



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 17. Oktober 2011

Nichtvereisende Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen

Zürich University
of Applied Sciences



**School of
Engineering**

IMPE Institute of Materials
and Process Engineering

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Windenergie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

GEBERT RÜF STIFTUNG, CH-4051 Basel
Clariant Int. Ltd, CH-4132 Muttenz 1
RETC, D-22297 Hamburg

Auftragnehmer:

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW
Institute of Materials and Process Engineering
Technikumstrasse 9
CH-8401 Winterthur
www.impe.zhaw.ch

Autoren:

Konstantin Siegmann, ZHAW, konstantin.siegmann@zhaw.ch
Markus Susoff, ZHAW, markus.susoff@zhaw.ch
Martina Hirayama, ZHAW, martina.hirayama@zhaw.ch

BFE-Bereichsleiter: Katja Maus

BFE-Programmleiter: Robert Horbaty

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154'340 / 102'660

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

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract	4
2. Zusammenfassung	5
3. Einleitung / Projektziele	6
4. Antifreeze Beschichtungen	8
5. Eisphobe Beschichtungen	12
6. Schlussfolgerungen und Ausblick	20
7. Nationale / internationale Zusammenarbeit	20
8. Referenzen	21

1. Abstract

Icing of rotor blades jeopardizes the use of wind energy in Switzerland. An elegant solution for the icing problem would be an anti-ice coating of the blades. First, we describe coatings that delay the freezing of water on their surfaces. Delayed freezing could lead to non-icing of rotor blades by the following mechanism: When a supercooled water droplet impinges on the coating it will not freeze on immediately. Due to delayed freezing, the droplet is blown over the blade and eventually leaves the blade before freezing. This hypothesis was tested on coated model rotor blades in an icing wind tunnel. It could be shown that icing is indeed delayed to some extent; however, the effect is by far not strong enough to keep the rotor blade ice free.

Our second approach is to study ice adhesion reducing, so-called icephobic, coatings. An icephobic coating reduces the adhesion force of ice to its surface and therefore makes shedding of ice possible by natural vibrations, gravity or centrifugal forces alone. At first, we constructed a custom-made ice adhesion test, which we could validate with literature data. We then studied various coatings and could confirm the potential of this approach. As superhydrophobic surfaces are much in discussion as icephobic coatings nowadays we next investigated their performance. Superhydrophobic coatings are intrinsically rough and we could show that surface roughness deteriorates icephobicity. Although superhydrophobic surfaces are highly water repellent, they increase the adhesion force of ice.

2. Zusammenfassung

Die Vereisung der Rotorblätter gefährdet die Nutzung der Windenergie in der Schweiz. Durch geeignete Anti-Eis Beschichtungen wollen wir die Rotorblätter von Windenergieanlagen eisfrei halten. Als erstes studierten wir sogenannte Antifreeze Beschichtungen. Antifreeze Beschichtungen verzögern das Gefrieren von Wasser auf ihrer Oberfläche. Dieser Effekt könnte durch folgenden Mechanismus eine Vereisung von Rotorblättern verhindern: Wenn der unterkühlte Tropfen auf die Profilvorderkante des Rotorblatts auftrifft, wird er nicht gleich anfrieren. Er wird über das Rotorblatt geblasen werden und schliesslich das Rotorblatt verlassen, bevor er gefriert. Diese Hypothese testeten wir an Modellprofilen in einem vereisenden Windkanal. Wir konnten zeigen, dass die unterkühlten Wassertröpfchen tatsächlich auf der Antifreeze Beschichtungen ein bisschen weiter geblasen wurden als auf anderen Oberflächen, der Effekt reicht jedoch nicht aus eine Vereisung zu verhindern.

Als nächstes untersuchten wir Beschichtungen, welche die Adhäsion von Eis an ihre Oberfläche verringern. Solche Beschichtungen werden "eisphob" genannt und sie sollen das Anwachsen von schweren Eisbelägen verhindern. Eine perfekt eisphobe Beschichtung verringert die Adhäsionskraft von Eis dermassen, dass natürliche Vibrationen, die Gravitation und Zentrifugalkräfte ausreichen eine Enteisung herbeizuführen. Ein Eisadhäsionstest ist Voraussetzung für das Studium von eisphoben Beschichtungen. Die Resultate von unserem individuell gefertigten Eisadhäsionstest sind in guter Übereinstimmung mit Werten aus der Literatur. Als nächstes wurden verschiedene eisphobe Beschichtungen untersucht und es konnte gezeigt werden, dass das Potential für solche Beschichtungen gross ist. Weil superhydrophobe Beschichtungen als eisphobe Beschichtungen heutzutage viel diskutiert werden, haben wir solche Beschichtungen genauer untersucht. Superhydrophobe Oberflächen sind von Natur aus rau, die Rauheit ist ein wesentlicher Bestandteil ihrer Wirkung. Wir konnten zeigen, dass Rauheit die Eishaftung erhöht, und dass darum superhydrophobe Oberflächen als eisphobe Beschichtungen ungeeignet sind.

3. Einleitung / Projektziele

Im Zuge des geplanten Atomausstiegs gewinnen die erneuerbaren Energien an Wichtigkeit. So war 2010 ein Rekordjahr für die Schweizer Windbranche, die Kapazitäten sind um fast 150% gewachsen. Allerdings müssen hierzulande Windenergieanlagen an alpinen Standorten errichtet werden, weil nur dort die Windverhältnisse gut sind. Abbildung 1 illustriert dieses Dilemma [1]. Links ist die Verteilung der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit 100 Meter über Grund gezeigt; orange und rote Farbtöne markieren gute Winde. Die rechte Karte zeigt die Vereisungshäufigkeit; blau, grün und gelb eingefärbt sind die Gegenden mit hoher Vereisungsgefahr. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich Gebiete mit starken Winden und solche mit hoher Vereisungsgefahr überschneiden; die Standorte mit den günstigsten Winden (Jura und Alpen) sind gleichzeitig diejenigen mit grosser Vereisungshäufigkeit.

Schnee und Eis aber beeinträchtigen Windenergieanlagen stark, denn die Rotorblattvereisung mindert die Energieausbeute bis hin zum Stillstand der Anlage, erzeugt eine Unwucht und ist wegen des Eisabwurfs eine Gefahr für Passanten. Es gibt noch keine befriedigende Lösung für die Vereisungsproblematik. Rotorblattheizungen werden manchmal eingesetzt, doch verbrauchen diese Strom und sind aufwändig in Installation und Wartung. Eine elegante Lösung des Problems wäre, z. B. die Haftung des Eises an die Oberfläche des Rotorblatts zu verhindern oder wenigstens so zu verringern, dass das Eis durch natürliche Vibrationen von selbst abfällt. Beschichtungen, welche die Eigenschaft haben, die Eishaftung zu verringern, werden "eisphob" genannt. Eisphobe Beschichtungen würden das Rotorblatt kostengünstig vor Vereisung schützen und Windenergieanlagen im kalten Klima rentabler und sicherer machen. Leider gibt es noch keine zufriedenstellende eisphobe Beschichtung. Hier setzt unser Projekt ein.

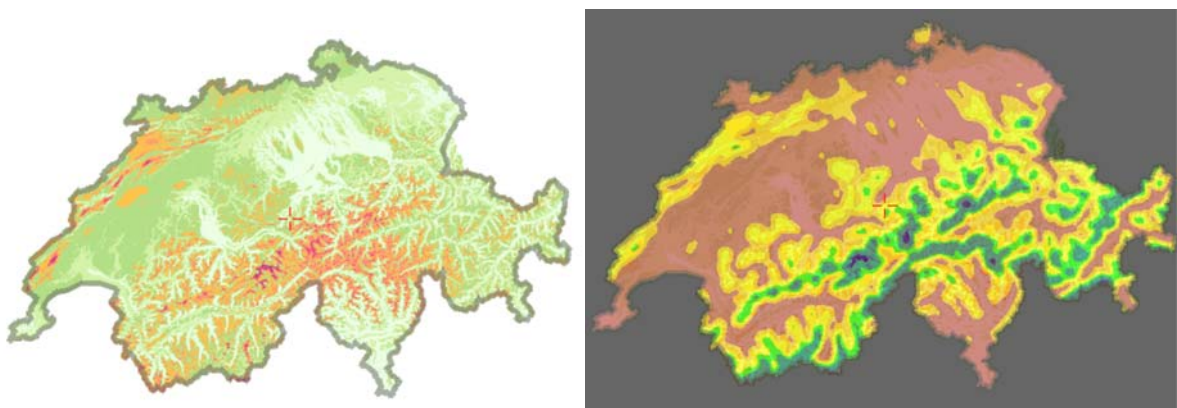


Abb. 1 Links: Windenergie-Karte der Schweiz (rote Farben bedeuten günstige Winde). Rechts: Vereisungshäufigkeit (blaue Farbe bedeutet hohe Vereisungsgefahr) [1].

