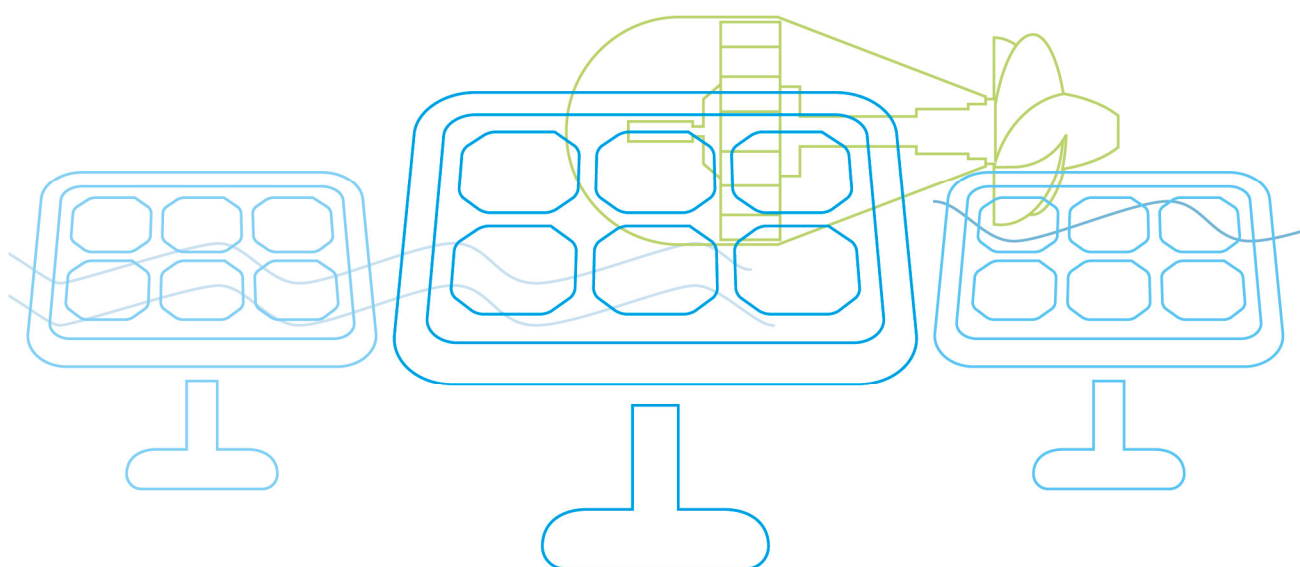




Produktivitätssteigerung durch Management von Eisansatz an Rotorblättern



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Produktivitätssteigerung durch Management von Eisansatz an Rotorblättern

Rotorblattenteisung

AutorInnen:

Rudolf Gradinger

Dr. Thomas Fleckl

Helmut Kühnelt

Dr. Hannes Steiner

Dietmar Schweighart

Markus Villinger

Andreas Reichl

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes	6
2.3	Einordnung in das Programm	6
2.4	Verwendete Methoden	6
2.5	Aufbau der Arbeit	7
3	Inhaltliche Darstellung	7
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	25
5	Ausblick und Empfehlungen	26
6	Literaturverzeichnis	27
7	Anhang	28
8	Kontaktdaten	28

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und besteht aus **mindestens 10 Seiten**. Die unten angeführte **Darstellung ist eine Mindestanforderung** und kann bei Bedarf erweitert werden.

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Windenergie machte zum Zeitpunkt der Antragstellung im Jahr 2011 in Österreich etwa 4% der Stromerzeugung aus; Ende 2015 wurde bereits ein Anteil von rund 8% des Stromverbrauches genannt, wobei dafür 1.100 Anlagen mit rund 2.400 MW Leistung¹ zur Verfügung stehen. Der Projektpartner WEB Windenergie AG nannte im selben Zeitraum, dass sie als größter unabhängiger Erzeuger von Windstrom in Österreich in einem einzigen Jahr an allen internationalen Standorten mehr Strom aus regenerativen Energiequellen als in den ersten zehn Bestandsjahren des Unternehmens zusammen erzeugen konnten.

Obwohl auch 2011 Windkraftanlagen bereits sehr weit entwickelt waren, gab es noch zahlreiche technische Herausforderungen, die eine intensive Forschungstätigkeit zu deren Lösung bedürften - eine spezielle Aufgabenstellung war und bleibt die Verringerung der Stillstandszeiten bei Wetterbedingungen, die zu Vereisung führen:

Österreich mit seinen strengen Wintern und hohen Bergen stellt weiterhin besondere Ansprüche an Windkraftwerke, da es in den Wintermonaten oft zu starker Vereisung an den Rotorblättern kommen kann. Aufgrund der Gefahr für Mensch, Umwelt und für die Anlage selbst muss bei beginnendem Eisansatz sofort eine Abschaltung der betroffenen Anlage durchgeführt werden. Danach dauert es oft tagelang, bis eine Wetteränderung das Eis wieder abgetaut hat. Anhand folgender Daten kann man das Ausmaß dieser Problematik erkennen: Ein sehr exponierter Standort befindet sich im Sternwald, in der Nähe von Vorderweißenbach im nördlichen Oberösterreich. In diesem Windpark befanden sich bei Antragstellung 7 Anlagen der 2-MW-Kategorie. Im Jahre 2009 verzeichnete alleine dieser Windpark 4.163 Stillstandsstunden bei einem Ertragsausfall von ca. 350.000 kWh. Bezieht man diese Menge an Strom aus einem kalorischen (Kohle)-Kraftwerk, so entspricht das einer Menge von fast 240 t CO₂. Alleine dieser Wert lässt die Bedeutung erfolgreicher Maßnahmen gegen längeren Stillstand erkennen – sowohl hinsichtlich Umweltschutz als auch Wirtschaftlichkeit.

WEB Windenergie veröffentlichte^{2,3} für den Jahresanfang 2016 Informationen zu den Produktionsergebnissen Jänner & Februar 2016, wonach es im Jänner abwechselnd frostige und milde Witterungsverhältnisse hintereinander gab, die zu viel Eisansatz an den Rotorblättern führten und daher die Anlagen in den frostigen Tagen zum Stillstand kamen. Dies war nicht nur der Fall bei den eigenen Windkraftanlagen im Wald- und Weinviertel sowie im nördlichen Burgenland, sondern auch in den

¹ Pressekonferenz der IG Windkraft am 29. Oktober 2015 „Wirtschaftsmotor Windenergie“

<https://www.igwindkraft.at/mmedia/download/2015.10.29/1446107616559877.pdf>

² W.E.B-Produktionsergebnis Jänner 2016 <https://www.windenergie.at/page.asp/-/1797.htm>

³ W.E.B-Produktionsergebnis Februar 2016 <https://www.windenergie.at/page.asp/-/1804.htm>

Standorten in Norddeutschland und Kanada. Ganz gegensätzlich das Monatsergebnis im Februar 2016: in nur 29 Tagen konnte summiert über alle Produktionsländern eine Gesamtproduktion von 86.956 MWh erreicht werden, deutlich mehr als einen Monat zuvor mit nur 68.964 MWh, was eben auf Eis und schwaches Windaufkommen zurückzuführen war.

Diese Zahlen zeigen, dass die Relevanz von Enteisungsmöglichkeiten auf bestehenden Anlagen in sehr vielen europäischen Ländern – von Schweden bis Portugal – und auch weltweit weiterhin gegeben ist.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Das Projekt forscht an Technologien zur Maximierung der Erzeugung elektrischer Energie aus Windkraftanlagen, wobei die Effizienzsteigerung von Bestandsanlagen im Zentrum steht und dabei spezifisch die Reduzierung der Ertragsausfälle der Windenergieproduktion durch winterliche Vereisung Zentrum rückt. Die drei innovativen Technologieansätze für Verbesserungs- bzw. Nachrüstoptionen auf bestehenden Windkraftanlagen sind:

- I. **Betriebsstrategien** zur Minimierung des Eis- und Reifansatzes durch Optimierung der Strömungsverhältnisse (Anstellwinkel, Drehzahl, ...)
- II. Innovative **Blattoberflächenbeschichtungen** zur
 - a.) Verringerung der mechanischen Eishaftung und
 - b.) passivem Enteisen durch Nutzung der Sonnenstrahlung
- III. Aktives elektrisches **Enteisen** durch Blattoberflächennahe Heizsysteme

2.3 Einordnung in das Programm

Das Programm Rotorblattenteisung bediente den Schwerpunkt 3.3 Erneuerbare Energieträger der 5. Ausschreibung Neue Energien 2020 insofern, als es Lösungsansätze für wirtschaftliche, umweltschonende und sichere Energieerzeugung fokussiert und sich dabei auf die regenerativen Energien konzentriert. Konkret werden Verfahren und Technologien zur Effizienzsteigerung der Erzeugung elektrischer Energie aus Windkraft in den mittleren - oberen Leistungsklassen untersucht.

2.4 Verwendete Methoden

Die verwendeten Methoden zur Erreichung der Verringerung der vereisungsbedingten Stillstandszeiten umfassen experimentelle Entwicklungen, Untersuchungen in Labor- und Feldumgebungen sowie numerisch-analytische Berechnungsverfahren; in Bezug auf die drei innovativen Technologieansätze sind dies :

- ▶ Statistische Auswertung von vergangenen Vereisungsfällen und Ableitung von angepassten Betriebsparametern zur Minimierung des Eis- und Reifansatzes durch Optimierung der Strömungsverhältnisse (Anstellwinke, Drehzahl, ...)
- ▶ Berechnung der Strömungs-und Vereisungsverhältnisse mit analytischen (LEWICE, ICEAC2D) und numerischen (CFX) Simulations- und Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Effekte hinsichtlich natürlicher Eisanlagerungs- und Sublimationseffekten

- ▶ Einsatz von weiterentwickelten Blattoberflächenbeschichtungen zur Erreichung von icephobic-Effekten zur Verringerung mechanischen Eishaftung unter Einbeziehung der natürlichen Strahlungswärme, um eine Oberflächentemperaturerhöhung im Winter zu erreichen.
- ▶ Nutzung von angepassten elektrischen Heizsystemen mit Einzelzonen-Steuerung
- ▶ Integration von bestehenden und zusätzlichen Überwachungssystemen zum inline-Monitoring

2.5 Aufbau der Arbeit

Das Projektkonsortium setzte sich aus Bedarfsträgern, Systemlösungspartnern und Forschungspartnern zusammen, die in dieser Konstellation bisher noch nicht kooperiert haben. Diese Aufstellung wurde gewählt, um Redundanzen zu gewährleisten und Synergien zu ermöglichen. Diese heterogene Situation spiegelt sich auch in der gewählten Projektstrukturierung wieder, die 5 Arbeitspakete umfasst; zwei Arbeitspakete (AP 1, AP 5) dienten der gemeinsamen Analyse der Bedarfe, Möglichkeiten und Resultate, die anderen drei wurden den konkreten Zielsetzungen gemäß auch durch spezifisch besetzte Teams ausgeführt. Anzumerken ist hierbei, dass im Fall der AIT vier unterschiedliche Geschäftsfelder zu unterschiedlichen F&E-Beiträgen mitgewirkt haben:

