



Schlussbericht 30. Juni 2013

Nichtvereisende Anemometer

Untersuchung der Wirksamkeit von Anti-Eis-
Beschichtungen im Feldversuch

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

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

Genossenschaft *METEOTEST*
Fabrikstrasse 14
CH-3012 Bern
www.meteotest.ch

Autoren:

Cornelia Pfaffenroth, ZHAW, cornelia.pfaffenroth@zhaw.ch
Johannes Fritsche, Meteotest, johannes.fritsche@meteotest.ch
René Cattin, Meteotest, rene.cattin@meteotest.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Katja Maus

BFE-Programmleiter: Robert Horbaty

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500829 und SI/500829-01

Installationsstandort: Gütsch oberhalb von Andermatt 690327, 167755

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

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract	4
2. Zusammenfassung	4
3. Einleitung / Projektziele.....	5
4. Kurzbeschreibung.....	6
5. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	7
5.1. Beschichtungsoptimierung	7
5.1.1. Haftung und Abrasionsbeständigkeit	7
5.1.2. Auftragung der Anti-Eis-Beschichtungen	9
5.2. Feldversuch	11
5.2.1. Durchgeführte Installationen auf dem Höhenzug „Gütsch“	11
5.2.1.1. Errichtung der Anemometer	11
5.2.1.2. Kameraüberwachung.....	11
5.2.1.3. Meteorologische Sensoren	12
5.2.1.4. Datenübertragung und -übertragung.....	12
5.2.2. Resultate	13
5.2.2.1. Grundlagen	13
5.2.2.2. Vorgehen zur Bestimmung von Vereisungsereignissen.....	14
5.2.2.3. Auswertung der Vereisungsereignisse.....	16
5.2.2.4. Auswertung der Vereisungsereignisse - Einzelereignisse.....	20
5.2.2.5. Einflüsse des Standorts	20
5.3. Stabilität der Beschichtungen.....	21
5.3.1. Optische Beurteilung der Anti-Eis-Beschichtungen.....	21
5.3.2. Kontaktwinkel	23
5.3.3. Fazit zur Stabilität der Beschichtungen	24
6. Zusammenarbeit von ZHAW und Meteotest	24
7. Bewertung und Ausblick.....	24
8. Referenzen	25

1. Abstract

The Institute of Materials and Process Engineering (IMPE), part of the School of Engineering at Zurich University of Applied Sciences (ZHAW) is working intensely on the development of icephobic coatings for application in wind power industry. Surface coatings have been established that are able to lower ice adhesion on laboratory scale by a factor of about 100 compared to aluminium. Within the scope of this pilot project two different anti-ice-coatings were tested in place on the mountain range "Gütsch" in collaboration with Meteotest. Therefore, anemometers have been chosen as a model system. Anemometers play a major role in the detection of ice accretion on wind power plants by monitoring wind velocity and have to provide reliable data even under freezing conditions. Surface coatings have been applied to heated as well as non-heated anemometers.

The project comprised an optimization of surface coating application onto anemometer material and geometry as well as taking measurements during the winter season 2012/13. Events of instrumental icing have been determined by camera surveillance and wind velocity data. Due to hardware failure wind velocity data of the non-coated reference anemometers could not be detected throughout the entire experiment. Thus wind data only allowed comparison of the surface coated anemometers.

None of the anemometers remained ice-free within the course of the field trial. Depending on the kind of surface coating the total duration of instrumental icing of the non-heated anemometers was between 409 and 712 hours (17 and 29,7 days). The heated anemometers showed instrumental icing of 37 to 46 hours.

Results of the pilot project reveal that further optimization of the anti-ice-coatings is required. Slight deviations in the performance of the surface coatings imply that ice adhesion can be influenced well-directed. Besides, a definite discrepancy between results from laboratory test and field trial was recognized. In order to design effective anti-ice-coatings the performance of reliable field trials is mandatory.

2. Zusammenfassung

Das Institute of Materials and Process Engineering (IMPE) der School of Engineering an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) arbeitet intensiv an der Entwicklung von eishaftungsreduzierenden Beschichtungen für die Anwendung im Bereich Windenergie. Es konnten Beschichtungen realisiert werden, auf denen Eis bei Adhäsionsuntersuchungen im Labormassstab um über einen Faktor 100 schlechter haftet als auf Aluminium. Zwei Anti-Eis-Beschichtungen wurden innerhalb dieses Projekts in Zusammenarbeit mit der Firma Meteotest unter realen Bedingungen auf dem Höhenzug „Gütsch“ getestet. Als Modellsystem wurden Anemometer gewählt. Diese werden beispielsweise bei der Eiserkennung auf Windenergieanlagen eingesetzt. Sie müssen daher trotz vereisender Bedingungen zuverlässige Messwerte liefern. Es wurden sowohl beheizbare als auch nicht beheizbare Anemometerschalen mit den Anti-Eis-Beschichtungen versehen.

Das Projekt beinhaltete eine Optimierung der Beschichtungsapplikation auf Material und Geometrie von Anemometerschalen und die Durchführung von Messungen in der Winterperiode 2012/13. Durch Überwachung der Anemometer anhand von Kamera- und Windmessdaten konnten die Phasen instrumenteller Vereisung bestimmt werden. Aufgrund von Hardware-Problemen konnten die Windgeschwindigkeiten der unbeschichteten Referenzsensoren über die gesamte Dauer des Pilotprojekts nicht ermittelt werden. Somit musste der Versuch ohne Referenz durchgeführt werden und nur die Performance der beschichteten Sensoren war direkt miteinander vergleichbar.

Eine differenzierte Betrachtung der Vereisungsereignisse der unterschiedlichen Sensoren zeigte, dass keiner der Sensoren während der Winterperiode eisfrei geblieben ist. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Beschichtungen der unbeheizten Sensoren wurden

zwischen 409 und 712 Stunden (17 und 29,7 Tagen) instrumenteller Vereisung beobachtet. Die beheizten Sensoren zeigten zwischen 37 und 46 Stunden instrumentelle Vereisung.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse des Pilotprojekts, dass eine weitere Optimierung der Anti-Eis-Beschichtungen zwingend notwendig ist. Leichte Unterschiede in der Performance der getesteten Beschichtungen bei Vereisungsereignissen lassen es aber als realistisch erscheinen, dass durch eine geeignete Beschichtung gezielt Einfluss auf das Eisadhäsionsverhalten genommen werden kann. Zudem wurde eine deutliche Diskrepanz zwischen den Ergebnissen aus Labor- und Feldversuch beobachtet. Für die effiziente Entwicklung wirkungsvoller Anti-Eis-Beschichtungen ist das Durchführen zuverlässiger Feldversuche zwingend notwendig.

3. Einleitung / Projektziele

Nach der Atomkatastrophe in Fukushima haben Bundesrat und Parlament den schrittweisen Ausstieg aus der Atomkraft beschlossen [1]. Aufgrund dieser Entscheidung gewinnen die erneuerbaren Energien für die Schweiz an Wichtigkeit. Daher schreitet der Ausbau der Windenergie als eine der „neuen“ erneuerbaren Energien ungebremsst fort. In Zahlen ausgedrückt bedeutet die Energienutzung von 252 TJ aus Windenergieanlagen im Jahr 2011 eine Steigerung um 121 TJ im Vergleich zum Vorjahr [2]. In der Schweiz ist die Windenergie auch weiterhin entwicklungsfähig. Geeignete Standorte stellen allerdings vorzugsweise hoch gelegene Gebiete dar, weil insbesondere dort die Windverhältnisse gut sind. Dies bedeutet, dass die Standorte mit den günstigsten Winden (Jura und Alpen) gleichzeitig diejenigen mit grosser Vereisungshäufigkeit sind. Es wird geschätzt, dass die Vereisung der Windenergieanlagen Produktionsausfälle in der Höhe von einigen Prozenten der jährlichen Stromerzeugung verursacht. Zudem stellen Eisabwurf, Lärmbelastung und Maschinenschäden weitere zu berücksichtigende Aspekte dar. Die aktuelle Technik begegnet der Vereisungsproblematik durch den Einsatz von Blattheizungen. Windenergieanlagen werden in der Regel so betrieben, dass die Anlage bei drohender Vereisung bzw. nach Eiserkennung automatisch abgeschaltet wird. Bei der ersten Generation von Anlagen mit Blattheizung erfolgt das Beheizen der Rotorblätter im Stillstand, bevor die Anlage nach dem Enteisungszyklus wieder starten kann. Neuere Anlagen detektieren Eis über den damit verbundenen Leistungsabfall und die Blattheizung schaltet sich während des Betriebs der Anlage ein. Wird die Toleranzschwelle im Leistungsabfall trotz Beheizung überschritten, so schalten aber auch diese Anlagen aus und heizen im Stillstand weiter. Blattheizungen funktionieren inzwischen recht gut. Eine Verhinderung der Eisbildung auf Rotorblättern durch eine funktionale Beschichtung würde aber ein einfacheres System ermöglichen.

Die Vereisung einer Windenergieanlage wird durch Vergleich der erzielten Leistung mit der gemessenen Windgeschwindigkeit festgestellt. Sinkt die Leistung trotz genügend Wind, ist dies ein Hinweis auf eine Vereisung. Eine zentrale Rolle bei der Eiserkennung spielen somit die für die Bestimmung der Windgeschwindigkeiten eingesetzten Anemometer. Es ist wichtig, dass die Anemometer trotz vereisender Bedingungen zuverlässige Messwerte liefern. Neben dem Zweck der Eiserkennung sind Anemometer auch während der Planungsphase von Windkraftprojekten gefragt.

Oft wird durch die Vereisung der Anemometer im rauen und kalten Klima die Windgeschwindigkeit verfälscht und unterschätzt. Speziell im Schweizer Alpenraum sind aufgrund der dort häufig herrschenden Vereisungsbedingungen nichtvereisende Anemometer für die Windenergieproduktion von Bedeutung. Ein Ansatz zur Verhinderung von Vereisung liegt in der Verringerung der Adhäsionskraft zwischen Eis und Oberfläche. Dies kann durch aktive und passive Systeme erreicht werden. Aktive Systeme stellen Heizungen dar, welche das Eis an der Oberfläche schmelzen und dadurch abrutschen lassen. Der Vorteil solcher Systeme ist ihre hohe Wirksamkeit. Als nachteilig sind der mit dem Heizen verbundene Energieverbrauch und damit auch die Notwendigkeit einer Stromversorgung des Standorts anzusehen. Insbesondere bei Einsatz von Anemometern während der Planungsphase von Windkraftprojekten besteht häufig keine Anbindung ans

Stromnetz. Hier wären sogenannte passive Systeme von entscheidendem Vorteil. Unter passiven Systemen sind Beschichtungen zu verstehen, die sich durch eine starke Verringerung der spezifischen Eishaftung auszeichnen. Ihre Vorteile sind die Energieneutralität und Unabhängigkeit von externer Stromversorgung. Bis heute existiert aber noch keine perfekte eishaftungsreduzierende Beschichtung, so dass auf diesem Gebiet weiterhin intensiver Forschungsbedarf besteht. Neben dem Einsatz rein aktiver bzw. rein passiver Systeme kann auch die Vereinigung beider Strategien in einem sogenannten Hybridansatz interessant sein. Durch eine die Eisanhaftung verringernde Beschichtung könnte der zur Enteisung notwendige Stromverbrauch drastisch gesenkt werden.

