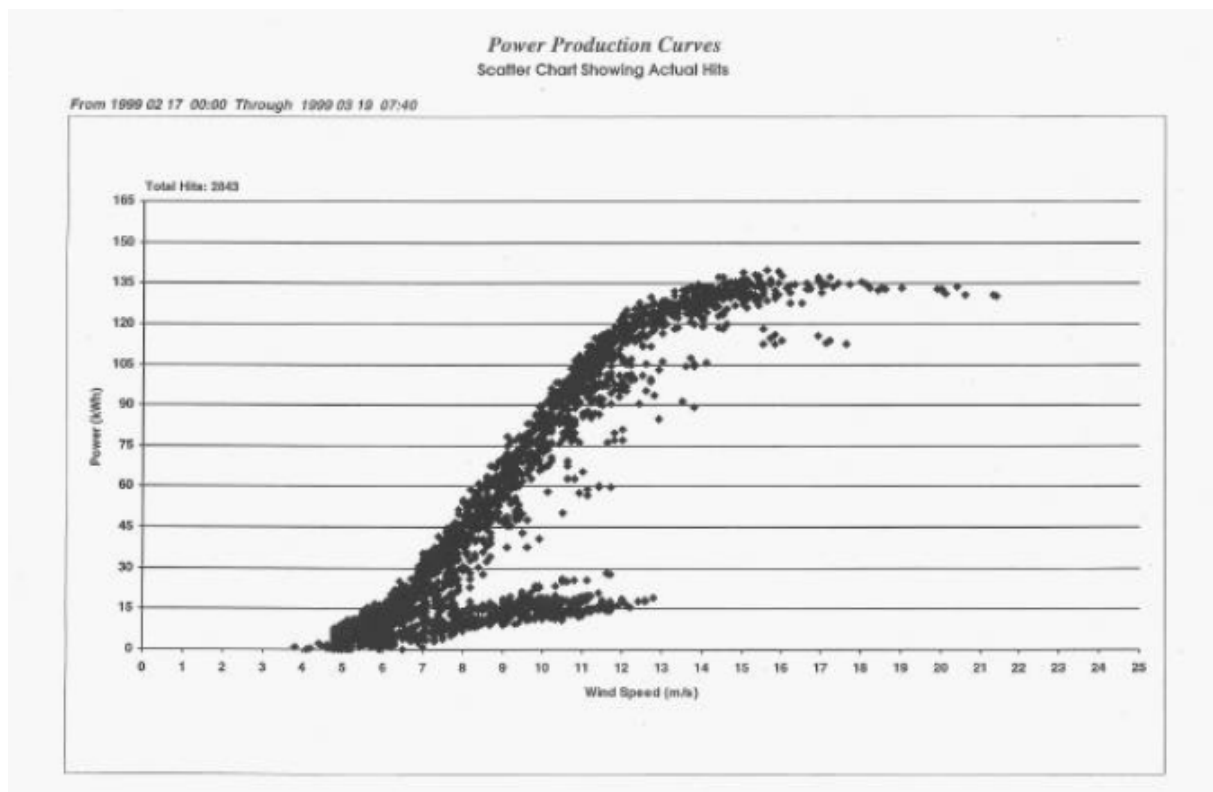


Abb. 1. Effekt der Vereisung auf die Leistung einer Windturbine. Die obere Kurve entspricht sauberen Rotorblättern, während die unteren Punkte bei vereisten Rotorblättern gemessen wurden. X-Achse: Windgeschwindigkeit (m/s); Y-Achse: Leistung (kWh) (J. F. Maissan, Youkon Energy Corp [3].)

Es gibt einige Massnahmen und Strategien um die Vereisung von Rotorblättern zu verhindern oder wenigstens zu verzögern. Die meisten davon stammen aus der Luft- und Raumfahrt, können jedoch nicht unbesehen übernommen werden, da die Rahmenbedingungen andere sind. Die wichtigste Änderung betrifft die Haltbarkeitsdauer. Es wäre wünschenswert, dass eine Windturbine für ungefähr 20 Jahre ohne grössere Wartung funktionieren würde. Damit fallen Massnahmen wie aufzuspühende

Flüssigkeiten, aber auch aufblasbare Gummiprofile weg. Die momentan wichtigsten Anti-Eis Strategien sind Rotorblattheizungen, entweder als Heissluftheizungen im Innern des Rotorblatts oder als Heizdrähte, die in die äusseren Schichten des Rotorblatts eingelassen sind. Rotorblattheizungen können im anti-icing oder de-icing Mode betrieben werden. Das bedeutet, dass sie entweder die Vereisung verhindern oder bereits entstandene Eisansätze abtauen sollen. In beiden Fällen verbrauchen die Heizungen wertvollen Strom. Da schwer vorherzusagen ist, wann eine Vereisung eintritt, müssen anti-icing Massnahmen bei entsprechenden meteorologischen Bedingungen immer eingeschaltet sein und dementsprechend viel Strom verbrauchen. De-icing verbraucht neben Strom auch Produktionszeit, nämlich typischerweise 1-2 Stunden, um das Eis abzutauen. Auch Rotorblattheizungen sind deshalb keine kostengünstige Lösung. Wünschenswert wäre eine passive Strategie welche die Rotorblattvereisung verhindert, dabei langlebig und kostenneutral ist. Dies ruft nach Beschichtungen, und tatsächlich sind so genannte eisphobe Beschichtungen auch auf Rotorblättern von Windturbinen angewandt worden. Eisphobe Beschichtungen reduzieren die Adhäsionskraft von Eis an die Beschichtung, so dass es leichter entfernt werden kann, im (nicht erreichten) Idealfall nur durch Wind oder natürliche Vibrationen. Ein typisches Beschichtungsmaterial ist Teflon, welches die Adhäsionskraft von Eis deutlich zu verringern mag. Trotzdem kann auch Teflon, eines der besten eisphoben Materialien, einer Vereisung nicht vorbeugen und es existieren im Moment keine dauerhaften Beschichtungen die die Vereisung von Rotorblättern verhindern könnten [4].

