



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Anti-freeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Dr. Konstantin Siegmann, Institute of Materials and Process Engineering,
Zürcher Hochschule Winterthur**

Postfach 805

CH-8401 Winterthur

**André Kaufmann, Institute of Materials and Process Engineering, Zürcher
Hochschule Winterthur**

Postfach 805

CH-8401 Winterthur

**Prof. Dr. Martina Hirayama, Institute of Materials and Process Engineering,
Zürcher Hochschule Winterthur**

Postfach 805

CH-8401 Winterthur

Email martina.hirayama@zhwin.ch

Homepage www.zhwin.ch

Impressum

Datum: 18. Dezember 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Windenergie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, markus.geissmann@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101'903

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Rotorblatt mit Eisansatz an der Profilvorderkante
[DEWI Magazin Nr. 10, Feb. 1997]

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	5
2. Abstract.....	7
3. Einleitung	9
4. Nicht verschmutzende und eis-phobe Oberflächen	10
5. Eis-phobe Beschichtungen im Bereich von Windenergieanlagen	14
6. Schmutz, Unterhalt und die Oberfläche von Rotorblättern	18
7. Materialien und Herstellungsprozesse von Rotorblättern.....	20
8. Von den Autoren vorgeschlagene Ansatz für anti-freeze Beschichtungen	23
8.1. Physikalische Betrachtungen von gefrorenem Wasser (Eis)	24
8.2. Mögliche Eisbindungs- und Wirkmechanismen von Frostschutzproteinen	26
8.2.1. Kolligatives Phänomen	26
8.2.2. Inhibierung des Kristallwachstums auf Grund des Gibbs Thomson (Kelvin) Effektes.....	27
8.2.3. Reversibles Adsorptions-/Desorptions Gleichgewicht.....	28
8.2.4. Weitere Modelle	28
8.3. Übertragung des „Anti-freeze“-Konzeptes auf Oberflächen.....	28
9. Know-how Träger auf der Welt, in Europa, und in der Schweiz	30
9.1. Die wichtigsten Windenergieanlagenhersteller, alphabetisch geordnet.....	31
9.2. Rotorblatthersteller und ihre Zulieferer europaweit, alphabetisch geordnet	33
9.3. Firmen und öffentliche Einrichtungen in der Schweiz auf dem Gebiet Windenergie [1]	35
9.3.1. Hersteller	35
9.3.2. Dienstleister und Planungsbüros	37
9.3.3. Betreiber	38
9.4. Forschungsinstitute rund um das Gebiet Vereisung von Oberflächen	38
10. Schlussfolgerung	41
11. Projektvorschlag	42

1. Zusammenfassung

Zuerst wird eine Zusammenstellung über den heutigen Stand der Forschung über nicht verschmutzende und eis-phobe (eisabstossende) Beschichtungen gegeben. Hydrophobe, insbesondere fluoridierte, Beschichtungen sind wasserabstossend und zeigen ein günstiges Reinigungsverhalten. Besonders geringe Verschmutzungstendenz haben superhydrophobe Beschichtungen mit Lotuseffekt. Eis-phobe Beschichtungen verringern die Haftung von Eis auf die Oberfläche. Es wird gezeigt, dass es noch keine perfekte eis-phobe Beschichtung gibt. Der Stand der Forschung auf dem Gebiet der Beschichtungen, die gegen das Anwachsen von Eis auf Rotorblätter von Windeenergieanlagen wirksam sind, wird dargestellt. Obwohl die Adhäsion von Eis an die Oberfläche der Rotorblätter deutlich verringert werden kann, ist eine Verhinderung der Vereisung durch Beschichtungen zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich. Es existieren jedoch Produkte, die nach den Angaben der Hersteller einer (partiellen) Vereisung vorbeugen können. Rotorblätter für Windenergieanlagen können bis zu 60 Meter lang sein und werden heutzutage aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Oft werden die Rotorblätter an den Profilverkanten mit einem Klebeband gegen meteorologische Einflüsse geschützt.

Die Autoren präsentieren einen Vorschlag für anti-freeze Beschichtungen basierend auf der Wirkung von anti-freeze Proteinen. Im Gegensatz zu traditionellen Frostschutzmitteln ist die Wirkung von anti-freeze Proteinen nicht proportional zu deren Konzentration. Anti-freeze Proteine verhindern das Kristallwachstum, die Eisbildung erfolgt erst bei wesentlich tieferen Temperaturen. Synthetisch hergestellte Polymere können den Effekt der natürlichen anti-freeze Proteine ebenfalls aufweisen. Beschichtungen aus diesen Polymeren könnten einer Vereisung vorbeugen.

Eine ausführliche Zusammenstellung der Know-how Träger auf dem Gebiet der Windenergieanlagen, Rotorblatthersteller, Schweizer Firmen und Institutionen und der Forschung schliesst den Bericht ab.

Beurteilung und Schlussfolgerungen aus diesem Bericht:

Zum heutigen Zeitpunkt existieren noch zu wenige Untersuchungen über die anti-Eis Wirkung von Beschichtungen, um über deren Verwendung bei Windenergieanlagen eindeutig urteilen zu können. In der Literatur werden jedoch interessante Ansätze beschrieben. Durch die Verwendung von kommerziell erhältlichen hydrophoben, superhydrophoben und eis-phoben Beschichtungen wird eine Eisminderung beobachtet. Beschichtete Rotorblätter werden im Windkanal vereisenden Bedingungen ausgesetzt. Die Adhäsionskraft von Eis an die Oberfläche und die Menge des abgeschiedenen Eises sind durch die Beschichtung deutlich verringert.

Die Autoren schlagen einen neuartigen Ansatz zur Eisminderung auf Rotorblättern vor, nämlich die Verwendung von anti-freeze Protein-ähnlichen Beschichtungen auf Polymerbasis. Anti-freeze Proteine verhindern das Eiskristall-Wachstum, im Gegensatz zu eis-phoben Beschichtungen welche die Haftung von Eis an die Oberfläche verkleinern.

Das von der ZHW vorgeschlagene Projekt beinhaltet folgende Punkte:

- Systematische Untersuchung von Beschichtungen (hydrophob, superhydrophob, eis-phob, anti-freeze).
- Entwicklung von Polymeren die analog zu anti-freeze Proteinen wirken.
- Optimierung der Haftung und der Beständigkeit von Beschichtungen mit den neuartigen anti-freeze Substanzen.

Das Potenzial des geplanten Projekts zur Entwicklung von stabilen anti-Eis Beschichtungen für Windenergieanlagen ist nach der Meinung der Autoren gross. Eine entsprechende Beschichtung würde für Standorte, beispielsweise in den Alpen, grosse Vorteile bringen. Die bisher getesteten Beschichtungen zeigen zwar eine Verringerung der Haftung und Bildung von Eis auf Oberflächen, diese ist jedoch nicht ausreichend. Beschichtungen mit anti-freeze Eigenschaften analog zu anti-freeze Proteinen eröffnen neue Möglichkeiten zur Reduktion der Eisbildung auf Oberflächen.

2. Abstract

First, a summary of the state of the today's research concerning easy-to-clean and icephobic (ice-repellent) coatings is given. Hydrophobic, especially fluorinated, coatings are water-repellent and display favorable cleaning properties. Especially little fouling tendencies are shown by super-hydrophobic coatings with lotus-effect. Icephobic coatings reduce the adhesion of ice to the surface. It is shown that there is yet no perfect icephobic coating. The state of research on the field of coatings, which are active in reducing the ice growth on rotor blades of wind-turbines, is described. Although adhesion of ice to the surface of rotor blades can be notably diminished, an inhibition of icing by coatings is not feasible to date. There are, however, products which, according to the declaration of the producer, can (partially) prevent icing. Rotor blades for wind-turbines can be as long as 60 meters and are nowadays produced from glass-fiber reinforced plastic materials. Often, the rotor blades are protected by an adhesive tape against meteorological influences.

The authors present a proposition for anti-freeze coatings based on the effect of anti-freeze proteins. Contrary to traditional antifreeze compounds, the effect of anti-freeze proteins is not proportional to their concentration. Anti-freeze proteins inhibit crystal growth, ice formation starts at much lower temperatures. Synthetically prepared polymers can mimic the effect of anti-freeze proteins. Coatings of such polymers could prevent icing.

A comprehensive compilation of know-how carriers in the area of wind-energy turbines, rotor blade manufacturers, Swiss companies and institutions, and research closes the rapport.

Judgment and conclusions from this rapport:

At present, there are not enough investigations on the anti-ice action of coatings to judge finally on their use for wind-turbines. In the literature, however, interesting approaches are described. By the use of commercially available hydrophobic, super-hydrophobic and icephobic coatings ice mitigation is observed. Coated rotor blades are exposed to icing conditions in a wind tunnel. The adhesion force of ice to the surface and the amount of deposited ice are significantly reduced by the coatings.

The authors propose a novel approach for the ice mitigation on rotor blades. That is, the use of anti-freeze protein-like coatings based on polymers. Anti-freeze proteins inhibit the growth of the ice crystals, contrary to icephobic coatings which decrease the adhesion of ice to the surface.

The project proposed by ZHW contains the following points:

- A systematic search for anti-ice coatings (hydrophobic, super-hydrophobic, icephobic, anti-freeze).
- Development of polymers which act analogously to anti-freeze proteins.
- Optimization of adhesion and resistance of coatings with the novel anti-freeze compounds.

The potential of the proposed project for the development of stable anti-ice coatings for wind-turbines is, at the opinion of the authors, great. An appropriate coating would bring great advantages for certain locations as, for example, the Alps. The to date tested coatings show a reduction in ice adhesion and formation on surfaces, but this reduction is not sufficient. Coatings with anti-freeze properties analogous to anti-freeze proteins open new possibilities for the reduction of ice formation on surfaces.

3. Einleitung

Die Anzahl an Windenergieanlagen ist in den letzten Jahren weltweit stark gewachsen. Dieser Trend ist zu begrüßen weil Wind, im Gegensatz zu Erdöl, eine erneuerbare Form der Energie darstellt. Auch werden in immer grösserer Anzahl Windenergieanlagen an vereisungsgefährdeten Standorten aufgestellt, wenn dort die Windverhältnisse günstig sind. Im nördlichen Skandinavien zeigten Windmessungen das vorhandene Potential für die Windenergienutzung auf, und im Alpenraum der Schweiz und Österreichs werden erste Erfahrungen mit Windenergieanlagen gesammelt. Es sind daher technische Lösungen gefordert, um den Betrieb unter Vereisungsbedingungen zu ermöglichen und eine Gefährdung der Umgebung und der Anlage auszuschliessen. An vielen gebirgigen Standorten ist mit entsprechend häufigen Vereisungsbedingungen zu rechnen. Mit zunehmender Erfahrung mehren sich die Berichte über Energieverluste durch längere Stillstandzeiten von vereisten Windenergieanlagen. Vermehrt melden Behörden Bedenken an wegen möglichem Eisabwurf von vereisten Rotoren und der damit verbundenen Gefahr für Personen. Es existieren noch keine wirklich überzeugende Konzepte für den Betrieb von Windenergieanlagen im kalten Klima. Die einfachste Strategie ist das Abschalten der Anlage, sobald eine Vereisung eintritt. Dabei stellt sich allerdings die schwierige Frage, wie die Vereisung überhaupt sicher erkannt wird.

Die zweite Strategie zur Vereisungsverhinderung ist die Verwendung so genannter Rotorblattheizungen, entweder durch Warmluft oder mit Drahtheizungen. Bei stillgelegter Maschine werden die Rotorblätter beheizt, so dass das anhaftende Eis abrutscht. Natürlich wird dabei Energie verbraucht und die Maschine produziert während des Enteisungsvorganges keinen Strom.

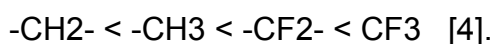
Die eleganteste Lösung wäre eine Rotorblattbeschichtung, die eine Vereisung erst gar nicht zulässt. Leider sind die bis jetzt bekannten eis-phoben Beschichtungen nicht in der Lage, eine Vereisung der Rotorblätter wirksam zu verhindern. Wir schlagen daher in diesem Bericht einen neuen Ansatz für eine anti-freeze Beschichtung vor, die Rotorblätter dauerhaft vor Eisansatz schützen soll.

4. Nicht verschmutzende und eis-phobe Oberflächen

Zur Reinigung von Oberflächen wird erheblicher Aufwand betrieben. Die Notwendigkeit der Reinigung kann sowohl ästhetische als auch funktionale Gründe haben. Im vorliegenden Fall steht die Erhaltung der Funktion im Vordergrund. Rotorblätter von Windenergieanlagen müssen ein exakt vorgegebenes Profil aufweisen. Durch Schmutz oder Eis kann dieses Profil verändert und dadurch der Wirkungsgrad der Anlage verringert werden. In der Schweiz ist Schmutz das kleinere Problem als Eis. Deshalb wird für unsere Breitengrade keine regelmässige Flügelreinigung empfohlen, weil der Nutzen die Kosten nicht rechtfertigt. Wenn es bei rotierender Maschine regnet, tritt ein gewisser Reinigungseffekt auf. Problematisch sind starke Verschmutzungen mit Rückständen von Insekten in regenarmen Gegenden [1]. Im Folgenden wird der Stand der Technik auf dem Gebiet der leicht zu reinigenden und selbstreinigenden Oberflächen beschrieben. Unseres Wissens werden solche Oberflächen jedoch nicht generell auf Rotorblättern von Windenergieanlagen eingesetzt. Für die Anwendung einer angeblich Schmutz- und Eisabweisenden Beschichtung für Rotorblätter siehe unter „Schmutz, Unterhalt und die Oberfläche von Rotorblättern“.

Es gibt im Wesentlichen drei Lösungsansätze für leicht zu reinigende und selbstreinigende Oberflächen: hydrophobe Oberflächen, hydrophile Oberflächen und superhydrophobe Oberflächen (der sog. Lotuseffekt). Man kann sowohl durch Hydrophobisierung als auch durch Hydrophilisierung von Oberflächen Vorteile im Reinigungsverhalten erzielen. Die Hydrophobisierung wird bereits angewandt (z.B. bei Sanitärflächen [2]), die Hydrophilisierung wird bisher kaum ausgeführt [3].