Das IMPE arbeitet intensiv an der Entwicklung von eishaftungsreduzierenden Beschichtungen für die Anwendung auf Rotorblättern von Windenergieanlagen. Es konnten Beschichtungen realisiert werden, auf denen Eis bei Adhäsionsuntersuchungen im Labormassstab um über einen Faktor 100 schlechter haftet als auf Aluminium. Die Beschichtungen sollen innerhalb dieses Projekts unter realen Bedingungen im Feldversuch getestet werden, denn letztendlich kann nur ein Feldversuch bei natürlichen Bedingungen die Wirksamkeit der Beschichtungen beweisen. Anemometer sind aus folgenden Gründen als Modellsysteme gut geeignet:

- Sie sind klein und deshalb im Labor zu beschichten.
- Es besteht bereits ein Überwachungskonzept.
- Sie sind mobil, was die Standortwahl erleichtert.
- Sie können beheizt werden.

Sollte der Feldversuch die Ergebnisse aus dem Labor bestätigen, können die untersuchten Beschichtungen in Zukunft nach Bewährung in entsprechenden Tests und Untersuchungen auch auf andere Objekte wie z.B. Windenergieanlagen übertragen werden.

4. Kurzbeschreibung

Zwei von den am IMPE entwickelten Beschichtungen, welche im Labor hohe Eishaftungsverringerungen zeigen, sollen unter realen Bedingungen im Feldversuch getestet werden. Als Modellsysteme werden Anemometer eingesetzt. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit der Firma Meteotest durchgeführt, die bereits umfassende Erfahrungen beim Einsatz von Anemometern unter vereisenden Bedingungen gesammelt hat. Auch die Bereiche Monitoring, Überwachung und Erfolgskontrolle werden von Meteotest gut beherrscht.

In Absprache mit dem Elektrizitätswerk Ursern wurde ein Aufbau der Anemometer unterhalb einer von ihnen auf dem Höhenzug „Gütsch“ installierten Windenergieanlage als Standort realisiert. Der instrumentelle Aufbau umfasst sechs Schalenkreuzanemometer der Firma NRG, von denen drei beheizbar und drei nicht beheizbar sind. Auf diese Weise sollen die beiden Beschichtungssysteme sowie unbeschichtete Referenzen jeweils auf einem beheizbaren und einem nicht beheizbaren Anemometer betrieben werden (Abb. 1).

Zum optischen Monitoring der Anemometervereisung während der Winterperiode wird eine Webcam in Kombination mit einem Infrarot-Scheinwerfer installiert. In einem ersten Schritt sollen die Kamerabilder analysiert und die Perioden mit meteorologischer und instrumenteller Vereisung identifiziert werden. Hierzu werden ebenfalls Temperatur und relative Feuchte erfasst. Zunächst soll der Zustand der Anemometer aus den Kamerabildern klassiert werden. Die Auswirkungen von optisch identifizierten Vereisungsereignissen auf die unterschiedlich beschichteten Anemometer sollen weiterhin durch detaillierte Betrachtung der gemessenen Windgeschwindigkeiten untersucht werden.

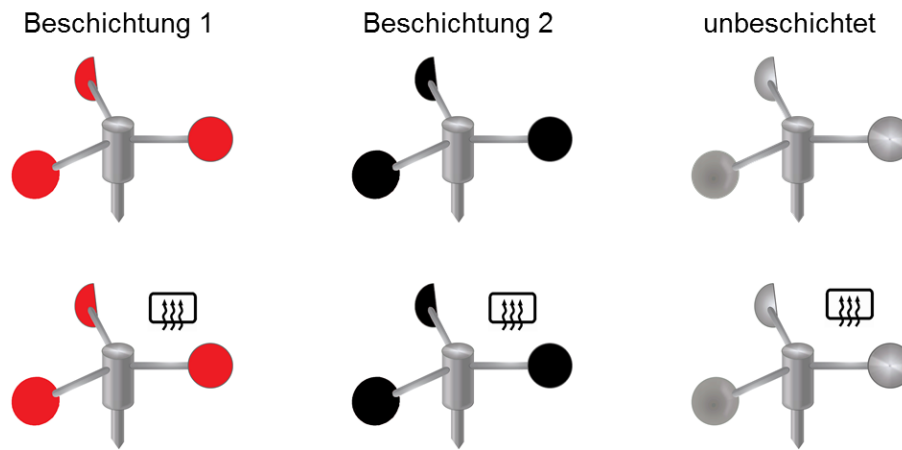


Abb. 1: Versuchsaufbau der sechs Anemometer, die unter vereisenden Bedingungen miteinander verglichen werden sollen.

Anhand des Versuchsaufbaus wird eine durchgehende Überwachung der Anemometer während des ganzen Winters erhalten. Dies ist nötig, weil Vereisungsbedingungen sporadisch auftreten und nur bedingt vorhersehbar sind. Anhand der gewonnenen Messdaten soll es möglich sein, die Funktionalität der Anti-Eis-Beschichtungen zu dokumentieren und die geeigneten Schlüsse über den Einfluss der Beschichtungen und Vorschläge für ein hybrides System mit Heizung und Beschichtung zu formulieren.

Nach der Messperiode im Winter 2012/13 wurden die beschichteten Anemometer abmontiert und im Labor analysiert. Dadurch konnten Schwachstellen und Verbesserungspotential der Beschichtungen erkannt werden.

5. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

5.1. Beschichtungsoptimierung

5.1.1. Haftung und Abrasionsbeständigkeit

Die im Rahmen dieses Projekts untersuchten Anti-Eis Beschichtungen fallen in die Kategorie der funktionalen Beschichtungen. Neben der Funktionalität in Form einer Eishaftungsreduzierenden Wirkung müssen die Beschichtungen aber zudem gut auf dem gegebenen Substrat haften und ausreichende mechanische Stabilität aufweisen. Diese Herausforderungen sind für jedes Substratmaterial wieder neu zu lösen. Deswegen wurden unter Verwendung von Aluminiumplättchen Modellversuche zur Optimierung von Haftung und Abrasionsbeständigkeit der Anti-Eis-Beschichtungen durchgeführt.

Als funktionale Anti-Eis-Beschichtung wurde zum einen ein modifizierter Silikonkautschuk, zum anderen eine Sol-Gel-Beschichtung ausgewählt. Diese Beschichtungen zeigten in Laborversuchen eine Reduktion der Eisanhaftung um den Faktor 106 bzw. 22 im Vergleich zu Aluminium. Aufgrund der chemischen Natur der Anti-Eis-Beschichtung benötigt der modifizierte Silikonkautschuk für eine Aufbringung auf Metall- oder lackierte Oberflächen eine geeignete Oberflächenbehandlung bzw. einen Haftvermittler. Die Sol-Gel-Beschichtung hingegen ist in der Lage, nach Vorbehandlung von Aluminium durch Plasmaaktivierung mit diesem chemische Bindungen einzugehen. Daher wurden für die Auftragung des modifizierten Silikonkautschuks diverse Substanzen mit haftvermittelnden Eigenschaften getestet. Bei der Sol-Gel-Beschichtung hingegen konnte auf diese Untersuchung verzichtet werden. Zudem wurde für beide Beschichtungssysteme die mechanische Stabilität im Rahmen eines Abrasionstests untersucht.

Um die Haftung zwischen Silikonkautschuk und Aluminium zu verbessern, wurden ein Lack, zwei Primer und zwei Silikonkleber getestet. Die Beurteilung der Haftung zum Substrat erfolgte über die Bestimmung der Klebkraft. Hierfür wurden ein Aluminiumplättchen in der Grösse eines Objektträgers und ein Stück Aluminiumfolie mit dem zu untersuchenden Haftvermittler versehen. Der Silikonkautschuk wurde zwischen Plättchen und Folie appliziert. Die Aluminiumfolie wurde in den Kraftaufnehmer einer Zugprüfmaschine eingespannt, wobei Aluminiumfolie zu Aluminiumplättchen während des gesamten Zugversuchs einen Winkel von 90° bildeten (Abb. 2). Mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/min wurde an der Aluminiumfolie gezogen und die Kraft aufgezeichnet, welche zum Versagen der Haftung zwischen Plättchen, Haftvermittler, Silikonkautschuk und Aluminiumfolie führte.



Abb. 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Klebkraft.

Für die untersuchten Systeme wurden Klebkräfte ermittelt, die sich bis zu einem Faktor von Zehn voneinander unterschieden. Die höchste Klebkraft mit 26,23 N/25 mm wurde durch einen Silikonkleber nach einer Trocknungszeit von 20 Stunden zwischen Auftragung und Applikation des eisphoben Silikonkautschuks erreicht.

Um die Abrasionsbeständigkeit diverser Kombinationen der Anti-Eis-Beschichtungen mit Haftvermittlern und Oberflächenbehandlungen beurteilen zu können, wurden Testbedingungen entwickelt, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu unterschiedlich stark ausgeprägten Beschädigungen der Beschichtungen führten. Diese Bedingungen umfassen das Bearbeiten beschichteter Aluminiumplättchen mit der kratzenden Seite eines abrasiven Schwamms zunächst ohne und später mit Zusatz von Scheuermittel.

Die Ergebnisse des Abrasionstests lassen eine Einteilung der untersuchten Beschichtungen in drei Gruppen entsprechend ihrer Performance zu. Gruppe 1 weist Beschädigungen auf, es ist aber zu keiner vollständigen Abtragung über die gesamte Breite der Substratoberfläche gekommen. Beschichtungen der Gruppe 2 weisen pro Schichtsystem ein bis zwei Probekörper auf, die eine vollständige Abtragung über die gesamte Breite der Substratoberfläche zeigen (Abb. 3). Insgesamt ist bei Einsatz von Beschichtungssystemen der Gruppe 2 mit einer deutlich reduzierten Abrasionsbeständigkeit im Vergleich zu den Systemen der Gruppe 1 zu rechnen. Gruppe 3 umfasst Schichtsysteme, bei denen es im Laufe des Abrasionstests zu einem Versagen aller Substrate gekommen ist (Abb. 3).