Abbildungen 2 und 3 zeigen vereiste Rotorblätter von Windenergieanlagen. Typisch ist die Eisansammlung an der Profilvorderkante, sie entsteht durch das Auftreffen von unterkühlten Wassertröpfchen aus einer Wolke. Unter Reifbedingungen frieren die Tröpfchen sofort an und bilden ein Eis von relativ niedriger Dichte, während sie unter wärmeren, d.h. Klareisbedingungen, etwas fließen bevor sie anfrieren. Die Vereisung verschlechtert die Aerodynamik des Rotorblatts stark; schon bei geringem Eisansatz wird die Energieausbeute drastisch verringert. Gut sichtbar sind auch Lücken im Eisansatz, dort wurden Eisbrocken, die ein Gewicht von bis zu einigen Kilogramm haben können, abgeworfen und bis zu 100 Meter weit geschleudert.

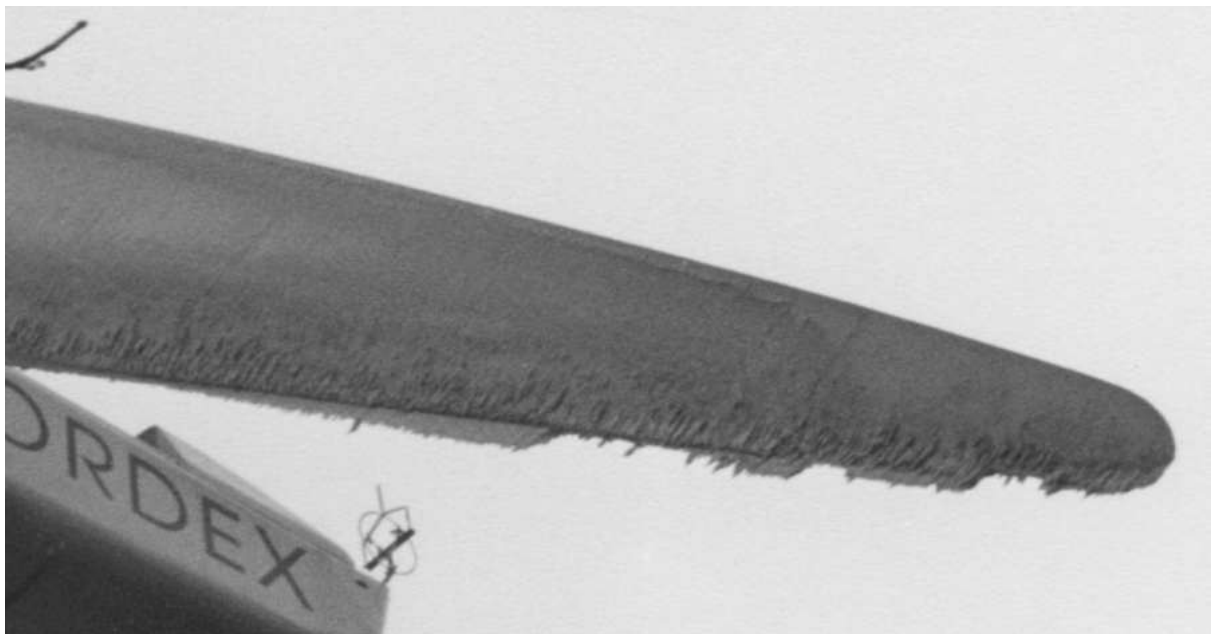


Abb. 2 und 3 Vereiste Rotorblätter von Windenergieanlagen [2] [3].

Das Ziel dieses Projekts ist es, der Vereisung von Windenergieanlagen vorzubeugen. Dieses Ziel soll durch Anti-Eis Beschichtungen erreicht werden.

4. Antifreeze Beschichtungen

In den fünfziger Jahren wunderte sich der kanadische Wissenschaftler Per Scholander darüber, wie arktische Fische in Gewässern überleben können, die kälter sind als der Gefrierpunkt ihres Blutes. Seine Experimente brachten ihn zu der Überzeugung, dass eine Art „antifreeze“ oder Frostschutzmittel in ihrem Blut war. In den späten sechziger Jahren war es dem Biologen Arthur DeVries möglich, Antifreeze Proteine aus dem Blut von antarktischen Fischen zu isolieren [4]. Antifreeze Proteine erzeugen einen Unterschied zwischen Schmelz- und Gefrierpunkt von Wasser. Im Blut der arktischen Fische gefriert die Flüssigkeit erst bei -2°C , die Eiskristalle schmelzen aber wieder bei ca. 0°C . Dieses Phänomen ist als thermische Hysterese bekannt. Man glaubt, dass Antifreeze Proteine das Eiskristallwachstum durch einen Adsorptions-Inhibitions-Mechanismus verhindern. Sie adsorbieren irreversibel an der Eisoberfläche und verhindern so das thermodynamisch bevorzugte Eiswachstum, welches fatale Folgen für die Fische hätte. In neuerer Zeit wurden Insekten bekannt, die, ohne zu gefrieren, noch viel tiefere Temperaturen ertragen können als die arktischen Fische. Man spricht in diesem Fall von „hyperaktiven“ Antifreeze Proteinen.

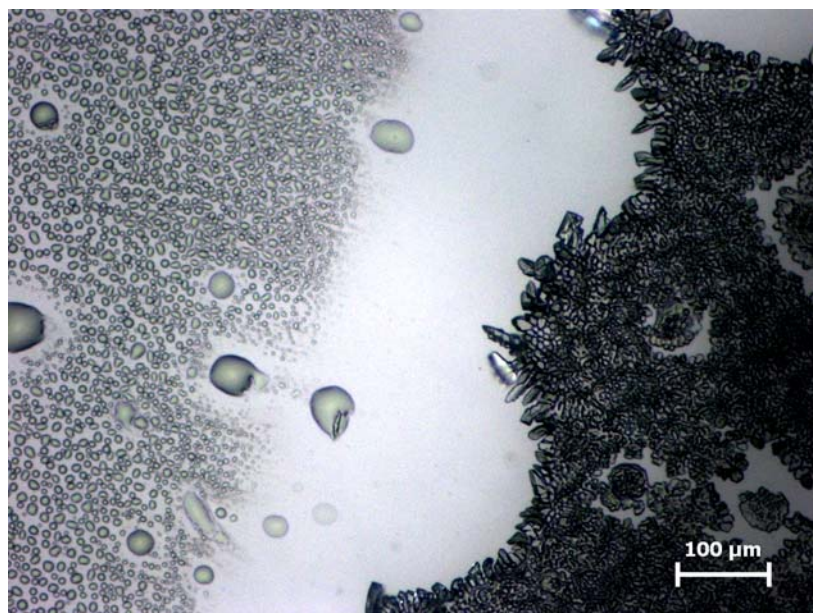


Abb. 4 Eine Antifreeze Beschichtung (Mikroskopaufnahme). Links: Wassertropfen auf der Beschichtung. Rechts: Eis auf unbeschichtetem Glas. Beide Seiten haben die gleiche Temperatur.