Hydrophobe Oberflächen zeigen tatsächlich ein günstigeres Reinigungsverhalten, im Vergleich zu den üblichen Oberflächen. Infolge der schlechten Benetzbarkeit haftet Schmutz weniger auf der hydrophoben Oberfläche und wird mit Wasser einfach weggespült. Ein nachhaltiges Verhindern des Benetzens oder Verschmutzens von Oberflächen wird durch ein Verringern der Wechselwirkung zwischen dieser und der kontaktierenden Substanz erzielt. Erreichen lässt sich das, indem man die Oberflächenenergie erniedrigt, beispielsweise durch das Beschichten mit bestimmten funktionellen Gruppen. Folgende Gruppen erniedrigen die Oberflächenenergie in der Reihenfolge:



Es zeigt sich, dass mit einer fluorierten Beschichtung ein Effekt erzielt wird, wie er sonst nur von reinen Teflonoberflächen bekannt ist. Das für viele Anwendungsfälle gewünschte oleophobe Verhalten, also eine Wasser und Öl abweisende Oberfläche ähnlich wie bei Polytetrafluorethylen (PTFE), wird mit Beschichtungen mit fluorierten Kohlenstoffketten erzielt. Fluorierte Beschichtungen auf Basis von Sol-Gel Chemie sind entwickelt worden und können Kunststoffe und Metalle vor Verschmutzung schützen. Das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC in Würzburg hat entsprechende multifunktionelle Nanokomposite unter dem Markennamen „Ormocer“ entwickelt [5].

Seit 1975 ist der Lotuseffekt, der einer superhydrophoben Oberfläche zugrunde liegt, bekannt und auch sehr prominent geworden. Der Effekt leitet sich von der Natur ab. Gewisse Pflanzen, wie unter anderem der Lotus, zeigen eine stark verminderte Verschmutzung und Benetzung. Wasser perlt einfach von den Blättern ab, ohne sie zu befeuchten. Ebenso haften Schmutz und sogar Klebstoffe kaum auf der Blattoberfläche und sind mit Wasser einfach wieder abzuspülen. Der Grund für den Lotuseffekt liegt in der speziellen Oberflächenstruktur der Blätter. Das primäre Abschlussgewebe (die Epidermis) bildet dabei etwa fünf bis zehn Mikrometer hohe und zehn bis fünfzehn Mikrometer voneinander entfernte Noppen. Diesen ist eine gefaltete Schutzschicht, die den Aussenwänden der Epidermiszellen aufliegt, aufgelagert. Sie besteht aus einem Grundgerüst von Polymeren und den darin eingelagerten hydrophoben Wachsen. Bedingt durch diese Oberflächenstruktur des Blattes werden Kontaktwinkel von bis zu 160° gemessen [6]. (Als Kontaktwinkel wird der Winkel bezeichnet, den ein Wassertropfen auf der Oberfläche eines Festkörpers zu dieser Oberfläche bildet. Die Grösse des Kontaktwinkels zwischen Flüssigkeit und Feststoff hängt von der Wechselwirkung (Adhäsion) zwischen den Stoffen an der Berührungsfläche ab. Je geringer diese Wechselwirkung desto grösser wird der Kontaktwinkel.)

Oberflächen, die Kontaktwinkel von über 150° aufweisen, werden als superhydrophob bezeichnet. Wassertropfen haben, wie alle Flüssigkeiten, die Tendenz zur Minimierung ihrer Oberfläche bis hin zur Kugelform. Dem wirken Erdanziehung und Adhäsion entgegen, letztere jedoch in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung. Wassertropfen auf einem Lotusblatt zeigen nahezu diese ideale Kugelform, und haben deshalb eine geringe Wechselwirkung mit der Blattoberfläche. So hohe Kontaktwinkel, wie man sie am Lotusblatt misst, bedeuten, dass nur etwa 2 bis 3% der Tropfenoberfläche mit der Oberfläche der Pflanze in Berührung sind, diese also eine extrem geringe Benetzbarkeit besitzt. Die Wechselwirkung zwischen Blattoberfläche und Wassertropfen ist dabei so gering, dass das Wasser leicht abperlen kann. Aufliegende Schmutzpartikel, die ebenso eine geringe Adhäsion aufweisen, werden dadurch mitgerissen und weggespült [2].

Die Voraussetzung für diesen Effekt sind die oben beschriebenen strukturierten Oberflächen. Es handelt sich dabei um Oberflächen, die von ihrer Chemie her wasserabweisend (hydrophob) sind. Ausschlaggebend für die besonderen Eigenschaften ist allerdings nicht nur die Chemie, sondern hauptsächlich die Mikro- bis Nanostruktur: Im Idealfall eine Grobstruktur (Durchmesser 5 bis 10 Mikrometer) und eine darüber gelagerte Feinstruktur (10 Nanometer bis 5 Mikrometer). Die Adhäsion von Partikeln auf diesen Oberflächen ist minimiert, denn sie liegen nur auf den Spitzen der Struktur. Durch abrollende Wassertropfen werden sie abgewaschen. Die Mikrostruktur und Oberflächenchemie zusammen machen den Lotuseffekt aus, so dass Wassertropfen abperlen wie Quecksilber und Verunreinigungen wie Schlamm, kleine Insekten und Dreck mitnehmen.

Nanotechnologen entwickeln Methoden, um Farben, Textilien, Ziegelsteine und andere Oberflächen so zu beeinflussen, dass sie trocken bleiben und sich selbst reinigen können wie das Lotusblatt. Dies wird üblicherweise erreicht, indem die Oberfläche mit einer Organofluorverbindung oder einem Silicon behandelt wird. In einem Beispiel wurde eine Aluminiumoberfläche superhydrophob gemacht, indem sie für einige Stunden in eine Natriumhydroxidlösung getaucht wurde. Danach wurde sie mit Perfluornonan durch spin-coating bis zu einer Dicke von 2 nm

beschichtet. Diese Prozedur vergrössert den Kontaktwinkel von 67° zu 168°. Die Elektronenmikroskopie zeigt, dass die Aluminiumoberfläche einer Lotusoberfläche gleicht mit einer porösen Mikrostruktur, die eingeschlossene Luft enthält [7].

Die Eis-Akkumulation ist ein Problem für das Transportwesen, für Strassen, Boote, Flugzeuge, Stromkabel, etc. Eine eis-phobe Beschichtung, angewandt auf exponierten Oberflächen, erscheint eine interessante Lösung um den Eis-Aufbau zu verhindern. Viele Materialien, Beschichtungen und Farben mit niedrigen Reibungs-Eigenschaften sind kommerziell erhältlich. Manche davon werden als „eis-phob“ vermarktet, wobei der Name impliziert dass sie die Eisablagerung minimieren oder verhindern. Die Forschung hat gezeigt, dass diese Materialien die Eisbildung nicht verhindern. Tatsächlich wächst Eis auf diesen Materialien mit der gleichen Geschwindigkeit wie auf jeden anderen Materialien. Dafür verringern sie die Kraft, die nötig ist, das Eis zu entfernen. Das heisst, die Bindungsstärke von Eis auf die eis-phobe Beschichtung ist kleiner. Aus diesem Grund werden eis-phobe Beschichtungen manchmal zusammen mit anderen Eis-Entfernungstechniken verwendet, wie z.B. Heizungen, pneumatischen Profilen oder mechanischen Einrichtungen. Jedoch gib es bis jetzt keine Beschichtung die perfekt eis-phob ist, weil Eis auf allem haftet. Trotzdem sind einige Materialien, die die Eis-Adhäsion vermindern, entwickelt worden.

Die Korrelation zwischen einem hohen Kontaktwinkel für Wassertropfen auf einer Oberfläche und deren verstärkter Fähigkeit, von der Oberfläche abzuperlen, beeinflusst die Fähigkeit einer Beschichtung hydrophob oder eis-phob zu sein [8]. In den meisten Studien werden so genannte eis-phobe Produkte nach ihren hydrophoben Eigenschaften ausgewählt, also nach ihren wasserabweisenden Eigenschaften. Die übliche Hypothese ist, dass ein Produkt, das eine kleine chemische Affinität zu Wasser hat, auch eine schwache Eis-Adhäsion aufweist. Diese Theorie kann jedoch nicht verallgemeinert werden, wie nachfolgendes Beispiel zeigt.

Tabelle 1) Reduktion der Eisadhäsion an fünf üblichen Produkten [9].

Produkte	Kontaktwinkel (Wasser)	Prozent Reduktion (verglichen mit blankem Aluminium)
Lithium-Schmierfett	90°	83%
Schützendes Metallwachs	91°	17%
Teflon	109°	0%
Anodisiertes Aluminium	81°	-3%*
Antikorrosionsfarbe	79°	-17%*

*Das negative Vorzeichen steht für eine Zunahme der Adhäsion

Tabelle 1 zeigt die prozentuale Reduktion der Eisadhäsion für 5 Schutzschichten, verglichen mit nicht beschichtetem Aluminium. Die prozentualen Reduktionen variieren von einer 17% Zunahme- bis zu einer 83% Abnahme der Adhäsion. Die effizienteste Beschichtung ist das Lithium-Schmierfett. Die weiche Struktur des Fettes begünstigt die Eis-Ablösung. Erstaunlich sind auch die gemessenen Kontaktwinkel, sie korrelieren wenig mit der Reduktion der Adhäsion. So ist Teflon, ein hydrophobes Material, gleich „gut“ wie blankes Aluminium.

Ein anderer Faktor, der untersucht wurde, ist der Einfluss des Oberflächenzustands. So wurde z.B. gezeigt, dass eine Zunahme der Rauheit der Oberfläche die Eis-Adhäsion verstärkt. Trotz der beachtlichen Anzahl Studien über eis-phobe Materialien, ist das Wissen bezüglich der anti-Adhäsionseigenschaften noch lückenhaft und manchmal sogar umstritten. Daraus folgt, dass noch kein Material bekannt ist, das Eis-Akkumulation vollständig verhindert [9].

Kann eine eis-phobe Beschichtung Eis vom Haften an eine Struktur verhindern? Nicht vollständig, Eis haftet auf allem. Aber eine eis-phobe Beschichtung kann die Adhäsion von Eis reduzieren, und dann kann das Eis einfacher entfernt werden (de-iced) mit kleinem Kraftaufwand, idealerweise nur von Wind oder natürlichen Vibrationen.

[1] Manfred Dürr, Bundesverband WindEnergie e.V., Abt. Technik / Fachgremien, 97082 Würzburg (persönliche Mitteilung).

[2] Sanitär Oberflächen mit Effektbeschichtung. A. Fath, Galvanotechnik 6 (2005)1319-1327.

[3] Leicht zu reinigende und selbstreinigende glatte Oberflächen. A. Biedermann, Keramische Zeitschrift 51(10) (1999) 874-878.

[4] W.A. Zisman, Adv.Chem., Ser. 43 (1994).

[5] Putzen leicht gemacht. Johanna Kron et al. Oberflächentechnik 57(5) (2003) 23-26.

[6] www.wikipedia, Lotus-Effekt.

[7] Zhiguang Guo et al., J. Am. Chem. Soc. 127 (2005) 15670-15671.

[8] Effect of Surfactants on Wetting of Super-Hydrophobic Surfaces. R. Mohammadi et al., Am. Chem. Soc. (2004) 1-6.

[9] How a solid coating can reduce the adhesion of ice on a structure. C. Laforte et al. IWAIS 2002.

5. Eis-phobe Beschichtungen im Bereich von Windenergieanlagen

Wind als Energieressource hat das Potential, einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung in vielen Regionen der Schweiz zu liefern. Jedoch sind einige Standorte in der Schweiz beeinträchtigt durch mögliche Vereisungen der Windenergieanlage. Darum bleibt ein grosses Potential ungenützt. Vereisung ist ein Problem, das viele Gruppierungen interessiert, wie z.B. private Energieunternehmen, öffentliche Einrichtungen und Landeigentümer. Die optimierte Windturbinen-Leistung hängt von dem Verhältnis von Hub zu Luftwiderstand ab, das von den Rotorblättern generiert wird. Eisakkumulation an der Profilvorderkante ändert die aerodynamische Form des Flügels und beeinflusst so den Hub. Gleichzeitig erzeugen Eisansätze Störungen für die laminare Strömung über die Flügeloberfläche und vermindern so die Energieausbeute. Schliesslich wird der Rotor durch die Eisakkumulation schwerer, und es wird eine Unwucht generiert. Dieser Abschnitt beschreibt Strategien, wie sie zur Verminderung von Vereisungen an Rotorblättern für Windenergieanlagen getestet wurden. Die Experimente wurden an Rotorblättern durchgeführt, wie sie gegenwärtig bei Windturbinen verwendet werden unter Bedingungen, die den wirklichen klimatologischen Verhältnissen entsprechen. Dazu sollte eine effiziente Eisminderungsstrategie nicht mehr Energie verbrauchen als das System liefert.

Windturbinen wurden „Reif“- oder „Klareis“- Vereisungsbedingungen ausgesetzt [1]. Im Folgenden wird glattes, kompaktes Eis, welches eine hohe Dichte hat und durchsichtig ist, „Klareis“ genannt. „Reif“ bezeichnet ein Eis von niedriger Dichte, das weiss und federförmig anzusehen ist. Klareis bildet sich bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt in Luft mit hohem Wassergehalt, charakteristischerweise zwischen 0°C und -6°C. Reif bildet sich bei kälteren Bedingungen, üblicherweise unter -10°C in Luft mit niedrigem Wassergehalt. Reif kann sich auch bilden, wenn die Oberflächentemperaturen unter -6°C fallen. Bei der Reifbildung gefrieren unterkühlte Wassertropfen sofort beim Aufprall und bilden ein Eis von niedriger Dichte. Unter Klareis-Bedingungen gefriert ein Teil der Wassertropfen beim Aufprall, und das übrige Wasser läuft über die Oberfläche, bevor es gefriert und eine glatte Form von klarem Eis hoher Dichte bildet. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften ist klares Eis schwieriger zu entfernen als Reif.

Derzeitige Techniken zur Eis-Vermeidung an Rotorblättern sind üblicherweise in der Literatur zur Luft- und Raumfahrt zu finden. Wie Fitt und Pope [2] beschreiben, bestehen diese Methoden aus Anti-icing- und De-icing-Techniken. Anti-icing bezeichnet Bedingungen, unter denen eine Vereisung nicht entstehen kann, während De-icing bedeutet, dass schon entstandene Eisablagerungen entfernt werden. Diese Techniken beinhalten gefrierpunktserniedrigende Substanzen, thermisches Schmelzen und Oberflächendeformation, wie z.B. durch aufblasbare Gummiprofile. Gefrierpunktserniedrigende Substanzen werden üblicherweise aufgesprüht, wie das zum Enteisen von Flugzeugflügeln vor dem Start verwendete Glykol.