Die funktionale Anti-Eis-Beschichtung in Form des modifizierten Silikonkautschuks erzielte das beste Ergebnis im Abrasionstest, wenn der modifizierte Silikonkautschuk über einen Silikonkleber auf mit einem Lack versehenem Aluminium aufgetragen wurde. Diese Kombination ist Gruppe 1 zuzuordnen. Die Abrasionsbeständigkeit der Sol-Gel-Beschichtung muss im Vergleich zum Silikonkautschuk als deutlich schlechter eingestuft werden. Alle untersuchten Kombinationen müssen der Gruppe 3 zugeordnet werden.

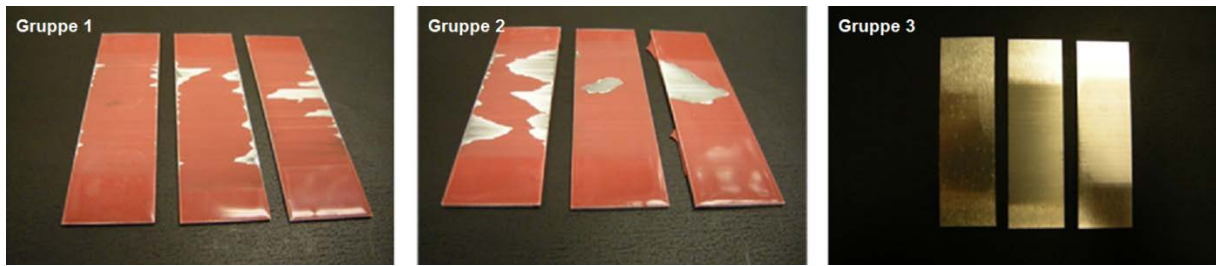


Abb. 3: Beispiele für Proben der Gruppe 1 bis 3 nach dem Abrasionsversuch.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zu Haftung und Abrasionsbeständigkeit zeigen deutlich, welche der getesteten Kombinationen für eine Applikation des modifizierten Silikonkautschuks am besten geeignet ist. Sowohl in Hinblick auf Haftung als auch auf Abrasionsbeständigkeit führt der Einsatz des Silikonklebers als Haftvermittler zu einer deutlichen Optimierung der Beschichtungseigenschaften. Zudem führt die zusätzliche Behandlung des Aluminiumsubstrats mit einem Lack zu einer weiteren Verbesserung der Abrasionsbeständigkeit. Für die Applikation des modifizierten Silikonkautschuks wird daher das System Lack plus Silikonkleber gewählt.

Die Abrasionsbeständigkeit der Sol-Gel-Beschichtung muss im Vergleich zum Silikonkautschuk als deutlich schlechter eingestuft werden. Da Sol-Gel-Beschichtungen aber bereits in Form von wasserabweisenden Beschichtungen auf Front- und Heckscheiben sowie Scheinwerfern von Automobilen erfolgreich Anwendung finden [3], ist auch die Sol-Gel-Beschichtung nach wie vor als geeignet für eine Applikation auf Anemometerschalen anzusehen.

5.1.2. Auftragung der Anti-Eis-Beschichtungen

Aufgrund der Geometrie der Anemometerschalen bietet sich die Applikation der Anti-Eis-Beschichtungen mittels Sprühauftragung an. Um diese optimal durchführen zu können, ist eine entsprechende Einstellung der Viskosität der Beschichtungslösungen, sowie eine Anpassung der Applikationszeitpunkte und Trocknungszeiten notwendig. Durch diese Massnahmen konnten für die Sol-Gel-Beschichtung eine ungleichmässige Auftragung aufgrund zu geringer Viskosität des Sols und eine Rissbildung in der Beschichtung während des Trocknungsprozesses vermieden werden. Bei der Applikation des Silikonkautschuks konnten durch entsprechende Einstellung der Viskosität sowohl Kantenflucht und Schlierenbildung als auch das Auftreten von Orangenhaut verhindert werden. Zudem wurde durch mehrfache Sprühauftragung mit Zwischentrocknung eine homogene Oberflächenbeschaffenheit erzielt.

Die erfolgreiche Aufbringung der Anti-Eis-Beschichtungen wird im Fall der Sol-Gel-Beschichtung durch Bestimmung der Kontaktwinkel von Wasser und Diiodmethan (Tab. 1) nachgewiesen. Beim Silikonkautschuk können die einzelnen Schritte aufgrund der Farbunterschiede der aufgetragenen Komponenten optisch verfolgt werden (Abb. 4).

Tab. 1: Kontaktwinkel und Oberflächenenergien Sol-Gel-beschichteter und unbeschichteter Anemometerschalen.

Oberfläche	statischer Kontaktwinkel in °		Oberflächenenergie in mN/m
	Wasser	Diiodmethan	
Anemometer unbeschichtet	93	52	38,57
Anemometer beschichtet	128	113	9,60

Die Kontaktwinkelmessungen zeigen einen signifikanten Anstieg der Werte für Wasser und Diiodmethan infolge der Aufbringung der Sol-Gel-Beschichtung. Zudem nimmt die Oberflächenenergie deutlich ab. Es ist also von einer erfolgreichen Aufbringung der Sol-Gel Beschichtung auszugehen.

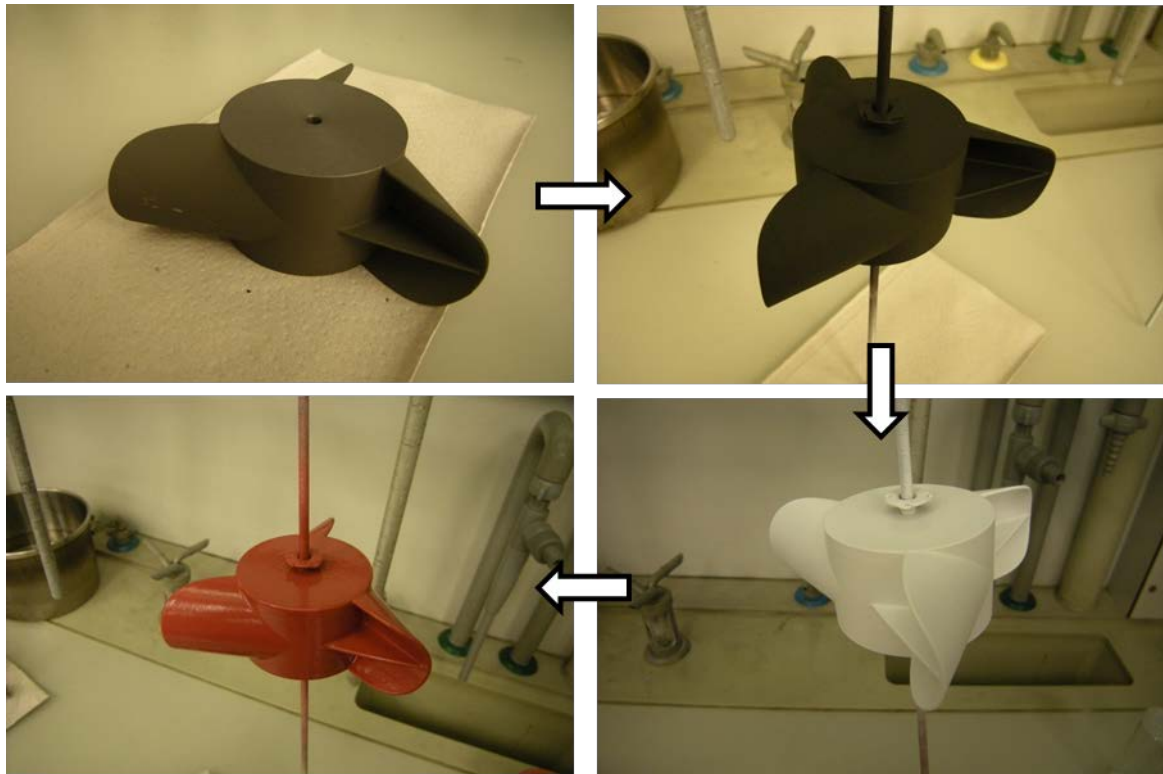


Abb. 4: Optischer Verlauf der Beschichtung von Anemometerschalen.

Für den Feldversuch wurden zwei Anemometerschalen mit der fluorierten Sol-Gel-Beschichtung versehen. Die Oberseite dieser Anemometerschalen war im Vergleich zu den Seiten deutlich glatter. In diesem Bereich kam es zu einer leichten Fleckenbildung innerhalb der Sol-Gel Beschichtung.



Abb. 5: Beschädigung der Beschichtung durch Montage der Anemometerschale.

Für den Feldversuch wurden weiterhin zwei Anemometerschalen mit dem Silikonkautschuk beschichtet. Eine der Anemometerschalen weist eine homogene Beschichtung ohne Kantenflucht auf. Die Oberfläche der anderen identisch beschichteten Anemometerschale weist

minimale Inhomogenitäten auf und zeigt leichte Nasenbildung im Bereich der Flügelkanten. Bei der Montage der mit Silikonkautschuk beschichteten Schalen auf die Anemometerschäfte kam es zu einer unvermeidlichen Beschädigung der Oberfläche durch die aufzuschraubende Mutter (Abb. 5).

5.2. Feldversuch

5.2.1. Durchgeführte Installationen auf dem Höhenzug „Gütsch“

5.2.1.1. Errichtung der Anemometer

Die in Abb. 1 schematisch dargestellten Sensoren wurden am 30.01.2013 an dem Wartungshäuschen unterhalb einer von dem Elektrizitätswerk Ursern auf dem Gütsch betriebenen Windenergieanlage installiert (Abb. 6). Bei den Sensoren handelt es sich um Schalenkreuzanemometer des Typs NRG IceFree III. Diese Sensoren sind über eine 24VAC-Stromversorgung beheizbar.

Die Anemometer wurden an einem horizontalen Ausleger in einem Abstand von 70 cm, 2 m oberhalb der Gebäudekante montiert. Durch die Nord-Süd Ausrichtung des Gebäudes wird die Messeinrichtung mittags durch die Windenergieanlage abgeschattet.



Abb. 6: Installation der Anemometer auf dem Gütsch.