Inspiziert von den Antifreeze Proteinen suchten wir nach Beschichtungen, die das Gefrierverhalten von Wasser beeinflussen können. In einer Kältekammer wurde das Gefrieren von Wasser auf vielen verschiedenen Oberflächen untersucht, dabei wurde auch die Gefriergeschwindigkeit auf der Beschichtung mit derjenigen auf Glas verglichen. Schliesslich wurde eine Beschichtung gefunden auf der Wasser erst deutlich später gefriert (siehe Abbildung 4). Das Ziel ist also, durch Beschichtungen das Gefrierverhalten von Wasser so zu beeinflussen, so dass eine Vereisung verhindert oder verzögert werden kann.

Gefrierverzögernde Beschichtungen

Wir haben Beschichtungen beschrieben, welche gefrierverzögernd wirken. Diese sogenannten Antifreeze Beschichtungen wirken, indem sie das Gefrieren von Wasser im Vergleich zu unbeschichtetem Glas verzögern. Unter dem Mikroskop wurde ein Tropfen Wasser von ca. 5 Mikroliter Volumen bei einer konstanten Temperatur von -10°C beobachtet. Dabei wurde die Zeit bis zum Gefrieren des Wassertropfens auf der Beschichtung mit derjenigen auf Glas verglichen. Auf der Beschichtung gefriert der Tropfen deutlich später. Je nach System kann eine Verzögerung des Gefrierens von einer Stunde bis zu über drei Stunden erreicht werden. Dieser Effekt könnte zu einer Nichtvereisung von Rotorblättern unter Klareisbedingungen dienen. Klareisbedingungen sind Vereisungen bei relativ warmen Verhältnissen (Typischerweise über -10°C), bei denen die unterkühlten Tröpfchen nicht sofort anfrieren sondern noch ein Stückchen auf dem Rotorblatt weggeblasen werden, bevor sie gefrieren. In Abbildung 5 ist das gezeigt. Während auf dem unbeschichteten Rotorblatt (oben) die unterkühlten Tröpfchen nach kurzen Wegstrecken anfrieren, könnte, auf dem beschichteten Rotorblatt, das Tröpfchen vom Rotorblatt weggeblasen werden bevor es gefriert. Das verzögerte Gefrieren auf der Antifreeze Beschichtung hätte also eine Nichtvereisung des Rotorblatts zu Folge.

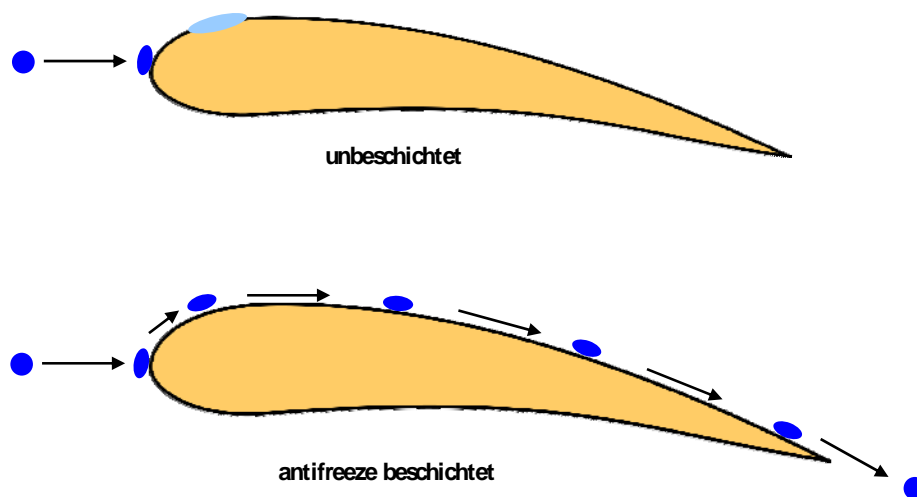


Abb. 5 Schematische Darstellung des postulierten Nichtvereisungseffekts eines Antifreeze beschichteten Rotorblatts unter Klareisbedingungen.

In Zusammenarbeit mit dem Renewable Energy Technology Center GmbH, RETC, haben wir 3 unterschiedlich beschichtete Profile in einem vereisenden Windkanal der Universität Manitoba (Kanada) untersucht. Die Beschichtung in Abbildung 6 war eine Anti-Haft-Beschichtung, Abbildung 7 eine Antifreeze Beschichtung und Abbildung 8 eine superhydrophobe Beschichtung. Abbildungen 6, 7 und 8 zeigen je ein Beispiel eines stark vereisten Flügelprofils mit der entsprechenden Beschichtung. Der Flügel ist von der Haltevorrichtung etwas verdeckt im Hintergrund zu beobachten. Der weiße Pfeil zeigt die Richtung der auftreffenden unterkühlten Tröpfchen, während der rote Pfeil den hinteren Rand der Vereisung des Flügelprofils markiert.

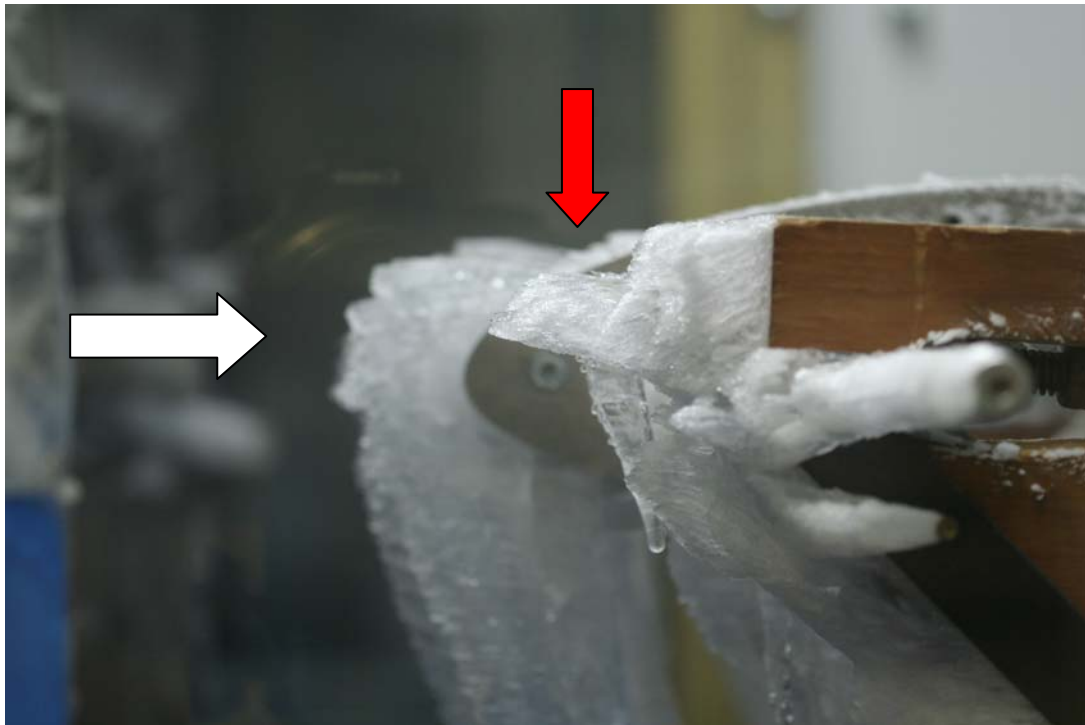


Abb. 6 Stark vereistes Profil welches mit einer Antihafbeschichtung versehen ist.

Die Unterschiede sind leider nicht gross. Was vielleicht bemerkenswert ist, ist die Eisansammlung am Profil welches mit der Antifreeze Beschichtung versehen ist (Abbildung 7). Dort wächst das Eis deutlich weiter nach hinten als bei den andren beiden Profilen. Die Aufnahmen wurden bei Klareis-Bedingungen gemacht, das heisst, dass die Wassertröpfchen nicht sofort anfrieren sondern etwas wandern können bevor sie gefrieren. Bei Abbildung 7 wandern also die Tröpfchen etwas weiter als bei Abbildung 6 oder 8. Das entspricht unseren Vermutungen, dass die Antifreeze Beschichtung das Gefrieren von Wasser verzögert; die Wassertröpfchen gefrieren erst später und wandern deshalb weiter. Allerdings ist der Effekt nicht so stark ausgeprägt, dass eine Nichtvereisung eintreten würde.