Nr.	Titel	Beteiligte Partner
AP 1	Konsolidierung der Erfahrungen und Expertisen der Partner und Definition der detaillierten Vorgehensweise	Alle
AP 2	Betriebsstrategien zur Minimierung des Eis- und Reifansatzes	WEB, Sternwind, AIT ⁴
AP 3	Oberflächenmodifikationen	WEB, Sternwind, AAC, AIT ⁵ , LKR ⁶
AP 4	Machbarkeitsstudie zu nachrüstbarem Heizlacksystem	WEB, Sternwind, Villinger, AAC, AIT ^{5,7} , LKR ⁶
AP 5	Potentialanalyse der Kombination der verfolgten Technologieoptionen	Alle

3 Inhaltliche Darstellung

In AP1 „KONSOLIDIERUNG DER ERFAHRUNGEN UND EXPERTISEN DER PARTNER UND DEFINITION DER DETAILLIERTEN VORGEHENSWEISE“ sollten durch Besprechungen aller oder spezifischer Partner die Beschreibungen des System-Ist-Zustands bez. Klimadaten und Randbedingungen (Windgeschwindigkeiten, Feuchte, Tröpfchengrößen, liquid water content (LWC)),

⁴ www.ait.ac.at/departments/mobility/business-units/electric-drive-technologies/

⁵ www.ait.ac.at/departments/energy/sustainable-thermal-energy-systems/

⁶ www.ait.ac.at/departments/mobility/business-units/light-metals-technologies-ranshofen/

⁷ www.ait.ac.at/departments/energy/complex-energy-systems/

Windturbinendaten (Blattgeometrie, ...) gesammelt und zur Definition der detaillierten Vorgehensweise für die AP2, 3 und 4 genutzt werden.

Zu Beginn des Projekts wurde auch ein Windenergieanlagenhersteller miteinbezogen, nämlich Vestas, Hersteller der für Versuche in Österreich geplanten Windkraftanlagen, die sich nach Vermittlung durch WEB zu mehreren Fachgesprächen mit Vestas-Mitarbeitern aus Dänemark, Singapur und Österreich. Vestas Österreich wurde auch in die Umbauten an Anlagen miteinbezogen. Die direkte Kommunikation mit Vestas Österreich in viele Fachgespräche hat sich als sehr sinnvoll erwiesen. Leider wurde zur Mitte des Projektes hin aber klar, dass seitens Vestas vielen Änderungen an Blättern, Naben etc. nicht zustimmen wird, ohne Gewährleistungs- und Garantiebedingungen zu ändern. Parallel wurde bekannt, dass Vestas ein eigenes, auf Heißluft basierendes Heizsystem auf den Markt brachte: News release⁸ from Vestas Wind Systems A/S, 23 October 2013: *Vestas' de-icing system improves power production in cold climates. The Vestas De-icing System (VDS) boosts the business case for operating wind power plants in cold climates. According to the BTM World Market Update 2012, severe icing can potentially reduce wind turbines' annual energy production by more than 20%, directly impacting the business case for wind power plants in cold climates. VDS has been developed to detect and efficiently remove ice formed on wind turbine blades, maintaining full power production - and therefore revenue generation for customers - through the winter months.*

Die Zusammenführung der laufenden Erfahrungen und Erkenntnisse während der langen Projektlaufzeit war ein wichtiger Bestandteil des Projekts. Die Kommunikation unter den Partnern wurde über die ganze Projektlaufzeit in vielzähligen Telefon- und Webkonferenzen aufrecht erhalten. Somit wurde der Austausch auch außerhalb der Fachdiskussion in den spezifischen Arbeitspaketen gefördert.

In AP2 „BETRIEBSSTRATEGIEN ZUR MINIMIERUNG DES EIS- UND REIFANSATZES“ wurden die Klima-Wetter-Produktions-Daten analysiert, um einen Abgleich der Modellansätze im Feldversuch zu erreichen und die Adaptierung und Modifizierung des Versuchsstands gezielt vornehmen zu können. Auf Basis aufgezeichneter Klima-Wetter-Produktions-Daten der Winter 2008-2013 erfolgte eine Selektion von Zeitreihen, in denen Eisansatz und -anlagerung bzw. Enteisung (Sublimationsregime) beobachtet wurde sowie eine statistische Auswertung der Ereignisse bezüglich ihres Parameterbereichs und möglicher Korrelationen. Insbesondere standen für alle 5 Winter folgende Größen zur Verfügung: Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit, elektrische Leistung, Azimut. Der Anteil von flüssigem Wasser in der Luft (LWC), eine Hauptvariable in der Vereisung, wurde zuvor nicht gemessen und konnte daher nicht in die Abhängigkeit der Vereisungsdauer einbezogen werden. Daraus wurde ein Performance-Indikator (mittels Matlab und MS Excel Routinen) erstellt, der die aktuelle elektrische Ist-Leistung mit der maximal möglichen elektrischen Leistung entsprechend der im Datenblatt veröffentlichten Leistungskurve vergleicht.

Die Analyse der Zeiträume von der Unterschreitung der Produktionsleistung von 80% bzw. 67% der Sollleistung bis zum vereisungsbedingten Abschalten der Anlagen führte zu einer Eingrenzung des Bereichs der Hauptparameter Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit. Es ist zu beobachten, dass Vereisung hauptsächlich in zwei Bereichen auftritt, erstens zwischen Null und -3°C mit einem Median bei -2°C und zweitens zwischen -3°C und -10°C mit einem Median um -6°C. Die

⁸ http://www.vestas.com/files//Filer/EN/Press_releases/2013%20Q4/News_release-Deicing_launch-FINAL.pdf

Windgeschwindigkeit liegt im Mittel bei 6 m/s. Weiters ergab die Analyse, dass Enteisierung in bis zu 10% aller Fälle bei tiefen Temperaturen (-7°C) auftritt. Dies kann als Indiz für sublimationsinduzierte Enteisierung gewertet werden. Der Performance-Indikator kann auch ganzjährig zur Früherkennung von aerodynamischen Leistungseinbußen oder Fehlfunktionen herangezogen werden.

Im Task "Numerische Vereisungssimulation" wurden mittels Computational Fluid Dynamics- (CFD-) und Vereisungs- Simulation von 2D Blatt-Querschnitten die Vereisungsrate bewertet und Strategien zur Minimierung von Vereisung erarbeitet. Dabei sollten zur Verfügung stehende Freiheitsgrade, wie Anstellwinkel des Rotorblatts oder Umdrehungsgeschwindigkeit einbezogen werden. Die wesentlichen Betriebszustände sind Eisansatz während Rotation sowie Bestehende Vereisung bei Stillstand der Turbine und Wind. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde bei AIT Mobility eine Masterarbeit zum Thema numerische Simulation der Vereisung von Windturbinenprofilen von Peter Fuchs angefertigt, mit dem Titel: "Numerical study of icing of horizontal axis wind turbine blades". Diese umfasst eine Validierungsstudie des CFX/ICEAC2D-Codes, eine numerische Studie der Variabilität der Simulationsergebnisse gegenüber Parametersettings der numerischen Modelle (Turbulenzmodell, Anzahl der Partikel, Grad der Glättung der Iceshapes,...) und eine erste vorbereitende Studie des Einflusses des Blattwinkels auf die Vereisungsrate. Diese Arbeit wurde betreut von Dr. Hassler, Diplomstudiengang Luftfahrt/Aviation, FH Joanneum Graz, der seinen wissenschaftlichen Schwerpunkt im Thema Simulation und messtechnische Erfassung von Vereisungsvorgängen in der Luftfahrt hat und in den gegenständlichen Vorgängerprojekten „ANTI-ICE“ und „HEAT“ beteiligt war.

Zur Validierung von CFX/ICEAC2D wurden experimentelle und numerische Validierungsdaten der NASA herangezogen. Da dabei Vereisung von Flugzeugen untersucht wurde, decken diese Daten einen Temperaturbereich $<-11^{\circ}\text{C}$ ab. Bei Windturbinen tritt Vereisung typischerweise bei höheren Temperaturen auf (zw. 0°C und -10°C). Es zeigt sich eine recht gute quantitative Übereinstimmung der berechneten Eisformen für tiefe Temperaturen (Rauheis, rime ice, $T = -28^{\circ}\text{C}$ und mixed ice, $T = -17^{\circ}\text{C}$) mit den Validierungsdaten. Die numerische Simulation von Glatteis (glaze ice, $T = -11^{\circ}\text{C}$) ist i.A. schwierig, da während der Vereisung auftreten Schmelzprozesse (run back water). Dies führt zu größeren Diskrepanzen zwischen numerischer Simulation und Validierungsdaten, sowohl bei ICEAC2D als auch in von der NASA veröffentlichten LEWICE Simulationen, siehe Abbildung 1.

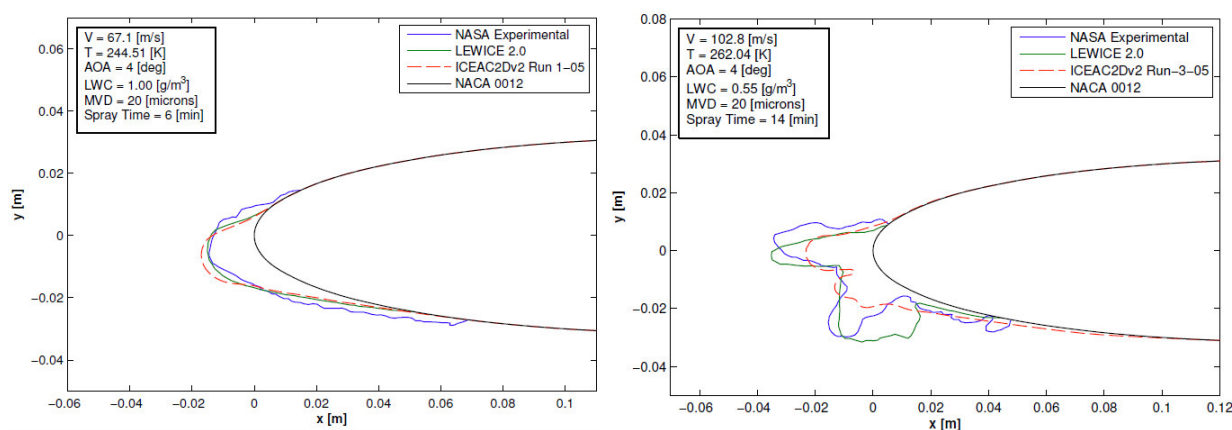


Abbildung 1: Vergleich der Eisanlagerung zwischen numerischer Simulation (ICEAC2D und NASA LEWICE) und NASA Experiment: gute Übereinstimmung bei Rime Ice (links), größere Abweichungen bei Glaze Ice (rechts)

Zur praktischen Untersuchung der Betriebsstrategien zur Minimierung des Eis- und Reifansatzes und der wirkenden natürlichen Sublimationseffekte, die nur vereinzelt in Realumgebung beobachtet werden können, konnten leider keine Untersuchungen im Feld durchgeführt werden. Eine Simulation dieser Effekte am AIT Eiskanal konnte mit dem bestehenden Setup nicht durchgeführt werden.