5.2.1.2. Kameraüberwachung

Die Anemometer wurden mit Hilfe einer Webcam vom Typ Mobotix M-12 dual night überwacht. Diese Kamera verfügt über zwei separate Bildsensoren für Tag- und Nachtbetrieb, ist aber nicht beheizt. Sie wurde am 30.01.2013 am Aufgang zum Turm der Windturbine befestigt und so ausgerichtet, dass alle sechs Anemometer erfasst wurden (Abb. 7). Um auch während der Nacht Aufnahmen von den Sensoren machen zu können, wurde zusätzlich ein Infrarotscheinwerfer installiert und auf den Versuchsaufbau ausgerichtet. Dieser wird über einen Dämmerungsschalter ein- bzw. ausgeschaltet. Die Webcam nimmt in Zeitabständen von zehn Minuten ein Bild auf und verschickt dieses an den ftp-Server von Meteotest. Während des Feldversuchs hat sich gezeigt, dass der IR-Scheinwerfer tendenziell zu schwach war, um den gesamten Versuchsaufbau bei Nacht genügend stark auszuleuchten. Insbesondere das sich am linken Bildrand befindende unbeheizte Anemometer mit Silikonkautschuk-Beschichtung wurde vom IR-Scheinwerfer nur unzureichend erfasst (Abb. 7). Dadurch wurde eine optische Beurteilung dieses Anemometers in den Nachtphasen stark erschwert. In der Regel konnten Vereisungsereignisse auf den anderen fünf Anemometern trotz schwacher Ausstrahlung des Kamerabildes dennoch gut identifiziert werden. Die Ursache lag in einer deutlichen

Kontrastzunahme und damit einem deutlich besseren Bild, wenn die Anemometerschalen bzw. –schäfte mit Schnee bedeckt oder vereist waren (Abb. 7). Da die Kamera nicht beheizt war, kam es in sehr seltenen Fällen zu einem Eisansatz, der den Blick auf den Versuchsaufbau erschwerte bzw. verhindert hat (Abb. 7).

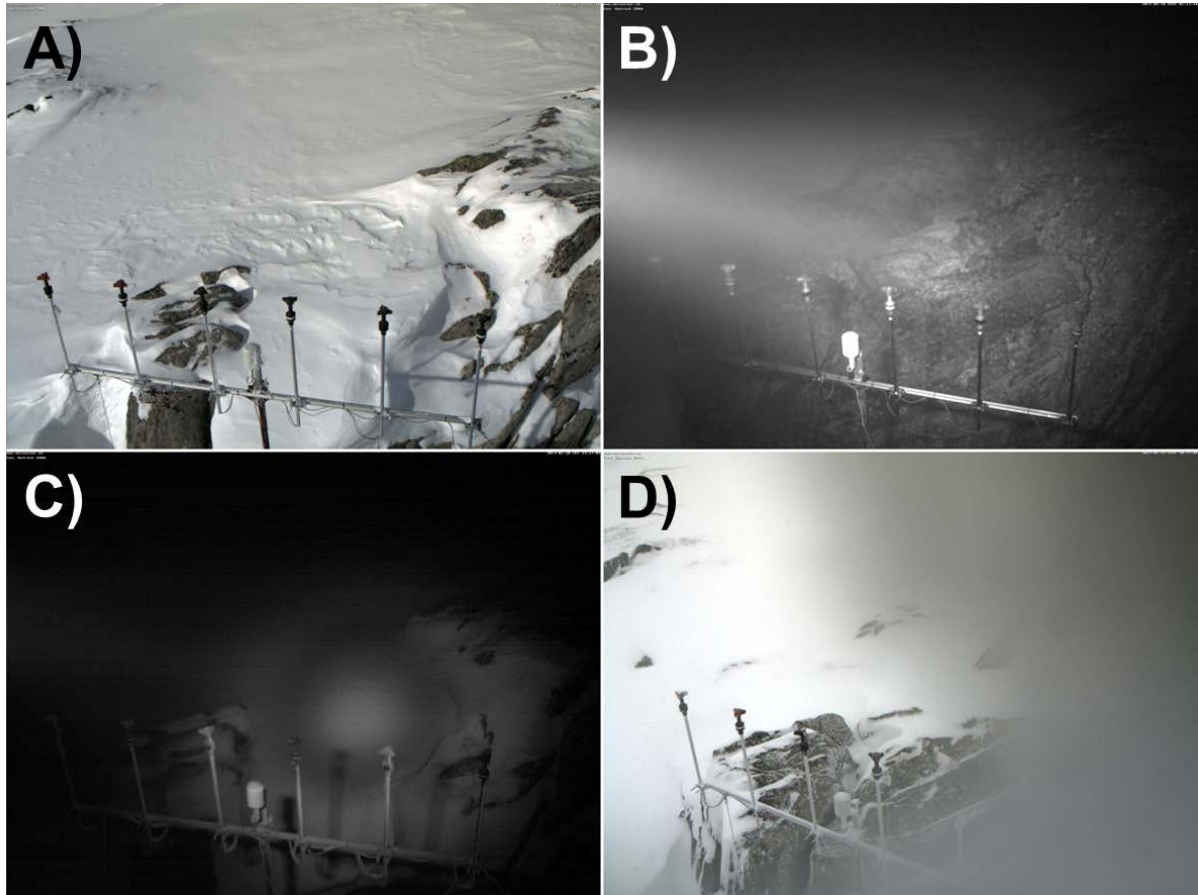


Abb. 7: Aufnahmen der Webcam: A) bei Tag, B) bei Nacht, C) Kontrastzunahme bei Vereisung der Anemometer, D) Vereisung der Kamera.

Insgesamt lieferte die Kamera tagsüber Bilder, die eine gute Beurteilung des Vereisungszustandes der Anemometer erlaubten. Durch die beschriebene Kontrastzunahme bei Schnee- oder Eisanlagerung konnten zudem für die unbeschichteten und mit Sol-Gel-Beschichtung versehenen Anemometer Nachtaufnahmen erhalten werden, die zur Erfassung von Vereisungsereignissen geeignet waren.

5.2.1.3. Meteorologische Sensoren

Die meteorologischen Parameter Temperatur und relative Feuchte liefern wichtige Informationen bei der Beurteilung von Vereisungsereignissen. Zur Messung dieser Parameter wurde ein Rotronic Temperatur-/Feuchtefühler MP103A-T7-W4W mit Strahlungsschutz zusammen mit den Anemometern am Ausleger installiert.

5.2.1.4. Datenerfassung und –übertragung

Die Messdaten der Anemometer wurden von einem Datenlogger (CR1000, Campbell Scientific) in einem Intervall von 1 Sekunde aufgezeichnet und als 10-Minuten Mittelwerte ausgegeben.

Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts wurden die Messdaten der Referenz-Anemometer nicht aufgezeichnet. Eine Analyse dieses Problems beim Hersteller des

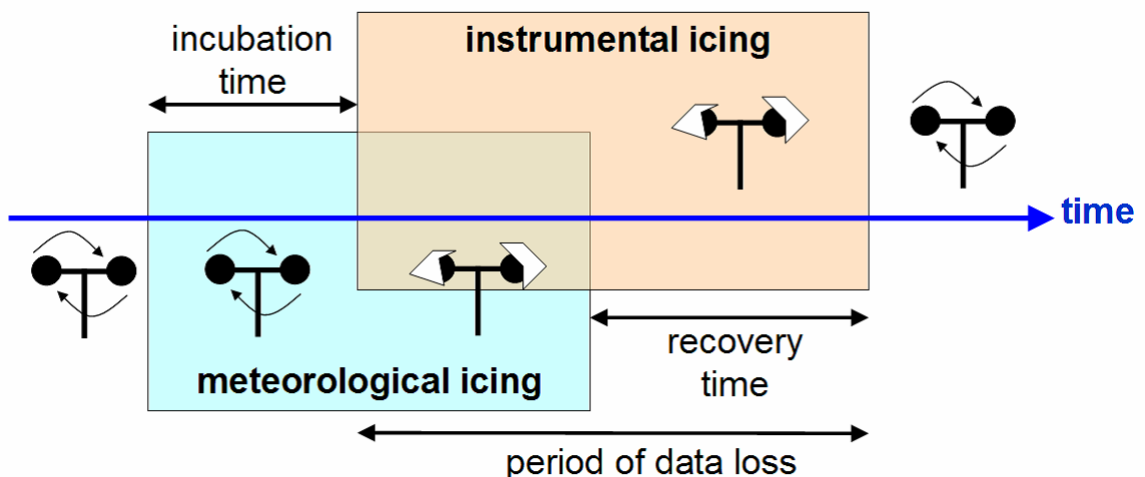
Datenloggers hat ergeben, dass ein Operationsverstärker im Pulszähler bei tiefen Temperaturen nicht korrekt funktioniert. Bei neueren Varianten dieses Datenloggers ist dieses Problem behoben.

Mittels GPRS-Router (3G UMTS/HSDPA router UR5 v2, Conel) wurden Mess- und Bilddaten an Meteotest gesendet. Die Messdaten wurden täglich, ein Bild der Webcam alle 30 Minuten abgefragt.

5.2.2. Resultate

5.2.2.1. Grundlagen

In dem vorliegenden Feldversuch sind Vereisungsereignisse definiert als Schnee- oder Eisansatz an den installierten Anemometern, also an meteorologischen Instrumenten, die der Atmosphäre ausgesetzt sind. Die Vereisung der Schalenkreuzanemometer soll durch die Begriffe meteorologische und instrumentelle Vereisung beschrieben werden. Die meteorologische Vereisung bezeichnet den Zeitraum, innerhalb dessen die meteorologischen Bedingungen für Eisansatz gegeben sind. In diesem Zeitraum wird aktiv Eis gebildet. Die instrumentelle Vereisung hingegen beschreibt die Dauer der technischen Störung eines Instruments durch Vereisung. Sie gibt also den Zeitraum an, in dem Eis am Instrument vorhanden ist. Zwischen dem Beginn bzw. dem Ende der meteorologischen Vereisung bzw. der instrumentellen Vereisung kommt es jeweils zu zeitlichen Verzögerungen. Diese werden als Inkubationszeit und Erholungsphase bezeichnet. Die Inkubationszeit stellt die Verzögerung zwischen dem Beginn der meteorologischen Vereisung und dem Beginn der instrumentellen Vereisung dar. Die Erholungsphase hingegen beschreibt die Verzögerung zwischen dem Ende der meteorologischen Vereisung und der Wiederaufnahme des normalen, eisfreien Betriebs eines Instruments. In Abb. 8 sind die beschriebenen Definitionen am für diesen Feldversuch relevanten Beispiel einer Windmessung illustriert.



Bildquelle: Ian Baring-Gould, René Cattin, Michael Durstewitz, Mira Hulkkonen, Andreas Krenn, Timo Laakso, Antoine Lacroix, Esa Peltola, Göran Ronsten, Lars Tallhaug, Tomas Wallenius, Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Energy Projects in Cold Climates. IEA Wind Recommended practices no. 13. 2012. Available at: <http://arcticwind.vtt.fi/>

Abb. 8: Beschreibung der Vereisung eines Anemometers durch die Begriffe meteorologische Vereisung, instrumentelle Vereisung, Inkubationszeit und Erholungsphase.