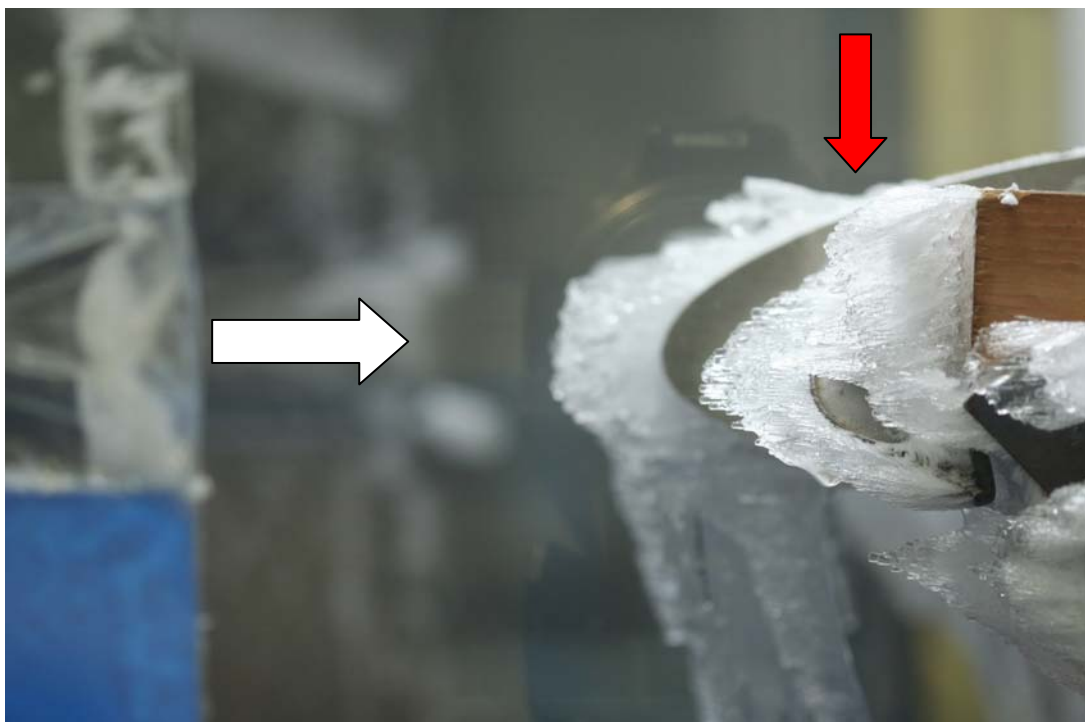


Abb. 7 Vereistes Rotorblatt mit Antifreeze Beschichtung

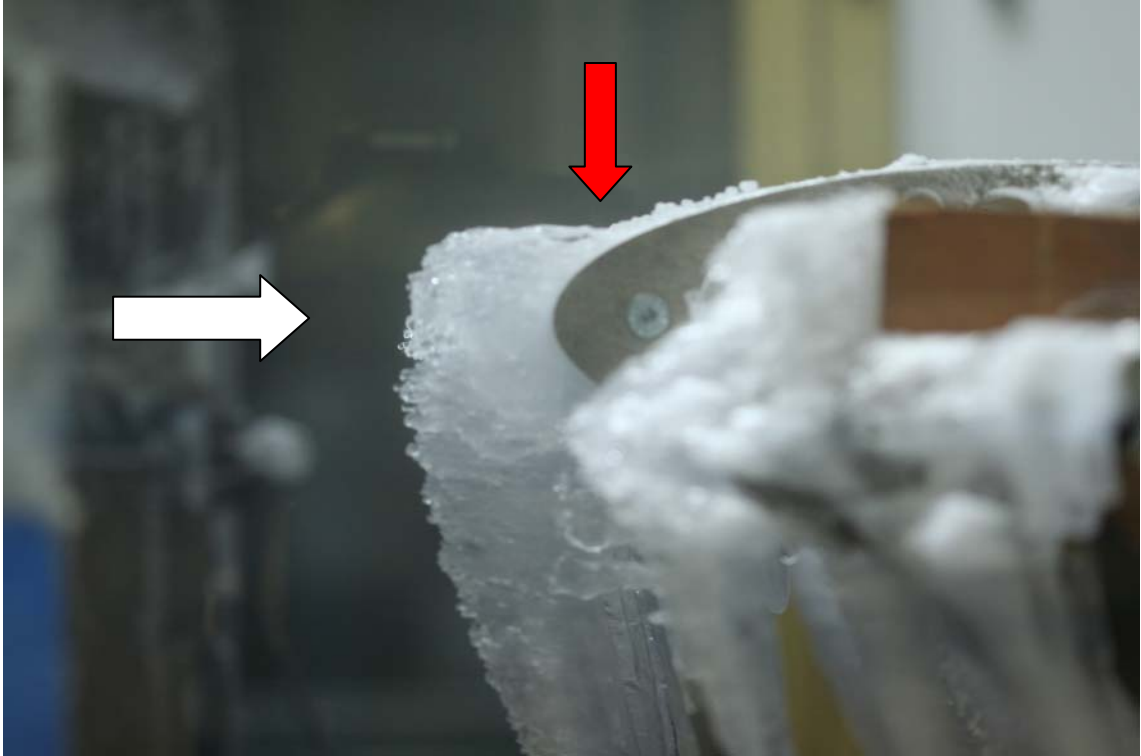


Abb. 8 Vereistes Rotorblatt mit superhydrophober Beschichtung

5. Eisphobe Beschichtungen

Unser nächstes Ziel war es, eine Beschichtung zu entwickeln, auf der Eis nicht oder nur so schwach haftet, so dass eine Vereisung von Rotorblättern vermieden werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, muss als Erstes ein Eisadhäsionstest entwickelt und überprüft werden. Unter Verwendung einer Zugprüfmaschine wurde deshalb ein Eisadhäsionstest entworfen. Abbildung 9 zeigt schematisch den Aufbau dieses Tests. Ein Aluminiumbolzen wird in einen Aluminiumblock eingefroren. Die Apparatur wird in die Zugprüfmaschine eingespannt, und es wird gemessen, welche Kraft nötig ist, um den Bolzen aus dem Block herauszuziehen. Dabei reisst das Eis an der Berührungsfläche mit dem Bolzen und aus der maximalen Zugkraft kann die Eishaftung an Aluminium berechnet werden. Ebenfalls kann der Bolzen mit einer Beschichtung versehen werden und dann resultiert aus dem Zugversuch die Eishaftung an die Beschichtung.

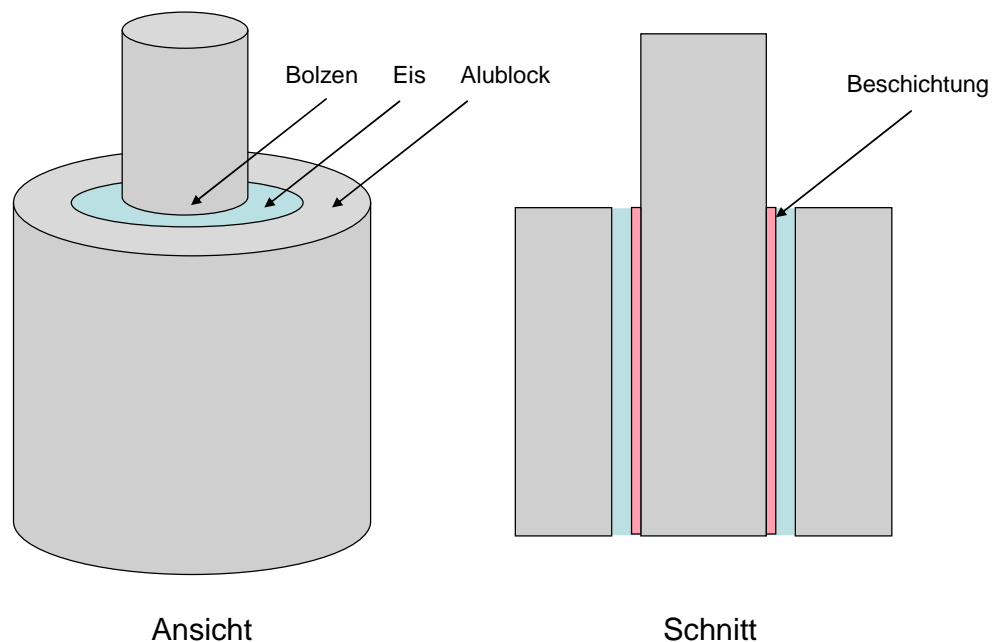


Abb. 9 Schematische Ansicht und Schnitt durch den Eisadhäsionstest.