Der Sublimationsmassenstrom an der Spitze des Blattes bzw. der Eisform und bei 30% der Sehnenlänge jeweils für die Saug- und Druckseite des vereisten Profils ist in Abbildung 2 dargestellt.

Beim vereisten Profil ist die Strömung über beide Profilseiten vollständig turbulent, dagegen ist die Strömung beim Originalprofil laminar, Transition tritt an der Saugseite bei etwa 30% der Sehnenlänge auf. Die Strömungsturbulenz erhöht die Sublimationsrate beim vereisten Profil im Vergleich zum Originalprofil deutlich, im vorderen Profilbereich (bis 30% der Sehnenlänge) etwa um das 2-4-fache.

Bei anhaltender Sublimation stellt sich ein Zustand mit nahezu keinem Wärmestrom durch die Profiloberfläche ($q_W = 0$) ein. Dabei ist im Vergleich zu den Anfangszuständen (mit einer Abschätzung der Oberflächentemperatur zwischen $T_W = T_{adiab}$ und $T_W = T_{adiab} - 1K$) die Oberflächentemperatur an der Blattspitze gesunken, so dass hier um etwa 40-60% geringere Sublimationsraten als anfänglich auftreten.

Die Strömungsfluktuationen bei Maximalgeschwindigkeit von 73 m/s (Fälle 1a und 1b) führen zwar anfänglich zu etwa 20-30% unterschiedlichen Sublimationsraten zwischen Druck- und Saugseite, im stationären Fall ($q_W = 0$) gleichen sie sich aus.

Bei Maximalgeschwindigkeit treten die höchsten Sublimationsraten auf, allerdings genügt bereits eine relativ geringe Strömungsgeschwindigkeit um die Sublimationsrate substantiell zu erhöhen. So liegt am vereisten Profil bei 15 m/s (Fall 3) die Sublimationsrate zwischen 0.6 und 1.15 kg/m²h und ist zwischen 4-10 mal höher als bei 1 m/s (Fall 5). Hingegen ist sie bei Maximalgeschwindigkeit (73 m/s) nur um 1.2-4 mal höher als bei 15 m/s.

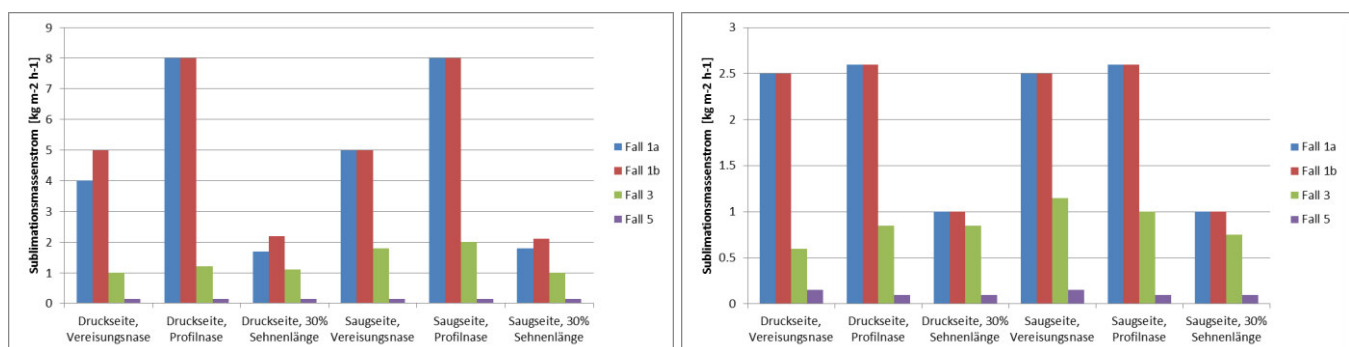


Abbildung 2: Sublimationsmassenstrom für das vereiste Profil für $T_W = T_{adiab} - 1K$ (links) und $q_W = 0$

Die numerischen Berechnungen zeigen, dass unter geeigneten Umgebungsbedingungen größere Eismengen durch Sublimation vom Blatt entfernt werden können. Die tatsächlich zu beobachtende Rate hängt neben der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte primär von der (radiusabhängigen) relativen Strömungsgeschwindigkeit am Blattprofil ab. Allerdings reichen bereits geringe Eismengen aus, um eine über das gesamte Blattprofil turbulente Strömung hervorzurufen, die zu erhöhten Sublimationsraten führt.

WEB ließ am Dach der Gondel im Windpark Sternwald eine webcam und eine Wetterstation installieren, die live-Bilder und Datenaufzeichnungen (von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, barometrischer Luftdruck und Niederschlagsintensität) übermitteln konnten (und weiterhin können).



Abbildung 3: Von WEB bei Sternwind installierte Messanlagen und Sensoren



Abbildung 4: Von WEB bei Sternwind installierte Messanlagen und Sensoren

Der bereits existierende Windkanal wurde im Zuge des AP2 zu einem Eiskanal umgebaut. Dazu war es nötig eine Düse, mit der unterkühlte Wassertröpfchen eingebracht werden, in den Kanal zu installieren. Die Düse ist dabei dasselbe Modell wie jenes, das im RTA Windkanal verwendet wird. Auch mussten neue Probenhalter für die untersuchten Modelle entwickelt werden. Die Luft strömt mit definierter Geschwindigkeit und Feuchtigkeit von links unten durch den Kanal. In der Einlaufstrecke befindet sich die Düse, deren Druckluft- und Wasseranschlüsse schematisch dargestellt sind. Danach befindet sich die Testsektion, in der die zu vereisenden Modelle an einer Waage hängend befestigt sind. Anschließend ist eine Messstrecke mit rundem Durchmesser eingezeichnet, in der die Temperatur und der Druck der ausströmenden Luft gemessen wird. Anschließend ist schematisch der Ventilator

angedeutet. Im realen Aufbau befindet sich dieser jedoch am Anfang der Luftstrecke um nicht durch die eingesprühten Wassertröpfchen vereist zu werden.

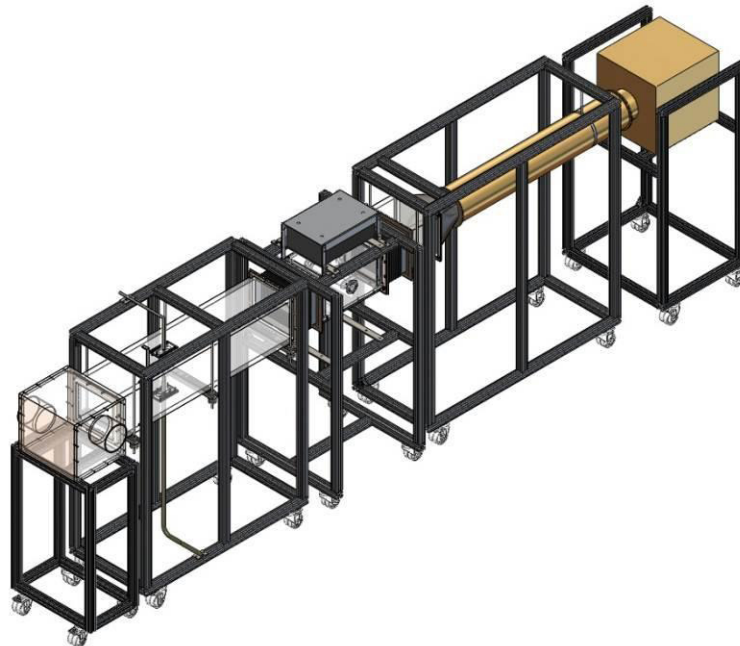


Abbildung 5: Schema des AIT-Vereisungs-Windkanals

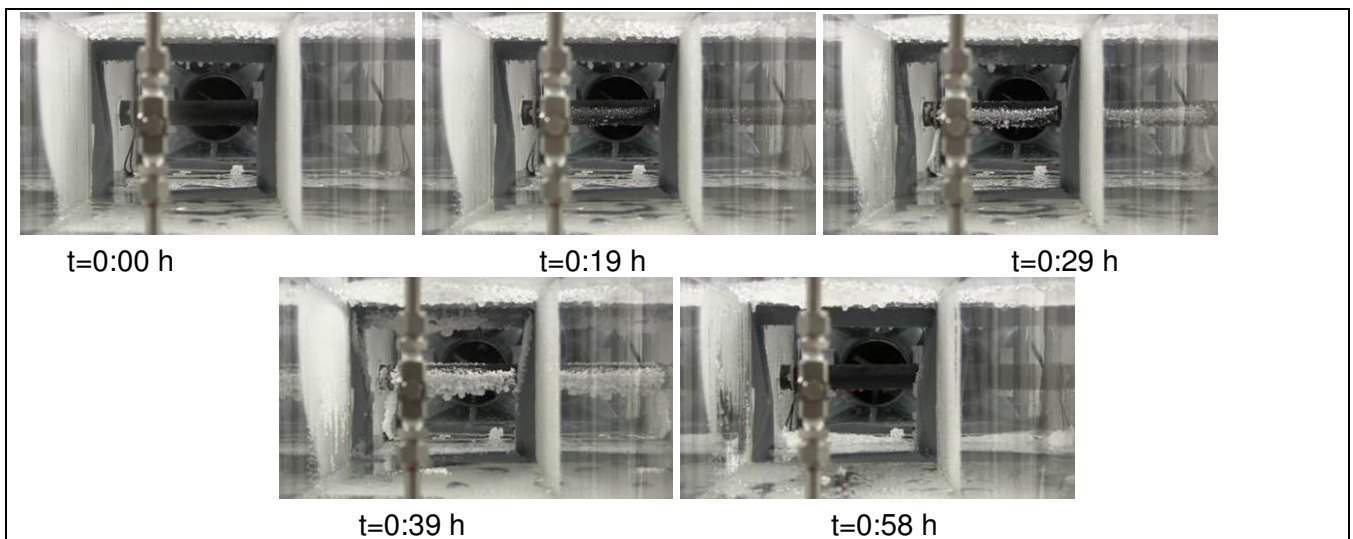


Abbildung 6: Bilder der Ver- und Enteisung an Mustern im AIT Eiskanal

Zum AP3 „OBERFLÄCHENMODIFIKATIONEN“ wurden bereits im ersten Winter kommerziell verfügbare Lacke und Folien in Feldversuchen bei Sternwind und WEB getestet. Diese zeigten nur beschränkte Wirkung, geringe Haltbarkeit und/oder gar negative Effekte. Schon zu Anfang des Projekts konnten von AAC weiterentwickelte eigene eisabweisende („*icephobic*“) Lack-Formulierungen in Kleinversuchen positive Wirkungen erzielen. In Feldversuchen bei Sternwind und WEB wurden die von AAC entwickelten Lack-Formulierungen im großen Maßstab getestet und mit diesen Ergebnissen Weiterentwicklungen betrieben. Parallel dazu wurden die Materialien im Labor untersucht und deren

Oberflächenenergie bzw. Kontaktwinkel bestimmt. Dazu wurden auch kommerziell erhältliche Produkte (3M Folie, Wemaplast Lack) und die original Rotorblattoberfläche untersucht.