2. Ziel der Arbeit

In den fünfziger Jahren wunderte sich der kanadische Wissenschaftler Per Scholander darüber, wie arktische Fische in Gewässern überleben können, die kälter sind als der Gefrierpunkt ihres Blutes. Seine Experimente brachten ihn zu der Überzeugung, dass eine Art „antifreeze“ oder Frostschutzmittel in ihrem Blut war. In den späten sechziger Jahren war es dem Biologen Arthur DeVries möglich, Antifreeze Proteine aus dem Blut von antarktischen Fischen zu isolieren [5]. Antifreeze Proteine erzeugen einen Unterschied zwischen Schmelz- und Gefrierpunkt von Wasser. Im Blut der arktischen Fische gefriert die Flüssigkeit erst bei -2°C , die Eiskristalle schmelzen aber wieder bei ca. 0°C . Dieses Phänomen ist als thermische Hysterese bekannt. Man glaubt, dass Antifreeze Proteine das Eiskristallwachstum durch einen Adsorptions-Inhibitions-Mechanismus verhindern. Sie adsorbieren irreversibel an der Eisoberfläche und verhindern so das thermodynamisch bevorzugte Eiswachstum, welches fatale Folgen für die Fische hätte. In neuerer Zeit wurden Insekten bekannt, die, ohne zu gefrieren, noch viel tiefere Temperaturen ertragen können als die arktischen Fische. Man spricht in diesem Fall von „hyperaktiven“ Antifreeze Proteinen.

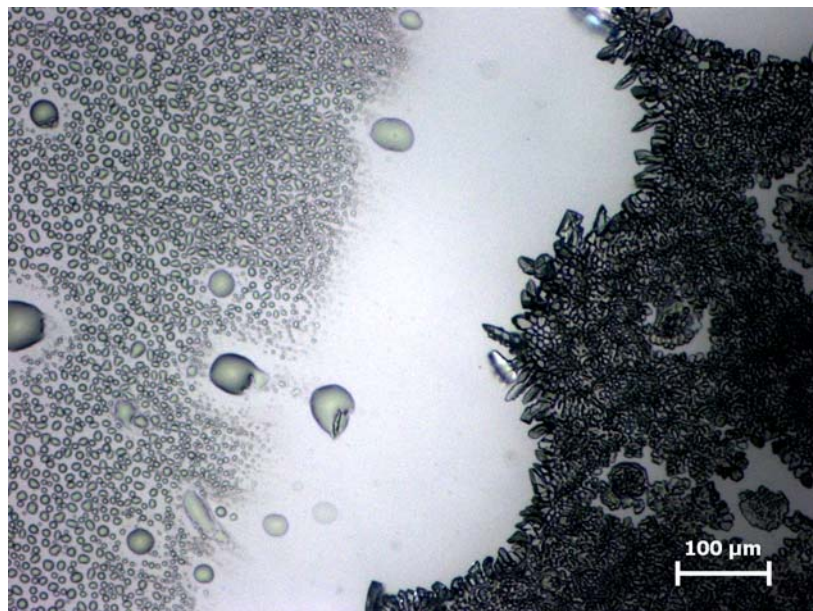


Abb. 2 Eine Antifreeze Beschichtung (Mikroskopaufnahme). Links: Wassertropfen auf der Beschichtung. Rechts: Eis auf unbeschichtetem Glas. Beide Seiten haben die gleiche Temperatur. (ZHAW)

Inspiziert von den Antifreeze Proteinen suchen wir nach Beschichtungen, die das Gefrierverhalten von Wasser beeinflussen können. In einer Kältekammer wurde das Gefrieren von Wasser auf vielen verschiedenen Oberflächen untersucht, dabei wurde auch die Gefriereschwindigkeit auf der Beschichtung mit derjenigen auf Glas verglichen. Schliesslich wurde eine Beschichtung gefunden auf der Wasser erst deutlich später gefriert (siehe Abbildung 2). Das Ziel dieser Arbeit ist also, durch Beschichtungen das Gefrierverhalten von Wasser so zu beeinflussen, so dass eine Vereisung verhindert oder verzögert werden kann.

3. Methode

Einleitung

Das Anti-icing Materials International Laboratory (AMIL) ist ein Labor der Universität Quebec in Chicoutimi (Kanada) welches sich mit Vereisungsphänomenen befasst [6]. Seit über 15 Jahren hat sich das AMIL auf das Studium der Vereisung spezialisiert, im Hinblick auf die Lösung der damit verbundenen Enteisungsprobleme und der Minimierung ihrer Unannehmlichkeiten. Die Infrastruktur des AMIL beinhaltet zwei vereisende Windtunnels und fünf Klimakammern in welchen gefrierender Regen, gefrierender Nieselregen, gefrierender Nebel, Reif, Schnee und Hagel simuliert werden können. Diese Installationen, zusammen mit einer Belegschaft aus Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern, können in der Evaluation von vor Vereisung schützenden Systemen benützt werden. Die Einrichtungen des AMIL sind gut geeignet, Versuche im kleinen Massstab unter hoch kontrollierten Vereisungsbedingungen durchzuführen.

In neuerer Zeit hat das AMIL eine Kompetenz in der Evaluation von eisphoben Beschichtungen entwickelt [7]. Eisphobe Beschichtungen reduzieren die Haftung (Adhäsion) des Eises an die Oberfläche. Diese Forschung führte zur Entwicklung verschiedener Tests um den eisphoben Charakter einer Beschichtung zu evaluieren. So kann der Centrifuge Adhesion Test (CAT) dazu verwendet werden, die Reduktion der Eisadhäsion durch die Beschichtung im Vergleich zur unbeschichteten Oberfläche zu bestimmen [8].