Zu Beginn der Zeitachse liegt keine Vereisung vor und das Instrument arbeitet korrekt. Mit Beginn des blau unterlegten Bereichs sind die meteorologischen Bedingungen für Eisbildung gegeben und die meteorologische Vereisung setzt ein. Nach einer gewissen Verzögerung setzt mit dem orange unterlegten Bereich der Eisansatz am Anemometer, also die instrumentelle Vereisung ein. Die Verzögerungsphase repräsentiert die Inkubationszeit. Ihre Dauer ist im Beispiel von Anemometern abhängig von Form und Temperatur der Anemometer sowie von der Oberflächenbeschaffenheit. Im letztgenannten Parameter sollte sich der Einfluss der Anti-Eis-Beschichtungen niederschlagen. Mit Beginn der instrumentellen Vereisung sind die Messwerte des Anemometers fehlerhaft. Sobald die meteorologischen Bedingungen für die Eisbildung nicht mehr gegeben sind, ist die meteorologische Vereisung zu Ende. Der Eisansatz am Instrument bleibt jedoch weiter bestehen, bis das Eis entweder von selber verschwindet oder mit geeigneten Massnahmen entfernt wird. Erst dann ist das Ende der instrumentellen Vereisung erreicht und das Instrument arbeitet wieder normal.

5.2.2.2. Vorgehen zur Bestimmung von Vereisungsereignissen

Um Häufigkeit und Verlauf der instrumentellen Vereisung der unterschiedlich beschichteten Anemometer zu beurteilen, wurden zunächst die Bilder der auf die Sensoren gerichteten Kamera ausgewertet. In einem zweiten Schritt wurden die gemessenen Windgeschwindigkeiten in den Phasen optisch identifizierter instrumenteller Vereisung detailliert betrachtet. Aus Kamera- und Windmessdaten konnten somit die Phasen instrumenteller Vereisung bestimmt werden. Kamerabilder und Windmessdaten lieferten bei diesem Vorgehen komplementäre Informationen, die miteinander kombiniert in der Regel eine gute Basis bildeten, um Vereisungsereignisse sicher zu identifizieren. Abb. 9 zeigt exemplarisch die aufgezeichneten Windmessdaten während eines Vereisungsereignisses mit Stillstand der Rotoren und die Zuordnung der anhand der Kameraaufnahmen gemachten Beobachtungen.

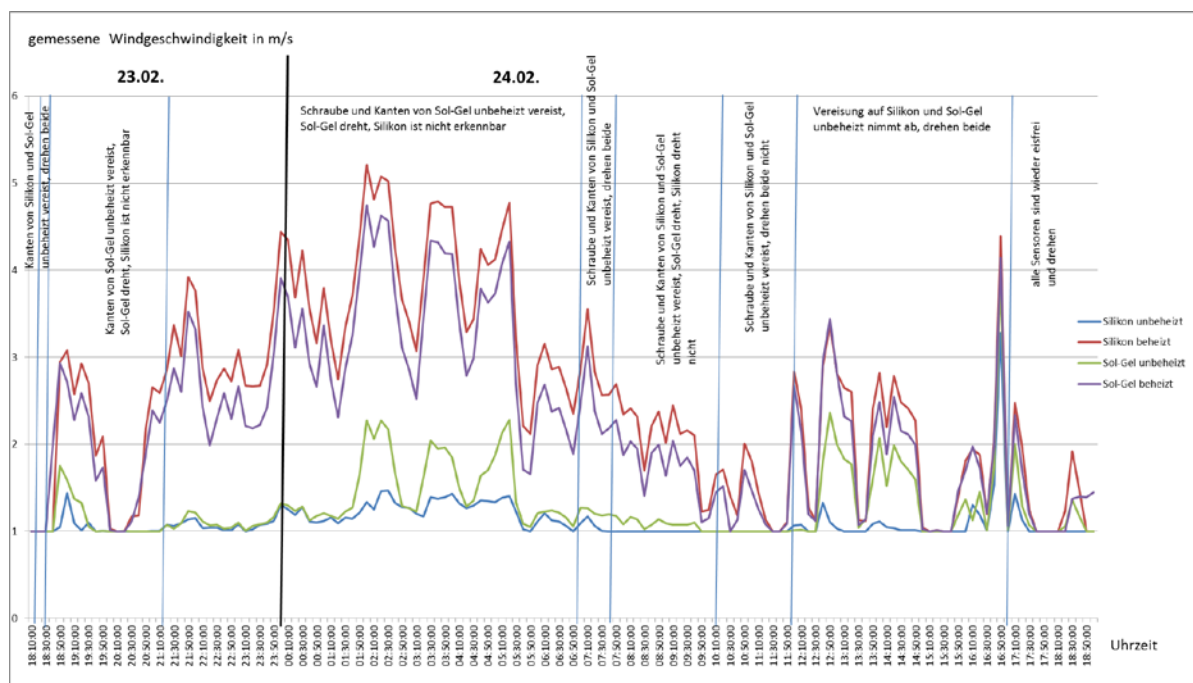


Abb. 9: Verlauf des Vereisungsereignisses am 23./24.02.2103 mit Stillstand der Rotoren.

Das beschriebene Vorgehen konnte nur für die beschichteten Sensoren angewendet werden. Die nicht beschichteten, eigentlich als Referenz eingesetzten Sensoren, lieferten keine Windmessdaten. Somit konnten lediglich die Kamerabilder zur Identifizierung von Vereisungsereignissen genutzt werden. Die angegebenen Zeiträume für instrumentelle

Vereisung sind also nicht durch entsprechende Windmessdaten abgesichert und zudem als weniger exakt anzusehen. Häufig wurde für die beschichteten Anemometer bereits vor und auch nach optischer Identifizierung von Vereisungsereignissen eine Verfälschung der Windmessdaten beobachtet. Bei den beschichteten Anemometern wurden die Zeitspannen instrumenteller Vereisung somit breiter gewählt als bei den unbeschichteten Anemometern, d.h. die Phasen instrumenteller Vereisung sind für die unbeschichteten Anemometer unterbestimmt.

Die Bestimmung der Phasen meteorologischer Vereisung gestaltete sich deutlich schwieriger als die Bestimmung der Phasen instrumenteller Vereisung. Die Option erster Wahl für den vorliegenden Feldversuch besteht darin, den Beginn der meteorologischen sowie der instrumentellen Vereisung als Annäherung mit dem Zeitpunkt des ersten Auftretens von Eis an den Anemometern gleichzusetzen. Die Inkubationszeit wird also auf null gesetzt. Der Zeitraum, innerhalb dessen ein Zuwachs des Eises beobachtet werden kann, wird als meteorologische Vereisung bezeichnet. Demgegenüber wird der Zeitpunkt, ab welchem kein Eis mehr an den Anemometern erkannt werden kann, als das Ende der instrumentellen Vereisung bezeichnet. Dieses Vorgehen konnte allerdings nicht angewendet werden. Die Kamerabilder sind nicht von ausreichender Qualität, um den Zeitraum identifizieren zu können, innerhalb dessen ein Zuwachs des Eises stattfindet. Zudem müsste der unbeschichtete und unbeheizte Sensor zur Bestimmung der meteorologischen Vereisung betrachtet werden, da dieser als Referenz verwendet wird. Für diesen Sensor sind aber bereits die Phasen instrumenteller Vereisung weniger exakt bestimmbar als für die beschichteten Sensoren, da keine Windmessdaten vorliegen. Insgesamt ist dieses Verfahren somit nicht anwendbar.

Eine alternative Bestimmung der Phasen meteorologischer Vereisung kann anhand der Messung von Lufttemperatur und relativer Feuchte erfolgen. Allerdings muss auch dieses Vorgehen mit Vorsicht betrachtet werden. Zwar wurde beobachtet, dass die Vereisung einer Windenergieanlage bei Lufttemperaturen unter 0°C und einer relativen Feuchte grösser 95 % auftritt, wenn sich das Instrument innerhalb der Wolken befindet [5], die Kombination von Temperatur und relativer Feuchte ist aber generell schlecht für die Bestimmung von Vereisungsphasen geeignet. Die Ursache hierfür ist in der Bestimmung der relativen Feuchte bei Temperaturen unter 0°C zu sehen.

Die relative Feuchte bezeichnet das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck der Atmosphäre bei der aktuellen Lufttemperatur. Die relative Feuchte lässt also erkennen, in welchem Grad die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist.

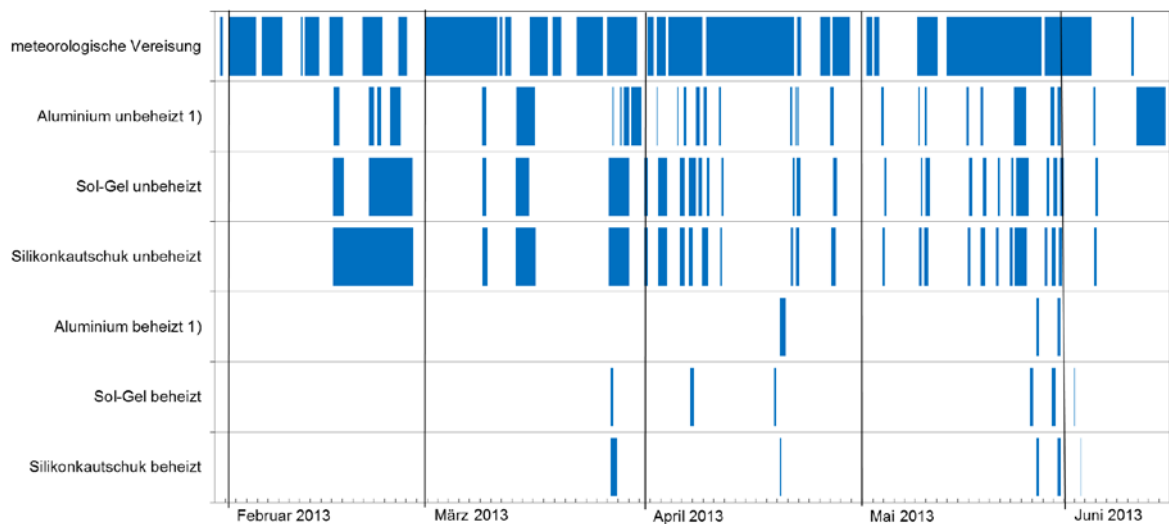
Gemäss den Richtlinien der World Meteorological Organisation WMO [6] muss eine Messung der relativen Feuchte immer vom Sättigungsdampfdruck in Bezug auf Wasser ausgehen. Dieses Vorgehen ist aber bei Temperaturen unter 0°C nicht korrekt, da der Sättigungsdampfdruck über Eis kleiner ist als über Wasser. Dies führt dazu, dass bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von einem zu hohen Sättigungsdampfdruck ausgegangen wird und somit eine gesättigte Luft mit einer relativen Feuchte von 100% nicht mehr erreicht werden kann. Unter dem Gefrierpunkt kann somit keine Sättigung der Luft mehr auftreten. In diesem Sinne ist eine Kombination aus Temperatur und relativer Feuchte schlecht geeignet, um Vereisung bestimmen zu können.