Das Verkleinern der Adhäsionskraft von Eis an die Oberfläche ist der Schlüsselpunkt zur Eisvermeidung. Wie von Loughborough [3] erläutert nimmt die Adhäsionskraft linear mit der Temperaturabnahme zu. Der Faktor beträgt 5976 kg/m^2 für

jedes Grad Celsius Temperaturabnahme. Deshalb würde eine Methode, welche die Adhäsionskraft von Eis an die Oberfläche verringert, Vereisungen vorbeugen und verzögern. Aus umwelthygienischen Gründen sind heisses Öl oder Chemikalien keine brauchbaren Alternativen, um Vereisungen zu verhindern. Der Gebrauch von elektrischer Energie, wie z.B. eine Rotorblattheizung, ist vom energetischen Standpunkt aus unbefriedigend. Deshalb wird bevorzugt eine passive Strategie angewendet, um die Vereisung so klein wie möglich zu halten. Die Ablagerung und Anhaftung von Eis an die Oberfläche der Rotorblätter soll vermindert werden.

In einer Studie, die verschiedene Eisminderungsverfahren an Rotorblättern für Windenergieanlagen untersuchte, wurden neben Beschichtungen auch thermische Verfahren angewandt [4]. Folgende zwei Beschichtungen wurden ausgewählt: *Wearlon Super-Icephobic* und *Super-Hydrophobic*. Die eisabweisende Beschichtung ist wirksam unter vereisenden Bedingungen, während die hydrophobe Beschichtung Wassertropfen abweist [5]. (Die genaue Beschaffenheit der eis-phoben Beschichtung wird von der Firma nicht angegeben. Lediglich wird erwähnt, dass es sich um ein Silikon-Epoxy Material handelt).

Der eis-phobe Charakter einer Beschichtung kann prinzipiell durch zwei verschiedene Testmethoden bewertet werden. i) Der Eis-adhäsionsvermindernde Effekt einer Beschichtung, verglichen mit einer unbeschichteten Oberfläche und ii) der Eis-Ablagerungs-vermindernde-Effekt einer Beschichtung. Das erste Testverfahren misst die Kraft, mit der das Eis an der Oberfläche haftet, das zweite die Masse an Eis die auf der Oberfläche angehäuft wird [6]. Zuerst wird auf den Adhäsionseffekt eingegangen.

Vergleicht man Klareis mit Reif, findet man, dass auf einer unbeschichteten, glatten Oberfläche die Adhäsionskraft von Klareis 40% kleiner ist als die von Reif. Die effektivste Eisminderungsbeschichtung unter Klareis Bedingungen ist die hydrophobe Beschichtung, welche die Adhäsionskraft um 97% verringert [4]. Unter Reif-Bedingungen ist die eis-phobe Beschichtung effektiver, sie vermindert die Adhäsion um 15%. Offensichtlich ist die hydrophobe Beschichtung unter Klareisverhältnissen am effektivsten, während die eis-phobe Beschichtung unter Reif-Bedingungen am besten ist. Das kann den physikalischen Eigenschaften der Beschichtungen zugeordnet werden. Die hydrophobe Beschichtung ist entworfen worden, um Wasser abzuweisen, wie sie unter Klareis Bedingungen herrschen, während die eis-phobe Beschichtung am effektivsten festes Eis abweist, wie sie unter Reif-Bedingungen vorherrschen. Die Resultate widerspiegeln die Unterschiede in den Strategien für die verschiedenen klimatischen Verhältnisse. Sie unterstreichen die Wichtigkeit, die richtige Beschichtung für die jeweiligen Bedingungen auszusuchen.

Für die thermischen Eis-Minderungsverfahren wurden kommerziell erhältliche Heizungen, die für den Flugzeugbau entworfen wurden, verwendet. Thermion Heizungen bestehen aus metallbeschichteten Kohlefasern, welche in Komposit- oder Polymermaterialien eingebettet werden können. Im Gegensatz zu traditionellen Drahtheizungen sind sie geeignet, um die Profilvorderkante vor Eis zu schützen, bedingt durch ihre leichte Bauweise und gleichmässige Wärmeverteilung [7]. Die Wärme, die durch diese Methode generiert wird, wird in die Grenzfläche zwischen Eis und Flügel geleitet, wo ein dünner Film aus flüssigem Wasser

erzeugt wird. Dies zerstört die Adhäsionskraft zwischen Eis und Oberfläche, und das Eis kann abfallen.

Unter den thermischen Bedingungen wurde die Haftung um 89% bei Klareis und um 46% bei Reif vermindert. Auch wurde gefunden, dass Klareis stärker als Reif auf die thermische Behandlung anspricht. Wenn nun Beschichtung und thermisches Verfahren kombiniert werden, ist die eis-phobe Beschichtung effektiver als die hydrophobe Beschichtung sowohl für Reif- wie auch für Klareis-Bedingungen.

Als zweites wird die Eis-Ablagerung untersucht [4]. Wenn man die Mengen an Eis vergleicht, die an der Profilverdekannte des Rotorblatts unter beiden (Klareis und Reif) Vereisungsbedingungen angehäuft werden, stellt man fest, dass weniger klares Eis als Reif abgeschieden wird. Die beste Eisminderungsstrategie ist die eis-phobe Beschichtung, welche die Anhäufung von Reif zu 23% und die von klarem Eis zu 5% vermindert. Es wird erwartet, dass unter vereisenden Bedingungen die eis-phobe Beschichtung die hydrophobe übertrifft. Die effektivste thermische Minderungsstrategie unter Klareis Bedingungen reduziert die Eisansammlung um 37%. Unter Reif-Bedingungen ist die Anhäufung nicht signifikant reduziert. Wenn beide Methoden, d.h. Beschichtung und thermische Behandlung, kombiniert werden, wird Folgendes gefunden: Für Klareis ist die eis-phobe Beschichtung am günstigsten und die Akkumulation wird um 83% verringert. Für Reif-Bedingungen ist ebenfalls die eis-phobe Beschichtung besser und die Akkumulation wird um 78% verringert.

Offensichtlich haben beide Minderungstechniken, die thermische und die Oberflächenbeschichtung, unabhängig voneinander signifikante Effekte im Reduzieren von Eisakkumulationen an Profilverdekannten von Rotorblättern. Jedoch zeigt die Kombination von thermischen- und Beschichtungsverfahren die grösste Reduktion der Eisakkumulation.

Darum wird als Minderungsstrategie für Reif oder Klareis die Verwendung einer eis-phoben Beschichtung zusammen mit thermischen Verfahren empfohlen. Diese Strategie ist auch effektiv im Verringern der Adhäsionskräfte.

Eine andere Studie über die Anti-Eis-Wirkung von Beschichtungen für Rotorblätter von Windkraftanlagen untersuchte vier verschiedene, kommerziell erhältliche Beschichtungen [8]. Die Beschichtungen wurden auf den Flügel aufgebracht, welcher dann mit unterkühlten Wassertropfen in einem Windkanal bei drei verschiedenen Temperaturen besprüht wurde. Die Beschichtungen bestanden aus einem wasserabweisenden Lack, zwei super-wasserabweisenden Lacken und einer Anti-Eis-Beschichtung, wie sie für Flugzeuge verwendet wird. Polyurethanharz-Lack wurde auf eine Testsektion als Kontrolle aufgetragen. Belastungstests wurden rasch nach dem Vereisen durchgeführt, um die Adhäsionskraft der Eisansammlungen aus dem Windkanal zu bestimmen. Unter vereisenden Bedingungen, d.h. unterhalb des Gefrierpunktes, schlug sich Eis immer an der vorderen Rotor-kante ab, ungeachtet der Temperatur oder der Beschichtung. Mit Belastungstests wurde die Adhäsionskraft der Eisbeschläge auf die Oberfläche bestimmt. Die minimale Adhäsionskraft wurde für die wasserabweisende Beschichtung gemessen. Es wurde gefunden, dass die Adhäsionskraft von Eis an die wasserabweisende Beschichtung fast halb so gross war wie an die anderen Beschichtungen.

Folgende Schlussfolgerungen wurden von den Autoren aus den Versuchen gezogen [8]:

- Die Vereisung von Rotorblättern nur durch Beschichtungen verhindern zu wollen ist nicht realistisch.
- Die Adhäsion von Eis an die Oberfläche kann jedoch durch geeignete Beschichtungen verringert werden.
- Kombinationen von Beschichtungen mit enteisenden oder Anti-Eis Geräten (wie z.B. Heizungen) sollten in Betracht gezogen werden.

[1] N. Bose, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 45 (1) (1992), 75-78.

[2] A.D. Fitt and M.P. Pope, Acta Mechanica 147 (1-4) (2001) 73-86.

[3] D.L. Loughborough, Aeronautical Engineering Review 11 (2) (1952) 29-34.

[4] Icing characteristics and mitigation strategies for wind turbines in cold climates. A.G. Kraj and E. L. Bibeau, Renewable Energy 2006, Makuhari, Chiba Japan Oct. 9-14, 2006.

[5] www.wearlon.com

[6] ANTI-ICING MATERIALS INTERNATIONAL LABORATORY (AMIL), Kanada

[7] www.thermion.com

[8] The effect of anti-icing paint on the adhesion force of ice accretion on a wind turbine blade. S. Kimura et al., BOREAS VI, Pyhäntunturi, Finland 9 – 11 April 2003.

6. Schmutz, Unterhalt und die Oberfläche von Rotorblättern

Die Leistungabgabe einer Windenergieanlage wird ausser durch anlagenspezifische Eigenschaften (Grösse, Regelprinzip, dynamisches Verhalten, usw.) massgeblich auch durch meteorologische Bedingungen beeinflusst. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass eine Verschmutzung der Rotorblätter durch Insekten und/oder Schmierfilme aus benachbarten Industrieanlagen das aerodynamische Verhalten des Rotorblattes negativ beeinflussen und somit zu einer geringeren Leistungsabgabe führen. Es gibt deshalb nur auf die Reinigung von Rotorblättern spezialisierte Firmen, wie z.B. die 1994 gegründete L&L Rotor-service [1].

Entsprechend den Angaben von L&L Rotor-service erfolgt die Reinigung der Rotorblätter mit einem Arbeitskorb, der von einem Autokran hochgezogen wird. Das Rotorblatt wird dabei in eine dem Mast parallele Stellung gebracht. Während des Hochfahrens wird das Rotorblatt mit einem Spezialreiniger eingesprüht. Anschliessend wird das Rotorblatt von oben mit Schwämmen per Hand bis zur Rotorblatt-Spitze gereinigt. Dieses Verfahren wird auf beiden Seiten aller drei Rotorblätter angewendet. Ein geeignetes Reinigungsmittel, welches alle Anforderungen an die Rotorblattreinigung und den Oberflächenschutz erfüllt, musste neu entwickelt werden. Hierbei handelt es sich um ein Reinigungsmittel, welches zu über 90% biologisch abbaubar ist. Genauere Angaben sind von der Firma L&L Rotor-service nicht zu bekommen. Diese Firma bietet auch Rotorblatt-Wartungskonzepte an. Sie empfiehlt die regelmässige Überprüfung der Rotorblätter alle ein bis zwei Jahre und standortabhängig eine Reinigung und spezielle Versiegelung der GFK-Oberflächen mit einem umweltverträglichen Spezialwachs. Eine zeitgleiche Instandsetzung von kleineren Oberflächenschäden ist in ihrem Servicepaket dabei. Leider gibt die Firma keinerlei Auskünfte über die Zusammensetzung der von ihr verwendeten Produkte. Interessant wäre z.B., was für eine Versiegelung für die Rotorblätter verwendet wird.

Wie die BS Rotor Technic [2] meldet, hat sie für Rotorblätter und Türme ein innovatives Verfahren entwickelt, welches die Haftung von Schmutz und Eis verhindert. Die neue Beschichtung orientiert sich am Vorbild des so genannten Lotus-Blatt-Effektes (easy to clean). Die Beschichtung versiegelt die Oberfläche. Sie ist ausserdem seewasser- sowie salzluftresistent. Das Wasser perlt von der Oberfläche ab und die Verschmutzung wird gleich mit abgewaschen. Das wirkt sich besonders günstig bei Offshore-Anlagen aus. Zusätzlich verringert sich durch die neue Beschichtung der Luftwiderstand. Windkraftanlagen können so wirtschaftlicher betrieben werden. Hinzu kommt, dass die Beschichtung besonders langlebig ist. Einen Schutz von mindestens sechs Jahren, verspricht der Northeimer Fachbetrieb für Reparatur und Wartung von Rotorblättern. Weitere Vorteile sind die Abrieb-, Stoss- und Kratzbeständigkeit der Beschichtung. Und sie bietet einen erhöhten Schutz des empfindlichen Gelcoat sowie UV-Strahlenschutz. Doch auch viele Chemikalien und organische Lösungsmittel greifen die Beschichtung nicht an. Besonderen Wert legt die BS Rotor Technic auf die Ergiebigkeit der Beschichtungslösung. 50 qm Fläche sind mit nur einem Liter zu versiegeln. Die BS Rotor Technic ist seit Juli 2003 in Northeim tätig. Das Unternehmen entwickelt Lösungen für die Windkraftbranche.

In einem Versuch wurden zwei Windkraftanlagen verglichen, eine gereinigte und eine, die nicht gereinigt wurde [3]. Als Ergebnis des Vergleichs der beiden Windenergieanlagen lässt sich feststellen, dass unter den gegebenen Verhältnissen eine Rotorblattreinigung in diesem Fall kurzfristig eine maximal ca. zweiprozentige Verbesserung der Leistung einer Windenergieanlage ergibt. Diese Ergebnisse gelten nur für diese Messung und sind nicht ohne weiteres auf andere Anlagen übertragbar. Für zukünftige Vermessungen zur Bestimmung des Einflusses einer Rotorblattreinigung sollte das Mass der Verschmutzung (z.B. Schmutzschichthöhe an ausgewählten Stellen des Blattes) mitaufgezeichnet werden. Es ist ausserdem zu empfehlen, Anlagen zu vergleichen, die bereits länger in Betrieb gewesen sind und eine sehr starke Verschmutzung aufweisen. Auch wenn eine Rotorblattreinigung grösstenteils bereits vom Regen durchgeführt wird, so liegt der Vorteil einer Reinigung durch qualifiziertes Personal vor allem darin, mögliche Schäden frühzeitig erkennen und beheben zu können und damit die Lebensdauer des Rotorblattes zu erhalten. Wenn dann noch Kosten für die Reinigung und Inspektion durch den kurzfristig erhöhten Energieertrag infolge gereinigter Blätter teilweise kompensiert werden, ist eine Reinigung und Inspektion insbesondere am Ende der Garantiezeit sicher für viele Betreiber lukrativ.