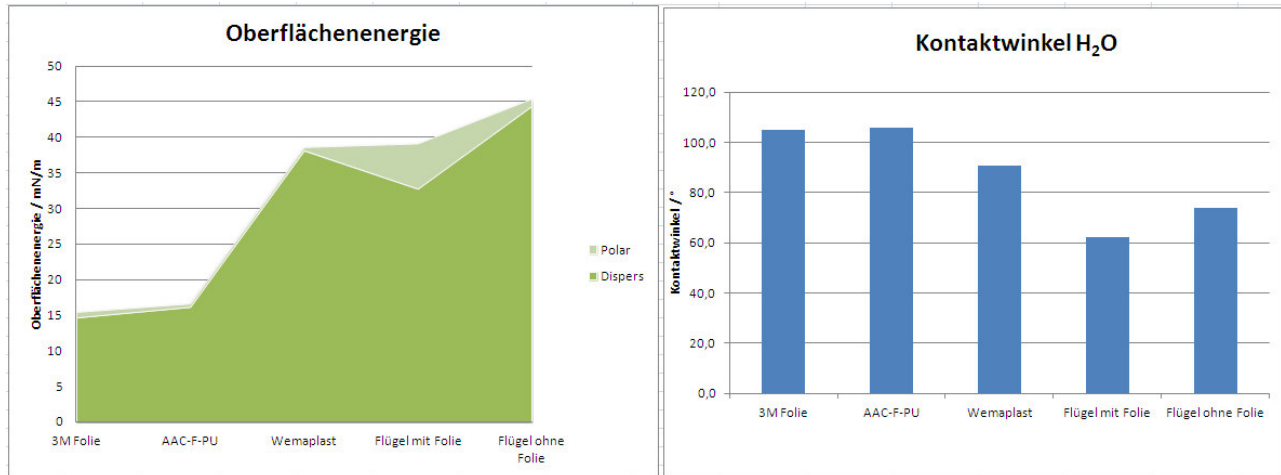


Abbildung 7: Kontaktwinkel von DI-Wasser (rechts) und Oberflächenenergie (links) von 3M PTFE-Folie, AAC-Lack, Wemaplast und der bewitterten Originaloberfläche an zwei verschiedenen Stellen (mit und ohne Erosionsschutzfolie).

Die Thermochromie in Kombination mit schnellerer Enteisung der Rotorblätter an sonnigen Wintertagen durch passive solarthermische Wärmeerbringung mit geeignetem Farb-Umschaltspunkt und Aussicht auf ausreichende Lebensdauer musste schon am Anfang des Projekts aufgrund fehlender Lieferanten für Produkte mit gewünschten Eigenschaften (thermochromer Umschlagspunkt, Farbe, Applizierbarkeit, Erosionsbeständigkeit) aufgegeben werden. Davor hatten praktische Untersuchungen ergeben, dass mit solarthermische Erwärmung und schwarzer Farbgebung des Flügels 62°C Temperatur erreicht wurden. Da Rotorblätter zwischen 70°C und 90°C getempert werden, sind durch diesen Temperatureinfluss noch keine Strukturprobleme zu erwarten. Beim Wintertest 2011/12 wurde bei einer Anlage die Vorderkante mit schwarzer Farbe beschichtet und darüber eine Antigraffiti-Lackschicht gezogen. Die Sonneneinstrahlung hilft zwar beim Abtauen, jedoch friert an den meisten Tagen das Eis (Wasser) wieder an und wird dadurch noch kompakter. An einer zweiten Anlage wurde eine Teflonfolie aufgebracht. Diese hatte die beste Performance gezeigt. Jedoch durch ihre „Steifheit“ ist sie nicht ohne Falten, Blasen im Nachhinein anzubringen und somit für größere Anlagen (in der derzeitigen Beschaffenheit) nicht zu gebrauchen.

Das primäre Ziel von AP3 lag immer in der Herstellung bzw. Auswahl von eisphobischen Materialien, die für den Einsatz auf Windkraftanlagen geeignet sind: die Umweltbedingungen an einer Windkraftanlage können sich durch dessen exponierte Lage in relativ kurzen Intervallen stark ändern. Hohe Temperaturschwankungen (Tag/Nacht, Sommer/Winter), starke Sonneneinstrahlung und starke Erosion durch Wind und Wetter stellen die Belastungsparameter von Beschichtungen an Windkraftanlagen dar.

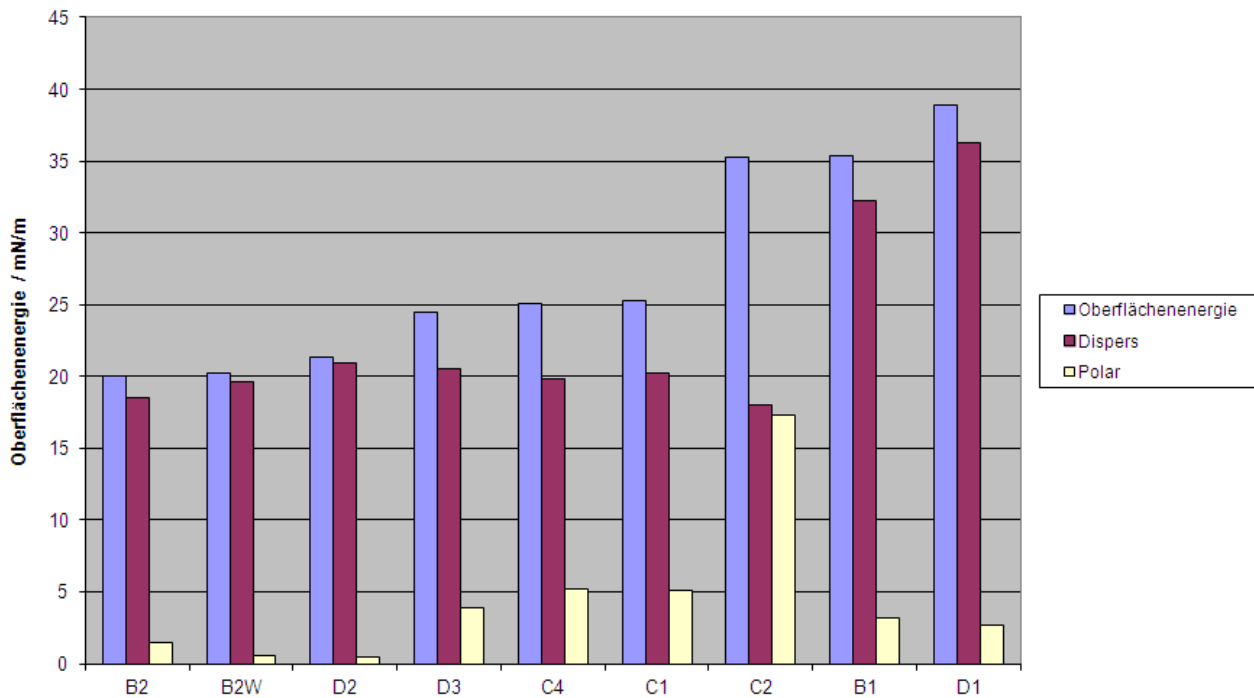


Abbildung 8: Oberflächenenergie verschiedener Lackvarianten. B1 ist die Referenz. Im Feldversuch werden u.a. die Varianten B2, C4 und B1 getestet werden.



Abbildung 9: Modifizierung der Oberflächen für Wintertest mit coating (ganz links) und Folie (2. von links) und Eisaufbau an diesen modifizierten Oberflächen im Wintertest

Erste Feldversuche mit hydrophoben Beschichtungen von AAC (und auch heizbaren Sektionen vom Partner Villinger; s. AP 4) wurden zunächst auf originalen Flügelspitzen (Länge von ca. 3.5m Länge) durchgeführt und auf dem Dach eines WEA-Maschinenhauses im Windpark Sternwald montiert. In dieser Lage waren die Beschichtungen den nahezu identen Umweltbedingungen wie die Rotorblätter ausgesetzt. Insgesamt wurden zwei solche Flügelspitzen aufgestellt, wobei beide von Villinger mit Heizlack ausgerüstet wurden. Die Heizung wurde in zwei Zonen aufgeteilt: Flügelvorderkante und Flügelfläche. Diese konnten getrennt voneinander geschaltet werden. Eine der beiden Flügelspitzen wurde von AAC zusätzlich mit insgesamt vier verschiedenen Lacksystemen lackiert. Alle getesteten Systeme gründeten auf der gleichen Lackbasis, einem 2K Acryl-PU System, das mit HDI gehärtet wird und mit zum Teil kovalent eingebundenen Additiven modifiziert wurde. Der Basislack weist bereits eine niedrige Oberflächenenergie auf, die durch den Zusatz von verschiedenen fluorhaltigen Additiven noch deutlich gesenkt werden konnte. Es ist im Falle von Additiv 2 zu beobachten gewesen, dass eine weitere

Erhöhung der Additiv-Konzentration nicht immer auch mit einer weiteren Abnahme der Oberflächenenergie einhergeht. Die Additive sind in diesem Fall nicht chemisch an das Polymernetzwerk gebunden, wodurch ein Leaching der Additiv-Komponente zu erwarten ist. Dies wurde auch in einem separaten Bewitterungsversuch in einer QUV Anlage verifiziert. Vor allem die polare Komponente stieg im Laufe des QUV Tests stark an.



Abbildung 10: Flügelspitzen bei der Montage im Windpark Sternwald im Februar 2013 (links) und montiert am Dach des Maschinenhauses im Sternwald (linkes Blatt mit AAC Lackierung)

Nach der Montage der Flügelspitzen sorgte der überdurchschnittlich kalte Winter 2012/2013 für zahlreiche Gelegenheiten die Wirkung der Beschichtungen zu testen. Die erste Jahreshälfte war dabei in Österreich um 0.1°C zu kühl im Vergleich zum langjährigen Mittel. Die Abtauversuche wurden in Zusammenarbeit von WEB und Sternwind durchgeführt. Insgesamt konnte durch visuelle Inspektion erkannt werden, dass die Heizbeschichtung angelagertes Eis rasch abtauen kann. Dabei wurde ein Zeitbedarf von ca. 10min gemessen. Im Vergleich schnitt die mit AAC-Lacken zusätzlich präparierten Spitze etwas besser ab, wobei darauf hingewiesen werden muss, dass die Versuche nicht vollständig vergleichbar sind. Die Gleichmäßigkeit der Heizzonen ist eine unbekannte Einflussgröße.