Hinzu kommt, dass die Vereisung stark von der Tröpfchengrösse und Verteilung in der Luft abhängig ist. Kleine Wassertropfen werden vom Wind um die Struktur herumgetragen, ohne dass Vereisung entsteht. Grosse Wassertropfen prallen auf die Struktur und führen zu Vereisung. In beiden Fällen ist die relative Feuchte oberhalb von 95%, aber nur in einem Fall findet tatsächlich Vereisung statt.

Die Verwendung von Temperatur und relativer Feuchte überschätzt die Zeitdauer der meteorologischen Vereisung massiv, da sehr viele "Fehlalarme" vorliegen. Dies kann zu einer grossen Diskrepanz zwischen der instrumentellen Vereisung wie in den Kamerabildern beobachtet und der meteorologischen Vereisung gemäss Temperatur und Feuchte führen. Dennoch wurden die Phasen meteorologischer Vereisung im Rahmen des vorliegenden Feldversuchs aus Mangel an Alternative nach diesem Verfahren bestimmt.

5.2.2.3. Auswertung der Vereisungsereignisse

In dem betrachteten Zeitraum vom 30.01. bis 10.06.2013 wurden 29 Ereignisse beobachtet, welche die Bedingungen von Temperatur und relativer Feuchte im Sinne von meteorologischer Vereisung erfüllten. Diese Ereignisse besaßen eine Gesamtdauer von 2089 Stunden bzw. 87 Tagen. Das längste Ereignis meteorologischer Vereisung hatte eine Zeitdauer von 322 Stunden bzw. 13,4 Tagen. Demgegenüber stehen im Zeitraum vom 15.02. bis 10.06.2013 in Abhängigkeit der unterschiedlichen Beschichtungen der unbeheizten Sensoren zwischen 712 Stunden bzw. 29,7 Tagen und 409 Stunden bzw. 17 Tagen instrumenteller Vereisung. Das längste Ereignis instrumenteller Vereisung trat auf dem Anemometer mit der Silikonkautschuk-Beschichtung auf und besaß eine Zeitdauer von 272 Stunden bzw. 11,3 Tagen. Die beheizten Sensoren zeigten zwischen 37 und 46 Stunden instrumenteller Vereisung. Auch hier weist das mit Silikonkautschuk beschichtete Anemometer mit einer Dauer von 20 Stunden das längste Ereignis instrumenteller Vereisung auf (Abb. 10).



¹⁾ Aufgrund mangelnder Windmessdaten (Seite 14/15) ist eine Unterbestimmung dieser Werte anzunehmen.

Abb. 10: Perioden mit meteorologischer und instrumenteller Vereisung der unterschiedlichen Sensoren.

Insgesamt sind die Perioden meteorologischer Vereisung unerwartet lang im Vergleich zu den Perioden instrumenteller Vereisung. Es wurden Verhältnisse zwischen instrumenteller und meteorologischer Vereisung von 0,02 bis 0,34 ermittelt (Tab. 2). Studien zur Vereisung von Windenergieanlagen am Standort St. Brais und am Standort Gütsch, bei denen die meteorologische Vereisung aus den Kamerabildern bestimmt wurde, lieferten Werte zwischen 3,4 bis 3,6 bzw. 5,2 [7]. Der deutlich geringere Anteil instrumenteller Vereisung in der vorliegenden Studie kann nicht auf die Wirksamkeit der applizierten Anti-Eis-Beschichtungen zurückgeführt werden. Auch der unbeschichtete und nicht beheizte Standardsensor weist mit 0,20 einen deutlich niedrigeren Wert auf als erwartet. Daher muss angenommen werden, dass die Bestimmung von Phasen meteorologischer Vereisung aus der Kombination von Temperatur und relativer Feuchte unrealistisch ist.

Eine differenzierte Betrachtung der Vereisungsereignisse der unterschiedlichen Sensoren zeigt zunächst, dass keiner der Sensoren während der Winterperiode eisfrei geblieben ist. An den unbeheizten Sensoren kam es allerdings immer wieder zu Eisanlagerungen, wohingegen es sich bei den beheizten Sensoren um Einzelereignisse handelte. Zudem wurde bei den beheizten Sensoren kein Stillstand der Rotoren infolge von Vereisung beobachtet (Tab. 3). Daher wird die Vereisung der beheizten Sensoren in dem Kapitel *Einzelereig-*

nisse diskutiert und an dieser Stelle nur auf die unbeheizten Sensoren eingegangen. Diese zeigten während des Untersuchungszeitraums eine Gesamtdauer instrumenteller Vereisung, die je nach Oberfläche zwischen 409 Stunden bzw. 17 Tagen und 712 Stunden bzw. 29,7 Tagen variierte. Das Ausmass der Vereisungsereignisse zeigte sich stark unterschiedlich. In Abb. 10 ist eine Übersicht der Vereisungsereignisse dargestellt, von denen alle unbeheizten Sensoren gleichzeitig betroffen waren.

Tab. 2: Übersicht der Vereisungsereignisse.

Anzahl der Ereignisse meteorologischer Vereisung	Gesamtdauer meteorologischer Vereisung (hh:mm/Tage)	Sensor	Gesamtdauer instrumentelle Vereisung (hh:mm/Tage)	Faktor
29	2089:20 / 87	Aluminium (n.b.) ¹⁾	409:10 / 17	0,20
		Sol-Gel (n.b.)	607:30 / 25,3	0,29
		Silikonkautschuk (n.b.)	712:20 / 29,7	0,34
		Aluminium (b.) ¹⁾	37:10 / 1,5	0,02
		Sol-Gel (b.)	44:00 / 1,8	0,02
		Silikonkautschuk (b.)	45:50 / 1,9	0,02

(n.b.): nicht beheizt; (b.): beheizt

¹⁾ Aufgrund mangelnder Windmessdaten (Seite 14/15) ist eine Unterbestimmung dieser Werte anzunehmen.

Insgesamt zeigte das unbeschichtete Anemometer (Aluminium) die geringsten Werte an Gesamtvereisungsdauer und das mit Silikonkautschuk beschichtete die höchsten. Die Zeitangaben für das unbeschichtete Anemometer müssen allerdings kritisch betrachtet werden, da sie lediglich auf der Auswertung der Kamerabilder beruhen und somit unterbestimmt sind (vgl. Abschnitt *Vorgehen zur Bestimmung von Vereisungsereignissen*). Zulässig ist aber ein Vergleich der beschichteten Anemometer untereinander, bei dem das Sol-Gel beschichtete Anemometer eine 15% kürzere Gesamtvereisungsdauer aufweist als das mit Silikonkautschuk beschichtete. Auch der Anteil von Vereisungsereignissen, bei denen nicht nur die Windgeschwindigkeiten fehlerhaft bestimmt wurden, sondern ein kompletter Stillstand der Rotoren auftrat, ist bei dem Sol-Gel beschichteten Anemometer geringer (Tab. 3). Darüberhinaus ist bei Vereisung die Differenz der gemessenen Windgeschwindigkeiten von beheiztem und nicht beheiztem Sensor bei der Sol-Gel-Beschichtung geringer als bei dem Silikonkautschuk (Abb. 9). Die Abweichung zur tatsächlichen Windgeschwindigkeit ist also kleiner. Dieses Verhalten tritt bei lang anhaltenden Vereisungsereignissen und bei Anhaftung von Eis oder Schnee immer auf. Kommt es zur Reifbildung auf den Anemometerschalen der unbeheizten Sensoren, so ist in zwei von drei Fällen eine höhere Windempfindlichkeit bei dem Sol-Gel-beschichteten Sensor auszumachen. Lediglich in einem Fall ist kein Unterschied auszumachen. Insgesamt können die aufgetragenen Beschichtungen eine Vereisung der unbeheizten Anemometer nicht verhindern. Die beschriebenen Unterschiede zwischen den Beschichtungen deuten aber darauf hin, dass generell durch eine geeignete Beschichtung Einfluss auf das Eisadhäsionsverhalten genommen werden kann.

Tab. 3: Differenzierung der Vereisungsereignisse nach Sensoroberflächen.

Sensor	Dauer instrumentelle Vereisung (hh:mm/Tage)			Anteil Stillstand (%)
	gesamt	ohne Stillstand	mit Stillstand	
Aluminium (n.b.) ¹⁾	409:10 / 17	148:30 / 6,2	260:40 / 10,8	64
Sol-Gel (n.b.)	607:30 / 25,3	244:30 / 10,2	363:00 / 15,1	60
Silikonkautschuk (n.b.)	712:20 / 29,7	235:10 / 9,8	477:10 / 19,9	67
Aluminium (b.) ¹⁾	37:10 / 1,5	37:10 / 1,5	-	-
Sol-Gel (b.)	44:00 / 1,8	44:00 / 1,8	-	-
Silikonkautschuk (b.)	45:50 / 1,9	45:50 / 1,9	-	-

(n.b.): nicht beheizt; (b.): beheizt

¹⁾ Aufgrund mangelnder Windmessdaten (Seite 14/15) ist eine Unterbestimmung dieser Werte anzunehmen.



Abb. 10: Übersicht der Vereisungsereignisse, von denen alle unbeheizten Sensoren betroffen waren.

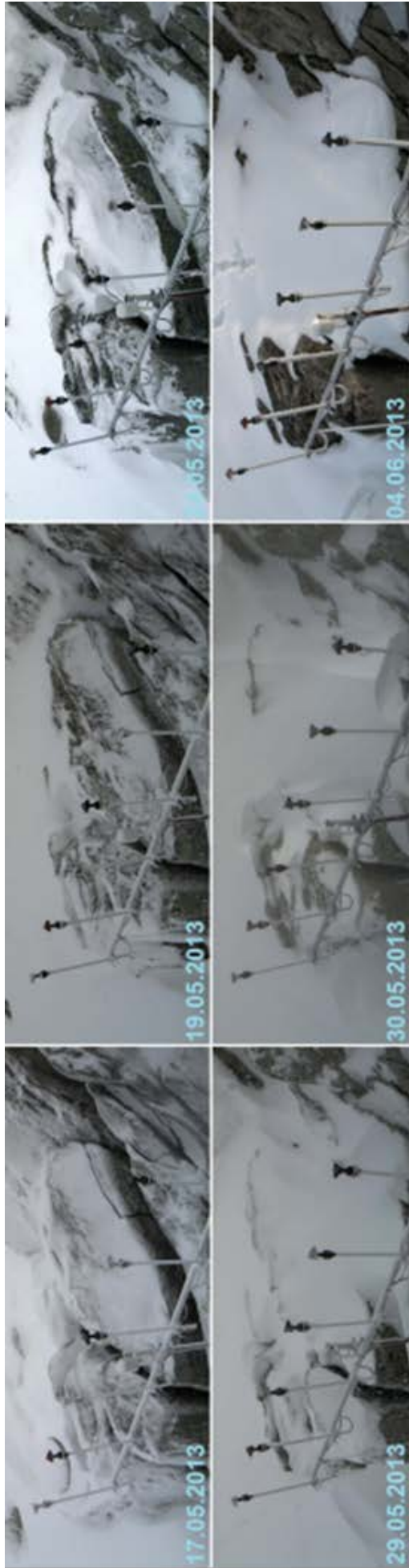


Abb. 10: Übersicht der Vereisungsereignisse, von denen alle unbeheizten Sensoren betroffen waren.

5.2.2.4. Auswertung der Vereisungsereignisse-Einzelereignisse

Über die Dauer des Feldversuchs wurden zwei Ereignisse beobachtet, die nur ein- bzw. zweimal auftraten und dabei alle beheizten bzw. alle nicht beheizten Anemometer betrafen. Am 19.04./20.04.2013 und 26.05.2013 kam es zu einer ausgeprägten Vereisung der beheizten Anemometer. Im gleichen Zeitraum konnte an den nicht beheizten Anemometern keine Eisanlagerung ausgemacht werden (Abb. 11). Hauptsächlich betroffen waren die Rotor-schaufeln der Anemometer und die Schäfte. Zeitgleich ist am 19.04./20.04.2013 in Ander-matt 80 cm Neuschnee gefallen. Daher ist anzunehmend, dass die Vereisung auf ein Schmelzen des Schnees auf der warmen Oberfläche des Sensors mit anschliessendem Gefrieren (secondary icing) beruht.



Abb. 11: Vereisung der beheizten Anemometer am 19.04./20.04.2013.

Am 22.04./23.04.2013 kam es zum Stillstand aller unbeheizten Sensoren, ohne dass auf den Kamerabildern eine Vereisung ausgemacht werden konnte. Die in diesem Zeitraum gemessenen Temperaturen zwischen $-2,9$ und $-4,2$ °C sprechen nicht dafür, dass der Vorfall auf eine Vereisung der Elektronik zurückgeführt werden kann. Es bleibt somit unklar, welche Ursache der Stillstand der Sensoren hat. Der Vorfall wurde in der Auswertung aber als instrumentelle Vereisung betrachtet.

5.2.2.5. Einflüsse des Standorts

Mit der Installation der Anemometer an dem Wartungshäuschen unterhalb einer von dem Elektrizitätswerk Ursern auf dem Gütsch betriebenen Windenergieanlage sind zwei Einflüsse auf die durchgeführten Messungen verbunden. Zum einen werfen sowohl Wartungshäuschen als auch die Rotoren der Windenergieanlage in Abhängigkeit des Sonnenstands Schatten auf den Versuchsaufbau (Abb. 12). Dadurch wird das Abschmelzen von Eis an den im Schatten befindlichen Sensoren verlangsamt. Ein eventuell vorhandener Einfluss der Anemometerbeschichtungen auf den Zeitpunkt der Eisfreiheit wird also überlagert.

Weiterhin fällt bei Betrachtung der von den unterschiedlichen Anemometern gemessenen Windgeschwindigkeiten über einen gesamten Monat auf, dass der beheizte und mit Silikonkautschuk beschichtete Sensor fast durchgängig höhere Messwerte liefert als die anderen Sensoren (Abb. 13). Aufgrund des Versuchsaufbaus (Abb. 6) ist davon auszugehen, dass sich die mit Silikonkautschuk beschichteten Sensoren weniger häufig im Windschatten des Wartungshäuschens befinden als die restlichen Sensoren. Zudem ist anzunehmen, dass sich die Anemometer je nach Windrichtung gegenseitig Windschatten spenden, da sie in einer Reihe montiert sind. Sinnvoll wäre die Installation eines separaten Anemometers isoliert vom restlichen Versuchsaufbau, um diese Einflüsse besser beurteilen zu können.



Abb. 12: Schattenwurf von Rotor (links) und Wartungshäuschen (rechts) auf die Anemometer.

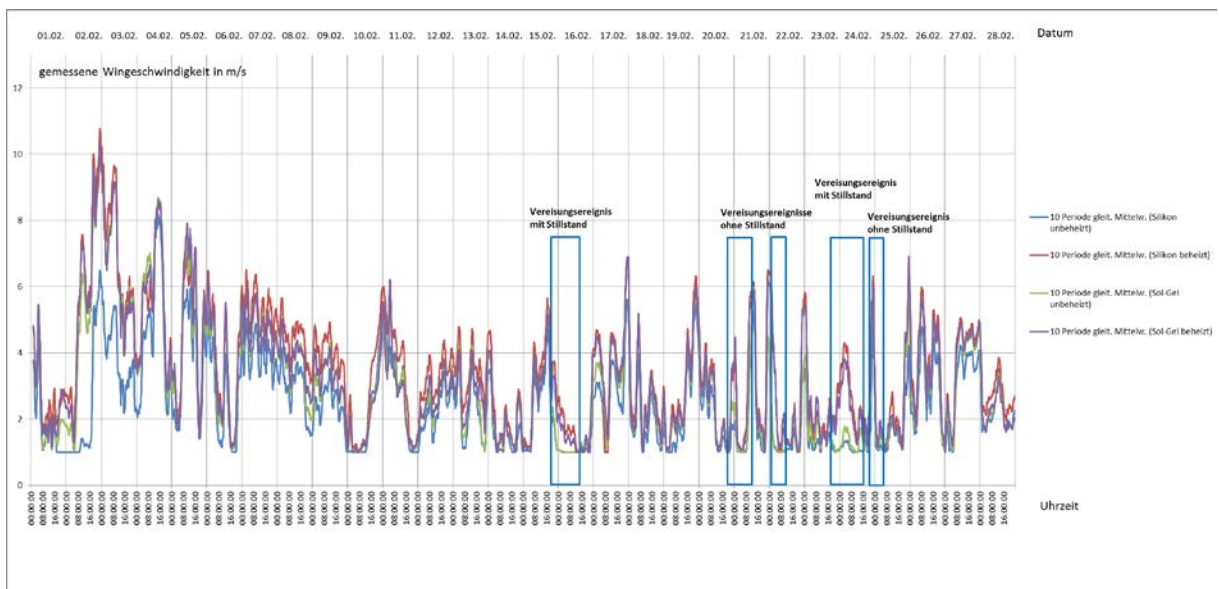


Abb. 13: Gemessene Windgeschwindigkeiten für den Monat Februar 2013 (roter Graph entspricht dem beheizten Anemometer mit Silikonkautschuk-Beschichtung).

5.3. Stabilität der Beschichtungen

Nach der Demontage des Versuchsaufbaus am 01.07.2013 wurden die Anemometerschalen von den Schäften entfernt und die Stabilität der Anti-Eis-Beschichtungen untersucht. Dies geschah in Form einer optischen Beurteilung und durch Bestimmung der Kontaktwinkel von Wasser und Diiodmethan.

5.3.1. Optische Beurteilung der Anti-Eis-Beschichtungen

Die mit Silikonkautschuk beschichteten Sensoren zeigen keine während der Testphase aufgetretenen Beschädigungen (Abb. 14). Lediglich die bereits bei der Montage der Schalen auf die Anemometerschäfte entstandene Verletzung der Beschichtung ist zu beobachten. Diese hat sich während des Einsatzes auf dem Gütsch aber nicht weiter vergrößert. Da die Silikonkautschuk-Beschichtung eine rote Farbe aufweist, ist nicht nur die Resistenz gegen mechanische Beschädigung von Interesse, sondern auch die UV-Stabilität. Um diese beurteilen zu können, wurde zeitgleich zu den im Feldversuch eingesetzten Anemometerschalen eine weitere Schale beschichtet, die während der Dauer des Pilotprojekts dunkel gelagert wurde. Ein optischer Vergleich zeigt keinerlei Farbabweichung der im Feldversuch eingesetzten Anemometerschalen zu der gelagerten Schale (Abb. 15). Die rote Farbe des Silikonkaut-

schuks beruht also mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einem Pigmentfarbstoff und nicht auf einem organischen Farbstoff. Neben ausreichender mechanischer Stabilität ist somit auch UV-Stabilität gegeben.

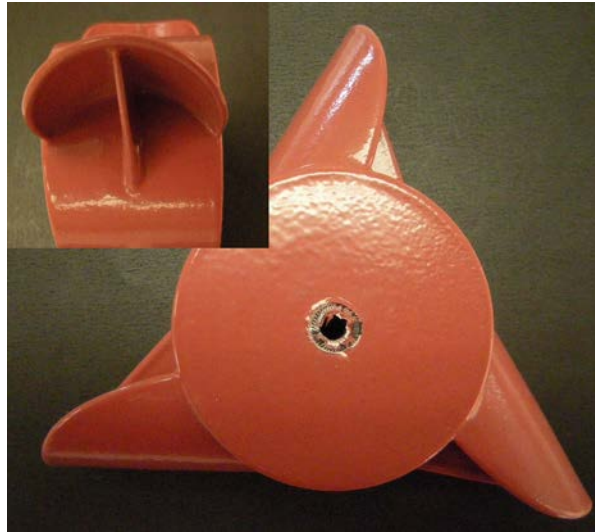


Abb. 14: Zustand der mit Silikonkautschuk beschichteten Anemometerschalen nach der Wintersaison auf dem Gütsch.



Abb. 15: Optischer Vergleich zwischen einer auf dem Gütsch eingesetzten, mit Silikonkautschuk beschichteten Anemometerschale (links) und der im Dunkeln gelagerten (rechts).

Bei Betrachtung der als Referenz eingesetzten, nicht beschichteten Anemometerschalen aus anodisiertem Aluminium fällt auf, dass diese nach dem Winter auf dem Gütsch Kratzer auf der Oberseite aufweisen (Abb. 16). Diese Beobachtung setzt sich bei Betrachtung der Sol-Gel beschichteten Anemometerschalen fort. Auch hier sind Kratzer und damit verbunden eine Beschädigung der Beschichtung auszumachen. Dabei handelt es sich zwar nicht um eine vollständige Abrasion der Sol-Gel-Schicht, es treten aber Bereiche mit massiven Beschädigungen auf (Abb. 17). Die Beschichtung der auf dem nicht beheizten Sensor eingesetzten Anemometerschale weist dabei optisch mehr Beschädigungen auf als die auf dem beheizten Sensor.



Abb. 16: Kratzer auf den unbeschichteten Anemometerschalen nach der Testsaison auf dem Gütsch.