Gemäss anderen Quellen [4] wird für unsere Breitengrade keine regelmässige Flügelreinigung empfohlen, weil der Nutzen die Kosten nicht rechtfertigt. Wenn es bei rotierender Maschine regnet, würde ein gewisser Reinigungseffekt auftreten.

[1] <http://il-rotorservice.de/>

[2] www.bs-rotor.de

[3] C. Hinsch und D. Westermann, DEWI Magazin (9), August 1996, 50-55.

[4] Manfred Dürr, Bundesverband WindEnergie e.V., Abt. Technik / Fachgremien, (persönliche Mitteilung)

7. Materialien und Herstellungsprozesse von Rotorblättern

Rotorblätter für Windkraftanlagen gleichen im Aufbau den Flügeln von Segelflugzeugen und leichten Motorflugzeugen. Als Materialien finden vorwiegend Faser-verbundwerkstoffe wie Glasfaser-Polyester, Glasfaser-Epoxy, oder auch Holz-Epoxy Verwendung. Kohlefasern würden sich besonders eignen, denn sie weisen das beste Festigkeit/Gewichtsverhältnis aus und könnten deshalb den Wirkungsgrad von Windenergieanlagen steigern [1]. Einen Haken haben Kohlefasern jedoch: Sie sind ziemlich teuer. So verwundert es nicht, dass von rund 30'000 Rotorblättern, die 2005 weltweit installiert wurden, nur ein Bruchteil mit Kohlefasern gefertigt wurde, die Masse bestand aus Glasfasern. Zudem sind Kohlefasern ein ausgezeichneter Stromleiter und damit ein Blitzfänger. Die Rotorblätter von Windkraftanlagen im Multimegawattbereich jedoch halten die Belastungen ohne Kohlenanteil kaum stand. Daher hat selbst LM Glasfiber [2] in den Blättern für eine Fünf-Megawatt-Maschine Karbon verbaut. Aus Preis/Leistungsüberlegungen ist glasfaserverstärkter Kunststoff, kurz GFK, das Material der Wahl für Rotorblätter [3]. GFK ist ein Faser Kunststoff-Verbund aus einem Kunststoff (z.B. Polyesterharz, Epoxydharz oder Polyamid) und Glasfasern. Er ist der am häufigsten eingesetzte, langfaserverstärkte Kunststoff. GFK ist umgangssprachlich auch als Fiberglas bekannt. Glasfaserverstärkte Kunststoffe sind, insbesondere in Kombination mit duroplastischen Matrixsystemen, ein kostengünstiger Faser-Kunststoff-Verbund. Polyester ist billiger als Epoxydharz, im Rotorblattbau wurde deshalb früher meistens Polyester verwendet. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Epoxydharz die besseren Eigenschaften aufweist, deshalb wird es heute bevorzugt angewandt.

In mechanisch hochwertigen Anwendungen findet sich der glasfaserverstärkte Kunststoff ausschliesslich in der Form von Endlosfasern in Geweben und unidirektionalen Bändern [4].

Verglichen mit Faser-Kunststoff-Verbunden aus anderen Verstärkungsfasern hat der glasfaserverstärkte Kunststoff ein relativ niedriges Elastizitätsmodul. Selbst in Faserrichtung liegt er unter dem von Aluminium. Bei hohen Steifigkeitsanforderungen ist glasfaserverstärkter Kunststoff daher nicht geeignet. Ein grosser Vorteil der Glasfaser, im Verbund mit einer Kunststoffmatrix, liegt jedoch in der hohen Bruchdehnung. Diesen Vorteil kann der Glasfaserverbund besonders in Blattfedern und ähnlichen Bauteilen zur Wirkung bringen. Bei Einsatz einer geeigneten Matrix zeigt der glasfaserverstärkte Kunststoff ein ausgezeichnetes Korrosionsverhalten auch in aggressiver Umgebung. Um die Oberfläche der Rotorblätter widerstandsfähiger zu machen, wird ein Gelcoat appliziert. Als Gelcoat wird ein Hartlack bezeichnet, der als Schutzschicht auf Formteilen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen aufgetragen wird. Das Gelcoat versiegelt den GFK gegen Feuchtigkeit und schützt vor Druckschäden. Das Gelcoat besteht aus mit Kieselsäure angedicktem Kunstharz (meist ungesättigter Polyester), aber keinen Glasfasern und ist meist – wenn die Farbgebung des fertigen Teils bekannt ist – in dieser Farbe eingefärbt, um spätere Lackschäden nicht so auffällig zu machen. Falls gewünscht, sind Gelcoats in der Regel durchgehend eingefärbt. Durch die Beimengung der Kieselsäure wird die Oberfläche abriebfester als es das unbeschichtete GFK-Formteil wäre.

Für den Ertrag einer Windenergieanlage sind Rotorblätter wesentlich verantwortlich und stellen daher eine der Schlüsselkomponenten dar. Sie werden heute hauptsächlich aus glasfaserverstärktem Kunststoff gebaut, in Halbschalen-Sandwichbauweise mit Versteifungsholmen oder -stegen im Inneren. Die Sandwichbauweise ist eine Bauweise für Halbzeuge, bei der mehrere Schichten verschiedener Eigenschaften in einem Werkstoff eingebettet werden. Als Konstruktionsweise bezeichnet die Sandwichbauweise eine Form des Leichtbaus, bei dem die Bauteile aus kraftaufnehmenden Decklagen bestehen, die durch einen relativ weichen, meist leichten Kernwerkstoff auf Abstand gehalten werden. Diese Teile sind bei geringem Gewicht sehr biege- und beulsteif, da sie durch die hohen Festigkeiten in den Decklagen ein hohes Flächenträgheitsmoment besitzen. Das Kernmaterial für viele Anwendungen ausserhalb der Windenergie besteht meist aus Papierwaben (z.B. Aramidfaser), Schaumstoffen (Hartschaum) oder Balsaholz. Es nimmt nur Schubkräfte auf.

Heute werden Rotorblätter meist durch das Harzinfusionsverfahren hergestellt. Das Harzinfusionsverfahren oder RI-Verfahren (Resin Infusion) ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Matrixmaterial wie Polyester, Epoxy-Harze etc. mit Hilfe eines erzeugten Druckgefälles in eine Kavität injiziert wird. Das Druckgefälle wird mit Hilfe einer Vakuumpumpe erzeugt. Die Vakuumpumpe ist über einen Schlauch mit der Kavität verbunden und evakuiert den eingelegten Faserpreform über die so genannte Absaugseite. Der Faserpreform, der sich unter einem Vakuumsack befindet (flexible Oberform), wird durch den Umgebungsdruck komprimiert. Es wird also nur eine starre Formhälfte benötigt und es müssen keine Schliesskräfte aufgebracht werden. Auf der Angussseite wird nach dem vollständigen Evakuieren des Faserpreforms das Harz in die Kavität eingeleitet. Von dort wird es über ein Verteilsystem, das aus speziellen Schläuchen und Verteilmedien besteht, schnell über den Faserpreform hinweg verteilt. Das RI-Verfahren wird eingesetzt, um Rotorblätter von bis zu 50 m Länge in einem Schuss zu fertigen. Die Laminatqualität ist aufgrund der vollständigen Evakuierung des Faserpreforms hervorragend und die Oberfläche ist so gut wie die Form. Es können einseitig spiegelglatte Oberflächen erzielt werden. Die Oberfläche auf der anderen Bauteilseite ist durch die Struktur des Abreissgewebes gekennzeichnet. Da die Bauteile oftmals nach der Fertigung miteinander verklebt werden müssen, kann jedoch gerade eine raue Oberfläche (verursacht durch das aufliegende Abreissgewebe) für eine Klebefuge als ideal angesehen werden.

Das sind die Vorteile des RI-Verfahrens: Nur eine Formhälfte nötig; grosse Bauteile in einem Schuss wirtschaftlich herstellbar; ausgezeichnete Laminatqualität (keine Poren oder Einschlüsse); Toleranzen in engen Grenzen; Hoher Faservolumenanteil von ca. 54 %.

Die Länge von Rotorblättern reicht von wenigen Metern bis zu über 60 m. Die Kräfte in Längsrichtung werden durch je einen oder mehrere Gurte aus Glas- oder Kohlenstofffasern, die meist in die Halbschalen integriert sind, aufgenommen. Die Gurte bestehen entweder aus Endlosfasern oder unidirektionalen Gelegen. Die Rotorblätter verfügen über ein integriertes Blitzschutzsystem. Dieses wird durch eingearbeitete Aluminiumprofile oder im Inneren des Rotorblattes verlaufende Stahlseile (auch zum Bedienen der Blattspitzenbremse), die die Entladung an die Erdung des Maschinenhauses ableiten, gebildet. In der Nähe der Blattspitze (Tip)

befindet sich ein Kontaktpunkt, der mit dem Blitzschutz verbunden ist und als Einschlagpunkt für den Blitz dient. Andere Hersteller verwenden auch Blattspitzen aus Aluminium. Der Blattanschluss, auch Rotorflansch genannt, wird mit Einsätzen aus Stahl oder einem Stahlring versehen, um das Blatt an der Nabe zu befestigen. Dies erfolgt durch vorgespannte Schraubenverbindungen. Bei kleineren Rotorblättern kommen einreihige, bei grösseren sowohl einreihige als auch zweireihige Flansche zum Einsatz.

Jetzige Rotorblätter mit einer Standardlänge von rund 46 Metern wiegen pro Stück etwa acht bis neun Tonnen. Für die neuen Rotorblätter der Offshoreanlagen (Spitzenleistung cirka 5.000 kW) werden Gewichte von 20 Tonnen angesetzt.

Viele WEA-Produzenten fertigen auch ihre Rotorblätter selbst bzw. lassen sie von Tochterfirmen fertigen. Dazu zählen z.B. Vestas [5], Enercon [6] oder auch Nordex [7]. Einige kaufen Blätter zusätzlich oder ausschliesslich von Lieferanten. LM Glasfiber ist der weltgrösste Rotorblatthersteller für Windenergieanlagen [2]. LM Glasfiber hat seinen Sitz in Dänemark, produziert aber mittlerweile weltweit, unter anderem in Spanien, Indien, China und den USA. Eine weitere Firma, die nur Rotorblätter herstellt, ist die Fa. Abeking & Rasmussen Rotec GmbH & Co. Kg [8]. Sie ist eine 100-prozentige Tochter der Yachtfirma Abeking & Rasmussen. Schon seit 1926 stellt Rotec Rotorblätter her - zuerst allerdings aus Holz für Wasserpumpen - seit den 1980ern aus Kunststoff. 160 Mitarbeiter sind auf rund 30.000 Quadratmetern beschäftigt. Der Exportanteil liegt zurzeit (2006) bei 80 Prozent [4].

Unter den schlimmsten Wüstenbedingungen halten Hubschrauber-Rotorblätter nicht länger als 20 Flugstunden durch, bevor die Beschädigung durch fliegende Partikel so bedrohlich wird, dass die Blätter abmontiert und repariert werden müssen - in einem Prozess, der bis zu 160 Stunden dauern kann. Die vorgeschlagene Lösung bestand darin, ein Polyurethan-Schutzklebeband an der Blattspitze jedes der vier Rotorblätter des Hubschraubers anzubringen. Dieselben Klebebänder werden oft in Windenergieanlagen verwendet, um sie vor Partikeln, wie z.B. Hagel, zu schützen.

[1] T Kramkowski, H. Seifert, IEA-Symposium on Aerodynamics of Wind Turbines, 3./4. Dezember 1992, Stuttgart.

[2] www.lmglassfiber.com

[3] D. Hautmann, neue energie 06, (2006) 34-37.

[4] www.wikipedia.org

[5] www.vestas.de

[6] www.enercon.de

[7] www.nordex.de

[8] <http://ar-rotec.de/>

8. Von den Autoren vorgeschlagene Ansatz für anti-freeze Beschichtungen

Im Gegensatz zu den traditionellen Frostschutzmitteln wie Propylen- und Ethylenglykol, welche den Schmelz- und Gefrierpunkt in Abhängigkeit ihrer molalen Konzentration absenken, hat sich die Natur ein viel effektiveres System ausgedacht, um sich vor zerstörerischen Eiskristallen zu schützen. Frostschutzproteine (oder engl. AFP von anti-freeze protein) und Frostschutzglykoproteine (oder AFGP von engl. Anti-freeze glycoprotein) sind die Antwort, welche viele Tiere, Pflanzen und Bakterien einsetzen um zu verhindern, dass ihre Körperflüssigkeiten einfrieren, um zerstörte Zellmembranen und andere schwere Schäden vermeiden zu können. Gewisse Organismen sind dadurch in der Lage, Temperaturen von bis zu -40°C zu überstehen. Im Gegensatz zu den traditionellen Frostschutzmitteln welche rein kolligativ wirken (eine Eigenschaft, welche nur von der Teilchenzahl nicht aber von der Art bzw. der chemischen Zusammensetzung der Teilchen abhängt), wirken die Frostschutzproteine zusätzlich zum kolligativen Effekt in einer nicht-kolligativen Art und Weise (Abb. 1).