Umfangreiche Vereisungsexperimente mit Rotorblattproben mit 8 verschiedenen Beschichtungen wurden im AIT-Windkanal untersucht, der in einer Klimakammer betrieben wurde. Mit Hilfe einer Zweistoffdüse (Druckluft und Wasser) wurden unterkühlte Wassertröpfchen eingebracht wurden und die Proben ca. 4min lang vereist. Die Wassertröpfchen trafen auf die Oberfläche der Proben, deren Gewicht mit einer Waage während des Experiments mitgemessen wurde. Der Volumenstrom, Temperatur und Druck der einströmenden Luft wurden während der Versuche aufgezeichnet, so auch die Temperatur und den Druck der ausströmenden Luft. Eine Kamera filmte die Stirnfläche des Probenprofils während des Experiments. Dabei stellte sich heraus, dass die Variante mit Additiv 1 5% die Vereisung signifikant verzögert.

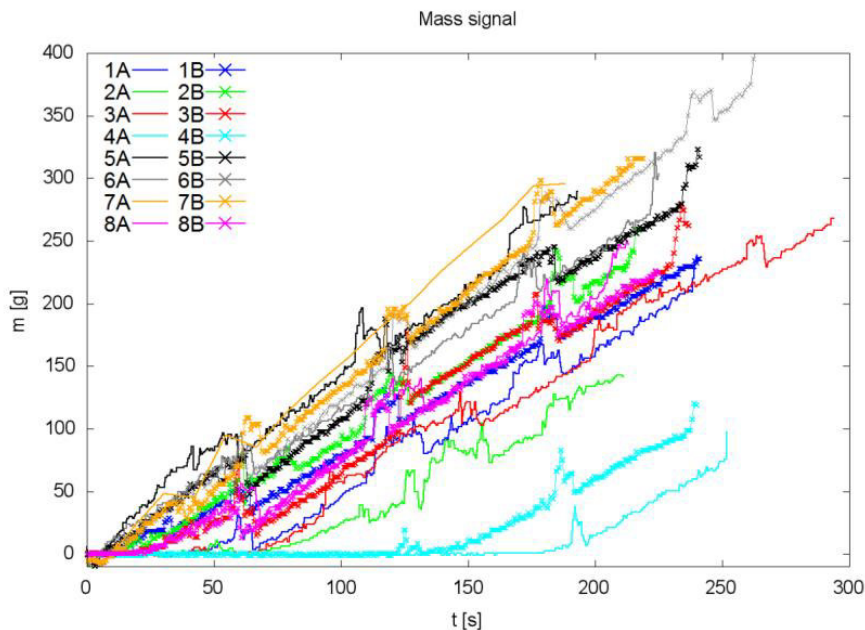


Abbildung 11: Massenzuwachs durch Vereisung: signifikant spätere Vereisung bei Proben 4 A und 4 B

Während der Experimente wurde jeweils ein Video des Vorganges aufgenommen. Die Blickrichtung war dabei jedes Mal in Richtung des Windkanals entlang der Düse auf die Stirnseite der Probe. Während die Düse aufgedreht war, verhinderten die eingesprühten Wassertröpfchen die Sicht auf die Probe. So wurde für die Verarbeitung der Bildinformation die Zeit vor und nach dem Experiment zur Analyse der Eisentwicklung durch das Video herangezogen. Da der weiße Untergrund der Beschichtung zu wenig Kontrast bietet um die Eisanlagerung entlang der sichtbaren Oberfläche zu untersuchen, wurde der Eisansatz entlang der oberen Kante analysiert. Dazu wurde ein zu analysierender Bereich bestimmt.

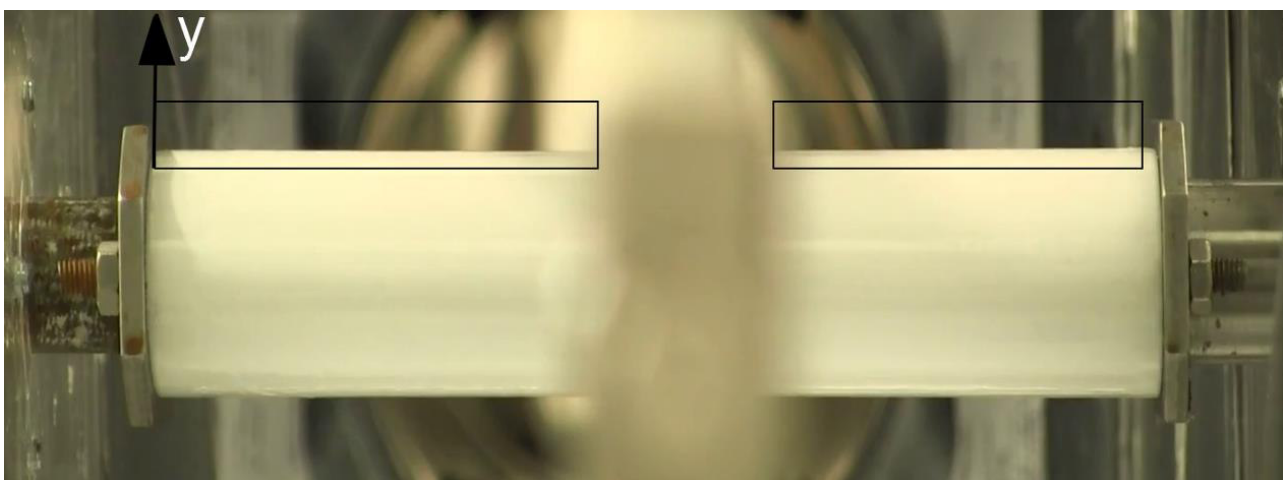


Abbildung 12 Probe mit eingezeichnetem Bereich, der analysiert wird

Für jedes Pixel des eingezeichneten Bereiches wurde die Bildinformation in Hue (Farbton), Saturation (Sättigung zwischen reiner Farbe und gleich heller Graustufe) und Value (Dunkelstufe) konvertiert. Für die weitere Verarbeitung wurde nur der V-Wert verwendet, der zwischen 0 und 1 liegt.

Die V-Werte der Videoframes vor und nach dem Video wurden nun voneinander abgezogen um die Änderung durch den Eisansatz zu ermitteln. Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf dieser Bildinformation entlang der y-Achse für Experiment A und B:

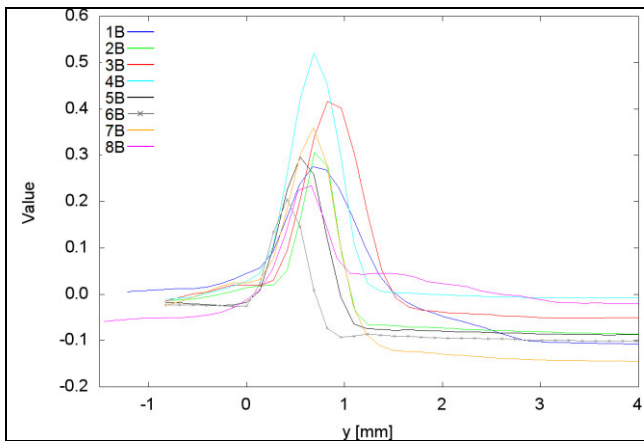


Abbildung 13 Verlauf der V-Werte für die Proben mit verschiedenen Beschichtungen, Experiment A

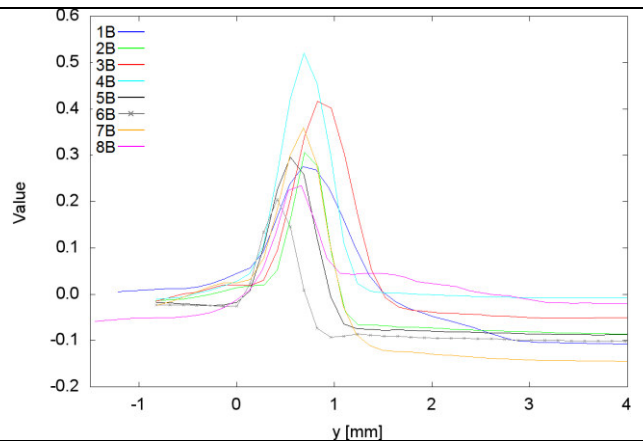


Abbildung 14 Verlauf der V-Werte für die Proben mit verschiedenen Beschichtungen, Experiment B

Der Nullpunkt der y-Achse in obigen Bildern liegt dabei auf der oberen Kante der Probe; auf der Oberfläche der Probe selbst ändert sich die Dunkelstufe im Prinzip nicht und der Verlauf ist ungefähr horizontal. Jedoch scheint die Eisanlagerung an der Oberkante einen signifikanten Einfluss auf diesen V-Wert zu haben. In einem Bereich von ca. 1-1,5 mm ändert sich der V-Wert deutlich und geht dann wieder auf einen Wert um 0 zurück.

Es wurden nun die Distanzen ermittelt, entlang denen sich deutliche Abweichungen der V-Werte von einer Horizontalen ereignen. Der Absolutwert der Dunkelstufe gibt keine Auskunft über die Art des Eises, da die Lichtverhältnisse der Klimakammer nicht für jedes Experiment exakt gleich waren. Die so ermittelten Eisdicken hängen natürlich von der Dauer des Besprühens mit Wassertröpfchen ab. Um sie besser vergleichen zu können, wurde durch die Dauer des Besprühens mit der Düse dividiert und so eine Eiswachstumsrate in mm/min ermittelt. Ziel der Sublimationsversuche war es im Windkanal auch die Sublimation an den Profilen zu vermessen um Daten zum Vergleich mit der Simulation bereitzustellen. Dabei sollte die vereiste Probe bei tiefen Temperatur um die -10°C hohen Geschwindigkeiten bis zu 25m/s ausgesetzt werden und die Abnahme der Eismasse mit den Waagen gemessen werden. Die vorhandenen Ventilatoren konnten jedoch maximal einen Volumenstrom von $330\text{m}^3/\text{h}$ erzeugen. Das entspricht in dem Windkanal einer Geschwindigkeit von 1,7m/s. Des Weiteren trat das Problem auf, dass die Düse bei tiefen Temperaturen vereiste, bevor die Wassereinsprühung gestartet werden konnte. Zwar wurde versucht, die Düse mit einem Heißluftgebläse eisfrei zu halten, jedoch war die Leistung des Gebläses nicht ausreichend. Ein Versuch mit Temperaturen, bei denen die Düse (ca. -4°C) noch funktionierte, und mit der oben genannten Maximalgeschwindigkeit brachte kein verwertbares Ergebnis. Weder lieferte die Waage ein brauchbares Signal, noch konnte optisch eine deutliche Eisabnahme festgestellt werden.