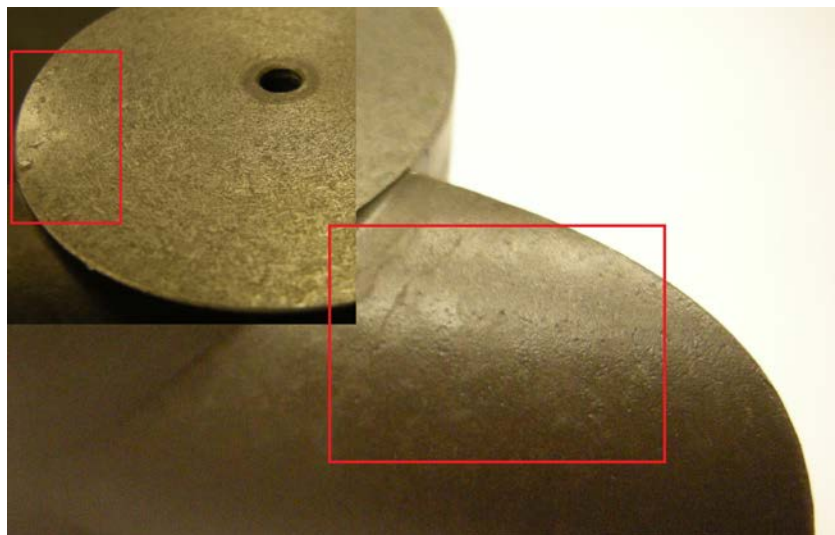


Abb. 17: Defekte in der Sol-Gel-Beschichtung nach der Testsaison auf dem Gütsch.

5.3.2. Kontaktwinkel

Die Bestimmung der Kontaktwinkel, welche Wasser und Diiodmethan auf den Oberflächen der Anemometerschalen nach der Testsaison auf dem Gütsch ausbilden, bestätigt die Aussagen der optischen Beurteilung. Im Fall des Silikonkautschuks werden für die Oberflächen des beheizbar und des nicht beheizbar betriebenen Sensors nahezu identische Werte für Kontaktwinkel und Oberflächenenergie erhalten (Tab. 4). Zudem besteht beim Vergleich der Werte mit denen der im Dunkeln gelagerten Anemometerschale kein signifikanter Unterschied. Insgesamt kam es während des Einsatzes der Beschichtung am Gütsch zu keinen merklichen Veränderungen der Oberflächeneigenschaften und des optischen Erscheinungsbildes. Bei der Sol-Gel-Beschichtung hingegen ist eine deutlich ausgeprägte Abnahme der Kontaktwinkel und eine Zunahme der Oberflächenenergie zu verzeichnen. Es werden Werte erhalten, die vielmehr den Erwartungen für Aluminium(oxid) entsprechen als denen für die Sol-Gel-Beschichtung. Diese Veränderungen sind bei dem beheizten Sensor stärker ausgeprägt als bei dem nicht beheizten. Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen bestätigen den optischen Eindruck, dass es zu einer massiven Beschädigung der Beschichtung gekommen ist, aber nicht, dass diese Beschädigung auf dem nicht beheizten Sensor stärker ausgeprägt ist als auf dem beheizten. Neben den Kontaktwinkeln der beschichteten Sensoren wurde auch der Kontaktwinkel für die unbeschichteten Referenzsensoren aus anodisiertem Aluminium bestimmt. Aus den Daten wird deutlich, dass sich auch die Oberfläche der

Referenzsensoren während der Testperiode verändert hat. Dies äussert sich in einer Abnahme der Kontaktwinkel und einer Zunahme der Oberflächenenergien. Im Gegensatz zu den Sol-Gel beschichteten Sensoren sind hier aber die Veränderungen bei dem unbeheizten Sensor stärker ausgeprägt als bei dem beheizten. Eine mögliche Erklärung ist in der Beschädigung bzw. Veränderung der Oxidschicht des Aluminiums während der Testsaison zu sehen.

Tab. 4: Kontaktwinkel und Oberflächenenergien zur Beurteilung der Stabilität der Beschichtungen.

Oberfläche	statischer Kontaktwinkel in ° unbeheizter/beheizter Sensor		Oberflächenenergie in mN/m unbeheizter/beheizter Sensor
	Wasser	Diiodmethan	
Aluminium vor Test-saison	93	52	38,57
Aluminium	67 / 78	45/42	52,86 / 47,69
Sol-Gel-Beschichtung vor Testsaison	128	113	9,60
Sol-Gel-Beschichtung	73 / 63	58 / 48	44,96 / 53,57
Silikonkautschuk	106 / 104	73 / 72	26,49 / 26,61
Silikonkautschuk, dunkel gelagert	108	70	26,76

5.3.3. Fazit zur Stabilität der Beschichtungen

Optische Beurteilung und Kontaktwinkelmessungen zeigen, dass die Beschichtung basierend auf Silikonkautschuk die Bedingungen während des Feldversuchs unbeschadet überstanden hat. Für die Sol-Gel-Beschichtung hingegen hat sich das bereits beim Abrasionstest im Labormassstab (Kapitel 5.1.1.) beobachtete, deutlich schlechtere Abschneiden auch im Feldversuch bestätigt. Für den Einsatz dieser Beschichtung in der Praxis müssen Anbindung und mechanische Stabilität zwingend verbessert werden.

6. Zusammenarbeit von ZHAW und Meteotest

Das beschriebene Pilotprojekt stellt eine Zusammenarbeit zwischen der ZHAW und der Firma Meteotest dar. Die ZHAW führte eine Optimierung der Beschichtungssysteme und -prozesse für die Anwendung auf Schalenkreuzanemometern durch, beschichtete beheizbare und nicht beheizbare Anemometer und wertete die im Feldversuch gewonnenen Daten mit Unterstützung von Meteotest aus. Der Projektbeitrag der Firma Meteotest bestand in einer geeigneten Standortsuche für den Versuchsaufbau, in der Planung und Organisation des Versuchsaufbaus und schliesslich der Installation, dem Betrieb und der Wartung des Feldversuchs. Die Zusammenarbeit der Projektpartner war während des gesamten Projektverlaufs sehr angenehm und konspirativ.

Zudem gilt der Firma NRG ein Dank für die aktive Unterstützung bei der Wahl des Materials der Anemometerschalen und der Bereitstellung von Testmaterial für Vorversuche. Dem Elektrizitätswerk Ursern gilt ein Dank für die Möglichkeit, den Feldversuch auf ihrem Gelände zu errichten.

7. Bewertung und Ausblick

Die geplanten Arbeitspakete des Projekts konnten in vollem Umfang durchgeführt werden. Aufgrund der lang anhaltenden Wintersaison 2012/13 auf dem Gütsch wurden bis Ende Juni 2013 Daten gesammelt.

Die Installation des Versuchsaufbaus konnte zeitlich so realisiert werden, dass ab dem 30.01.2013 Windmessdaten der beschichteten Sensoren und ab dem 14.02.2013 Kamerabilder zur Verfügung standen und analysiert werden konnten. Bei tiefen Temperaturen wurden die Messdaten der Referenz-Anemometer aber nicht aufgezeichnet. Bei dem eingesetzten Datenlogger handelt es sich um ein vielfach bewährtes Gerät; ein derartiger Ausfall war nicht vorhersehbar. Als Konsequenz musste der Feldversuch ohne Referenz durchgeführt werden und nur die Performance der beschichteten Sensoren war letztendlich wirklich miteinander vergleichbar. Diese Tatsache bedeutet eine deutliche Einschränkung in der Beurteilung der getesteten Anti-Eis-Beschichtungen. Aufgrund der fehlenden Windmessdaten konnten Differenzen wie sie zwischen Sol-Gel-Beschichtung und Silikonkautschuk auftraten zwischen beschichteten und unbeschichteten Sensoren nicht erfasst werden. Ein weiterer Faktor mit Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der gesammelten Daten stellt die Standortwahl dar. Durch den Aufbau der Anemometer unterhalb einer vom Elektrizitätswerk Ursern auf dem Höhenzug „Gütsch“ installierten Windenergieanlage kam es über Mittag zu einer Abschottung der Messeinrichtung.

Die Ergebnisse des Pilotprojekts zeigen, dass alle nicht beheizten Sensoren unter den am Gütsch herrschenden Bedingungen vereisen. Eine weitere Optimierung der Anti-Eis-Beschichtungen ist also zwingend notwendig. Interessant sind aber zwei Tatsachen. Zum einen zeigt ein Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeiten auf beheiztem und unbeheiztem Sensor bei Vereisungsereignissen unterschiedlich starke Differenzen für die beiden untersuchten Beschichtungen. Daher scheint es realistisch, dass prinzipiell auch unter realen Bedingungen durch eine geeignete Beschichtung gezielt Einfluss auf das Eisadhäsionsverhalten genommen werden kann. Zum anderen ist das Abschneiden der Sol-Gel-Beschichtung im Vergleich zum Silikonkautschuk im Feldversuch als besser einzustufen. Im Laborversuch reduzierte die Sol-Gel-Beschichtung die Anhaftung von Eis im Vergleich zu Aluminium aber nur um den Faktor 22, wohingegen der Silikonkautschuk einen Faktor von 106 erreichte. Diese Tatsache zeigt sehr deutlich die Diskrepanz zwischen Labor- und Feldversuch unter realen Bedingungen auf. Für die Entwicklung wirkungsvoller Anti-Eis-Beschichtungen ist das Durchführen zuverlässiger Feldversuche zwingend notwendig.

Insgesamt führte das Pilotprojekt zu einer Erweiterung des Wissens über Anti-Eis-Beschichtungen und es konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Diese bilden eine solide Basis, um durch weitere Optimierung von Versuchsaufbau und –standort ein Test-Setup zu erreichen, das eine verlässliche Beurteilung der Wirksamkeit von Anti-Eis-Beschichtungen unter realen Bedingungen erlaubt. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, ist ein solches Setup ist für die effiziente Entwicklung von Anti-Eis-Beschichtungen unerlässlich.

8. Referenzen

- [1] Aktuelles der Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft vom 25.05.2011, <http://www.admin.ch/aktuell/00089/?lang=de&msg-id=39337>.
- [2] Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2011.
- [3] M. A. Aegerter, R. Almeida, A. Soutar, K. Tadanaga, H. Yang, T. Watanabe (2008) *J Sol-Gel Sci Technol* **47**, 203-236.
- [4] K. Siegmann, M. Susoff, M. Hirayama (17.10.2011) *Nichtvereisende Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen – Schlussbericht*.
- [5] R. Cattin *Alpine Test Site Gütsch – Monitoring einer Windkraftanlage unter Vereisungsbedingungen*, Eis und Fels **2007**, Andermatt, Schweiz.
- [6] WMO/CIMO *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, Chapter 4, Annex 4.A, Item 17.
- [7] R. Cattin, S. Koller (15.08.2011) *Vereisung WEA St. Brais – Schlussbericht*.