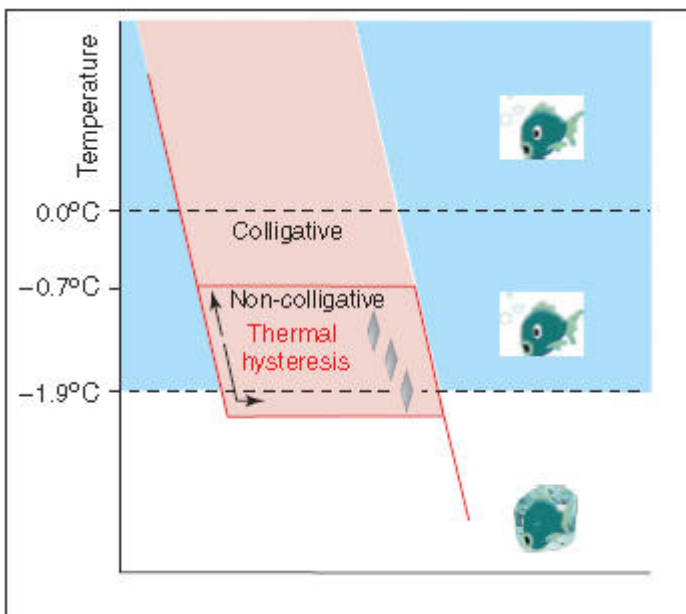


Abb. 1: Da Meerwasser erst bei -1.9°C gefriert, müssen sich die in polaren Gewässern lebenden Fische etwas einfallen lassen, damit ihre Körperflüssigkeiten nicht einfrieren. Die in ihrem Blut befindlichen, gelösten Stoffe (Salze, Zucker, Proteine, etc.) wirken hierbei genau gleich wie zum Beispiel Ethylenglykol, d.h. rein kolligativ und senken den Gefrierpunkt (aber auch den Schmelzpunkt) auf -0.7°C herab – zu wenig um den Fisch vor dem Gefrieren zu schützen. Da der Fisch aber über Frostschutzproteine verfügt, kann er sogar Temperaturen ein wenig unterhalb -1.9°C überstehen (bringt eigentlich nichts, da dann das Wasser um ihn herum gefroren wäre). Dieser Effekt der thermalen Hysterese beruht auf einem nicht-kolligativen Wirkmechanismus der nur den Gefrierpunkt, nicht aber den Schmelzpunkt (dieser bleibt unverändert bei -0.7°C) beeinträchtigt (Bild aus [1]).

Die AFP's und die AFGP's binden an die Oberflächen eines im Entstehen begriffenen Eiskristalls und verhindern, dass sich weiteres Wasser anlagern kann und so der Kristall wächst. So setzen sie den Gefrierpunkt des Wassers herab, nicht aber dessen Schmelzpunkt. Diese Differenz wird thermale Hysterese genannt und ist somit ein Mass für die Frostschutz-Aktivität eines Stoffes (man findet manchmal den Begriff thermal hysteresis protein oder kurz THP als Synonym für AFP und AFGP in der Literatur). Darüber hinaus sind die verschiedenen Frostschutzproteine in der Lage, die Morphologie des Eiskristalls zu verändern. Als Beispiel seien gewisse Fisch-Glykoproteine genannt, welche den Eiskristallen eine hexagonal-bipyramidale Form aufzwingen.

8.1. Physikalische Betrachtungen von gefrorenem Wasser (Eis)

Um den Wirkmechanismus von Frostschutzproteinen erahnen zu können (es gibt bis dato keine alles erklärende Theorie wie Frostschutzproteine im Detail funktionieren), bedarf es vorerst einiger physikalischer Betrachtungen bezüglich des Eises.

Alles natürliche Eis, wie zum Beispiel Schnee, gefrorener Tau, Reif, Raureif, Raufrost oder Raueis (alles verschiedene, natürlich vorkommende Formen von Eis), kristallisiert in einem hexagonalen Kristallsystem (Eis Ih) mit dem typischen sechsfachen rotationssymmetrischen Aussehen wie man es zum Beispiel von der Schneeflocke her kennt. Des Weiteren gibt es zahlreiche weitere morphologische Formen von Eis (kristalline und amorphe) wovon einige in Abb.2 (Phasendiagramm von Eis) gezeigt sind.

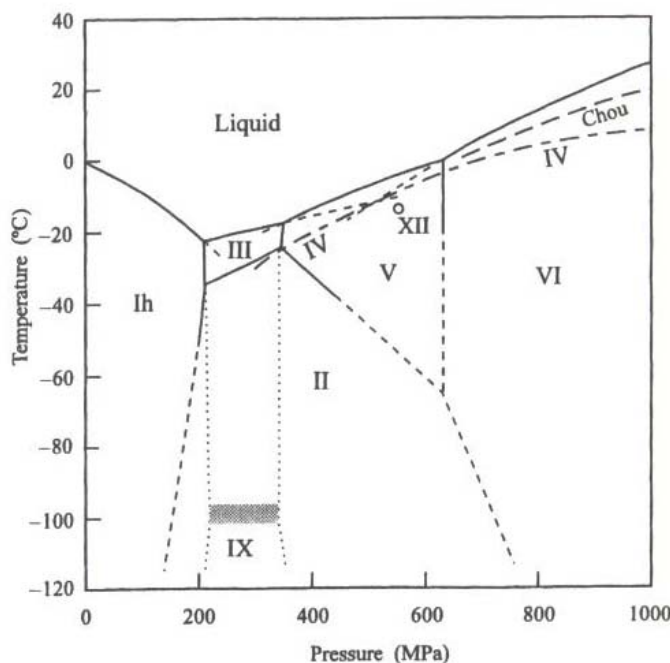


Abb.2: Das Phasendiagramm von Eis zeigt die bevorzugten Kristallmodifikationen in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Innerhalb jeder Phase ist das Material in Bezug auf seine chemische und physikalische Beschaffenheit konstant. Jede Linie stellt eine Phasengrenze dar, an welcher zwei Phasen koexistieren können. Das Phasendiagramm enthält 11 Tripelpunkte – ein weiterer nicht nachweisbarer Tripelpunkt bei 0 K kann vermutet werden – und 2 kritische Punkte (Bild aus [2]).

Beim Ih Eis schliessen sich sechs Wassermoleküle über Wasserstoffbrücken zu einem Ring zusammen, wobei jedes Molekül ebenfalls Teil von zwei benachbarten Ringen ist. Hierbei entstehen Kristallite welche aus zwei hexagonalen Basisflächen (basal facet) und sechs rektangularen Seitenflächen (prism facet) bestehen. Daraus können entweder plättchenartige oder stängelige (kolumnare) Kristalle entstehen (Abb.3).

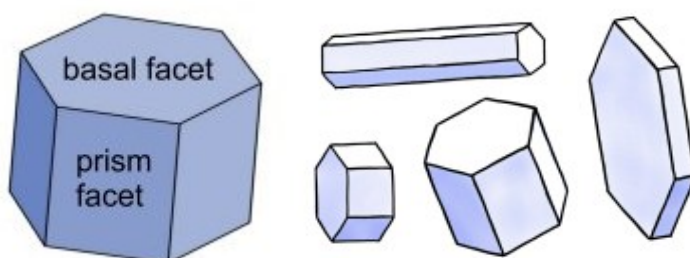


Abb.3: Die grundlegendste Form eines Eiskristalls ist ein sechseckiges Prisma. Die Kristallite können dabei eine plättchenartige oder aber eine kolumnare Form annehmen (Bild aus [3]).

Das Ih Eis besitzt eine ziemlich geöffnete Struktur (Abb.4), in der die Packungsdichte (~1/3) eher niedrig ist (ein einfaches kubisches Gitter hat eine Packungsdichte von ungefähr 1/2 und kubisch flächenzentrierte Gitter von ungefähr 3/4).

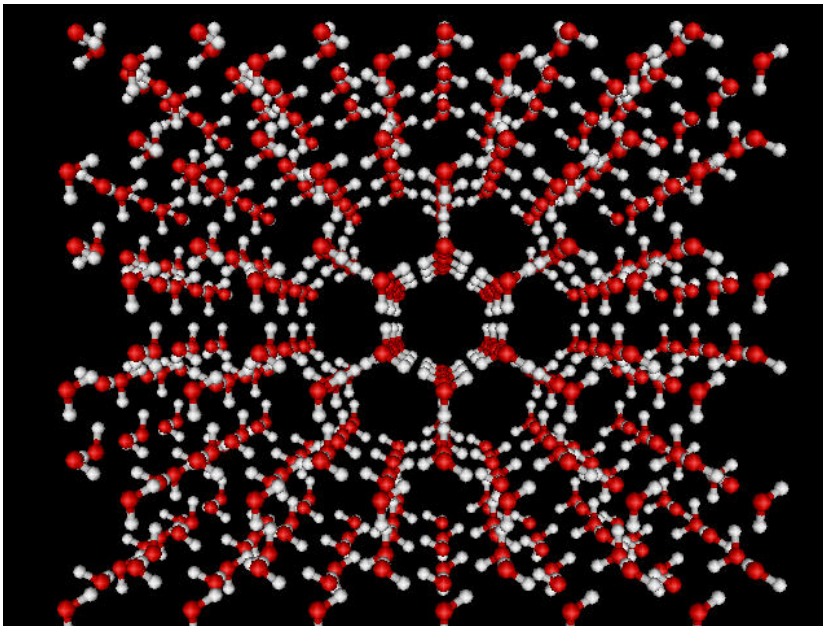


Abb.4: Aufsicht auf die Basisfläche (basal facet) eines hexagonalen Eiskristalls (Ih). Schön ersichtlich sind die sechsfache Rotationssymmetrie und der Aufbau eines solchen Gitters: Sechs Wassermoleküle schliessen sich zu einem Ring zusammen, wobei jedes Molekül an zwei benachbarten Ringen angrenzt. Die löchrige Struktur macht die geringe Packungsdichte von nur einem Drittel pro Elementarzelle ersichtlich.

Im Allgemeinen wird die Kristallisation von Eis durch so genannte Keimbildner (Staubpartikel, rauhe Oberflächen, etc.) erleichtert, da sich das Wasser an sie anlagern kann. Reines Wasser kann bis -23°C oder mehr abgekühlt werden ohne zu gefrieren. Sind überhaupt keine Keimbildner vorhanden, gefriert Wasser erst bei -40°C (unter Normaldruck = $101'325\text{ Pa}$) - man spricht in diesem Fall von homogener Eisnukleation. Daraus lässt sich ableiten, dass wenn Wasser oberhalb -40°C gefriert, Keimbildner die Eisnukleation initiiert haben (heterogene Nukleation). Der Grund für dieses bemerkenswerte Phänomen liegt an der Tatsache, dass das Kristallwachstum erst ab einer gewissen Grösse energetisch sinnvoll ist. Bei -5°C müssen sich etwa $50'000$ Wassermoleküle geordnet zusammenlagern, bevor der Eiskristall stabil ist und weiter wachsen kann. Bei -20°C müssen es immer noch einige hundert sein und zufällige Anhäufungen dieser Grösse sind eher unwahrscheinlich. Generell ist das Wachstum eines Kristalls nur dann erlaubt, wenn die freie Enthalpiedifferenz (ΔG) negativ ist (jedes System versucht seinen Energieinhalt zu minimieren). Die Bildung von Eiskristallen besteht aber aus zwei konkurrierenden Termen: Dem thermodynamisch begünstigten Volumenanteil ($\Delta G_{\text{Volumen}}$) steht die Arbeit gegenüber, die aufgebracht werden muss, um neue Oberflächen zu bilden ($\Delta G_{\text{Oberfläche}}$).

$$\Delta G = \Delta G_{\text{Volumen}} + \Delta G_{\text{Oberfläche}} \propto -\frac{4\pi r^3}{3} + 4\pi r^2 \quad (1)$$

Da sich aber bei immer grösseren Kristallen das Volumen zu Oberfläche Verhältnis ändert (es wird grösser), nimmt der Volumenanteil der freien Enthalpie überproportional zu und das Kristallwachstum wird energetisch möglich (Abb.5). Folglich überwiegt bei sehr kleinen Kristallen der Oberflächenterm, weshalb man hier von kinetisch gehemmtem Kristallwachstum spricht. Die Anwesenheit von Kristallisationskeimen umgeht diese kinetische Hemmung.



Abb.5: Die grüne Kurve stellt den Oberflächenterm der freien Enthalpie, die blaue Kurve den Volumenteil dar. Die Summe (violette Kurve) beschreibt den energetischen Verlauf des Kristallwachstums, der erst ab einer gewissen kritischen Keimgröße r^* freiwillig abläuft (ist r^* überschritten, besteht zur Energieminimierung nur noch die Möglichkeit des Wachstums).

8.2. Mögliche Eisbindungs- und Wirkmechanismen von Frostschutzproteinen

Die Frostschutzproteine weisen zum normalen, kolligativen, der jeder Substanz inne ist, zusätzlich einen nicht kolligativen Effekt auf. Dieser aussergewöhnliche Effekt wurde das erste Mal 1953 entdeckt und ist bis heute nicht im Detail verstanden, nicht zuletzt daher, weil die verschiedenen Frostschutzproteine eine teilweise total verschiedene Struktur aufweisen (α -Helix, β -Faltblatt und weitere) und deshalb auch verschieden mit Wasser und Eis interagieren. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Theorien welche alle Stärken aber auch Schwächen aufweisen.

8.2.1. Kolligatives Phänomen

Bei idealen, verdünnten Lösungen ist die Ursache der resultierenden Gefrierpunktserniedrigung die Erniedrigung des chemischen Potentials des Lösungsmittels. Für ein solches System bestehend aus einem Lösungsmittel a und einem gelösten Stoff b, berechnet sich die Gefrierpunktserniedrigung nach (2):

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{RT_0^2}{\Delta H_m} x_b \quad (2)$$

Hierbei ist T_0 der Gleichgewichtsgefrierpunkt von Wasser (273,15 K), R die molare Gaskonstante ($8,314472 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), ΔH_m die molare Schmelzwärme für Wasser ($6009,5 \text{ J mol}^{-1}$) und x_b der Stoffmengenanteil der gelösten Substanz b an der Ge-

samtmischung (dimensionslos). Es ist zu beachten, dass bei Salzen (z.B. NaCl), welche vollständig dissoziieren, alle Kationen und Anionen als eigenständige Teilchen gerechnet werden müssen. Bei nicht idealen Lösungen wird (2) durch einen Korrekturterm χ (dimensionslos) erweitert, welcher eine Art Feststoff-Lösungs-Interaktions-Parameter darstellt. Aus (2) wird dann (3):

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{RT_0^2}{\Delta H_m} \left[x_b - \left(\chi - \frac{1}{2} \right) x_b^2 \right] \quad (3)$$

Handelt es sich bei der gelösten Substanz b um ein Polymer mit m Wiederholungseinheiten, so wird aus dem Feststoff-Lösungs-Interaktions-Parameter χ , der sich berechnen lässt, eine experimentelle Grösse namens Polymer-Lösungs-Interaktions-Parameter (gleiches Symbol wie beim Feststoff-Lösungs-Interaktions-Parameter). Aus (3) wird (4):

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{RT_0^2}{\Delta H_m} \left[\frac{x_b}{m} - \left(\chi - \frac{1}{2} \right) x_b^2 \right] \quad (4)$$

8.2.2. Inhibierung des Kristallwachstums auf Grund des Gibbs Thomson (Kelvin) Effektes

Man hat beobachtet, dass Kristallite welche eine durch Frostschutzproteine teilweise besetzte Oberfläche haben, eine unebene, gewellte Oberfläche besitzen (Abb.6a und Abb.6b). Dies ist energetisch betrachtet ungünstig, da in diesem Fall auf Grund der verminderten Anzahl Nachbaratome im Kristallverbund die Kohäsionskräfte abnehmen und so die Geschwindigkeitskonstante (k_{-1}) der Rückreaktion grösser wird, was wiederum, bei gleichbleibender Geschwindigkeitskonstante der Hinreaktion (k_1), das Gleichgewicht zwischen fest und flüssig bei gegebener Temperatur verändert. Dies führt auf Grund einer Verminderung von ΔG zu einer Gefrierpunktserniedrigung (5).

$$\Delta G = -RT \ln K = -RT \ln \frac{k_1}{k_{-1}} \quad (5)$$

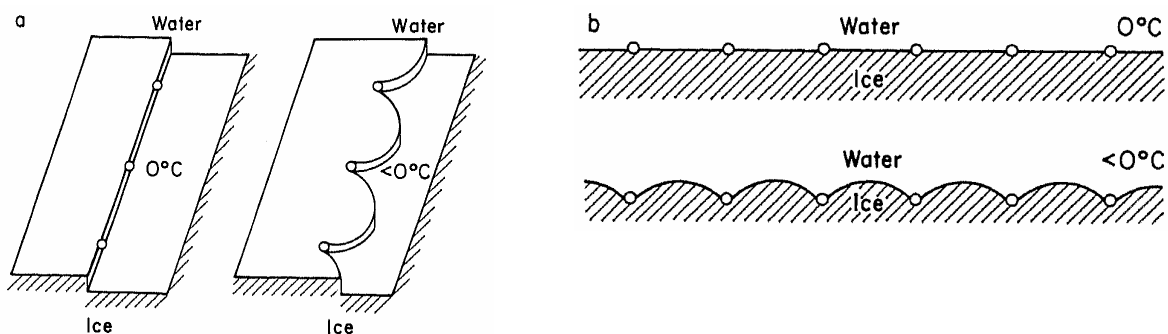


Abb.6a und Abb.6b: Gezeigt sind zwei verschiedene Morphologien der Eisoberfläche. Die kleinen Kreise symbolisieren Frostschutzproteine welche an die Oberfläche gebunden sind. In a wird das Stufenwachstum verändert, in b tritt eine Veränderung der Morphologie in z-Richtung auf. Beide Fälle haben ein gekurvtes Profil eigen, welches auf Grund des Gibbs-Thomson (Kelvin) Effektes zu einer Gefrierpunktserniedrigung führt (Bilder aus [4]).

Es hat sich aber gezeigt, dass der Gibbs-Thomson (Kelvin) Effekt alleine nicht im Stande ist, die gemessene Gefrierpunktserniedrigung zu beschreiben. Die Gefrierpunktserniedrigung lässt sich mit (6) berechnen:

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{2V_m \gamma T_0}{r \Delta H_m} \quad (6)$$

Hierbei ist V_m das molare Volumen von Eis ($19,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$), γ die isotropische Oberflächenenergie (J m^{-2}) und r der Radius in Meter (m).

8.2.3. Reversibles Adsorptions-/Desorptions Gleichgewicht

Ein weiteres Model bedient sich ebenfalls des Gibbs-Thomson (Kelvin) Effektes, verfeinert dieses aber mit der Tatsache, dass Frostschutzproteine nicht irreversibel an Eisflächen adsorbieren. Zur Beschreibung des Adsorptions-/Desorptions Gleichgewichtes wurde eine modifizierte Langmuir Adsorptionsisotherme verwendet und das Gibbs-Thomson (Kelvin) Model damit erweitert (7).

$$(7) \quad \Delta T = T_0 - T = \frac{2V_m \gamma T_0}{r \Delta H_m} = \frac{4V_m \gamma T_0}{[\sqrt{N_e} - (2b / \pi)] \Delta H_m}$$

Bei diesem Model stellt man sich die Frostschutzproteine als zylindrische Stäbchen vor. Dabei ist b die Länge der Stäbchen (in Meter) und N_e ist die Adsorptionsfläche (in m^2) welche belegt wird. Allerdings konnte gezeigt werden, dass dieses Model ebenfalls nicht allein im Stande ist, die Parameter zu identifizieren, welche für die Gefrierpunktserniedrigung der Frostschutzproteine verantwortlich sind.

8.2.4. Weitere Modelle

Ein anderes Model verfährt etwa gleich wie das reversible Adsorptions-/Desorptions Gleichgewichtsmodel, verwendet aber an Stelle von Langmuir ein Adsorptionsmodel nach Flory-Huggins. Dieses Model, welches für Polymere entwickelt wurde, wird nun für die Frostschutzproteine angewandt, auch wenn die Proteine nicht die gleiche Beweglichkeit besitzen wie unvernetzte Polymerknäuel.

8.3. Übertragung des „Anti-freeze“-Konzeptes auf Oberflächen

Momentan werden die Frostschutzproteine oder deren Abkömmlinge (z.B. Polymere mit gefrierpunktserniedrigender Wirkung) nur wenig eingesetzt. Es wird untersucht, ob Frostschutzproteine helfen können, Tiefkühlprodukte länger haltbar zu machen. Ein konkretes Beispiel ist Eiscreme. Hier soll verhindert werden, dass

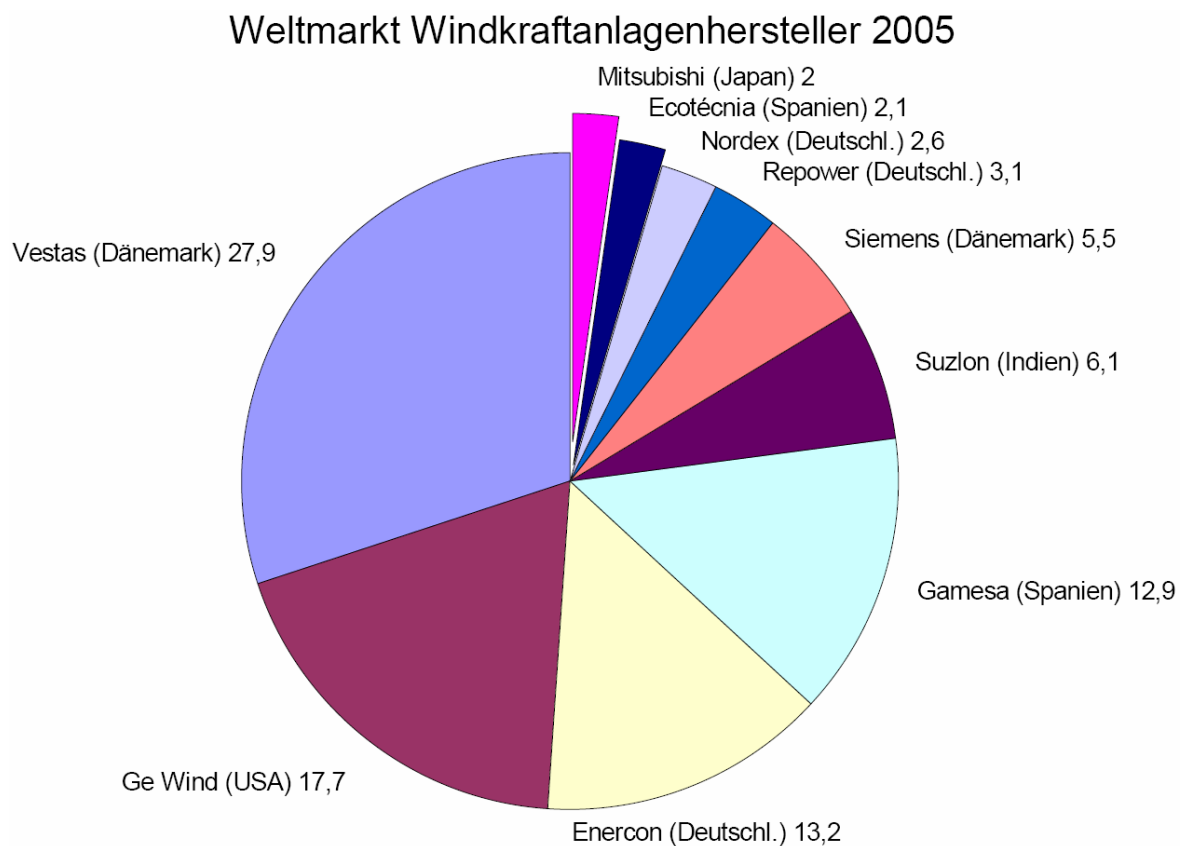
das Eis rekristallisiert und so seine cremige Konsistenz verliert. Ebenfalls von Interesse ist die Haltbarmachung von lebenden Organen oder gar von ganzen Organismen (in Funktion als so genannte Kryoprotektiva). Auf Oberflächen gibt es bis heute keine Anwendungen welche das Prinzip der Frostschutzproteine verwenden. Es gibt zwar Beschichtungen welche „icephobic“ sein sollen (manchmal werden solche Beschichtungen auch als „Anti-freeze“-Beschichtungen bezeichnet), die aber nur die Adhäsion zwischen Schicht und Eis herabsetzen. Ein solcher Ansatz kann niemals eine zufriedenstellende Lösung sein, da die Bildung von Eis nach wie vor geschieht. Ein Aufbringen von Frostschutzproteinen resp. von Substanzen mit ähnlicher Wirkung aber höherer Persistenz (z.B. Polymere) kann hingegen einen möglichen Weg darstellen, wie die Bildung von Eis tatsächlich verhindert werden kann. Die Eisbildung würde dann erst bei wesentlich tieferen Temperaturen einsetzen. Einen möglichen Ansatz für ein solches System sind hydrophile Polymere (Nanoschichten), welche auf eine Oberfläche aufgetragen werden könnten.

- [1] Jia Z.; Davies P.L.; TRENDS in Biochemical Sciences (2002), 27(2), 101-106.
- [2] Petrenko, V.F.; Withworth R.W. Physics of Ice. Oxford University Press Inc., New York (1999).
- [3] November 2006: <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/>
- [4] Yeh Y.; Feeney R.E.; Chemical Reviews (1996), 96(2), 601-618.

9. Know-how Träger auf der Welt, in Europa, und in der Schweiz

Zuerst wird eine Zusammenstellung der weltweit wichtigsten Windeenergieanlagenhersteller aufgeführt, dann folgt eine Liste der europaweit tätigen Hersteller von Rotorblättern und Zulieferer für die Rotorblattherstellung. Schliesslich wird eine Zusammenstellung aller Firmen und Institutionen, die sich mit Windenergie in der Schweiz befassen, aufgelistet.

Abschliessend folgt eine Aufstellung von Forschungsinstituten, die sich mit den Fragestellungen um die Vereisung von Rotorblättern befasst.



Weltmarkt Marktanteile Windkraftanlagenhersteller (2005). Alle Zahlen in Prozent [wikipedia].

9.1. Die wichtigsten Windenergieanlagenhersteller, alphabetisch geordnet

Die Aufzählung ist nicht abschliessend, enthält aber die weltgrössten Anbieter.

- **Enercon (Deutschland)**
Die Enercon GmbH ist der grösste deutsche Hersteller von Windenergieanlagen mit Stammsitz in Aurich (Ostfriesland). Das 1984 vom heutigen Inhaber Aloys Wobben gegründete Unternehmen beschäftigt weltweit über 8.000 Mitarbeiter und hatte 2004 einen Umsatz von 1,2 Milliarden Euro. Mit mehr als 9.000 installierten Windenergieanlagen in über 30 Ländern zählt ENERCON auch international zu den führenden Herstellern. Beispielhaft für die neueste technologische Innovation ist die im Jahr 2004 eingeführte neue Rotorblattgeometrie, die die Ertragswerte signifikant erhöht, die Schallemission verringert und die auf die Windenergieanlage einwirkenden Lasten reduziert.
- **Fuhrländer AG (Deutschland)**
Fuhrländer beschäftigt 200 Mitarbeiter bei einem Umsatz von 48 Mio. Euro. Mit einer breiten Anlagenpalette - sie fertigen aktuell Anlagen von 30 kW bis 2,5 MW - haben sie für jeden Standort die passende Windenergie-Anlage im Programm. Besonders auch unter schwierigen Windverhältnissen beweisen sich ihre robusten Systeme.
- **Gamesa (Spanien)**
Mit 3'389 Mitarbeitern erreichte Gamesa einen Umsatz von 1'311 Mio. Euro im Jahr 2005. Gamesa ist ein bedeutender Hersteller und Lieferant von hoch entwickelten Produkten, Anlagen und Diensten in den Bereichen Luftfahrt und Erneuerbare Energien. Gamesa produziert Windturbinen, plant, entwickelt, errichtet und betreibt Windparks.
- **GE Energy, Atlanta (USA)**
GE Energy ist einer der führenden Verkäufer von Windturbinen mit einem Umsatz von 2,273 Milliarden Euro. GE stellt auch fortgeschrittene Rotorblätter her, die höchste Qualität und modernstes Design vereinen.
- **Nordex (Deutschland)**
Unter dem Markennamen Nordex werden starke Windturbinen für fast alle geographischen Regionen rund um den Globus angeboten. Nordex beschäftigt 700 Mitarbeiter mit einem Umsatz von 308 Mio. Euro.
- **REpower (Deutschland)**
REpower entwickelt die weltweit grösste Windenergieanlage. Die Entwicklung der Anlage wird vom Land Schleswig-Holstein und der Europäischen Union unterstützt. REpower hatte 2005 einen Umsatz von 328 Mio. Euro und beschäftigte 631 Mitarbeiter.
- **Siemens Wind Power (Dänemark)**
Durch den Kauf der dänischen Firma Bonus Energy wurde Siemens zu einem der weltführenden Verkäufer von Windenergiesystemen. Siemens Wind Power beschäftigt 195 Mitarbeiter und erwirtschaftete einen Umsatz von 700 Mio. Euro.
- **Suzlon (Indien)**
Bei Beginn dieses Jahrtausends hielt Suzlon den grössten Marktanteil in Asien und bewegte sich in den zehn weltgrössten Firmen, mit einem Um-

satz von 780 Mio. Euro. Suzlon ist gegenwärtig der fünftgrösste Windturbinenhersteller der Welt und hat einige der grössten Windparks in Asien entwickelt.

- Vestas (Dänemark)

Die dänische Vestas Wind Systems A/S ist der weltgrösste Hersteller von Windenergieanlagen mit einem Umsatz von 3,583 Milliarden Euro. In Deutschland ist das Unternehmen in Husum, Osnabrück, Zwickau und Lauchhammer (Rotorblattfertigung) tätig.

- WinwinD (Finnland)

WinWinD hat eine ein- und drei Megawatt Windturbine basierend auf einer "low-speed" Technologie entwickelt. Die wichtigsten Vorteile sind Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. WinwinD erwartet einen Umsatz von 45 Mio. Euro für 2006.

9.2. Rotorblatthersteller und ihre Zulieferer europaweit, alphabetisch geordnet

a) Abeking & Rasmussen ROTEC GmbH & Co. KG (Deutschland)

Stellt nur Rotorblätter her und ist eine 100-prozentige Tochter der Yachtfirma Abeking & Rasmussen. 160 Mitarbeiter werden derzeit auf einer Produktionsfläche von 30.000 m² beschäftigt. Das Leistungsspektrum umfasst die Produktion von Rotorblättern für Windkraftanlagen von 5 kW bis 6 MW Nennleistung sowie den Modell- und Formenbau in den unterschiedlichsten Bereichen.

b) BERGOLIN GmbH & Co.KG (Deutschland)

Liefert Beschichtungen im Bereich der Rotorblatffertigung. Sie verfügen derzeit über ein Komplett-System auf Polyurethan-Basis, welches wahlweise mit lösemittelhaltigem oder wasserbasierendem Decklack endbeschichtet werden kann. Im Bereich schmutzabweisende und eisabweisende Oberflächen verfügen sie über keine Produkte in ihrem aktuellen Lieferprogramm, jedoch erforschen sie Möglichkeiten auf diesem Sektor. Derzeit beschäftigt Bergolin 130 Mitarbeiter und erwirtschaftete 2002 einen Umsatz von 22 Mio. Euro.

c) CMC Klebetechnik GmbH (Deutschland)

Beschäftigen 100 Mitarbeitende und sind Hersteller von selbstklebenden Polyurethanfolien, die zum Einsatz als Erosion- und Steinschlagschutz, z.B. an den Rotorblattkanten, kommen.

Es handelt sich dabei um UV-beständige Materialien.

d) Gaugler + Lutz oHG (Deutschland)

Produziert im Kunststoffbereich. Airex® T90 ist ein thermoplastischer, struktureller Hartschaumstoff, speziell geeignet für alle Arten von Harzen und Laminierungsprozessen. Übertreffende mechanische und chemische Eigenschaften machen ihn zu einem Material, das u.a. auch im Schiffbau und sogar für hoch belastete Bauteile wie Rotorblätter von Windkraftanlagen verwendet werden kann.

e) Henkel Teroson GmbH (Deutschland)

Zu ihrem Produktprogramm gehören Dicht- und Klebstoffe sowie Beschichtungsmaterialien und Produkte zur Körperschalldämmung. Im Bereich der Windenergie beschäftigen sie sich unter anderem mit Abdichtungen wie zum Beispiel die Abdichtung der Stahlturm-Segmente, der Querbolzen am Rotorblatt, mit Abdichtungen von Kabeldurchführungen und der Trennfugen im Gondelgehäuse. Auch für Beschichtungen der Rotorblätter können sie mit ihren Produkten eine Lösung bieten.

f) LM Glasfiber (Dänemark)

ist der weltgrößte und einzige globale Rotorblatthersteller für Windenergieanlagen. LM Glasfiber produziert weltweit, unter anderem in Spanien, Indien, China und den USA. Besitzt 8 Fabriken in 6 Schlüsselmärkten und hat über 86'000 Rotorblätter hergestellt. Hat 20 Kunden weltweit, einschliesslich 8 der zehn weltgrößten Windenergieanlagenherstellern. Im Jahr 2005 hat LM Glasfiber einen Umsatz von 331 Mio. Euro mit 3'200 Angestellten erwirtschaftet.

g) Mankiewicz Gebr. & Co. (Deutschland)

Ist ein weltweit führender Hersteller hochwertiger Lacksysteme für die industrielle Serienfertigung in den Geschäftsbereichen Allgemeine Industrie, Luftfahrt- und Automobilindustrie. Hohe Beständigkeitseigenschaften, optisch ansprechende Oberflächen und rationelle Lackierprozesse sind Anforderungen, welche die Lacksysteme von Mankiewicz Gebr. & Co. erfüllen. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Windkraftanlagen steigen auch die Ansprüche an die Werkstoffe. Beständigkeiten gegen Abrasion und Erosion durch Witterungseinflüsse sind ebenso wichtig wie die Dauerelastizität und der Verbund mit dem Laminat.

Produkte - Langzeitschutz für Rotorblätter:

SEEVENAX®-Gelcoat, ALEXIT®-Processcoat und witterungsbeständiger ALEXIT®-Gelcoat, die einen extrem guten Verbund mit dem Laminat sicherstellen und die die entsprechenden Kundenspezifikationen erfüllen. Lösemittelarme ALEXIT®-Lacksysteme, für hoch witterungs- und abrasionsbeständige Deckschichten oder farbige Markierungen mit geringer Verschmutzungsneigung.

h) 3M (Deutschland)

Unter den aggressivsten Bedingungen halten Hubschrauber-Rotorblätter nicht länger als 20 Flugstunden durch, bevor die Beschädigung durch fliegende Partikel so bedrohlich wird, dass die Blätter abmontiert und repariert werden müssen. Die von 3M vorgeschlagene Lösung besteht darin, ein Polyurethan-Schutzklebeband an der Blattspitze der Rotorblätter anzubringen. Dieses Klebeband wird auch für Rotorblätter von Windenergieanlagen verwendet.

i) NOI-Rotortechnik GmbH (Deutschland)

Produziert Rotorblätter für Windkraftanlagen in einem Betrieb mit 80 Mitarbeitern.

j) RELIUS COATINGS GMBH & Co. KG (Deutschland)

Seit über 100 Jahren entwickelt und produziert RELIUS hochwertige Oberflächenbeschichtungen aller Art. Für verschiedenste Untergründe und Anwendungen bieten sie die objektspezifische Lösung. Gemeinsam mit europäischen Tochter- und Schwestergesellschaften präsentiert sie sich unter dem Dach des Degussa-Konzerns.

Rotorblätter:

Bereits seit über sechs Jahren werden Rotorblätter mit dem lösemittelfreien Polyurethan-Gelcoat-System von RELIUS beschichtet. Mittlerweile drehen sich ca. 5.000 Rotorblätter im Wind. Ihre Rotorblattbeschichtung verbindet Funktion und umweltfreundliche Aspekte. Die einzelnen Komponenten Gelcoat, Spachtel und Decklack sind exakt auf einander abgestimmt und sind an die verschiedensten Fertigungsabläufe angepasst. Ob in eine Negativ-Form oder per Spritzapplikation auf einen vorgefertigten Flügel, die Anforderungen werden erfüllt.

k) Saint-Gobain (Frankreich)

Saint-Gobain liefert Glasfasern für Rotorblätter.

9.3. Firmen und öffentliche Einrichtungen in der Schweiz auf dem Gebiet Windenergie [1]

9.3.1. Hersteller

l) ABB

Entwicklung und Produktion von elektrischen Komponenten für Windkraftanlagen (Generatoren, Umrichter, Netzanbindung). Weltweit tätiges Unternehmen.

m) Alcan Airex AG

Alcan Airex produziert geschlossenzelligen Spezialschaumstoff u.a. als Sandwich-Kernmaterial für Rotorblätter; Hauptabnehmer ist Vestas, einer der weltgrössten Anlagenhersteller. Weltweit tätiges Unternehmen mit Hauptsitz in Sins (CH). Umsatz: 150 Mio. CHF mit 216 Mitarbeitern.

n) Alstom

Entwicklung und Produktion von elektrischen Komponenten für Windkraftanlagen (Generatoren, Umrichter, Netzanbindung). Weltweit tätiges Unternehmen.

o) Aventa AG

Entwicklung, Bau und Installation der so genannten Leichtwindanlage AV-7 (6.5 kW). Die Aventa AG hat in der Schweiz bis Ende 2003 10 Anlagen installiert. Schweizer Unternehmen mit Sitz in Winterthur.

p) Blatec Blade Technologies AG, Sarnen

Ist Hersteller von Rotorblättern für Windkraftanlagen in leichter Bauweise unter Verwendung von Kohlefasern oder Glasfasern, die sich mit Sensoren und Rotor-Reglern den jeweiligen Windverhältnissen anpassen. (Es ist nicht klar ob diese Unternehmen noch operativ tätig ist.)

q) Drivetek

Entwickelt und produziert Antriebssysteme (Generatoren und Umrichter) für Windkraftanlagen bis ca. 100 kW. Schweizer Unternehmen mit Sitz in Port.

r) Elmotec

Entwickelt und produziert permanenterregte Generatoren für Windkraftanlagen bis 500kW. Schweizer Unternehmen mit Sitz in Kleindöttingen.

s) Flender AG

Forschung/Entwicklung, Konstruktion von Antriebssystemen für Windkraftanlagen (Getriebe, Kupplung, Generator und Umrichter); Montage von Windkraftgetrieben sowie Prüfung der Getriebe auf eigenen Prüfständen. Weltweiter Marktleader. Weltweit tätiges deutsches Unternehmen mit einer Niederlassung in Lenzburg. Der Bereich Windenergie wird von der Tochter Winergy AG mit Hauptsitz in Bocholt/D bearbeitet.

t) gmb elektrische Maschinen AG

Entwicklung und Produktion von elektrischen Neumaschinen insbesondere permanenterregte Generatoren für Windenergieanlagen (2-1'600kW). Schweizer Unternehmen mit Sitz in Regensdorf.

u) GIS AG

Produziert Elektrokettenzüge für Wartungsarbeiten an Windenergieanlagen mit einer Hubhöhe bis 120m. Tochtergesellschaft eines weltweit tätigen Familienunternehmens mit Sitz in Schötz.

v) Gurit-Heberlein AG

Forschung/Entwicklung und Produktion von Faserverbundwerkstoffen für Rotorblätter (Prepregs, Harze, Strukturschäume und Gelcoats). Zu den Abnehmern gehören u.a. Vestas und Gamesa. Weltweit tätiges Unternehmen mit Hauptsitz in Wattwil. Der Bereich Windenergie wird durch die Firma SP, UK (ein Unternehmen der Gurit Composite Technologies-Gruppe) bearbeitet.

w) Huntsman Advanced Materials

Entwickelt und produziert Harze und Klebstoffe (u.a. Araldit) für Faserverbundwerkstoffe für Rotorblätter. Weltweiter Marktleader. Weltweit tätiges Unternehmen mit Hauptsitz in den USA; Entwicklung und Produktion von Komponenten für Rotorblätter in Basel und Monthey.

x) Integral Drive Systems AG

Stellt IGBT-Umrichter für Windkraftanlagen mit einer Generatorleistung von 0.5 bis 3 MW her. Liefert Umrichter an Anlagenhersteller in Deutschland, Spanien und Indien. International tätiges Unternehmen mit Sitz im Technopark Zürich.

y) Kendrion Binder Magnet AG

Entwickelt und produziert elektrische Komponenten für Windkraftanlagen (elektromagnetische Bremsen und Frequenzumformer). Liefert Frequenzumformer für Aventa. International tätiges Unternehmen mit Hauptsitz in Holland und einer Niederlassung in Hausen am Albis.

z) Kofmel Kunststofftechnik AG

Produziert Faserverbundteile vor allem für andere Anwendungen, aber auch Rotorblätter, z.B. für Aventa AG.

aa) Maag Gear AG

Entwickelt und produziert Getriebe für Onshore- und Offshore-Windkraftwerke mit einer Leistung von 750 kW bis 5 MW (und grösser). Die Maag Gear AG beliefert bisher insbesondere den Anlagenhersteller Nordex. Weltweit tätiges Unternehmen mit Sitz in Winterthur. Die Maag Gear AG ist ein Unternehmen der F.L. Smidth-Gruppe.

ab) Maxwell Technologies SA

Produktion von Leistungskondensatoren für die Notstromversorgung von Pitch-Regulierungen (Blattwinkelverstellung der Rotorblätter). Beliefert Enercon. Internationales Unternehmen mit Sitz in San Diego, USA und Rossens, CH.

ac) Schaffner Holding AG

Entwicklung und Produktion kompakter Filter für Drehstrom-Anwendungen - u.a. für Windenergieanlagen. Weltweit tätiges Unternehmen mit Hauptsitz in Lutribach.

ad) Von Roll Casting

Entwickelt und produziert Gusseisen-Bauteile und -Komponenten.
Fertigt Rotornaben für den Anlagenhersteller Enercon. International tätiges Unternehmen mit Sitz in Emmenbrücke, Delemont und Choindex.

ae) Von Roll Isola.

Entwickelt und produziert Isolationsmaterialien für elektrische Generatoren.
Weltweit tätiges Unternehmen mit Hauptsitz in Zürich.

9.3.2. Dienstleister und Planungsbüros

Arbastrom

Planung und Installation von Kleinwindanlagen. Arbastrom betreut seit 1997 eine Wind-Solar Pilotanlage auf dem Lötschenpass. In Zusammenarbeit mit Fachhochschulen wie der ZHW werden damit Untersuchungen über Wind-Solaranlagen durchgeführt. Es handelt sich um Fragestellungen im Bereich Maschinenbau/Elektrotechnik. Schweizer Unternehmen mit Sitz in Winterthur.