Weitere Feldtests fanden im Winter 2013/14 bei WEB in Oberstrahlbach statt: basierend auf den Ergebnissen aus den obigen Tests und Feldversuchen, entschloss sich WEB eine komplette Anlage mit

AAC Anti-Haft-Lack auszustatten. Es wurde das PU-Acryl-System mit 8% Additiv 1 gewählt. Die Arbeiten wurden mittels Hubsteiger direkt im Feld durchgeführt. Zunächst wurden die Flügel abgeschliffen und gereinigt. Danach erfolgte der Auftrag mittels Pinselrolle. Die Arbeiten fanden Anfang Oktober 2013 bei Schönwetter statt. Bei der Lackierung trat eine leichte Blasenbildung auf, sodass kein völlig glattes Lackbild erreicht werden konnte. Auch Wiederholversuche in der temperierten Werkshalle bei WEB erzielten das gleiche Ergebnis. Die hydrophoben Eigenschaften wurden mittels Testtinten ermittelt und protokolliert. Der Winter 13/14 war sehr mild und brachte nur zwei Vereisungsperioden, in denen die Vereisung wiederum sehr massiv war. Daher konnte in diesen Perioden keine Vorteile durch die Beschichtung gesehen werden. Für die Wiederholung der Feldtests im Winter 13/14 wurde AAC die Flügelspitze wieder zugestellt. Es wurde beschlossen, dass die Spitze teilweise neu lackiert werden soll, wobei zwei Felder als Referenz nicht verändert wurden: Das Basissystem und das System mit Additiv 1 8%. Die beiden anderen Felder wurden zunächst abgeschliffen und dann nach einer Grundierung mit zwei neuen Lackvarianten beschichtet: Variante 1 besteht aus einem Epoxy Hybrid-Lack mit Additiv 1; Variante 2 besteht aus dem ursprünglichen Acryl-PU System mit einem Fluor-modifizierten Härter. Die Modifikation soll eine komplette kovalente Einbindung der Fluorkomponente erwirken und somit dem Leaching vorbeugen.

Die fertige Flügelspitze wurde am 18. 2. 2014 an den Windpark Sternwald versendet und wurde dort in weiterer Folge wieder auf einer Windkraftanlage montiert. Am Ende des Projektes konnte AAC Lacke, die um den Faktor 20 verringerte Scherspannung aufweisen, auch zum Feldversuch führen, indem in Oberstrahlbach wieder die Blätter einer Anlage mit einem modifizierten PU-Acryl-System beschichtet werden konnten. Dazu mussten die Lackschichten der Wintertests 2013/14 zuerst entfernt werden. Es zeigten sich auch Vorteile bei der Applizierbarkeit durch geringere Blasenbildung und damit glattere Oberfläche. Weitere Versuchsmuster mit 5 verschiedenen Beschichtungen wurden in Pfaffenschlag am Maschinenhaus zur Bewitterung ausgelagert. Diese Muster sollen die vor dem Winter 2014/15 modifizierten Flügelspitzen am Turm der Sternwindanlage ergänzen, welche mit 4 unterschiedlichen Zonen beschickt worden war.



Abbildung 15: Bestimmung der Oberflächenspannung mittels Testtinten; rechts: Hubsteiger an der WEA in Oberstrahlbach

In AP4 „MACHBARKEITSSTUDIE ZU NACHRÜSTBAREM HEIZLACKSYSTEM“ sollten die vorab bekannten Konzepte von den bisherigen Anwendungsgebieten aufskaliert und für Nachrüstung auf WEA untersucht werden, wobei elektrische Leitfähigkeit, Haftung zum Substrat (Folie, Gelcoat etc.), Witterungsbeständigkeit, Invariabilität der Eigenschaften gegenüber der zyklischen Belastung, Applizierbarkeit und Kompatibilität mit bestehenden Blitzschutz- und Leistungsversorgungssystemen zu beachten sind.

Am Beginn des Projekts wurde auf Basis der Abstimmungen in AP1 das Heizsystemprinzip auf die Dimension der Rotorblättern weiterentwickelt und dabei Konzepte erarbeitet, die es ermöglichen, die Erfahrungen aus Vorgängerprojekten für den Eisansatz in Windenergieanlagen (WEA) zu übertragen. Dabei stellten die Bedingungen der Nachrüstbarkeit aufgrund der Größen und Kosten für Adaptionen (zB gegenüber Flugzeugpropellern) besondere Herausforderungen dar. Mehrere denkbare Ausführungsformen wurden im Konsortium studiert, wobei insbesondere auch die Leistungsversorgung, die Steuer- und Regelungstechnik und Applikationsoptionen besonders in Betracht gezogen werden mussten. Es wurden unterschiedliche Prototypen entwickelt und in Evolutionsstufen als Testmuster für den Eiskanal und Blitztests bei AIT sowie für einen Aufbau bei Sternwind beigestellt. Besonders die Erfahrungen aus den Blitztests bei AIT sorgten für eine Weiterentwicklung, die wiederum in einer der beiden Blattspitzen prototypisch umgesetzt und für den letzten Projektwinter montiert wurde.

Um die Heizlackfelder mit neuen Kontakten verbinden zu können, wurden bei LKR wurden 6 Gewebemuster (3 Gewebetypen je mit 2 Proben) mit flammgespritztem Al-Bahnen mit der Drahtflammspritzpistole (Modell GTV 12E) hergestellt um Vorversuche mit dem Heizlack von der Firma Villinger GmbH auszuprobieren. Die Geometrie der gespritzten Gewebeproben ist in der Abbildung 1 dargestellt. Alle gespritzten Proben sind einseitig und alle wurden mit einem Roboter (Modell ABB IRB2400) gespritzt. Die Polyestergewebe sind so genannt: 5911, 5248 und XX. Die 2 ersten sind eng

gewoben und der dritte ist lockere gewoben. Das Al-Draht (GTV 50.11.2) hat einen Durchmesser von 3.2 mm und wurde mit einer Sauerstoff und Azetylen-Durchflussmenge von ca. 1800 und 1080 l/h gespritzt. Für jedes Gewebe wurden 2 unterschiedlichen Al-Mengen (ca. 20 mg/cm² und ca. 30-40 mg/cm²) aufgespritzt, deshalb könnte die beste Al-Menge ermittelt um eine gute Leitfähigkeit für diese Anwendung zu bekommen. Die Al-Schichtmenge von 20 mg/cm² wurde aus einem damaligen Projekt als die minimale Menge erkannt um eine sinnvolle Leitfähigkeit zu bekommen. Auf ein Paar Proben, gibt es sehr kleinen Gewebeverbrennungen, die aber wahrscheinlich keinen Einfluss auf die gesamte Leitfähigkeit haben sollten. Die Vorversuche mit dem Lack bei Villinger GmbH an diesen flammgespritzten Proben im Frühling 2013 zeigen allerdings, dass die Flammgespritzmethode gegenüber herkömmlichen Drahtgeflechten keinen besonderen Vorteil bringen und die Nutzung kommerzieller Halbzeuge verfolgt wird.

Für die Real-Versuche mit einem beheizten Enteisungssystem wurden ausschließlich Heizlacksysteme von Villinger verwendet. Diese können entsprechend der Anforderungen für eine Applikation modifiziert und angepasst werden. Unter anderem kann der elektrische Widerstand, Viskosität, Plastizität, Ansprechverhalten und PTC Effekt eingestellt werden. Bei einem der beiden Flügelspitzen wurden 2 verschiedene Heizkreise in die Compositestruktur integriert, wobei eine für die Enteisung der Flügelvorderkante aktiviert werden kann und die zweite die gesamte restliche Fläche des Flügels beheizen kann. Dabei wurde besonders darauf geachtet, eine optimale Wärmeverteilung ohne Hot-Spots zu gewährleisten sowie einen widerstandsfähigen und langlebigen Schutz für das Heizelement zu erzielen, parallel diverse Entwicklungen und Tests zur Integration von Heizelementen von Villinger durchgeführt wurden, auch an mehreren Flügelsegmenten appliziert unter Variation der Leistungsdichte.. Um eine bessere Haftung und chemische Kompatibilität zwischen Heizschicht und Träger bzw. Heizschicht und Deckschicht zu erzielen, wurden zahlreiche Tests durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Harz- und Deckschichtsysteme auf ihre Eignung geprüft. Um die Kompatibilität zwischen Heizsystemen und Harzsystemen zu gewährleisten und unerwünschte Wechselwirkungen zu vermeiden, wurden diverse Experimente durchgeführt. Um eine qualitativ hochwertige Faserverbund-Versiegelung zu erzielen, wurde die Deckschicht anhand des Vakuumpressverfahrens angebracht. Dadurch wird ein homogener Faservolumenanteil erzielt und die Bildung von Lufteinschlüssen verhindert. Eine weitere Methode, das Heizsystem vor Beschädigungen zu schützen ist die Versiegelung durch eine Edelstahl Erosionskante. Versuche wurden mit verschiedenen Materialstärken (von 0,1mm bis 0,5mm) durchgeführt. Durch die Anwendung spezieller Klebstofftechniken und Verfahren konnte auch hier eine Verbindung ohne Lufteinschlüsse erzielt werden. Da es sich bei Flügelvorderkanten um asymmetrische, teils komplexe Geometrien handelt, muss zur Vorbiegung der Edelstahlsegmente ein verbessertes Verfahren gefunden werden. Um die Versiegelung der verschiedenen Heizsystemen für Flügelvorderkanten zu vereinfachen bzw. zu beschleunigen, ohne dass sonstige qualitative Einbußen entstehen, liegt ein großes Augenmerk der Entwicklung bei der Verwendung von so genannten Prepregs..

