

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse  
**Band:** 100 (2009)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Frostschutz für Windenergieanlagen  
**Autor:** Siegmann, Konstantin / Meola, Giuseppe / Hirayama, Martina  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856416>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Frostschutz für Windenergieanlagen

## Eisfreie Oberflächen der Natur abgeschaut

**Günstige Winde an vereisungsgefährdeten Standorten führen dort zu immer mehr Windenergieanlagen. So ist es zum Beispiel geplant, einen ganzen Windpark am Gotthard aufzustellen. Das Problem der Vereisung der Rotorblätter ist jedoch nicht gelöst und führt zu erheblichen Energieverlusten. Rotorblattheizungen verbrauchen selber viel Strom und sind daher unwirtschaftlich. Eine elegante Lösung wäre eine Beschichtung, auf der Eis nicht haftet, jedoch sind die auf dem Markt erhältlichen eishaftungsvermindernden Materialien leider nicht wirksam genug. Spezielle Eiweisse von arktischen Fischen weisen den Weg für neuartige Beschichtungen.**

Um das in Europa vorhandene Windpotenzial zu nutzen, müssen Windenergieanlagen an vereisungsgefährdeten Standorten aufgestellt werden. Es wird geschätzt, dass ungefähr 20% der Windenergie an Orten mit Vereisungsgefahr realisiert wer-

*Konstantin Siegmann, Giuseppe Meola, Martina Hirayama*

den müssen. Zum jetzigen Zeitpunkt belaufen sich die Energieproduktionsverluste an relativ stark bis sehr stark vereisungsgefährdeten Standorten auf ca. 20–50% der jährlichen Windenergieproduktion (siehe Bild 1).

Windmessungen im nördlichen Skandinavien zeigten erstmals das Potenzial für Windenergienutzung in kälteren Klimazonen. Kalte Luft ist dichter, verspricht also prinzipiell höhere Leistung. Im Alpenraum der Schweiz und Österreichs werden jetzt erste Erfahrungen mit Windenergieanlagen gesammelt. Die Windkarte der Schweiz zeigt, dass die Winde vor allem an höher gelegenen Lagen stark sind. Die geeigneten Standorte liegen hier fast ausschliesslich mehr als 800 m über dem Meeresspiegel in turbulentem und harschem Klima, wo Vereisungen häufig sind (Bild 2).

In der Schweiz werden erste Erfahrungen mit der weltweit höchstgelegenen Windturbine auf dem Gütsch oberhalb Andermatt gemacht (Bild 3). Für Windenergieanlagen sind Vereisungen fatal: Die Eisan-

sammlung an den Vorderkanten der Rotorblätter verändert deren Profil und verhindert schliesslich die Energieerzeugung gänzlich (Bild 4). Produktionsverluste durch Stillstandzeiten der vereisten Windenergieanlage sind die Folge. Es gibt jedoch auch eine ernst zu nehmende Gefahr für Personen, die von vereisten Windenergieanlagen ausgeht, nämlich der Eisabwurf. Von den vereisten Rotorblättern können sich grössere Brocken ablösen und über 100 m weit geschleudert werden. Es sind daher technische Lösungen gefordert, die den Betrieb unter Vereisungsbedingungen ermöglichen und eine Gefährdung der Umgebung und der Anlage ausschliessen. Bis heute existieren jedoch keine wirklich überzeugende Konzepte für den Betrieb von Windenergieanlagen im kalten Klima. Die einfachste Strategie ist das Abschalten der Anlage, sobald eine Vereisung eintritt; dadurch geht aber wertvolle Produktionszeit verloren. Auch stellt sich die Frage, wie eine Vereisung sicher erkannt werden kann.

### Entstehungsmechanismen der Rotorblattvereisung

Atmosphärische Vereisung tritt auf, wenn Wassertropfen aus der Luft beim Kontakt mit Objekten gefrieren. Wasser gefriert nicht immer bei 0 °C. Flüssiges Wasser unterhalb dieser Temperatur heisst unterkühltes Wasser, und es sind unterkühlte Tröpfchen, die das Vereisungsproblem an Rotorblättern

verursachen. Vereisung entsteht, wenn eine Windenergieanlage in einer Wolke steht, deren Temperatur unterhalb des Gefrierpunkts liegt. Die unterkühlten Tröpfchen können auf die Rotorblätter auftreffen und dort gefrieren. Wegen der Strömungsverhältnisse am sich drehenden Rotorblatt entsteht die Vereisung praktisch nur an der Profilverdickung, wo die Tröpfchen aufprallen.

Unterhalb von –20 °C ist Vereisung selten, weil Wolken bei diesen Temperaturen anstelle von unterkühlten Wassertropfen normalerweise aus Eisparkeln bestehen. Unterhalb –40 °C ist die Vereisung vernachlässigbar. 2 Typen von Eis, die bei der Vereisung entstehen, lassen sich unterscheiden: Glattes, kompaktes Eis, welches eine hohe Dichte hat und durchsichtig ist, wird «Klareis» genannt (Bild 5). «Reif» bezeichnet ein Eis von niedriger Dichte, das weiss und federförmig anzusehen ist (Bild 6). Klareis bildet sich bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt in Luft mit hohem Wassergehalt, charakteristischerweise zwischen 0 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 mit hoher Dichte bildet. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften ist klares Eis schwieriger zu entfernen als Reif.

### Techniken zur Bekämpfung der Vereisung

Derzeitige Techniken zur Eisvermeidung an Rotorblättern sind üblicherweise in der Literatur zur Luft- und Raumfahrt zu finden. Diese Methoden bestehen aus Anti-Icing- und De-Icing-Techniken. Anti-Icing bezeichnet Bedingungen, unter denen keine Vereisung entstehen kann; während De-Icing bedeutet, dass bereits entstandene Eisablagerungen entfernt werden. Diese Techniken beinhalten gefrierpunktniedrigende



Substanzen, thermisches Schmelzen und Oberflächendeformationen, wie z.B. durch aufblasbare Gummiprofile. Gefrierpunkt-erniedrigende Substanzen werden üblicherweise aufgesprüht, wie das zum Enteisen von Flugzeugflügeln vor dem Start verwendete Glykol. Aus umwelthygienischen Gründen sind andere Chemikalien oder heisses Öl keine brauchbaren Alternativen, um Vereisungen zu verhindern. Aufblasbare Gummiprofile sind sehr wartungsintensiv und verändern das aerodynamische Profil des Rotorblatts. Die am häufigsten angewandte Strategie zur Vereisungsverhinderung ist die Verwendung sogenannter Rotorblattheizungen, entweder durch Warmluft oder mit Drahtheizungen. Im De-icing-Modus werden bei stillgelegter Maschine die Rotorblätter beheizt, sodass das anhaftende Eis abrutscht. Dabei wird Energie verbraucht, und die Maschine produziert während des Enteisierungsvorgangs typischerweise während 1–2 h keinen Strom.

Deshalb sollte bevorzugt eine passive Strategie angewendet werden, um die Vereisung so klein wie möglich zu halten. Die Ablagerung und Anhaftung von Eis an der Oberfläche der Rotorblätter soll durch eine Beschichtung vermindert werden.

#### Eisabweisende Beschichtungen

Die Eisakkumulation ist nicht nur ein Problem für Windenergieanlagen, sondern auch für das Transportwesen, für Strassen, Boote, Flugzeuge, Stromkabel etc. Als interessante Lösung zur Verhinderung des Eisaufbaus erscheint daher eine eisabweisende Beschichtung der exponierten Oberflächen. Die Suche nach einer Beschichtung mit schwacher Eisadhäsion ist von grossem Interesse. Es sind viele Materialien, Beschichtungen und Farben mit niedrigen Reibungseigenschaften kommerziell erhältlich. Manche davon werden als «eis-phob» vermarktet, wobei der Name impliziert, dass sie die Eisablagerung minimieren oder verhindern. Die Forschung hat jedoch gezeigt, dass diese Materialien die Eisbildung nicht verhindern können. Tatsächlich wächst hier Eis mit der gleichen Geschwindigkeit wie auf jedem anderen Material. Dafür ist die Adhäsionskraft des Eises verringert, d.h., das Eis kann leichter entfernt werden. Aus diesem Grund werden eisphobe Beschichtungen manchmal zusammen mit anderen Eisentfernungstechniken verwendet, wie z.B. mit Heizungen, pneumatischen Profilen oder mechanischen Einrichtungen. Bis jetzt gib es keine Beschichtung, die perfekt eisphob ist, weil Eis auf allen Materialien haftet. In den meisten Studien werden sogenannte eisphobe Produkte nach ihren hydrophoben Eigenschaften ausgewählt, also nach ihren wasserabweisenden Ei-

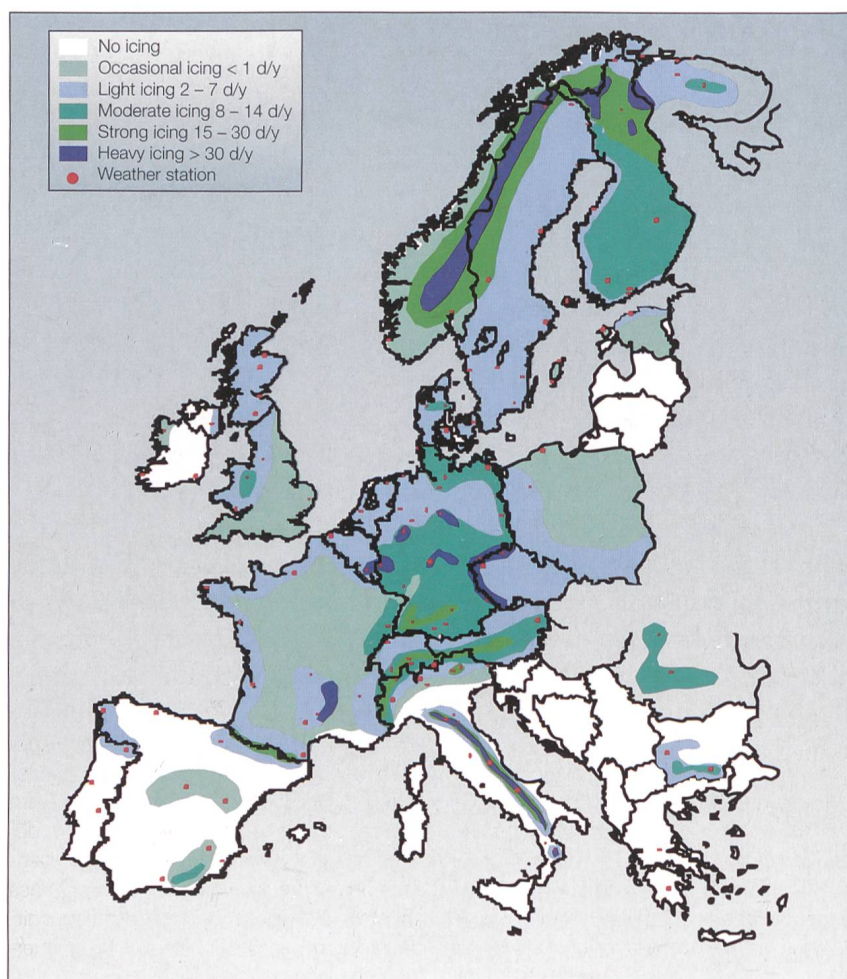


Bild 1 Die Karte zeigt das relative Vereisungsrisiko für Windenergieanlagen in Europa.

genschaften. Die übliche Hypothese ist, dass ein Produkt, das eine kleine chemische Affinität zu Wasser hat, auch eine schwache Eisadhäsion aufweist. Das trifft im Allgemeinen jedoch nicht zu.

Die Idee bezüglich der eisphoben Materialien besteht darin, eine Beschichtung zu finden, die einerseits starke Bindungen mit dem Substrat eingeht, andererseits aber fast inert an der Oberfläche ist. Weil Teflon

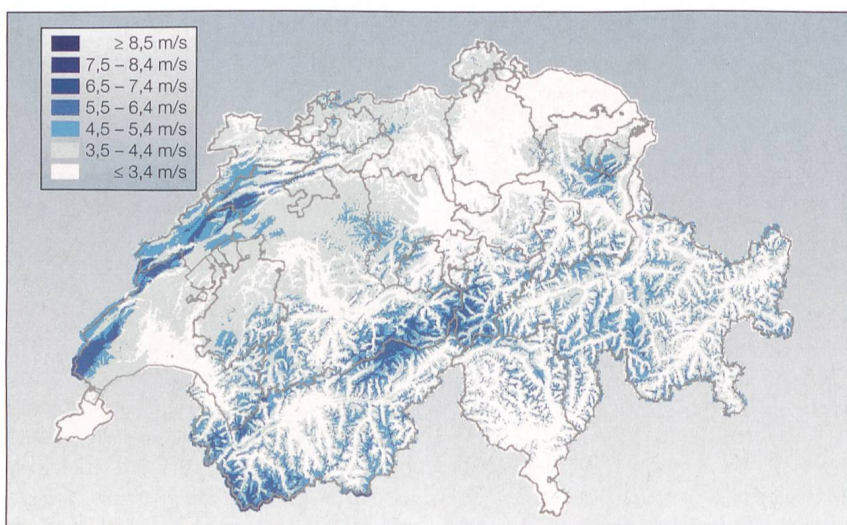


Bild 2 Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in der Schweiz, 70 m über Grund gemessen.





M. Russi, Andermatt

Bild 3 Die weltweit höchstgelegene Windenergieanlage auf dem Gütsch oberhalb Andermatt.

durchwegs eine schwache Adhäsion an Eis zeigt, ist Teflon die meistgetestete und am häufigsten verwendete Beschichtung, gefolgt von Silikon. Von den beiden hat Teflon die schwächere Adhäsion an Eis und ist dauerhafter. Im Bestreben, ein Material mit kleineren Adhäsionskräften als Teflon zu finden, wurden viele Stoffe getestet, z.B. Gummi, Urethane und Polyurethane, Polyethylen, Polystyrol, Acryle, Neopren etc. Keines dieser Materialien entwickelt eine kleinere Adhäsionskraft an Eis als Teflon.

Ein anderer Faktor, der untersucht wurde, ist die Beschaffenheit der Oberfläche. So wurde gezeigt, dass eine Zunahme der Rauheit der Oberfläche die Eisadhäsion verstärkt. Jedoch weist eine ganz glatte Oberfläche dennoch eine beachtliche Eisadhäsion auf. Trotz einer Vielzahl von Studien über eispohbe Materialien ist heute das Wissen bezüglich der Antiadhäsioneigenschaften lückenhaft und manchmal sogar umstritten. Das heisst, dass noch kein Material bekannt ist, das Eisakkumulation vollständig verhindert.

Kann eine eispohbe Beschichtung Eis vom Haften an einer Struktur verhindern? Nicht vollständig: Eis haftet auf allem. Aber eine eispohbe Beschichtung kann die Adhäsion von Eis reduzieren. Das Eis kann folglich einfacher entfernt werden, mit kleinem Kraftaufwand, idealerweise nur durch Wind oder natürliche Vibrationen der Rotoren.

### «Antifreeze»-Proteine

In den 1950er-Jahren wunderte sich der kanadische Wissenschaftler Scholander darüber, wie arktische Fische in Gewässern überleben können, die kälter sind als der Gefrierpunkt ihres Blutes. Seine Experimente brachten ihn zur Überzeugung, dass eine Art «Antifreeze»- oder Frostschutzmittel in ihrem Blut war. In den späten 1960er-Jahren war es dem Biologen de Vries möglich, Antifreeze-Proteine aus dem Blut von antarktischen Fischen zu isolieren. Antifreeze-Proteine erzeugen einen Unterschied zwischen Schmelz- und Gefrierpunkt von Wasser. Im Blut der arktischen Fische ge-



Wikipedia

Bild 5 Klareisbildung an Zweigen.

friert die Flüssigkeit erst bei  $-2^{\circ}\text{C}$ , die Eiskristalle schmelzen aber wieder bei ca.  $0^{\circ}\text{C}$ . Dieses Phänomen ist als thermische Hysterese bekannt. Man glaubt, dass Antifreeze-Proteine das Eiskristallwachstum durch einen Adsorptions-Inhibitions-Mechanismus verhindern. Sie adsorbieren irreversibel an die Eisoberfläche und verhindern dann das thermodynamisch bevorzugte Eiswauchstum, welches fatale Folgen für die Fische hätte. In neuerer Zeit wurden Insekten bekannt, die, ohne zu gefrieren, noch viel tiefere Temperaturen ertragen können als die arktischen Fische. Man spricht in diesem Fall von «hyperaktiven» Antifreeze-Proteinen.

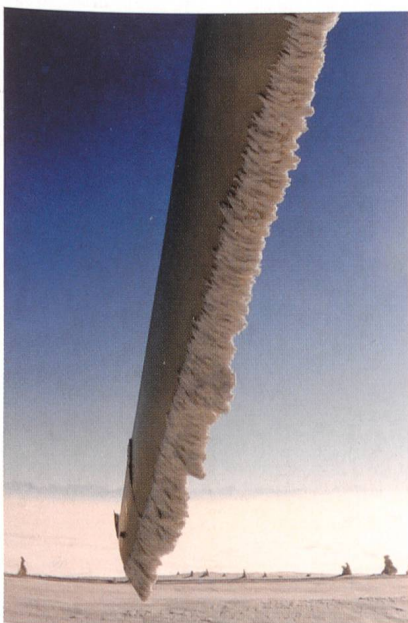


Foto ADEV 1998

Bild 4 Stark vereiste Vorderkante eines Rotorblatts.



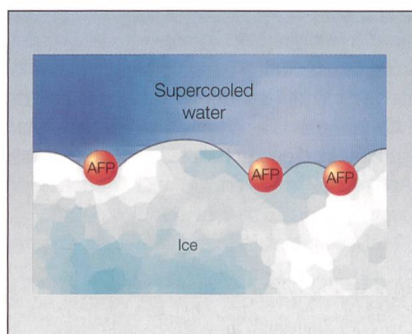
Wikipedia

Bild 6 Reifbildung an einem Baum.



## Wie wirken Antifreeze-Proteine?

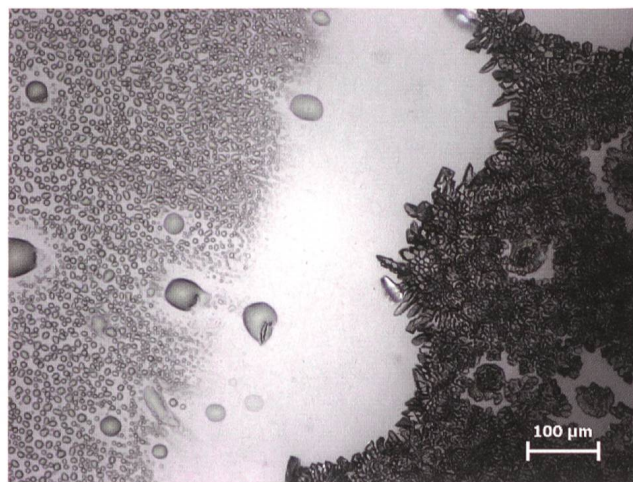
Im Gegensatz zu den traditionellen Frostschutzmitteln wie Streusalz oder Ethylenglykol unterdrücken Antifreeze-Proteine den Gefrierpunkt von Wasser nicht proportional zu ihrer Konzentration. Stattdessen funktionieren sie nach einem nicht kolligativen Mechanismus. Dies erlaubt ihnen, in 300–500-mal kleineren Konzentrationen als Gefrierschutz wirksam zu sein. Diese ungewöhnliche Eigenschaft von Antifreeze-Proteinen wird ihrer Fähigkeit zur Bindung an Eis zugeschrieben. Antifreeze-Proteine binden irreversibel an die Oberfläche embryonischer Eiskristalle. Im unterkühlten Wasser müsste der Kristall weiterwachsen; das Eis wird nun aber gezwungen, eine gekrümmte Oberfläche anzunehmen, weil es sich zwischen 2 benachbarten Antifreeze-Proteinen herauszwängen muss (Bild 7). Die stark gekrümmte Oberfläche hat eine Gefrierpunkts-erniedrigung zur Folge. Diese Gefrierpunkts-erniedrigung kleinster Strukturen mit hohem Oberflächen- zu Volumenverhältnis wird nach ihren Entdeckern auch Gibbs-Thomson-Effekt genannt. Die Antifreeze-Proteine zwingen das Eis also zu einer gekrümmten Form mit hoher Oberflächenspannung, die einen niedrigeren Gefrierpunkt besitzt.



**Bild 7** Antifreeze-Proteine (AFP) binden ans Eis, welches jetzt zwischen 2 Proteinen herauswachsen muss. Die dadurch erzwungene Krümmung verringert den Gefrierpunkt (Gibbs-Thomson-Effekt).

**Bild 8** Eine Antifreeze-Beschichtung (Mikroskopaufnahme).

Links: Wassertropfen auf der Beschichtung. Rechts: Eis auf unbeschichtetem Glas. Beide Seiten haben die gleiche Temperatur.



## Von den Antifreeze-Proteinen zu den Antifreeze-Beschichtungen

Inspiziert von dem verblüffenden Effekt der Antifreeze-Proteine, war es unser Ziel, das Gefrieren von Wasser auf Oberflächen zu beeinflussen. Wir suchten also nach einem Beschichtungsmaterial, welches das Gefrieren von Wasser auf Oberflächen verzögert oder verhindert und das man z.B. auf Rotorblättern einsetzen könnte. Allerdings entschlossen wir uns, nicht mit Antifreeze-Proteinen selbst zu arbeiten, da diese zu teuer und auch zu wenig stabil sind. Stattdessen wählten wir Beschichtungen aus dem Bereich der Sol-Gel-Technik. Eine wichtige Frage blieb jedoch ungeklärt: Können Antifreeze-Proteine oder ihre synthetischen Analoga auf Oberflächen die gleiche gefrierpunktsniedrigende Wirkung entfalten wie in Lösung?

Als Erstes wurde eine Kältekammer konstruiert, in der bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen das Gefrierverhalten von Wasser studiert werden konnte. Wassertropfchen auf Oberflächen wurden durch ein Mikroskop beobachtet, und ihre Gefriertemperatur wurde registriert. Viele Materialien wurden getestet, bis schließlich eine synthetische Beschichtung ge-

funden worden war, auf der Wasser erst bei deutlich tieferen Temperaturen gefriert wie auf unbehandeltem Glas (Bild 8).

Wenn also ein unterkühlter Wassertropfen auf eine solche Oberfläche auftrifft, sollte er nicht oder verzögert anfrieren. Momentan sind wir dabei, unsere Antifreeze-Beschichtungen unter realistischen Bedingungen zu testen. Ob der im Labor unter dem Mikroskop beobachtete Effekt ausreicht, eine Vereisung zu verhindern oder wenigstens zu verzögern, sollen Tests in einem spezialisierten Labor in Kanada zeigen. Vor einer möglichen industriellen Anwendung sind noch verschiedene Weiterentwicklungen und Tests notwendig.

Das Projekt wird von der Gebert-Rüf-Stiftung und dem Bundesamt für Energie unterstützt.

## Angaben zu den Autoren

**Dr. Konstantin Siegmann** ist Chemiker und arbeitet auf den Gebieten Katalyse, organische Synthese und der Russbildung in Flammen an der ETH Zürich und an der University of California, Santa Barbara. Seit 2006 ist er Mitarbeiter am IMPE in der Gruppe «Polymere Materialien», die sich mit Grenz- und Oberflächenphänomenen befasst.

ZHAW, 8401 Winterthur,  
konstantin.siegmann@zhaw.ch

**Giuseppe Meola** hat eine 3-jährige Lehre als Chemielaborant bei der Ems-Chemie absolviert. Anschließend studierte er Chemie an der Zürcher Fachhochschule in Winterthur und diplomierte in der Fachrichtung Industrielle Chemie mit Schwerpunkt Antifreeze-Beschichtungen unter der Leitung von Prof. Dr. M. Hirayama. Seit 2008 ist er wissenschaftlicher Assistent am IMPE in der Gruppe «Polymere Materialien».

ZHAW, 8401 Winterthur,  
giuseppe.meola@zhaw.ch

Prof. Dr. **Martina Hirayama** hat an der Universität Freiburg i. Ue., am Imperial College London und an der ETH Zürich Chemie studiert. An der ETH Zürich hat sie auch Betriebswissenschaften studiert und am Institut für Polymere dissertiert. Sie befasst sich mit Polymeren an Oberflächen und Grenzflächen und leitet die Gruppe «Polymere Materialien» sowie das «Institute of Materials and Process Engineering» an der ZHAW in Winterthur.

ZHAW, 8401 Winterthur,  
martina.hirayama@zhaw.ch

## Résumé

### Revêtements antigel pour les pales de rotors

*Des surfaces non givrées copiées de la nature.* Toujours plus d'éoliennes sont installées aux endroits où les vents sont favorables mais compromis par le givre. Il est par exemple prévu de construire un parc d'éoliennes au Gotthard. Le problème du givrage des pales du rotor n'est toujours pas résolu et entraîne des pertes d'énergie considérables. Les chauffages des pales de rotor consomment eux-mêmes beaucoup d'électricité et ne sont donc pas économiques. Une solution élégante serait un revêtement sur lequel la glace n'adhérerait pas, mais les matériaux disponibles sur le marché visant à réduire l'adhérence de la glace ne sont malheureusement pas suffisamment efficaces. Des protéines particulières aux poissons de l'Arctique ouvrent la voie vers des revêtements d'un nouveau genre.