Beschreibung des Centrifuge Adhesion Tests (CAT)

Der CAT besteht aus einer Zwei-Stufen-Prozedur, in der das äussere Ende von kleinen Aluminiumbalken entweder in einem Kälteraum oder einem Windkanal vereist werden, und dann wird die Eisadhäsion mit Hilfe der Zentrifugalkraft bestimmt. Diese Bestimmung geschieht in einer Zentrifuge, in der der Balken mit immer höheren Drehgeschwindigkeiten rotiert.

Eine einzelne CAT Messserie besteht aus drei Aluminiumbalken die mit dem zu evaluierenden Material beschichtet sind, verglichen mit sechs unbeschichteten Aluminiumbalken welche gleichzeitig vereist werden. Das Eis bedeckt eine 5 cm² grosse Oberfläche mit einer Dicke von ca. 1 cm. Jeder Balken wird ausbalanciert, in eine speziell angepasste Zentrifuge gebracht und diese in beschleunigte Rotation gebracht. Die Zentrifugalkraft der Rotation tendiert dazu, das Eis abzulösen. Wenn die Zentrifugalkraft die Haftungskraft des Eises erreicht, löst sich dieses ab. Das Ablösen des Eises wird von Messzellen, welche empfindlich auf Vibrationen sind, registriert. Diese Messzellen befinden sich im Zentrifugegehäuse und leiten ihr Signal in real-time an einen Computer weiter. Mit diesem Signal wird die Umdrehungsgeschwindigkeit während des Ablösevorganges bestimmt. Schliesslich wird die Adhäsionskraft des Eises an die Beschichtung aus der Umdrehungsgeschwindigkeit bei Ablösung, der Masse des Eises und der Länge des Balkens berechnet.

$$F = mr\omega^2$$

Wobei:

F = Zentrifugalkraft [N]

m = Masse des Eises [kg]

r = Radius des Balkens [m]

ω = Umdrehungsgeschwindigkeit [rad/s]

Aus der Zentrifugalkraft wird die Scherbeanspruchung berechnet:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Wobei:

A = vereiste Fläche [m²]

τ = Scherbeanspruchung [Pa]

Der adhäsionsreduzierende Faktor (ARF) wird dann aus der durchschnittlichen Scherbeanspruchung der drei beschichteten Balken verglichen mit der durchschnittlichen Scherbeanspruchung des unbeschichteten Aluminiums berechnet.

$$ARF = \frac{\tau_{nackt}}{\tau_{beschichtet}}$$

Daher:

ARF = 1	kein haftungsreduzierender Effekt
ARF > 1	eishaftungsreduzierender Effekt, je höher der Wert desto stärker der Effekt
ARF < 1	Eine Zunahme der Eishaftung an die Beschichtung verglichen mit unbeschichtetem Aluminium

Daher würde ein nackter Aluminiumbalken einen adhäsionsreduzierenden Faktor von 1 aufweisen, ein ARF unter 1 zeigt eine Zunahme der Haftung verglichen mit Aluminium. Je höher der ARF desto stärker eisphob ist die Beschichtung.

Ausrüstung

Kleine Aluminiumbalken für die Zentrifuge

Die Tests werden normalerweise mit Hilfe von Aluminiumbalken durchgeführt, die folgende Masse aufweisen: 3.2 cm breit, 0.6 cm dick und 34.3 cm lang. Die Beschichtung wird auf einer Fläche, die mindestens 10 cm des Balkens bedeckt, aufgetragen. Neun Balken, drei davon beschichtet und sechs unbeschichtet, sind für eine einzelne Testserie nötig, weil die Messung der Eisadhäsionsreduktion an gleichzeitig vereisten Balken durchgeführt wird.



Abb. 1. Aluminiumbalken mit Masstab.

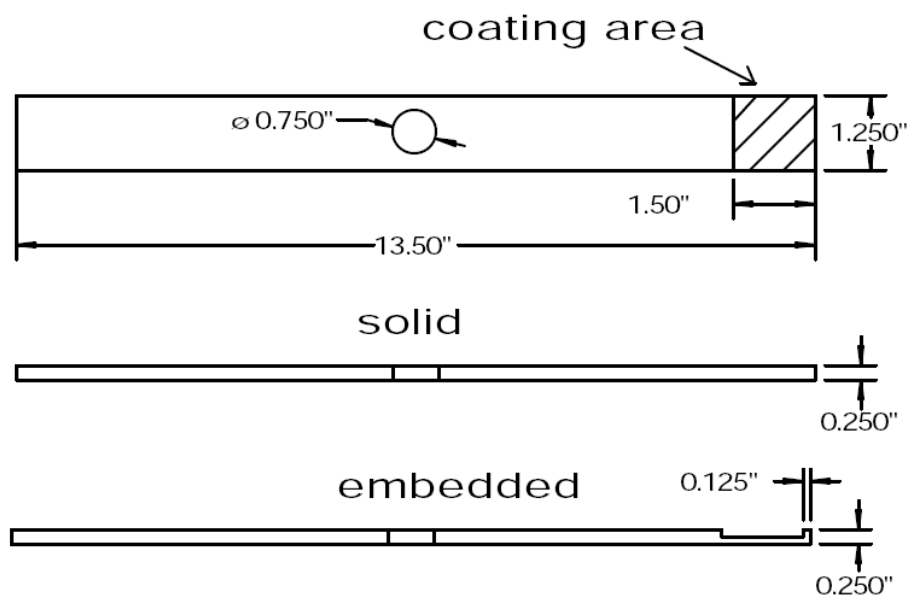


Abb. 2. Dimensionen der Testbalken in Inch (Grafik AMIL)

Vereisung

Die Balken können entweder in der statischen Umgebung eines Kälteraums vereist werden unter den Bedingungen eines gefrierenden Regens, oder sie können im Windkanal vereist werden unter den simulierten Bedingungen eines Objekts das sich durch eine unterkühlte Wolke bewegt. In beiden Fällen involviert jede Testserie das gleichzeitige Vereisen von 9 Aluminiumbalken.

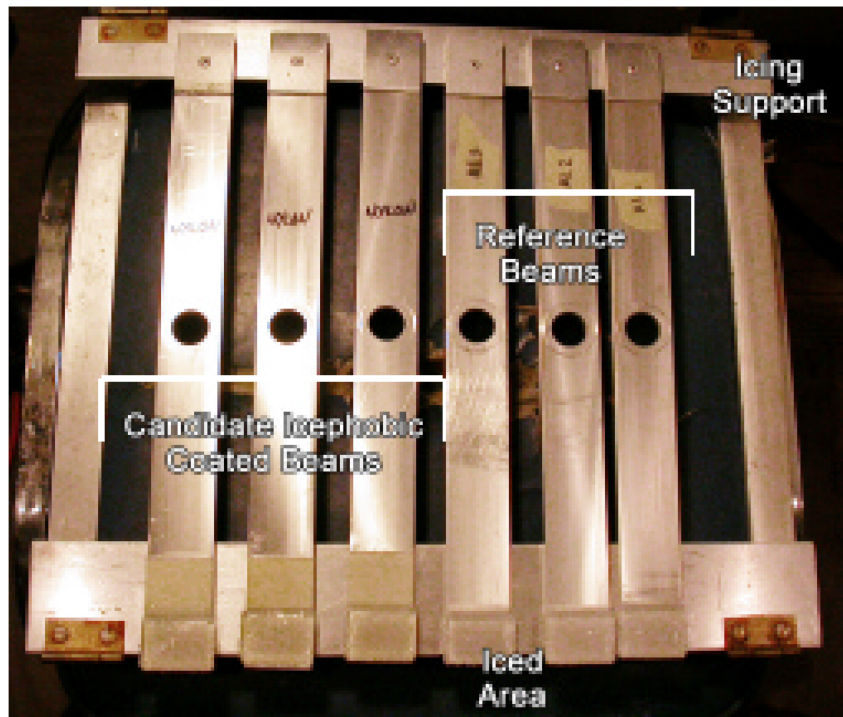


Abb.3 Hier wurden sechs Balken gleichzeitig vereist. (Foto AMIL)

Kühlraum

Diese Tests werden in AMIL's Kühlraum mit gefrierendem Regen durchgeführt. In diesem Raum ist es möglich einen Sprühregen mit einem mittleren Volumendurchmesser (MVD) der Wassertröpfchen zwischen 20 und 250 μm unter Temperaturen von -35 bis $+30^\circ\text{C}$ zu erzeugen. Die Enden der neun Balken werden gleichzeitig bei -8°C mit gefrierendem Regen vereist. Man bekommt so schweren Reif mit einer Dichte von 0.87 g/cm^3 .

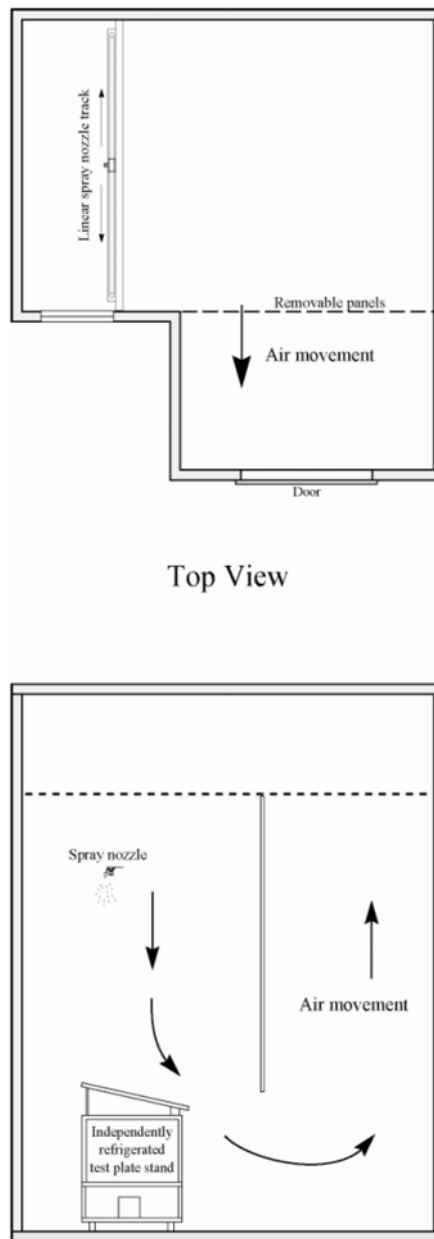


Abb. 4 AMIL's Kammer für gefrierenden Regen. (Grafik AMIL)

Vereisender Windkanal

Vor ihrer Entfernung in der Zentrifuge kann die Eisanhäufung auch in einem vereisenden Windkanal durchgeführt werden. Der verwendete Windkanal ist ein gekühlter Kanal mit geschlossenem Kreislauf. Er ist fähig, die Eisanhäufung bei Temperaturen zwischen 0 und -30°C und Windgeschwindigkeiten bis zu 85 m/s durchzuführen. Die unterkühlten Tröpfchen simulieren eine vereisende Wolke im Zentrum der Testsektion in welchem die Balken montiert sind.



Abb. 5 Vereisender Windkanal. (Foto AMIL)



Abb. 6 Aluminiumbalken im vereisenden Windkanal. (Foto AMIL)

Zentrifuge

Nach dem Vereisen werden die Aluminiumbalken einzeln in der Zentrifuge getestet. Dort werden die Balken mit Geschwindigkeiten von 0 bis zur Ablösung des Eises rotiert, bei einer Beschleunigung von 300 rpm/sec. Die resultierende Zentrifugalkraft tendiert dazu, das Eis abzulösen. Das Loslösen des Eises wird von vibrations sensitiven Messzellen in dem Zentrifugenbehälter registriert, welche ihr Signal an einen Computer in real-time weiterleiten.

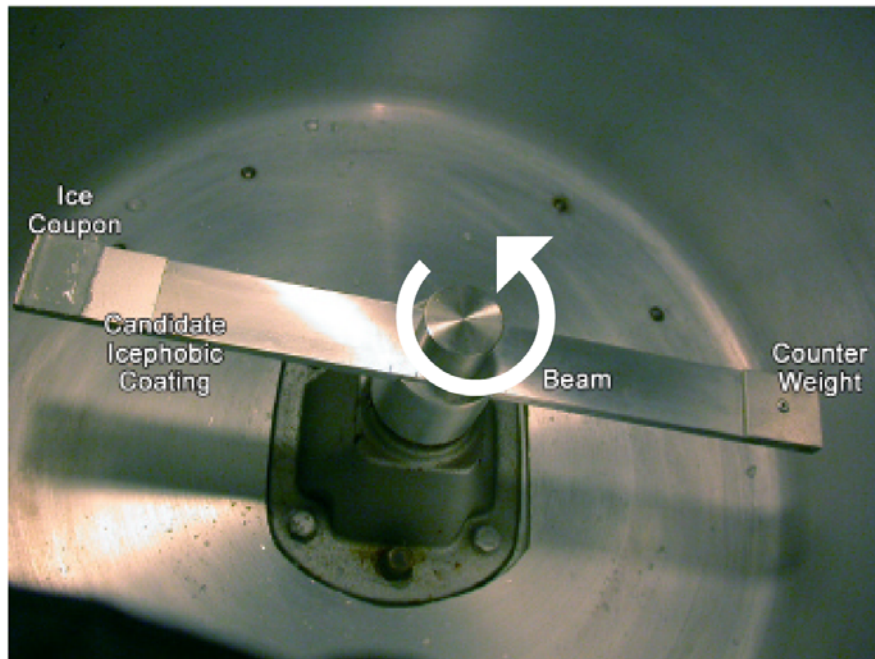


Abb. 7 Vereister Aluminiumbalken in der Zentrifuge. (Foto AMIL)

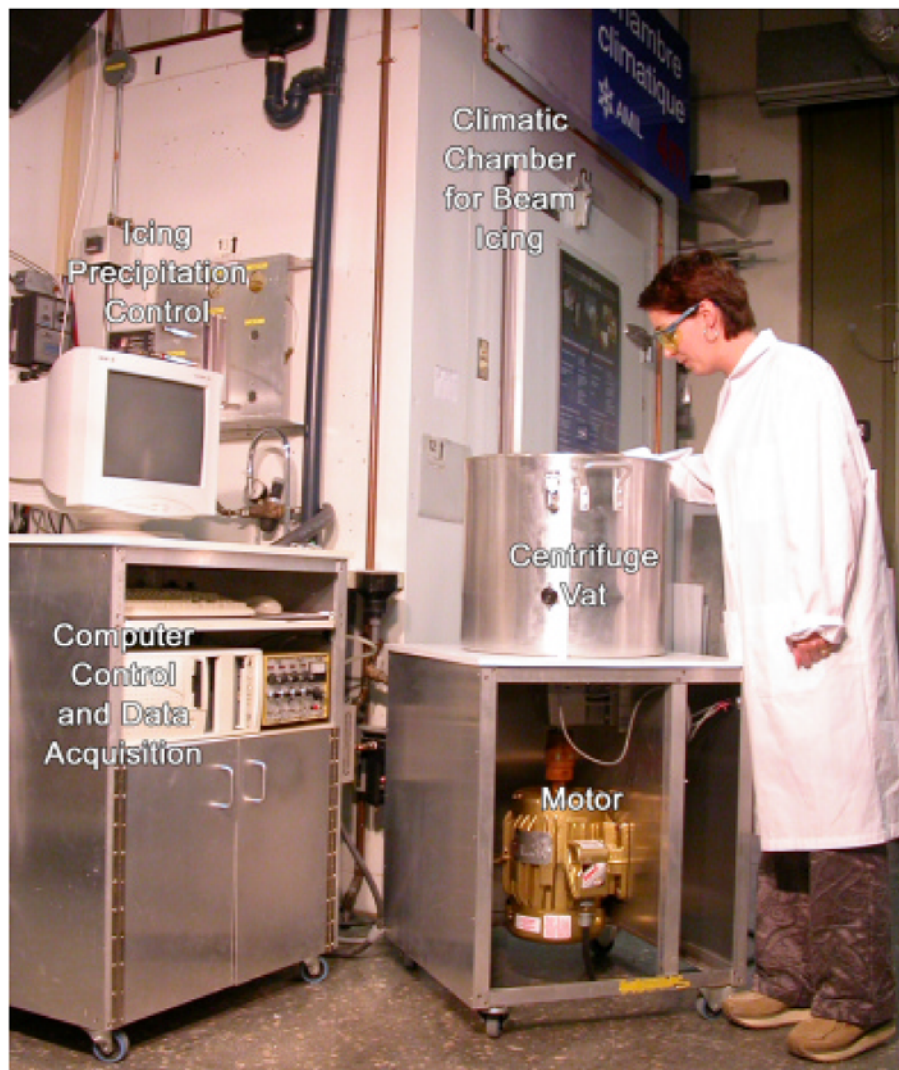


Abb. 8 Experimenteller Aufbau mit Zentrifuge. (Foto AMIL)

4. Ergebnisse

4. 1. Verzögertes Gefrieren

In der Apparatur, welche im vorhergehenden Bericht [9] beschrieben worden ist, wurde ein Tropfen Wasser von ca. 5 Mikroliter Volumen bei einer konstanten Temperatur von -10°C beobachtet. Dabei wurde die Zeit bis zum Gefrieren des Wassertropfens auf der Beschichtung mit derjenigen auf Glas verglichen. Auf der Beschichtung gefriert der Tropfen deutlich später. Je nach System kann eine Verzögerung des Gefrierens von einer Stunde bis zu über drei Stunden erreicht werden.

Ebenfalls wurde in Kanada eine besondere Beobachtung, die sich mit unseren Experimenten deckt, gemacht. Während der Vereisung der CAT Balken mit gefrierendem Sprühregen bei einer Temperatur von -8°C wurde beobachtet, dass die Tröpfchen auf den beschichteten Aluminiumbalken später gefroren als auf den unbeschichteten Aluminiumbalken.

Eine mögliche Anwendung des verzögerten Gefrierens für Rotorblätter wird in Kapitel 5 diskutiert.

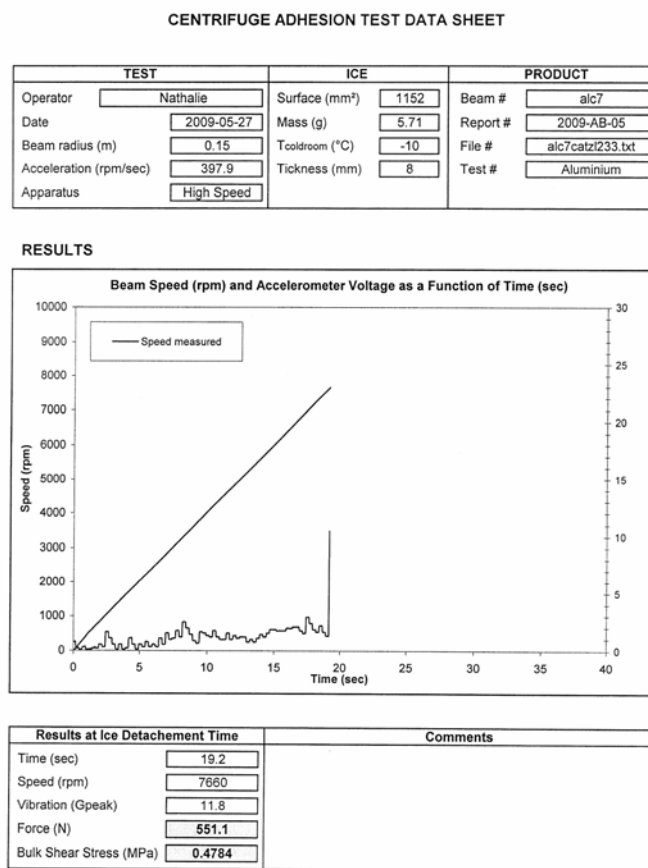



Abb. 9 Auswertblatt eines einzelnen CAT (Grafik AMIL).

4. 2. Eishaftung

Da die Haftung eines Klebstoffes - in diesem Fall Eis - in Kraft pro Fläche gemessen wird, hat sie die Dimension eines Druckes. Die Eishaftung an Aluminium ist z. B. in unseren Versuchen durchschnittlich ca. 0.46 MPa. Dieser Wert ist jedoch Schwankungen unterworfen und hängt insbesondere von der Art der Erzeugung des Eises ab. Darum wird das Eis unter möglichst wirklichkeitsnahen Bedingungen hergestellt. In unserem Fall ist das durch gefrierenden Nieselregen bei einer Temperatur von -8°C . Andere Quellen berichten von einer Eishaftung von 1.58 MPa an Aluminium, allerdings wurde in die-

sem Fall das Wasser direkt in einem Kühlschranks eingefroren. Man sieht schon aus diesen Daten, die um mehr als ein Faktor 3 variieren, dass die Streuung erheblich ist. Deshalb werden beim CAT in jedem Fall 6 unbeschichtete Aluminiumbalken zusammen mit 3 beschichteten gleichzeitig vereist und nacheinander in der Zentrifuge gemessen. Die Eishaftungsreduktion, ARF, ergibt sich aus dem Quotienten der durchschnittlichen Eishaftung von unbeschichtetem durch beschichteten Balken für jedes Experiment. In Abbildung 8 ist ein einzelner CAT an einem unbeschichteten Aluminiumbalken gezeigt. Neben vereisungsspezifischen Daten wie vereiste Fläche, Masse des Eises und Temperatur sind in einer Grafik die Zentrifugenmesswerte gezeigt. Der lineare Anstieg der Rotationsgeschwindigkeit bricht beim Überschreiten einer Schwelle des piezoelektrischen Vibrationssensors ab, dies ist der Moment wo sich das Eis ablöst. Die Messdaten im Moment des Ablösens sind unten angegeben und die Eishaftung wird vom Computer daraus berechnet.

Abbildung 10 zeigt die Auswertung für eine Beschichtung. Es handelt sich dabei um eine Antifreeze-Beschichtung mit dem Kürzel TMGS. In der oberen Tabelle („iced beam properties“) sind vereisungstechnische Angaben aufgelistet, während in der Unteren („ice adhesion“) die Daten vom CAT zu finden sind. Die Tabellen sind in 2 Zeilen gegliedert, die eine für die Aluminiumreferenz (hellblau unterlegt), die andere für die Beschichtung. Grau unterlegt sind die Durchschnittswerte einerseits für Aluminium, andererseits für die Beschichtung. Durch deren Division ergibt sich der Eishaftungsreduktionsfaktor, ARF, der ganz unten angegeben ist. In diesem Fall beträgt er 1.3.


FOR-ENI012/2

Centrifuge Adhesion TEST SHEET

Candidate Coating (#):	TMGS (158)	Date (yy/mm/dd):	09-05-27
Reference Substrate (#):	Aluminium	Air pressure (psi):	70
Report # :	2009-AB-05	Icing finished at (hr:mm):	09:00
Icing File:	2009AB05CATZL233	Icing time (min):	30
T_{air icing} (°C):	-8.0 ± 0.2	Spinning started at (hr:mm):	10:00
T_{ice formation} (°C):	-4.6 ± 1.6	Time between icing and spinning	
T_{air testing} (°C):	-10	(hr:min)	01:00
		CAT#:	CATZL233

Acceleration (rpm/sec): 300 100

Iced beam properties			
Product and Beam #	Surface (mm ²)	Ice Thickness (mm)	Ice Weight (± 0.02g)
AIC7	1152	8.0	5.71
AIC8	1184	8.0	5.61
AIC9	1152	8.0	5.52
AIC10	1184	7.0	5.29
AIC11	1216	7.0	5.04
AIC13	1216	7.0	4.87
158A292	1216	7.0	5.58
158A293	1216	7.0	5.42
158A294	1216	7.0	5.10

	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Detachment				Comments
			Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (MPa)	
Aluminium	AIC7CATZL233	398	19	7660	551	0.478	
	AIC8CATZL233	398	18	7302	492	0.416	
	AIC9CATZL233	398	20	8114	598	0.519	
	AIC10CATZL233	396	23	9246	744	0.628	
	AIC11CATZL233	397	21	8292	571	0.469	
	AIC13CATZL233	396	25	9758	763	0.627	
	Average Reference Beam	397	21	8395	620	0.523	
	Standard deviation	1	2	939	109	0.088	
% Variation	0%	12%	11%	18%	17%		
TMGS (158)	158A292CATZL233	399	17	6980	447	0.368	
	158A293CATZL233	398	19	7512	503	0.414	
	158A294CATZL233	398	20	7934	528	0.43424	
	Average Candidate Coating	399	19	7475	493	0.405	
	Standard deviation	1	1	478	41	0.034	
	% Variation	0%	7%	6%	8%	8%	

Adhesion Reduction Factor with AL= 1.3

Comments:
 1 The ice sample did not detach completely
 2 Rejected by Q₉₅ (95% of confidence)
 3 The sample was accidentally broken before spinning
 4 Malfunction of the apparatus

Abb. 10 Auswertblatt des CAT für eine Beschichtung (Grafik AMIL).

Wir entschlossen uns, 4 Beschichtungen testen zu lassen. Darunter sind 2 Antifreeze-Beschichtungen, TMGS und TGS und zwei adhäsionsvermindernde Beschichtung mit dem Kürzel SNG 2b und IGS Die adhäsionsvermindernde Beschichtungen wurden ausgewählt weil sie nach dem gleichen Verfahren wie die Antifreeze-Beschichtungen auf die Aluminiumbalken aufgebracht werden. Die Antihafbeschichtungen IGS und SNG 2b wurden auch untersucht um einen Vergleich mit traditionellen Beschichtungen zu haben.

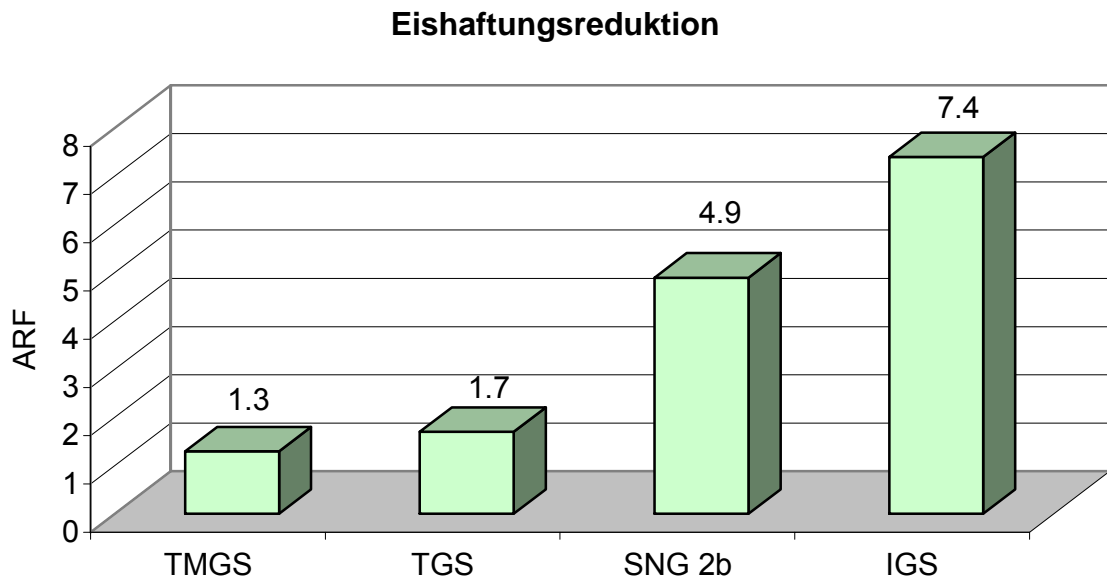


Abb. 11 Eishaftungsreduktion im Vergleich zu Aluminium, ARF; für 2 Antifreeze-Beschichtungen (TMGS und TGS), und zwei adhäsionsverringere Beschichtung SNG 2b und IGS.

Die ARF Werte von 1.3 und 1.7 für die beiden verschiedenen Antifreeze-Beschichtungen TMGS und TGS unterscheiden sich nur unwesentlich von unbehandeltem Aluminium, während der ARF von 4.9 und 7.4 für die adhäsionsvermindernden Beschichtung deutlich darüber liegt. Die adhäsionsvermindernden Beschichtungen zeigen also einen Effekt, während die Antifreeze-Beschichtungen nur einen kleinen Effekt zeigen.

5. Diskussion

Die Eigenschaft des verspäteten Gefrierens von Wasser auf den Antifreeze-Beschichtungen ist durchaus interessant und nützlich. Ein unterkühlter Tropfen, der auf ein solchermassen beschichtetes Rotorblatt auftritt, würde nicht sofort gefrieren sondern erst nach einiger Zeit. Diese Zeit könnte aber ausreichen, dass der Tropfen bis an die Hinterkante des Rotorblatts geblasen wird und er das Rotorblatt schon wieder verlässt bevor er gefriert. Die Gefrierverzögerung hätte also eine Nichtvereisung des Rotorblatts zur Folge.

Um die Resultate der Haftungsreduktion besser einordnen zu können zeigt Abbildung 12 die Eishafungsreduktionen im Vergleich zu Aluminium (ARF) für verschiedene Systeme.

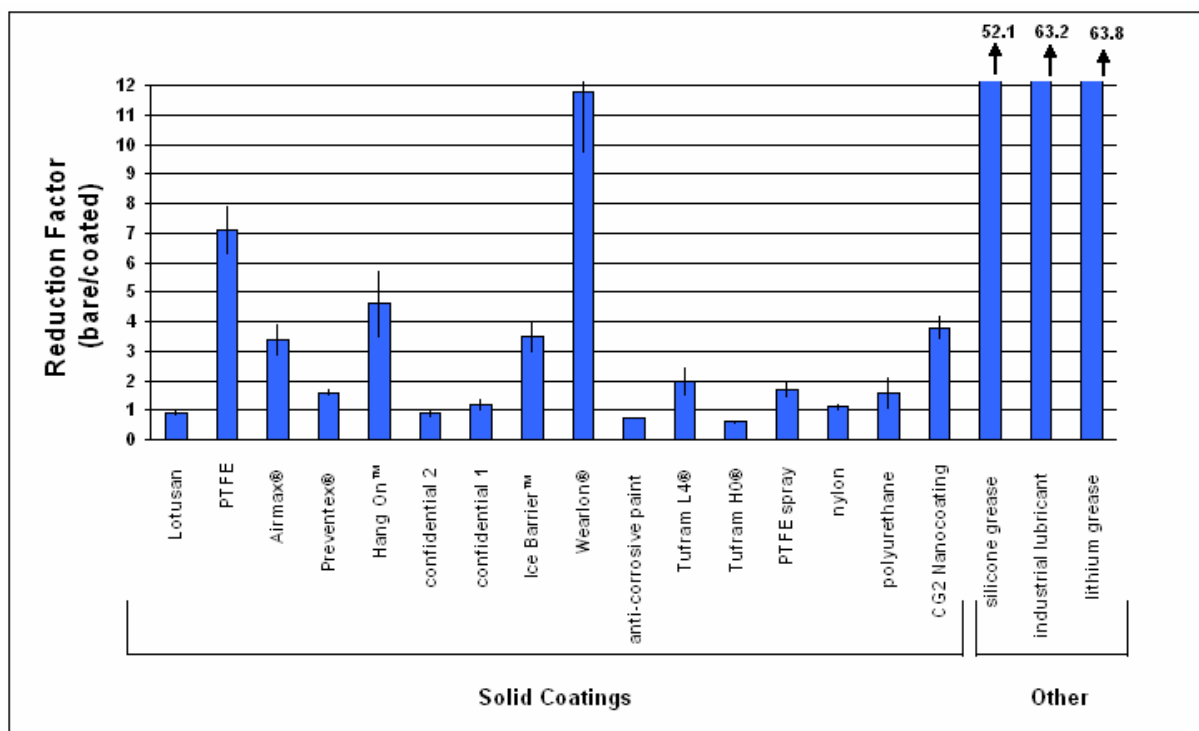


Abb. 12 Eishafungsreduktion, ARF, für verschiedene Systeme (Grafik AMIL)

Die besten ARF werden von Fetten und Schmiermitteln erreicht, diese sind jedoch nicht dauerhaft und für Rotorblätter untauglich. Das Material mit dem höchsten ARF ist Teflon (PTFE) es liegt beinahe gleichauf mit IGS mit einem ARF von 7.4. Die beste kommerzielle Beschichtung mit einem ARF von ca. 12 ist Wearlon.

5. 1. Ausblick

Das verspätete Gefrieren kann an einem Flügelprofil in einem Klimawindkanal unter vereisenden Bedingungen untersucht werden. Momentan evaluieren wir die verschiedenen Testmethoden und in Zukunft wollen wir dazu Versuche durchführen.

6. Danksagung

Wir danken der GEBERT RÜF STIFTUNG und Clariant International Ltd für finanzielle Unterstützung.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Suisse Eole, www.wind-data.ch.
- [2] Wind turbine performance under icing conditions. C. Hochart, G. Fortin and J. Perron, Wind Energy 11, **2008**, 319-333.
- [3] Wind power development ind sub-arctic conditions with severe rime icing. J. F. Maissan, Circumpolar Climate Change Summit and Exposition, March 19-21 **2001**, Whitehorse, Yukon, Canada.
- [4] A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. N. Dalili, A. Edrisy and R. Carriveau, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, **2009**, 428-438.
- [5] Freezing resistance in some antarctic fishes. A. DeVries and D. E. Wohlschlag, Science 163 (3871), **1969**, 1073–1075.
- [6] Anti-icing Materials International Laboratory, www.ugac.ca/amil.
- [7] How a solid coating can reduce the adhesion of ice on a structure. C. Laforte, J.-C. Carriere and J.-L. Laforte, The Tenth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS, June **2002**.
- [8] Icephobic material centrifuge adhesion test. C. Laforte and A. Beisswenger, IWAIS, 11th International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, Montreal, Canada, June 16, **2005**.
- [9] Antifreeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen. K.Siegmann, G. Meola, M. Hirayama, Bundesamt für Energie, Schlussbericht, 30. Juni **2008**.