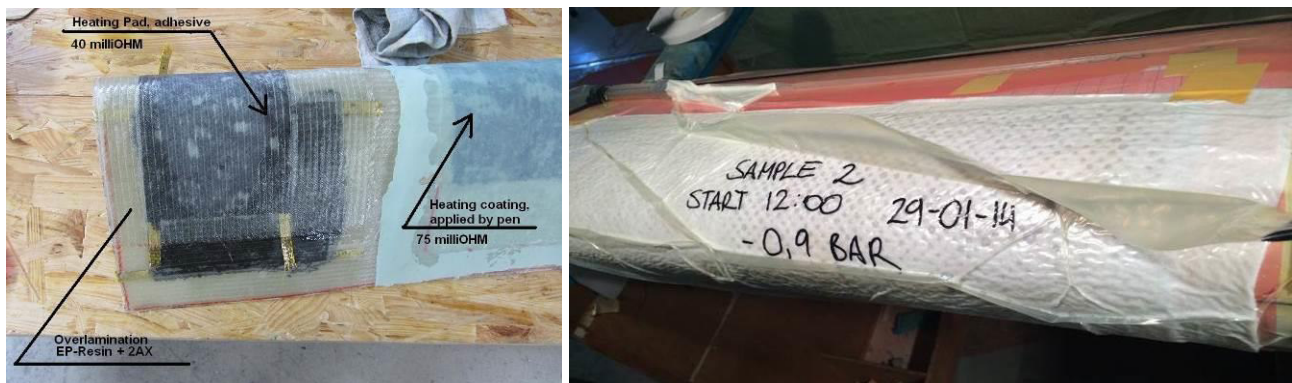


Abbildung 16: Prototyp einer Flügenvorderkante (links), hergestellt mit dem Vakuumpressverfahrens Versiegelung mit FVK:

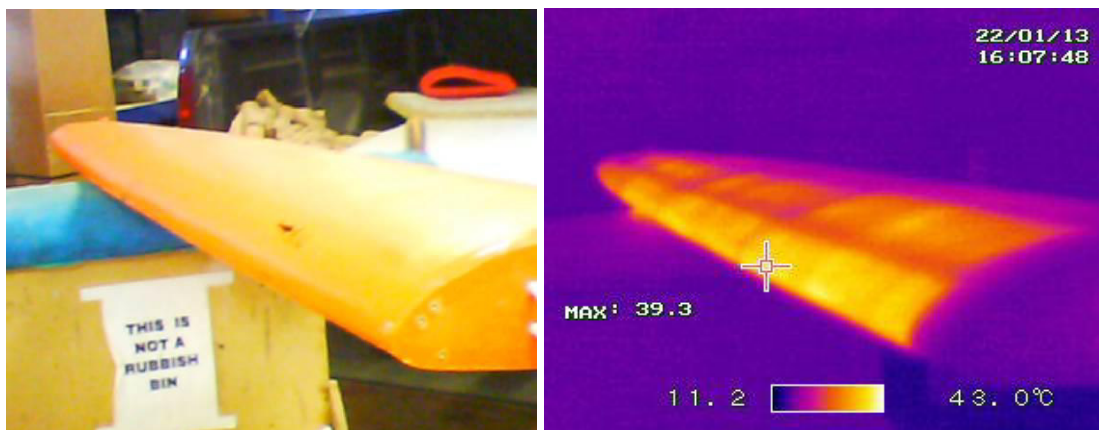


Abbildung: Funktionstest einer Flügelspitze im Labor: links: Muster; rechts: IR-Aufnahme unter Beheizung

Die zweite Flügelspitze wurde mit einem Heizsystem an der Flügelvorderkante ausgestattet, welches an der Außenseite zusätzlich mit einer Kante aus rostfreiem Stahl versehen wurde und somit ein besonders robustes System zu gewährleisten welches auch Blitzeinträge unbeschadet überstehen kann. Dafür wurde von Villinger ein elektronischer Controller entwickelt, mit dem die Leistungsdichte der Heizung geregelt und somit das System auf höchste Effizienz mit geringstem Energieverbrauch optimiert werden kann.



Abbildung 17: Bilder vom ersten Testobjekts bei Sternwind bei Montage (ganz li.), vor (2. V.links) und nach kurzer aktiver Beheizung (3.v.links) sowie als IR-Aufnahme während Beheizung⁹

Bei den ersten Tests mit der von Villinger produzierten beheizten Flügelspitzen zeigte sich dass das System in der Lage ist einen vollständigen Enteisungsvorgang einer stark vereisten Flügelspitze in weniger als 5 Minuten durchzuführen



Abbildung 18: Aufnahmen des Aufbaus (links) und Markierungen (Schmauchspuren) nach Blitztests bei AIT

Weiters wurden von Villinger Versuchsmuster mit Heizsystemen ausgestattet und am 18.9.2012 bei AIT bezüglich Blitzbeständigkeit erfolgreich getestet. Dabei wurden Blitz-Stoßstromversuche an Rotorblatt-Modellstücken derart durchgeführt, dass als negative Elektrode eine Cu-Elektrode mit Durchmesser 20mm im Abstand zu Prüfling von 50mm und als positive Elektrode der "Rezeptor" Zwingen mit Durchmesser 30mm genutzt wurde und zwischen Proben mit und ohne Lack sowie trocken und nass variiert wurde. Dabei erwies sich ein von Villinger entwickeltes Muster als äußerst robust. Es zeigte sich, dass eine spezielle Heizbeschichtung in der Lage war, einen Blitzeintrag an der Oberfläche zu der Erdung abzuleiten, ohne dass das Blatt dadurch beschädigt wurde. Sogar nach zweimaligem Blitzeintrag auf der exakt gleichen Stelle war das Heizsystem noch intakt und verwendbar.

In weiterer Folge wurden die Beschichtungen von Villinger mit einer Schutzschicht in Form eines Glasfaser Prepreg versehen welches im Vakuumverfahren auf die Heizschicht aufgebracht wurde. Bei weiteren Blitzversuchen zeigte sich nun, dass bei dieser Anordnung ein Blitz durch die Deckschicht durchschlägt und dann wieder über die leitende Schicht von Villinger zur Erdung abfließt. Durch die dadurch auftretenden hohen Temperaturen und lokal entstehendem Überdruck die Deckschicht im Bereich des Blitzeintrittes angehoben und beschädigt wurde

⁹ www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=C1Lb8kYFpXs#!



Abbildung 19: Beschädigung der Deckschicht über dem Heizlack von Villinger nach Blitzeintrag

Eine Neuentwicklung ist die Integration der Villinger Heiztechnologie in eine galvanisierte Erosionskante. Die Weiterentwicklung sollte also den Anforderungen zu integralen Blitzschutzsystemen genügen; daher wurde in weiterer Folge ein großer Teil der Arbeiten der Entwicklung verschiedener Blitzschutzsysteme gewidmet. Dafür wurden verschiedene leitende Materialien teils in das System integriert, teils an der Oberfläche angebracht. Im Frühjahr 2014 wurden mehrere Flügelsegmente mit verschiedenen Heiztechnologien ausgestattet und zur Überprüfung der Verträglichkeit von Blitzen nach München gebracht, da dort über die bei AIT maximal erreichbaren 50kA beaufschlagt werden konnten. Im dortigen Blitzlabor wurden mehrere Varianten von Einschlägen simuliert. Damit konnten sehr viele Erfahrungen gesammelt werden. Wie erwartet konnte das Villinger De-Icing System mit der Verwendung von speziellen Erosionsschutzkanten mehrere Blitzschläge mit 220kA ohne größere Beschädigungen bewältigen.



Abbildung 20: diverse Testapplikationen von Villinger mit Edelstahlkante für Blitzversuche in München



Abbildung 21: links: mit Heizsystem ausgestattete und später fix an der Gondel montierte (Signalrot lackierte) Flügelspitze; rechts: Ausführung der Blattspitze mit Edelstahl-Erosionskanten

Anfangs 2014 wurde die Entwicklung von Kohlenstoff-basierten Heizlacken bei AAC fortgesetzt. Als Ausgangsbasis diente das oben beschriebene Acryl-PU Lacksystem in einer Klarlackvariante. Dazu wurden mit verschiedenen Graphit, Ruß und CNT Typen Versuche durchgeführt. Zunächst wurde die Perkolationschwelle evaluiert und die dazu notwendige Menge an Dispergieradditiven und Verdünnern. Die Versuchsmatrix sollte weiters klären, wie die einzelnen Graphit- und Russtypen die Leitfähigkeit bei gleicher Feststoffkonzentration beeinflussen, bzw. welche Leitfähigkeitsadditive die höchsten Leitfähigkeiten erwirken. Weiters wurde getestet, in welchem Verhältnis Graphit und Ruß gemischt werden müssen, um eine optimale Leitfähigkeit zu erreichen. Die erhaltenen Lackschichten wurden auf 10x20cm Glasplatten mit einer Schichtdicke von 300µm aufgezogen und bei Raumtemperatur ausgehärtet. Die Kontaktierung erfolgte über zuvor aufgeklebte Cu-Streifen von ca. 1cm Breite am Rande der Glasplatte. Die Verarbeitung der Lacke erfolgte auf zwei unterschiedliche Verfahren: Einerseits auf einem 3-Walz-Werk und andererseits in einem geschlossenen Dissolver. Es konnte am Ende erreicht werden, Ansätze vom 3-Walz-Werk auf den Dissolver zu übertragen. Vorteile des Dissolvers sind: Geschlossenes Gefäß, keine Lösungsmitteldämpfe, geringere Verluste bei der Verarbeitung, reduzierter Reinigungsaufwand. Bei ersten Tests konnte mit diesen Beschichtungen bei 30V Spannung eine Leistung von ca. 0.3 W/cm² erreicht werden. Höhere Spannungen und das Verhalten bei Dauerbelastung müssen noch getestet werden. Ebenso ist für die automatische Temperaturregelung ein positiver Temperaturkoeffizient vorteilhaft. Dabei steigt der Widerstand des Materials mit zunehmender Temperatur. Bei Versorgung mit konstanter Spannung führt das dazu, dass sich ein Gleichgewichtsstrom einstellt. Man spricht vom „PTC-Effekt“.

Die beiden Messobjekte bei Sternwind wurden auch im letzten Projektwinter 2014/15 weiter betrieben und die aktive Heizung und der icephobic-Lack auf ihre Wirkung hin untersucht, indem weiterhin die installierten Sensoren, die webcam und die remote-Steuerung genutzt wurden. Konkret wurden Enteisungsversuche im Sternwald an der modifizierten Blattspitze am 03. Jänner 2015 und weiter am 04. Jänner, 05. Jänner, 08. Jänner, 27. Jänner, 28. Jänner und 02. Februar durchgeführt, wobei ein gutes Verhalten gezeigt wurde.

Im AP5 „POTENTIALANALYSE DER KOMBINATION DER VERFOLGTEN TECHNOLOGIEOPTIONEN“ wurden mehrere Fragen behandelt, die den Einsatz an Realanlagen betreffen: Besonders im Kontakt zu

Vestas wurde mehrfach aufgezeigt, wie viele Randbedingungen beachtet werden müssen, eine Nachrüstooption applizieren zu können, ohne die Garantie- und Wartungsverträge der Standardkomponenten negativ zu beeinflussen. Dies betrifft zuerst einmal die Frage, dass elektrisch leitende Flächen an den Blattoberflächen, wie sie hier eben als Grundsatz der thermischen Enteisung eingesetzt werden sollen, einen Nebenschluss zur eingebauten Blitzschutzanlage darstellen und damit nicht mehr für die korrekte Ableitung Garantie übernommen werden kann. Da bei Sternwind früher ein Blitzschaden auftrat, der durch eine Versicherung gedeckt war, konnten dem Konsortium auch die Kosten und Zeiten bis Wiederherstellung mitgeteilt werden.