Die grösste Herausforderung in der Planung dieses Versuches war die Kühlung des Eisadhäsionstests. Da die Eishaftung eine Funktion der Temperatur ist, gilt, je tiefer diese, desto stärker die Haftung des Eises. Optimal wäre es, den Eisadhäsionstest auf eine konstante Temperatur von -10 °C zu kühlen und die Zugversuche ebenfalls bei dieser Temperatur durchzuführen. Leider bedingt das einen Kühlraum mit aufwendiger Thermostatisierung und ist mit den uns zu Verfügung stehenden Mitteln nicht zu realisieren. Wir entschlossen uns darum, den Eisadhäsionstest in einem Tiefkühlteil eines gewöhnlichen Kühlschranks bei ca. -20 °C einzufrieren. Mit einem Thermoelement, welches im Eis platziert wird, kann dessen Temperatur während des ganzen Vorganges gemessen und überprüft werden. Der Eisadhäsionstest wird dann aus dem Kühlfach genommen und schnell an der Zugprüfmaschine montiert. Es wird gewartet, bis die Temperatur auf -14 °C angestiegen ist und dann wird

die Zugprüfung gestartet, die in wenigen Minuten beendet ist. Es hat sich gezeigt, dass mit Hilfe einer Schaumstoffisolierung der Temperaturanstieg so verlangsamt werden kann, dass eine reproduzierbare Messung möglich ist. Abbildung 10 zeigt unseren Eisadhäsionstest eingespannt in die Zugprüfmaschine.

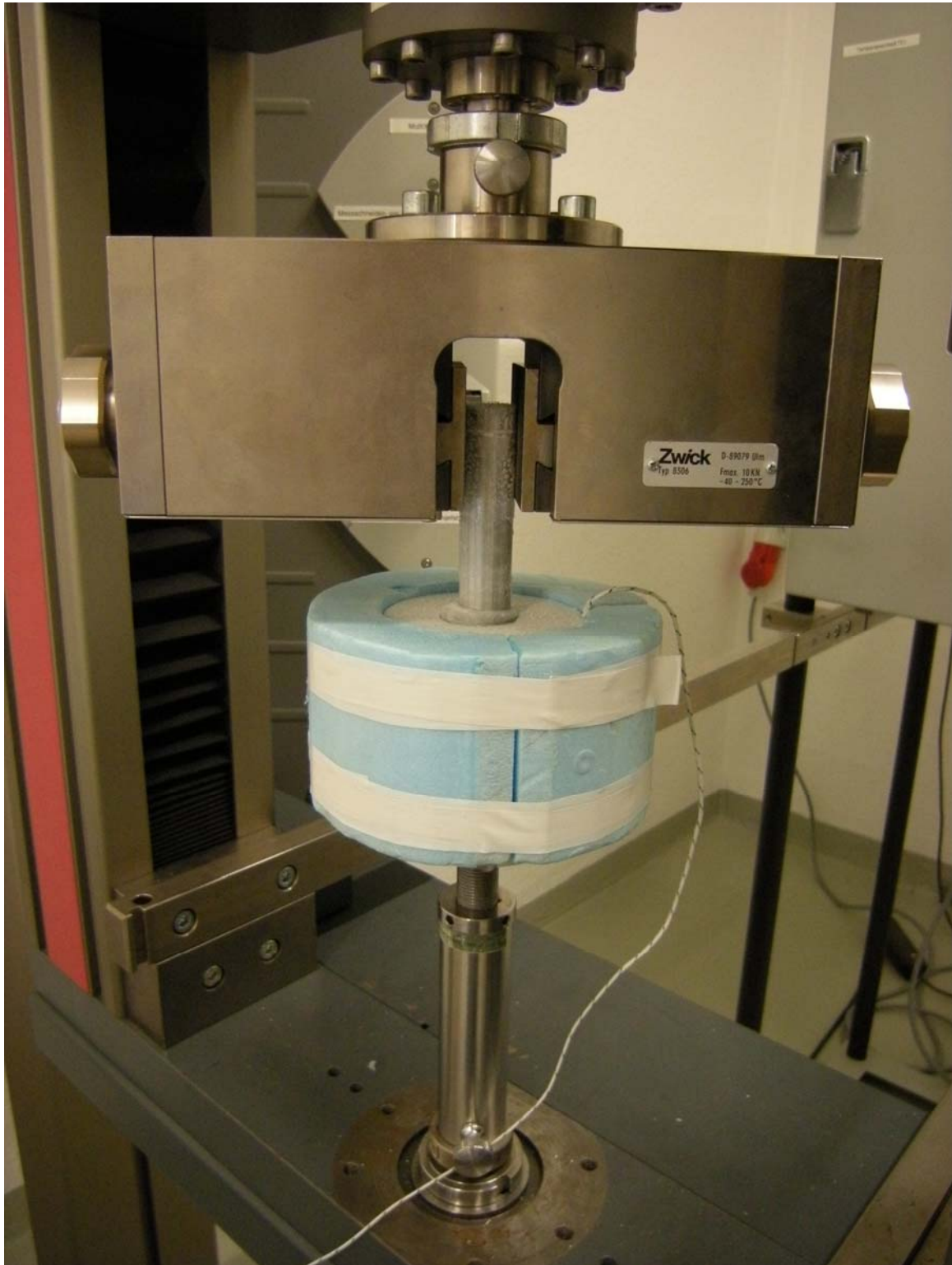


Abb. 10 Zugmaschine und darin eingespannter Eisadhäsionstest (blau die Schaumstoffisolierung).

Das Prinzip unseres Eisadhäsionstests ist nicht neu und wurde von der US-Army eingeführt [5]. Abbildung 11 zeigt deren Apparatur. Der Unterschied zu der unsrigen ist, dass sie mit Druck arbeiten anstelle von Zug und dass sie einen auf -10 °C thermostatisierten Raum besitzen in dem der ganze Prozess stattfindet.

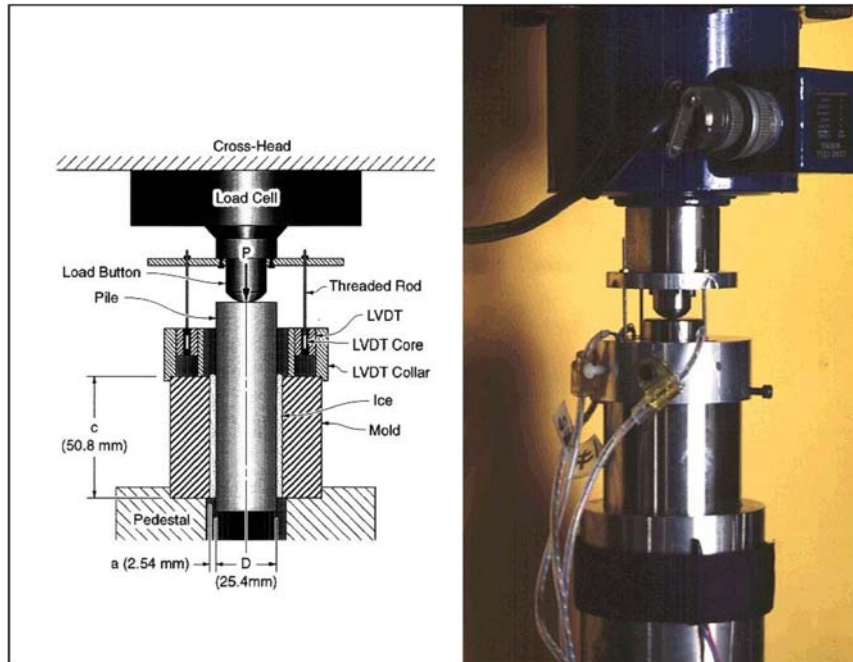


Abb. 11 Eisadhäsionstest der US-Army [6].

Bei dieser und unserer Testmethode werden Scherkräfte gemessen. Wir konnten visuell bestätigen, dass kein Eis am Bolzen haften bleibt, d. h., dass wirklich die Grenzschicht zwischen Eis und Bolzen reißt. Aus der Kraft, bei der die Grenzfläche Eis / Bolzen oder Eis / Beschichtung bricht, lässt sich die Eisadhäsion an den Bolzen oder die Beschichtung nach Formel 1 berechnen.

$$Adhäsion = \frac{Kraft}{Fläche} \quad 1)$$

Die Kontaktfläche des Eises mit dem Bolzen ist $3.707 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Tabelle 1 zeigt unsere Messungen der Eisadhäsionswerte in kPa für einige Standardmaterialien und -Beschichtungen.

Tabelle 1

Material	Durchschnittswerte [kPa], Standardabweichung, (%)	Literaturwerte [kPa], (bei -10 °C)
Aluminium	1592 ± 178 (11.2%)	1577 [5]
Antifreeze Beschichtung	1152 ± 35 (3.1%)	ca. 1000 [7]
Teflon	305 ± 29 (9.5%)	238 [6, 8]

Die von uns gemessenen Eishaftungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur. Auch liegen die Standardabweichungen unserer Messungen mit rund 10% in einem vertretbaren Rahmen. Im Speziellen ist der Wert der Eishaftung an Aluminium fast identisch mit dem Literaturwert [5]. Dies ist wichtig, um einen vergleichbaren Eishaftungsreduktionsfaktor, ARF (Adhesion Reduction Factor), nach Formel 2 zu definieren.

$$ARF = \frac{\text{Adhäsion(Aluminium)}}{\text{Adhäsion(Beschichtung)}} \quad 2)$$

Der ARF vergleicht also die Eishaftung an Aluminium mit derjenigen an die Beschichtung. Je grösser der ARF, desto eisphober das Beschichtungsmaterial. Wir haben z. B. einen ARF von 157 für Lithiumfett gemessen, das heisst, dass die Eishadhäsion an dieses Fett ca. 10 kPa beträgt. Das ist ein sehr kleiner Wert. Diese Adhäsion entspricht einer Scherkraft von ca. 38 N, der eingefettete Bolzen lässt sich also in eingefrorenem Zustand leicht von Hand aus dem Alublock ziehen.

Danach haben wir die Bolzen beschichtet und verschiedene Beschichtungen auf ihre Eishaftung hin untersucht. Abb. 12 zeigt die Resultate. Die Eishaftung zu Aluminium ist zum Vergleich ebenfalls eingezeichnet (horizontale Linie). Es gibt einige Beschichtungen die eine grosse Haftungsverminderung aufweisen. Die vierte Beschichtung mit dem hohen Haftungs-wert ist eine superhydrophobe Beschichtung. Superhydrophobe Oberflächen sind naturgemäss rau und diese Rauheit wirkt sich auf die Eishaftung aus. Obwohl superhydrophobe Oberflächen extrem wasserabweisend sind, sind sie wegen ihrer Rauheit möglicherweise nicht eishaftungsvermindernd. Darum wurde der Zusammenhang von Oberflächenrauheit und Eishaftung untersucht.

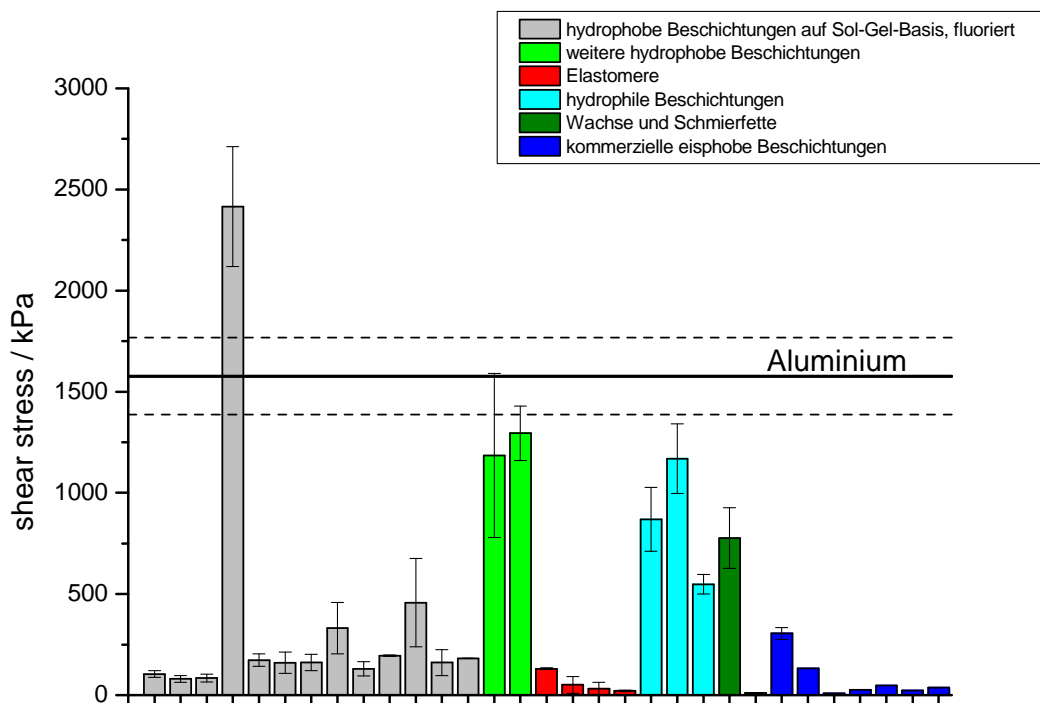


Abb. 12 Verschiedene Beschichtungstypen mit ihren Eishaftungswerten

Der Einfluss der Rauheit auf die Eishaftung

Die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit einer Oberfläche und der Eishaftung ist immer noch nicht eindeutig geklärt. Je nach Messmethode und Vereisungsbedingungen erhält man ganz unterschiedliche Ergebnisse. So wird eine superhydrophobe Oberfläche nicht vereist, wenn man aus einer relativ grossen Entfernung unterkühlte Wassertropfen auf sie fallen lässt, da sie sofort abperlen, wenn die beschichtete Platte geneigt ist. Vereist man solch eine superhydrophobe Oberfläche direkt in einem Gefäss mit Wasser, so kann beim Versuch, sie aus dem Eisblock herauszuziehen, die Eishaftung um ein Vielfaches höher sein, als bei einer unbeschichteten Platte. Dies hängt sehr stark mit der Topographie der Oberfläche zusammen, also mit der Rauigkeit dieser Beschichtung.

Um einen systematischen Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauigkeit und der Eishaftung zu erhalten, wurde deren Einfluss auf verschiedenen Weisen untersucht. Aluminiumbolzen wurden durch unterschiedliche Methoden aufgeraut und die Eishaftung ermittelt.

Rauigkeit von Oberflächen

Die Charakterisierung der Oberflächentopographie ist für viele Bereiche wichtig. So beeinflusst die Rauigkeit einer Oberfläche beispielsweise die Reibung und Gleiteigenschaften von Substanzen beträchtlich. Wie andere Parameter, hängt auch die Messung der Oberflächenrauigkeit stark von der verwendeten Methode aber auch von der Probengrösse an sich ab, da es sich um eine insgesamt statistische Grösse handelt. Die Rauigkeit kann generell in zwei Ebenen untersucht werden. Stellt man sich die Struktur einer Oberfläche ganz einfach als sinusförmigen Verlauf vor, so kann einerseits die Amplitude als Rauigkeit, andererseits auch die Wellenlänge als strukturbestimmendes Merkmal verstanden werden. Bei unseren Untersuchungen konzentrieren wir uns auf die mittlere Rauheit. Sie stellt den Abstand eines Punktes zur Mittellinie dar. Diese Mittellinie schneidet das Profil auf der untersuchten Bezugsstrecke. Die mittlere Rauheit entspricht also dem arithmetischen Mittel der Abweichung von der Mittellinie. Beliebte Messmethode zur Bestimmung der Rauigkeitsparameter ist das Tastschnittverfahren, wobei eine Diamantspitze über eine Oberfläche gleitet und die Rauigkeit abbildet. Ein Nachteil dieser Methode ist die Tatsache, dass diese Spitze die Oberfläche verformen kann und somit die eigentliche Rauigkeitsstruktur verändert. Eine berührungslose Messmethode stellt die konfokale Mikroskopie dar. Die Rauigkeiten dieser Studie wurden mittels eines konfokalen Mikroskops der Firma Leica bestimmt. Man erhält einen flächenbezogenen Rauheitswert S_a . Die untersuchte Fläche betrug in den meisten Fällen $255 \times 191 \mu\text{m}^2$. Schwierigkeiten bereitet die gekrümmte Oberfläche der Bolzen. Dies kann aber mittels der Mikroskop-Software berücksichtigt werden. Diese Software entfernt mithilfe eines mathematischen Operators die Krümmung rechnerisch, so dass nur die Rauigkeit übrigbleibt. Die Rauigkeit wurde an verschiedenen Positionen der Bolzen bestimmt, wobei mindestens fünf Messungen pro Probe durchgeführt wurden.

Erzeugen unterschiedlicher Rauigkeiten

Ausgegangen wird von Aluminium-Bolzen des Typs „Anticorodal“ (Anticorodal-112, EN AW-6082, AlSi1MgMn), deren Oberflächenrauheit auf verschiedene Arten modifiziert werden kann. Das Erzeugen von Rauheit kann zum einen mechanisch als auch chemisch erfolgen. Unter mechanischem Aufrauen versteht man die Nutzung von Schmirgelpapier oder Sandstrahlen, chemisches Aufrauen erreicht man beispielsweise durch Ätzen mit Säure oder Lauge. In dieser Studie wurde verdünnte Salzsäure zum chemischen Ätzen benutzt. Neben den unbehandelten Aluminiumbolzen wurde Aluminium durch Sandstrahlen aufgeraut. Des Weiteren wurden Bolzen an einer Drehmaschine mit Sandpapier so bearbeitet, dass die Rauheit senkrecht zur Bolzenachse eine Vorzugsrichtung bekommt (siehe Abbildung 13).

Auf das Aufrauen der Oberfläche mit Schmirgelpapier allein von Hand wurde verzichtet, da dadurch keine reproduzierbaren Rauigkeiten eingestellt werden können.



Abb. 13 Schematische Darstellung der Vorzugsrichtung der Rauheit, bedingt durch Schleifen mit Sandpapier an einer Drehmaschine.

Das chemische Ätzen erfolgte mit verdünnter Salzsäure. Konzentrierte HCl wurde im Verhältnis 1:3 mit entionisiertem Wasser verdünnt. Bei Raumtemperatur wurden die entfetteten und gereinigten Bolzen in die gerührte Beizlösung gestellt. Als Beizezeit wurde einerseits 5 min und andererseits eine Zeit zwischen 10 und 15 min gewählt. Wann der Bolzen wieder aus der Beizlösung herausgezogen wurde, hing stark mit der fortschreitenden Reaktion zusammen. Aluminium löst sich exotherm in Salzsäure und so erwärmt sich die Lösung allmählich und beschleunigt die gesamte Reaktion. Bis die Reaktion sichtbar voranschreitet, vergeht allerdings etwas Zeit, da zunächst die Oxidschicht aufgelöst werden muss. Ziel war es, die Rauigkeit über die Beizezeit kontrollieren zu können. Dazu wurden Untersuchungen zum Ätzverhalten mit einfachen Aluminium-Plättchen durchgeführt. In Abbildung 14 ist die Rauigkeit entsprechend der Beizezeit dargestellt. Als Beizlösung wurde HCl 1:4 verdünnt mit Wasser benutzt.

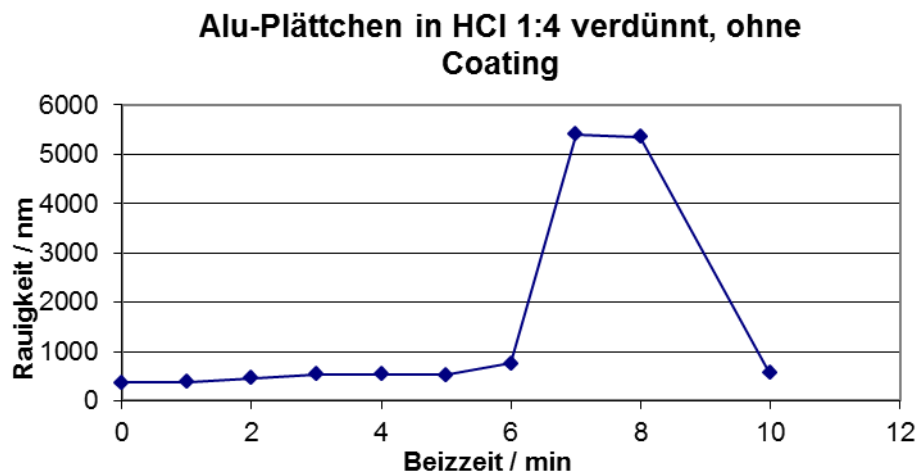


Abb. 14 Rauigkeit gegen Beizezeit für Alu-Plättchen; Beizlösung: HCl, 1:4 verdünnt, RT.

Man erkennt, dass die Rauigkeit zunächst nur sehr langsam ansteigt. Dies hängt mit der Auflösung der Oxidschicht zusammen. Ist nur noch ungeschütztes Aluminium vorhanden, kann es durch die Säure einfach aufgelöst werden und die Rauigkeit nimmt stark zu. Nach einiger Zeit verringert sich die Rauigkeit wieder. Dies ist wahrscheinlich auf einen gleichmässigen Abbau der Aluminium-Schichten zurückzuführen.

Zusammengefasst zeigen diese Voruntersuchungen, dass einige Zeit benötigt wird, bis ein sichtbares Auflösen des reinen Aluminiums eintritt, das dann zu relativ hohen Rauigkeiten im unteren Mikrometerbereich führt.

In Tabelle 2 sind die eingestellten Rauigkeitswerte entsprechend der Oberflächenbearbeitung aufgelistet.

Tabelle 2 Auflistung der Rauigkeiten der verschieden bearbeiteten Aluminium-Bolzen.

Methoden	Rauheit / nm	± / nm
unbehandelt	246	20
sandgestrahlt	794	74
gedreht mit Sandpapier (mit Vorzugsrichtung)	580	81
Beizung mit HCl (1:3 verdünnt), 5 min.	291	38
Beizung mit HCl (1:3 verdünnt), 10-15 min	1300 - 4300	----

Man erkennt, dass die unbehandelten Bolzen eine recht geringe Rauigkeit zeigen. Durch Sandstrahlen wird die Oberfläche deutlich aufgeraut. Diese Rauigkeit kann reproduzierbar eingestellt werden. Bolzen, die mittels Schleifpapier durch Drehen bearbeitet wurden, zeigen eine Rauigkeit zwischen derjenigen der unbehandelten Bolzen und der sandgestrahlten Probenkörper. Beim chemischen Ätzen kann, wie oben gezeigt, durch die Beizzeit eine unterschiedliche Rauigkeit erhalten werden. Es wurden zwei Zeiten gewählt; zum einen wurden die Bolzen fünf Minuten geätzt, zum anderen wurden sie 10 bis 15 Minuten in der Lösung gehalten (zumeist wurden sie nach 13 Minuten entnommen, da dann die Reaktion sehr heftig von Statten ging). Die Rauigkeit nach fünf Minuten Beizzeit steigt nur unwesentlich an. Dagegen erhält man nach mehr als zehn Minuten Ätzzeit Rauigkeiten im unteren Mikrometerbereich. Durch das Beizen mehrerer Bolzen konnten jene, die ähnliche Rauigkeiten zeigten, für die weiteren Untersuchungen zusammengefasst werden. Letztlich spielt bei diesen langen Beizzeiten auch die jeweilige Beschaffenheit der Bolzen und die Temperatur der Lösung eine entscheidende Rolle, was die entstehende Rauigkeit betrifft.

Eishaftung ohne Beschichtung

Ziel ist es, eine Beziehung zwischen der Rauigkeit und der Eishaftung zu erhalten. Zunächst wurde die Eishaftung der unbeschichteten, aber unterschiedlich rauen Bolzen bestimmt. In Tabelle 3 sind die entsprechenden Messergebnisse aufgelistet (siehe auch Abbildung 15).

Tabelle 3 Scherbeanspruchungen τ der unterschiedlich rauen Proben ohne Beschichtung.

Probe	Rauheit / nm	τ / kPa	± / kPa	ARF
Unbehandelt	246	1593.69	71.91	1
Sandgestrahlt	794	3900.58	261.84	0.41
Gedreht (Schleifpapier)	580	2561.52	429.79	0.62
Beizung mit HCl (1:3 verdünnt), 5 min.	291	2680.54	193.97	0.6
Beizung mit HCl (1:3 verdünnt, 10-15 min	> 1300	> 2900	---	

Die ungebeizten Proben zeigen einen eindeutigen Trend: je rauer die Oberfläche ist, umso höher ist die Scherbeanspruchung, wenn die Haftung Eis-Oberfläche gelöst wird. Eine höhere Rauigkeit führt zu einer grösseren Kontaktfläche Eis-Oberfläche und das anwachsende Eis kann sich regelrecht verankern. In Abbildung 15 ist durch die horizontale Linie ausserdem gezeigt, welche Scherbeanspruchung maximal gemessen werden kann, wenn die Eistester komplett mit Wasser gefüllt werden ($\tau = 2900$ kPa). Dieser Wert entspricht einer maximalen Zugkraft der Prüfmaschine von 10 000 N. Für die Bestimmung höherer Scherbeanspruchungen wurden die Messungen mit halbgefüllten Eistestern durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass eine geringere Fläche vereist ist und somit eine geringere Kraft benötigt wird, um die Bolzen herauszuziehen.

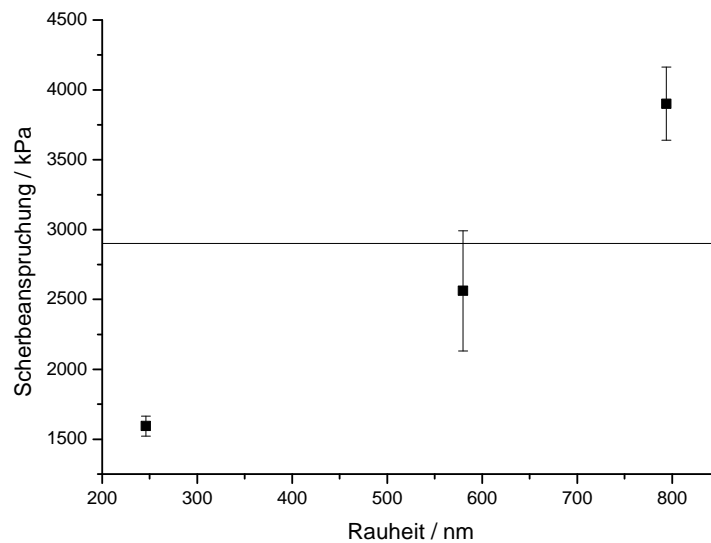


Abb. 15 Scherbeanspruchung in Abhängigkeit von der Rauigkeit der oberflächen-behandelten Aluminiumbolzen (ohne mit Säure gebeizte Probe); horizontale Linie zeigt die bei komplett gefülltem Tester maximal messbare Scherbeanspruchung an.

Bolzen, die fünf Minuten mit Säure gebeizt wurden, zeigen keinen bedeutenden Anstieg der Rauigkeit. Dafür ist deren Anstieg in der Scherbeanspruchung bemerkenswert. Dies bedeutet, dass bei der Behandlung mit Säure offenbar die chemisch veränderte Oberfläche einen grossen Einfluss auf die Eishaftung besitzt.

Bolzen, die länger gebeizt wurden und somit eine Rauigkeit im unteren Mikrometerbereich zeigten, konnten nicht aus den Testern gezogen werden. Die enorme Rauigkeit und einhergehende Vergrösserung der Oberfläche führt dazu, dass das Eis fest an das Aluminium gebunden wird. Es wurde nicht versucht, mit halbgefüllten Eistestern zu arbeiten, weil die Haftung auch für halbgefüllte Tester zu gross scheint.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die entwickelten Antifreeze Beschichtungen zeigten eine signifikante Gefrierverzögerung. Allerdings reichte die Gefrierverzögerung nicht aus, um Modellrotorblätter im vereisenden Windkanal eisfrei zu halten. Die Antifreeze Beschichtungen eignen sich aufgrund ihres hydrophilen Charakters nicht zur Reduktion der Eishaftung.

Deshalb haben wir andere eishaftungsvermindernde, sog. eisphobe, Beschichtungen untersucht. Es wird geschätzt, dass ab einer Eishaftungsverminderung von einem Faktor 100, verglichen mit Aluminium, eine eisphobe Beschichtung das Rotorblatt vor dem Vereisen schützt. Unser Screening verschiedener Beschichtungen hat gezeigt, dass es möglich sein sollte, dieses Ziel zu erreichen.

Der Lotus-Effekt superhydrophober Oberflächen steht in neuerer Zeit im Interesse als eisphobe Beschichtung. Dies deshalb, weil superhydrophobe Oberflächen extrem wasserabweisend sind. Die Vorstellung ist, dass, was gut gegen Wasser ist, auch gut gegen Eis sein sollte. Superhydrophobe- oder Lotus-Oberflächen sind rau und dies gezwungenermaßen da die Rauigkeit eine Voraussetzung für ihre Funktion ist. Wir konnten zeigen, dass Rauigkeit die Eishaftung erhöht, und zwar drastisch. Beschichtungen mit Lotus-Effekt scheiden also als eisphobe Beschichtungen aus. Hier eine Zusammenstellung der Beschichtungen und ihre Eignung für Rotorblätter von Windenergieanlagen.

Beschichtung	Eignung
• <i>Antifreeze Beschichtungen</i>	Nein
• <i>Eisphobe Beschichtungen</i>	Ja
• <i>Superhydrophobe Beschichtungen</i>	Nein

Als Konsequenz aus diesen Studien werden wir eisphobe Beschichtungen weiter untersuchen und entwickeln. Das Erreichen eines ARF-Wertes von 100 (ARF = Adhäsions Reduktions Faktor im Vergleich zu Aluminium) scheint uns möglich.

7. Nationale / internationale Zusammenarbeit

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

8. Referenzen

[1] <http://www.wind-data.ch/windkarte/>

[2] http://www.kellyaerospace.com/wind_turbine_deice.html

[3] <http://wilfriedheck.tripod.com/wiggensb.htm>

[4] Freezing resistance in some antarctic fishes. A. DeVries and D. E. Wohlschlag, *Science* 163 (3871), **1969**, 1073–1075.

[5] a) Toward Developing a Standard Shear Test for Ice Adhesion. N. D. Mulherin, R. B. Haehnel, K. F. Jones, *The Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS, 1998*. b) The bond strength of an ice-solid interface loaded in shear. R. B. Haehnel, N. D. Mulherin **1998** *Ice in Surface Waters*, 597-604.

[6] <http://www.crrel.usace.army.mil/library/technicalnotes/TN03-4.pdf>

[7] Antifreeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen. K. Siegmann, G. Meola, M. Hirayama, Schlussbericht, Bundesamt für Energie BFE, **2009**.

[8] <http://www.nusil.com/library/papers/Silicone%20Ice%20Phobic%20Coatings.pdf>