Meteotest

Arbeitet im Bereich angewandte Meteorologie: Durchführung von Windmessungen mit Mast oder SODAR, Erstellen von Windgutachten, Windmodellierung in komplexem Terrain, Erstellen von regionalen Windkarten. Schweizer Unternehmen mit Hauptsitz in Bern und einer Niederlassung in Nördlingen/D.

Sander+Partner

Dienstleistungen für rechnergestützte Meteorologie und Strömungsdynamik (CFD). Erstellen von Windanalysen und Windkarten mit Wettermodellen. Schweizer Unternehmen mit Sitz in Liebfeld.

Interwind

Planung von grossen Windkraftanlagen und Windparks vor allem in der Türkei und in der Schweiz. Schweizer Unternehmen mit Hauptsitz in Zürich und einer Niederlassung in Ankara.

NEK

Planung von grossen Windkraftanlagen und Windparks in Südamerika, Afrika sowie in Europa (Italien, Spanien, Schweiz). Schweizer Unternehmen mit Hauptsitz in Zürich. Niederlassungen in Amerika, Brasilien, England, Ghana, Italien und Spanien.

Weisskopf Partner GmbH

Planung von grossen Windkraftanlagen und Windparks in der Schweiz. Schweizer Unternehmen mit Sitz in Zürich.

9.3.3. Betreiber

EWU,

Dem Elektrizitätswerk Ursern gehört die höchste Gross-Windturbine der Welt auf dem Gütsch ob Andermatt UR.

Juvent SA, Bern,

wird von der BKW FMB Energie AG geführt, baut und betreibt Windkraftwerke in der Schweiz, insbesondere das grösste schweizerische Windkraftwerk auf dem Mont-Crosin im Berner Jura bei Saint-Imier und verkauft den Strom aus Windkraft unter dem Label „naturemade“.

Windpower AG

Die Firma erntet Wind mit einer Anlage in Entlebuch LU.

RhônEole AG

RhônEole ist Betreiberin der grössten Windturbine der Schweiz in Collonges VS.

Suisse Eole

Suisse Eole ist die Vereinigung zur Förderung der Windenergie in der Schweiz.

[1] Daten zum Teil von R. Rigassi, Dr. Eicher+Pauli AG, Planer für Energie- und Gebäudetechnik.

9.4. Forschungsinstitute rund um das Gebiet Vereisung von Oberflächen

ANTI-ICING MATERIALS INTERNATIONAL LABORATORY (AMIL), Kanada

AMIL ist ein Forschungsinstitut, das sich mit Vereisung befasst, und gehört zur Universität Québec in Chicoutimi (UQAC), Kanada. AMIL hat Testverfahren entwickelt, mit denen die Haftung von Eis auf verschiedenen Substraten in Klimakammern oder zwei vereisenden Windtunneln gemessen werden kann und mit denen eis-phobe Beschichtungen getestet werden können, für Anwendungen ausserhalb des Windenergie-Bereiches [1].

DEWI, Deutsches Windenergie Institut, Wilhelmshafen

Das DEWI wurde 1990 in Wilhelmshafen gegründet mit dem Zweck, die Windenergie-Industrie zu unterstützen. Seither hat das Institut die schnelle Entwicklung der Windenergie in allen Bereichen wie Grundlagenforschung, Messtechnik, politische Entscheidungsprozesse und den vielen Aufgaben, die mit der Realisation von Windfarmen verbunden sind, begleitet. Während in den ersten Jahren die Aktivitäten des DEWI auf die Forschung konzentriert waren, wuchs der Service-Sektor stetig und beträgt heute mehr als 90% des Umsatzes. Als unabhängige Institution bietet das DEWI alle Arten von Dienstleistungen für die Windenergieindustrie, Entwickler und Finanzinstitute an. Das DEWI organisiert die DEWEK 2006, die 8. deutsche Windenergiekonferenz, (22/23 November 2006) in Bremen (Deutschland).

DUWind, TU-Delft, Niederlande

Das Ziel von DUWind ist Forschung, um die Niederländische Windenergieindustrie zu fördern, und die Verbreitung der Nutzung der Windenergie auf der Welt. Neben numerischen Modellen verfügt DUWind über beträchtliche experimentelle Möglichkeiten, wie einen "open jet" Windkanal und eine gut ausgerüstete Freilicht-Forschungsanlage. Weiterhin steht ein niedergeschwindigkeits-, niedrig turbulenter Windkanal für Experimente zur Verfügung.

Hochschule Bremerhaven, Deutschland

Henry Seifert ist neuer Leiter der Forschungs- und Koordinierungsstelle Windenergie (fk-wind) an der Hochschule Bremerhaven. Henry Seifert hat nach 15-jähriger Tätigkeit am Deutschen Windenergie-Institut (DEWI) zum 01. April 2005 die Professur für Maschinenbau und Energiesysteme an der Hochschule Bremerhaven angenommen. Als Leiter des fk-wind-Teams möchte Seifert die drei Standbeine Forschung, Koordination und Transfer regional und überregional weiter ausbauen. Er möchte insbesondere in den Bereichen Windturbinen, Rotor-aerodynamik, Lastannahmen, Rotorblattmaterialien und Rotorblattvereisung forschen.

Kanagawa Institute of Technology, Japan

Shigeo Kimura ist Erstautor einer Veröffentlichung mit dem Titel: The effect of anti-icing paint on the adhesion force of ice accretion on a wind turbine blade. Er ist im Besitz eines Windkanals für Vereisungstests an Rotorblättern [2]

LPAS/EPFL Lausanne, Schweiz

Das Hauptziel des Laboratoire de Pollution Atmosphérique et Sol (LPAS) ist es, realistische Modelle zu entwickeln die fähig sind, unsere Atmosphäre zu simulieren. Diese Modelle sollen gebraucht werden um die Konsequenzen der menschlichen Aktivität auf unsere Atmosphäre vorauszusagen. Chemische Reaktionen auf der Oberfläche von Aerosol Partikeln wie Eis, Russ, Salz und mineralischer Staub haben grossen Einfluss auf die Zusammensetzung der Atmosphäre. Laboratoriumsexperimente auf Modelloberflächen werden durchgeführt um ein besseres Verständnis der Kinetik und Mechanismen dieser atmosphärisch relevanten Reaktionen zu erhalten. Die Gruppe um M. Rossi beschäftigt sich unter Anderem mit der Entstehung der heterogenen Eis-Nukleation und des Eis-Wachstums.

NSERC/Manitoba Hydro Alternative Energy Industrial Chair

Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Manitoba
Winnipeg, MB, Kanada.

Die Entwicklung von alternativen Energien ist eins der wichtigen Ziele für Manitoba Hydro. Die Forschungsgruppe um Eric Bibeau hat sich intensiv mit dem Thema Vereisung von Rotorblättern von Windenergieanlagen befasst und auch verschiedene Eis-Minderungstechniken für Rotorblätter untersucht [3].

- [1] How a solid coating can reduce the adhesion of ice on a structure. C. Laforte et al. IWAIS 2002.
- [2] The effect of anti-icing paint on the adhesion force of ice accretion on a wind turbine blade. S. Kimura et al., BOREAS VI, Pyhätunturi, Finland 9 – 11 April 2003.
- [3] Icing characteristics and mitigation strategies for wind turbines in cold climates. A.G. Kraj and E. L. Bibeau, Renewable Energy 2006, Makuhari, Chiba Japan Oct. 9-14, 2006.

10. Schlussfolgerung

Die bis jetzt in der Literatur beschriebenen anti-Eis Beschichtungen sind noch nicht genügend ausgereift, um an Rotorblättern für Windenergieanlagen im Dauerbetrieb verwendet zu werden. Ihr Schutz gegen Vereisung ist nicht vollständig. Ebenso ist über die Beständigkeit und die Dauerhaftigkeit der Beschichtungen zu wenig bekannt. Die Windenergie-Produktion unter kalten klimatischen Verhältnissen kann jedoch verbessert werden indem die beschriebenen Eisminderungs-Strategien angewandt werden, welche die Profilveränderung der Rotorblätter, die Adhäsionskraft von Eis und die Menge an abgeschiedenem Eis verringern. Es wurden zwei Arbeiten gefunden, die sich mit dem Thema der Eisverminderung an Rotorblättern mittels Beschichtungen befassen. Die Tests wurden in Windkanälen durchgeführt, in denen vereisende Bedingungen simuliert werden können, Feldversuche wurden keine beschrieben. Total wurden 6 verschiedene, kommerziell erhältliche Beschichtungen getestet. Darunter sind eis-phobe, hydrophobe und superhydrophobe Lacke. Die besten Beschichtungen vermindern die Adhäsion von Eis an die Profilverankerante und verringern die Menge an abgeschiedenem Eis. Unter Klareis-Bedingungen sind die hydrophoben Beschichtungen effektiver, während unter Reif-Bedingungen die eis-phobe Beschichtung besser wirkt. (Klareis-Bedingungen herrschen knapp unter dem Gefrierpunkt bei hoher Luftfeuchtigkeit, Reif bildet sich unter kälteren Verhältnissen in Luft mit niedrigem Wassergehalt). Die Autoren der Studien unterstreichen die Wichtigkeit, die richtige Beschichtung für die jeweilig vorherrschenden klimatischen Gegebenheiten auszuwählen. Jedoch verhindert keine Beschichtung alleine ein Ansetzen von Eis am Rotorblatt vollständig, beziehungsweise wird das bereits angesetzte Eis nicht alles wieder abgeschüttelt. Die Beschichtungen müssen mit thermischen Verfahren kombiniert werden. Thermische Verfahren sind in diesem Falle Heizungen in Form von Drähten, die auf die Profilverankerante aufgebracht werden. Selbst wenn die eis-phoben, hydrophoben oder superhydrophoben Beschichtungen mit thermischen Verfahren kombiniert werden, ist eine absolute Eisfreiheit nicht gewährleistet. Allerdings sind nur wenige auf dem Markt verfügbare Beschichtungen getestet worden. So wäre es z.B. interessant, eine Beschichtung mit Lotus-Effekt auf seine anti-Eis Wirkung hin zu testen, wie sie z.B. von der Firma BS Rotor Technic vertrieben wird. Wird deren anti-Eis Wirkung nur aus verkaufstechnischen Gründen angegeben, oder hat die Firma diese auch verifiziert?

Das Potenzial des geplanten Projekts zur Entwicklung von stabilen anti-Eis Beschichtungen für Windenergieanlagen ist nach der Meinung der Autoren gross. Eine entsprechende Beschichtung würde für Standorte, beispielsweise in den Alpen, grosse Vorteile bringen. Die bisher getesteten Beschichtungen zeigen zwar eine Verringerung der Haftung und Bildung von Eis auf Oberflächen, diese ist jedoch nicht ausreichend. Beschichtungen mit anti-freeze Eigenschaften analog zu anti-freeze Proteinen eröffnen neue Möglichkeiten zur Reduktion der Eisbildung auf Oberflächen.

11. Projektvorschlag

An der ZHW wird mit Materialien gearbeitet, die als anti-freeze Beschichtungen unter vereisenden Bedingungen eingesetzt werden können. Das Wirkungsprinzip dieser Substanzen ist anders als das der eis-phoben Beschichtungen. Während eis-phobe Beschichtungen die Adhäsionskraft von Eis auf die Oberfläche verringern, verhindern anti-freeze Beschichtungen analog zu anti-freeze Proteinen das Gefrieren von Wasser. Ähnlich wie bei Rotorblattheizungen sollte dadurch die Grenzfläche zwischen Eis und Flügel flüssig bleiben und so ein Anwachsen von Eis verhindert werden. Die Gefrierpunktserniedrigung beruht nicht auf einem kolligativen Effekt, denn es kann eine thermische Hysterese beobachtet werden. Das heisst, das Wasser gefriert zwar erst bei Temperaturen unter 0°C, schmilzt aber wieder bei 0°C.

Um unter realistischen Bedingungen zu arbeiten, muss ein Partner gefunden werden, der im Besitz eines Windkanals ist, in dem vereisende Bedingungen simuliert werden können. Klareis- und Reif-Bedingungen sind verschieden voneinander und sollten beide auf der gleichen Anlage hergestellt werden können. Eventuell müssen Eis-Adhäsionstests durchgeführt werden um die Kraft, mit der das Eis an der Beschichtung haftet, zu messen und dadurch die Qualität der Beschichtung zu bestimmen. Die Zusammenarbeit mit Industriepartnern ist für eine praxisnahe Lösung essenziell.

Vorschlag für den zeitlichen Ablauf

Phase 1.

Konsortium und Finanzierung für die Bearbeitung des Projektes zusammenstellen.

Phase 2:

Systematische Untersuchung verschiedener Materialien und Beschichtungen auf ihre Fähigkeit die Haftung und Bildung von Eis auf Oberflächen zu reduzieren.

Ziel: Aussagen zur Wirksamkeit verschiedener Beschichtungen

Phase 3.

Finden geeigneter anti-freeze Verbindungen mit möglichst grosser thermischer Hysterese, eventuell Synthese von viel versprechenden Substanzen. Testen der anti-freeze Verbindungen auf ihre gefrierpunktserniedrigenden Eigenschaften. Aufbringen der Substanzen auf Glas und Bestimmung der Gefrierpunktserniedrigung der Beschichtung.

Ziel: Eine stark wirksame anti-freeze Verbindung.

Phase 4.

Entwicklung geeigneter Formulierungen der Beschichtungen. Die gefrierpunktserniedrigende Substanzen sollen dauerhaft auf eine Oberfläche aufgebracht werden. Testen der so erhaltenen Beschichtungen auf ihre anti-freeze Eigenschaften. Ausserdem müssen Haftung, Beständigkeit und Alterung geeigneter Beschichtungen optimiert werden.

Ziel: Eine dauerhafte anti-freeze Beschichtung.

Phase 5.

Aufbringen von anti-freeze Beschichtungen auf Rotorblätter, testen der Rotorblätter im Windkanal unter vereisenden Bedingungen. Durchführen von Feldversuchen mit wirksamen Beschichtungen.

Ziel: Nicht vereisende Rotorblätter (bis zu einer gewissen Minimaltemperatur).

Ein erfolgreiches Projekt ermöglicht den Industriepartnern neue innovative Produkte für Windenergieanlagen. Windenergie als erneuerbare Energie bekommt durch ein erfolgreiches Projekt die Chance in bisher klimatisch problematischen Regionen als alternative Energie eingesetzt zu werden.