Eine weitere Fragestellung bei den Nachrüstkonzepten betrifft die chemische Kompatibilität der neuen Werkstoffe gegenüber den Serienwerkstoffen. Dies musste gegenüber icephobic-Lacken als auch gegenüber Heizlacken geprüft werden. Auch zueinander stellt sich die Frage der chemischen Langzeitkompatibilität, da der Ansatz der Reduktion der Eishaftrkräfte durch Icephobic-Oberflächen und den darunter liegenden Heizschichten dazu führen können, dass erste Bildung von Flüssigkeitsfilmen die weiträumigere Abscherung durch Wind- oder Gewichtskräfte beschleunigen kann und den Energieaufwand und/oder Betriebszeit der aktiven Heizung verringern kann. AAC konnte zum Projektabschluss die um den Faktor 20 verringerte Scherspannung nachweisen.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Aus den umfangreichen Entwicklungsarbeiten und Untersuchungsreihen konnten vielfältige Ergebnisse zu allen fokussierten Lösungsansätzen generiert werden. Im Einzelnen sind folgende Erkenntnisse gewonnen worden:

Die Nutzung der **passiven Solarthermie** durch gezielte graue bzw. schwarze Farbstreifen und auch thermochrome Farbstoffe, und somit Erhöhung der Oberflächentemperatur der Blätter, müssen schon anfangs des Projekts verworfen werden, da eine dauerhaft dunkle Oberflächenfarbe mit den Harzen der Blätter laut Hersteller nicht vereinbar (zulässig) ist und die temperaturabhängige Färbung mit Thermochromie aufgrund nicht verfügbarer Produkte nicht realisiert werden konnte.

Um die Potentiale der gezielte Änderung des Betriebszustandes der Anlage (Ausrichtung, Anstellung/Pitch, , Drehzahländerung) im Hinblick auf raschere passive Enteisung zu evaluieren, wurden Datenauswertungen und CFD-Analysen durchgeführt; dabei konnten **Sublimationseffekte** nachgewiesen werden. Allerdings stellte sich auch heraus, dass einerseits die Messtechnik diese Erscheinungen nicht vollständig aufzeichnen kann und andererseits die Anlagentechnik die Regelung zur Optimierung nicht vollständig anbietet. Eine geringfügige Drehung der Rotorblätter, die die natürliche Sublimation beschleunigen könnte, kann aber aus Gründen der Betriebsgenehmigung nicht vorgenommen werden, sodass zusammengekommen eine Beschleunigung des natürlichen Enteisens mit den vorhandenen Anlagen und Vorschriften nicht möglich ist.

Bei den **Anti-Ice („icephobic“) Beschichtungen**, die die Haftung von Eis verringern und den Eisansatz verzögern, konnten große Fortschritte im Vergleich zum eignen Startpunkt als auch zum allgemeinem Stand der Technik erzielt werden, was den eigentlichen Effekt an sich und vor allem die Herstellbarkeit, Nutzbarkeit im Lackverbund mit anderen Lacken und Harzen sowie die Dauerhaltbarkeit betrifft. Dies wurde sowohl im Labor, an kleinen Mustern unter Witterungseinflüssen, an den starr montieren Flügelspitzen und zu guter Letzt auch in 1:1 Skalierung an einer WEA von WEB gezeigt werden. Hier bestehen sehr gute Aussichten, dass diese Lacke weiter untersucht, angepasst und breiter genutzt werden können.

Im Themenbereich **aktive Beheizung** wurden die elektrisch leitenden Lackschichten weiter entwickelt und derartige Lacke in Heizsystemen als kleine Muster im Labor als auch an den Flügelspitzen auf der Sternwind-Anlage erfolgreich getestet. Aufgrund der Ergebnisse der Blitztests wurde eine zweite Entwicklungsrichtung eingeschlagen, die metallische Vorderkanten nutzt und damit auch Blitzschutzanforderungen entgegenkommt: Das Heizsystem wird in mehrere vorgefertigte Erosionsschutzkanten aus Metall eingearbeitet; diese Segmente werden mittels luftfahrtzertifizierten Spezialklebstoffen an der Flügelvorderkante installiert. Bei einem Rotorblatt von 30m Länge werden etwa 10 bis 15 modulare Segmente verbaut, um einerseits Spannungen zu vermeiden und im Falle von Blattschäden eine einfachere Austauschbarkeit zu gewährleisten. Nachteilig im Projekt war, dass es aus vertraglichen Gründen zwischen Sternwind und Vestas nicht möglich war, die Blätter einer Sternwind-Anlage mit dieser Heiztechnik auszustatten; dies hätte den Gewährleistungsschutz gefährdet und konnte so nicht riskiert werden. Diese Situation betrifft nicht nur die eine für Versuche genutzte Anlage, sondern alle, zu denen Wartungs- und Gewährleistungsverträge mit den Herstellern bestehen. Nur wenn das Haftungsrisiko selbst von Eigentümer übernommen wird, scheint eine Nutzung der effektiv und effizient wirkenden Oberflächenheizung möglich werden.

5 Ausblick und Empfehlungen

Der Bedarf an Nachrüstlösungen für Windenergieanlagen bleibt aufrecht, was gerade die zuvor zitierten Zahlen der WEB aus den ersten beiden Monaten 2016 zeigen. Die Erfahrungen zeigen aber, dass neue Technologie in enger Kooperation mit den Anlagenherstellern gestaltet werden müssen, solange Garantien und Gewährleistungen oder Wartungsverträge aufrecht sind. Dies gilt für alle drei verfolgten Strategien, denn eisphobische Toplacke müssen mit den darunter liegenden Lackschichten kompatibel sein, Heizsysteme müssen zu etlichen anderen Systemen wie Blitzschutz, Elektrische Versorgung, Regelung etc. kompatibel sein und dynamischem Blattwinkelveränderungen dürfen keine die Betriebssicherheit mindernden Auswirkungen zeigen.

Allerdings sind einige Windparkbetreiber am Ende des Projektes mit einzelnen Partnern in konkrete Gespräche eingetreten, in Österreich und Frankreich einzelne Technologie in großangelegten Feldversuchen zu bewerten und zu testen.

Da der Bedarf an Verbesserungen der Vereisungsausfälle kein ausschließlich österreichischer, sondern ein weltweiter ist, kommt auch eine pan-europäische Kooperation in Frage, um hier erzielte Fortschritte bei Heiz- und icephobic- Lacken und –Systemen weiter voranzutreiben.

Eine konkrete Anregung aus dem Projekt heraus ist es, ein europäisches Zentrum für experimentelle Vereisungs- und Enteisungs-Untersuchungen aufzubauen, das eine oder mehrere frei zugängliche WEA-Forschungsanlagen anbieten kann - bestmöglich in Österreich, betrieben von Österreichischen Unternehmen unter F&E-Leitung eines Österreichischen Forschungspartners mit Auslastung durch weltweite Kunden und Projektpartner. Dies wurde daher auch gegenüber den Gestaltern der Studie „Gezielte Entwicklung der Wind-Energie-Technologie (GET WET) - Empfehlungen an die Politik“¹⁰ zur Sprache gebracht. Dabei muss aber bedacht werden, dass wichtige Fragen wie Kompatibilität prototypischer Anlagenteile auf eine bestehende Anlage (eines anderen Typs / Herstellers), der effiziente Wechsel von Anlagenteilen zB eines Satzes Rotorblätter erst im Detail untersucht werden müssen. Grundsätzlich wäre aber der Standort Sternwald prädestiniert, da er zum Leidwesen der Betreiber und Eigentümer zu einem europaweit besonders von winterlichen Eisbildungen betroffenen Standorten zählt.

Positiv ist, dass die beiden Technologie-KMUs AAC und Villinger aktuell in weiteren Projekten – sowohl mit WEA-Bezug als auch für andere, ähnliche Anwendungen zB Luftfahrt - ihre Ergebnisse nutzen und weiterentwickeln, sodass Rückkopplungen zu kommenden WEA-Projekten bereits wieder auf höherem Entwicklungsstand möglich werden.

6 Literaturverzeichnis

Vortrag Villinger bei „science brunch“ „Energie Alpin“ am 09. Okt 2012 im Kongresshaus Innsbruck, durchgeführt von Klima- und Energiefonds

Vortrag von DI Rudolf Gradinger " Innovative electro-thermal ice protection system for wind turbine blades" 08. – 13. SEPTEMBER 2013, SEVILLA/SPANIEN, Euromat 2013

Einreichung eines papers bei Euromat 2013 (session WIND ENERGY) "Innovative electro-thermal ice protection system for wind turbine blades"

S. Seichter, T. Fleckl, C. Reichl: "Development of a wind tunnel to investigate heat and mass transfer to heat exchangers"; Vortrag: Gemeinsame Jahrestagung der Österreichischen und Schweizer Physikalischen Gesellschaft, Linz; 03.09.2013 - 06.09.2013.

S. Seichter, C. Reichl, T. Fleckl, M. Monsberger: "Wind tunnel for qualitative and quantitative investigations of icing and condensation"; Vortrag: ESAT 2014, 27th European Symposium on Applied Thermodynamics, Eindhoven University of Technology, NL; 06.07.2014 - 09.07.2014.

P. Fuchs: "Numerical study of icing of horizontal axis wind turbine blades", Masterarbeit, FH Joanneum, Graz, 2014.

¹⁰ <http://www.uma.or.at/assets/userFiles/downloads/Projekte/Projekte/GET%20WET.pdf>

A. Zanon, M. de Gennaro, H. Kuehnelt, "Performance prediction of 5 MW windturbine during ice accretion", Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics (in Vorbereitung)

7 Anhang

(keiner)

8 Kontaktdaten

Projektleiter:

Dipl.-Ing. Rudolf Gradinger
LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH
Lamprechtshausenerstraße 61, A-5282 Ranshofen-Braunau
+43 (0)50550-6975
rudolf.gradinger@ait.ac.at
<http://www.lkr.at>

Kooperationspartner:

- WEB Windenergie AG www.windenergie.at/
- Aerospace & Advanced Composites GmbH www.aac-research.at/
- STERNWIND Errichtungs- und Betriebs-GmbH www.sternwind.at/
- AIT Austrian Institute of Technology GmbH www.ait.ac.at/
- Villinger GmbH www.villinger.com/

IMPRESSUM

Verfasser

LKR Leichtmetallkompetenzzentrum
Ranshofen GmbH
Lamprechtshausenerstraße 61
5282 Ranshofen-Braunau
Tel: +43 (0)50550-6975
E-Mail: rudolf.gradinger@ait.ac.at
Web: www.lkr.at

AutorInnen

Rudolf Gradinger (Projektleiter)
Thomas Fleckl
Helmut Kühnelt
Hannes Steiner
Dietmar Schweighart
Markus Villinger
Andreas Reichl

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH