



Schlussbericht, 15. August 2011

VEREISUNG WEA ST. BRAIS

Auswirkungen der Vereisung auf das
Betriebsverhalten und den Energieertrag von
Windkraftanlagen im Jurabogen

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

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

Autoren:

René Cattin, *METEOTEST*, rene.cattin@meteotest.ch
Sara Koller, *METEOTEST*, sara.koller@meteotest.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Katja Maus

BFE-Programmleiter: Robert Horbaty

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154227 / 103208 bzw. 154232 / 103203

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

Zusammenfassung

Die ADEV Windkraft AG hat im September 2009 zwei Windenergieanlagen (WEA) in St. Brais im Kanton Jura errichtet. Die Verfügbarkeit dieser WEA soll innerhalb des Projekts genutzt werden, um Erkenntnisse über das Betriebsverhalten von grossen WEA im Jurabogen unter vereisenden Bedingungen zu evaluieren.

Das Projekt konnte innerhalb des vorgesehenen Zeitplans und in vollem Umfang durchgeführt werden. Alle Systeme funktionierten zuverlässig, es konnte eine sehr gute Datenverfügbarkeit erreicht werden.

Während der beiden Winter wurde eine Häufigkeit der meteorologischen Vereisung von 10 bis 11 Tagen festgestellt. Für die instrumentelle Vereisung wurden Werte zwischen 25 und 42 Tagen bestimmt. Das Verhältnis zwischen meteorologischer und instrumenteller Vereisung war mit 3.4 bis 3.6 relativ konstant. Im Vergleich dazu wurden auf dem Gütsch 5 Tage meteorologische Vereisung, 28 Tage instrumentelle Vereisung und ein Verhältnis von 5.2 bestimmt.

Die Analyse der von Enercon serienmässig eingesetzten Eiserkennung der WEA zeigte, dass ausser einem ersten Ereignis Ende November/Anfang Dezember 2009 jedes der Ereignisse von der WEA korrekt erkannt wurde. Dieses Ereignis fand kurz nach der Inbetriebnahme der Anlagen statt, möglicherweise war die Kalibration der Eiserkennung über die Leistungskurve zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen.

Der Einsatz der Blattheizung führte am Standort zu einer signifikant erhöhten Jahresproduktion. Der Produktionsverlust einer WEA ohne Blattheizung wurde mit ca. 10% der Jahresproduktion beziffert. Dank der Blattheizung konnte mit Heizen im Stillstand der Verlust auf etwa 3% reduziert werden. Dabei wurden ca. 0.5% der Jahresproduktion als Heizleistung eingesetzt. Diese Verluste wurden experimentell bestätigt: Bei einer WEA wurde die Blattheizung vom 6. Januar bis 8. Februar 2010 deaktiviert. Der Mehrertrag der beheizten Anlage betrug knapp 100'000 kWh. Die aufgewendete Heizleistung entsprach für diese Periode in etwa 6.5% der gewonnenen Energie.

Heizen im Betrieb hat ein grosses Potenzial, diese Verluste weiter zu minimieren. Möglicherweise besteht ein Verbesserungspotenzial bei der Heizungssteuerung im Betrieb, insbesondere bei der Bestimmung des Heizendes. Allenfalls kann hier die relative Feuchte wichtige Zusatzinformationen liefern.

Die Resultate des Moog/Insensys Rotor Monitoring Systems in Bezug auf Eisdetektion sind grundsätzlich positiv. Es wurde jedoch deutlich, dass ein Einsatz des Systems ohne Zugang auf die Betriebsdaten der WEA nur bedingt möglich ist. Von Seiten Enercon zurzeit kein augenblickliches Interesse an der Implementierung des Moog/Insensys Systems in die Betriebssteuerung.

Die Durchführung und Auswertung der Schallmessung erwies sich als schwierig. Einerseits ist eine Schallmessung unter vereisenden Bedingungen als solches schwierig zu bewerkstelligen. Tendenziell konnte eine Erhöhung des Lärmpegels unter vereisenden Bedingungen vermutet werden. Insbesondere interessant sind Indizien, welche auf erhöhte Lärmimmissionen einer stehenden vereisten Anlage hindeuten.

Am 11. Mai 2010 und am 21. Juni 2011 reiste René Cattin (Meteotest) nach Aurich um die bisherigen Resultate des Projekts vorzustellen. Die Veranstaltungen stiess beide auf grosses Interesse in den Bereichen Forschung und Entwicklung, technische Dokumentation, Vertrieb und Site Assessment. Insbesondere anwesend waren Werner Bohlen (Leitung F&E), Christoph Hilling (Leitung Site Assessment) und Sandra Hoffmann (Vertrieb Schweiz).

Projektziele

Die ADEV Windkraft AG hat im September 2009 zwei Windenergieanlagen (WEA) vom Typ Enercon E-82 in St. Brais im Kanton Jura auf 1'100 m über Meer errichtet (Abb. 1). Dabei handelt es sich um die ersten WEA dieses Typs im Jurabogen, die zudem serienmässig mit einem System zur Eiserkennung (Vergleich Leistungskurve mit effektiver Produktion) sowie einer Warmluftheizung zur Entfernung von Eisansatz an den Rotorblättern (De-Icing) ausgerüstet sind.

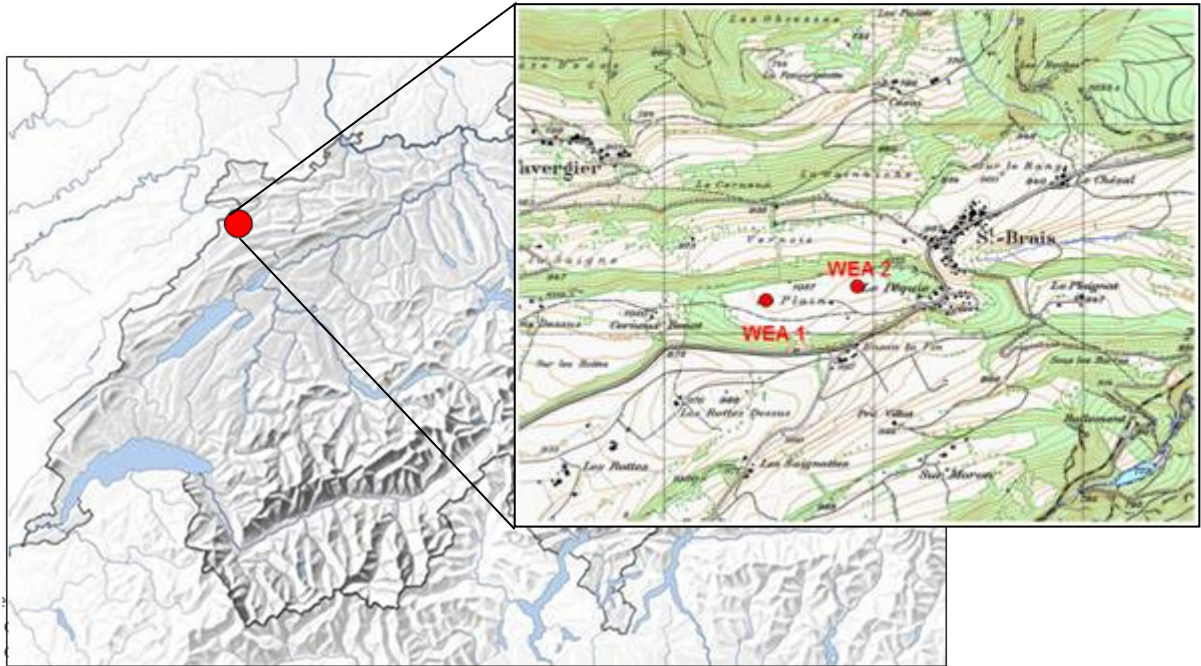


Abb. 1: Standorte der Windkraftanlagen von St. Brais.

Die erstmalige Verfügbarkeit solcher WEA im Jura soll innerhalb dieses Projekts genutzt werden, um Erkenntnisse über das Betriebsverhalten von grossen WEA im Jurabogen unter vereisenden Bedingungen zu evaluieren und aus den gewonnenen Erfahrungen Empfehlungen für die Planer von weiteren Windenergieprojekten zu formulieren. Diese Arbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit dem WEA-Hersteller Enercon durchgeführt. Zudem sollen die Schlussfolgerungen in das schon bestehende Handbuch für den Betrieb von WEA unter Vereisungsbedingungen einfließen.

Das Projekt hat eine Gesamtdauer von 24 Monaten und umfasst zwei Winter mit Messungen (2009/10 und 2010/11).

Im Kontext mit den Schwerpunkten des Windenergieforschungsprogramms des Bundes sollen im Rahmen dieses P+D beziehungsweise Forschungsprojekts folgende Ziele erreicht werden:

1. Bestimmung der Effizienz und der Zuverlässigkeit des von Enercon gelieferten Systems zur Eisentfernung von den Rotorblättern (Warmluftheizung) mittels Auswertung der Webcam-Bilder: Berechnung der dazu benötigten Energie, Vollständigkeit der Eisentfernung.
2. Ermittlung des Ertragsausfalls einer WEA durch Vereisung: Bei einer WEA wird während eines Monats pro Messwinter das Enteisungssystem deaktiviert, während die zweite Anlage normal weiterbetrieben wird. Aus den Resultaten wird ein Vergleich zwischen der zusätzlich gewonnenen Energie und der eingesetzten Heizenergie erstellt und daraus eine Aussage über das Kosten-Nutzen Verhältnis des eingesetzten Enteisungssystems gemacht. Gleichzeitig soll der Einfluss der Vereisung auf die Leistungskurve der WEA quantifiziert werden.

3. Installation und Betrieb des Moog/Insensys Rotorblatt-Monitoringsystems an einer der beiden WEA.
4. Installation und Betrieb einer WEA-Überwachung basierend auf den Bildern zwei Webcams, welche sowohl die Rotorblätter als auch die Windmessung auf der WEA überwachen.
5. Erfassung der durch Vereisung an den Rotorblättern entstehenden Zusatzlasten basierend aus den Messdaten des Moog/Insensys Rotorblatt-Monitoringsystems (Eiserkennung).
 - Bestimmung der Häufigkeit, der Intensität, der Dauer und der Art von Vereisungsereignissen am Standort St. Brais im Jurabogen. Vergleich mit den bei der Projektierung theoretisch berechneten Werten sowie den Resultaten der vom BFE geplanten Vereisungskarte der Schweiz.
 - Detaillierte Evaluation der Zuverlässigkeit unterschiedlicher Systeme zur Erfassung der Vereisung an Rotorblättern von WEA. Die Resultate der folgenden Systeme soll im Detail untersucht werden:
 - Vergleich der Leistungskurve mit der effektiven Produktion: Dieser Ansatz wird serienmässig von Enercon eingesetzt.
 - Meteorologische Messungen: Via Messung von Temperatur, relativer Feuchte und einfallender langwelliger Strahlung auf der Gondel der WEA wird auf Vereisungsbedingungen geschlossen.
 - Dehnmessstreifen in den Rotorblättern: In den Rotorblättern werden Dehnmessstreifen installiert, welche Eisansatz detektieren können.

Zur Validierung der Resultate dienen zwei Webcams, welche sowohl die Rotorblätter als auch die Windmessung auf der WEA überwachen.
6. Erstellung einer standortspezifischen Leistungskennlinie der WEA mit und ohne Vereisung mittels einer LIDAR-Messkampagne. Vergleich mit der vom Hersteller definierten Leistungskurve.
7. Erfassen der durch Vereisung an den Rotorblättern entstehenden Zusatzlasten mittels einer Gewichtsmessung mit Dehnmessstreifen (Eiserkennung).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Durchgeführte Installationen an WEA 1 in St. Brais

Moog/Insensys Rotor Monitoring System RMS

Das Moog/Insensys RMS System basiert auf faseroptischer Dehnungsmesstechnologie. Dabei werden pro Rotorblatt vier Dehnmessstreifen installiert, welche das Dehnungsverhalten, die Masse und den Schwerpunkt jedes Flügels in Echtzeit messen. Ursprünglich wurde das System für die Implementation einer individuellen Pitch-Kontrolle entwickelt. Mit den gleichen Sensoren kann aber auch die Zunahme der Masse eines Rotorblatts wegen Vereisung festgestellt werden.

Von 25. bis 27. August 2009 wurden im Enercon Werk in Aurich die Dehnmessstreifen in die Rotorblätter der für St. Brais vorgesehenen WEA 1 durch Moog/Insensys installiert (Abb. 2). Ein Sensor konnte nicht an der optimalen Position angebracht werden, da an dieser Stelle die Enercon Blattheizung installiert ist (gestrichelter rosa Kreis in Abb. 2).

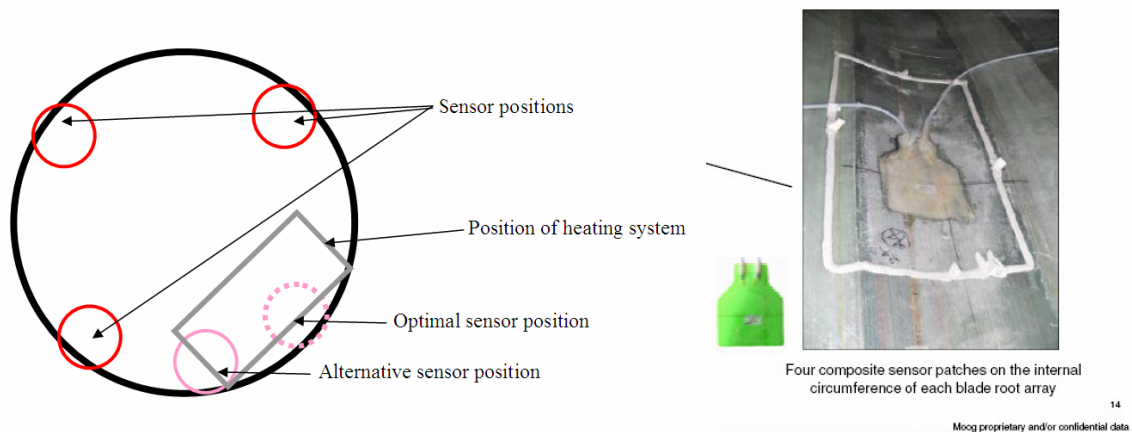


Abb. 2: Links: Position der Moog/Insensys Sensoren und der Enercon Blattheizung im Rotorblatt. In pink dargestellt die optimale und die alternative Position des vierten Sensors. rechts: Installierter Sensor auf Rotorblatt (Quelle: Moog/Insensys).

Nach der Errichtung der Windturbinen in St. Brais im September 2009 wurde am 15. und 16. Oktober 2009 die Datenerfassungseinheit in der Nabe der WEA installiert, verkabelt und in Betrieb genommen. Die Arbeiten wurden von den Mitarbeitern des Enercon Support Teams unterstützt. Zudem wurden die Sensoren kalibriert.

Der Datentransfer erfolgt via GPRS (SIM-Karte durch Meteotest bereitgestellt) zu Insensys.

Das Moog/Insensys System funktionierte während des gesamten Projekts einwandfrei, es konnte eine Datenverfügbarkeit von 100% erreicht werden.

Kameraüberwachung

Mit einer Webcam wurden die Rotorblätter der WEA überwacht. Dafür wurden am 23. Oktober 2009 eine Mobotix M12 Netzwerkkamera mit Dualoptik auf der WEA installiert. Die Kamera wurde an der Gondel der WEA befestigt, so dass sie seitlich in Richtung der Rotorblätter blickt. Um auch während der Nacht Informationen zu erhalten, wurde zudem ein Infrarotscheinwerfer an der WEA angebracht, welcher sich selbständig über einen Dämmerungsschalter ein- und ausschaltet. Um Informationen über den Zustand der Instrumente auf der Gondel zu erhalten, wurde eine zusätzliche Kamera, ebenfalls mit einem

IR-Scheinwerfer, installiert. Abbildung 3 zeigt die beiden auf der Gondel installierten Kameras und die IR-Scheinwerfer.

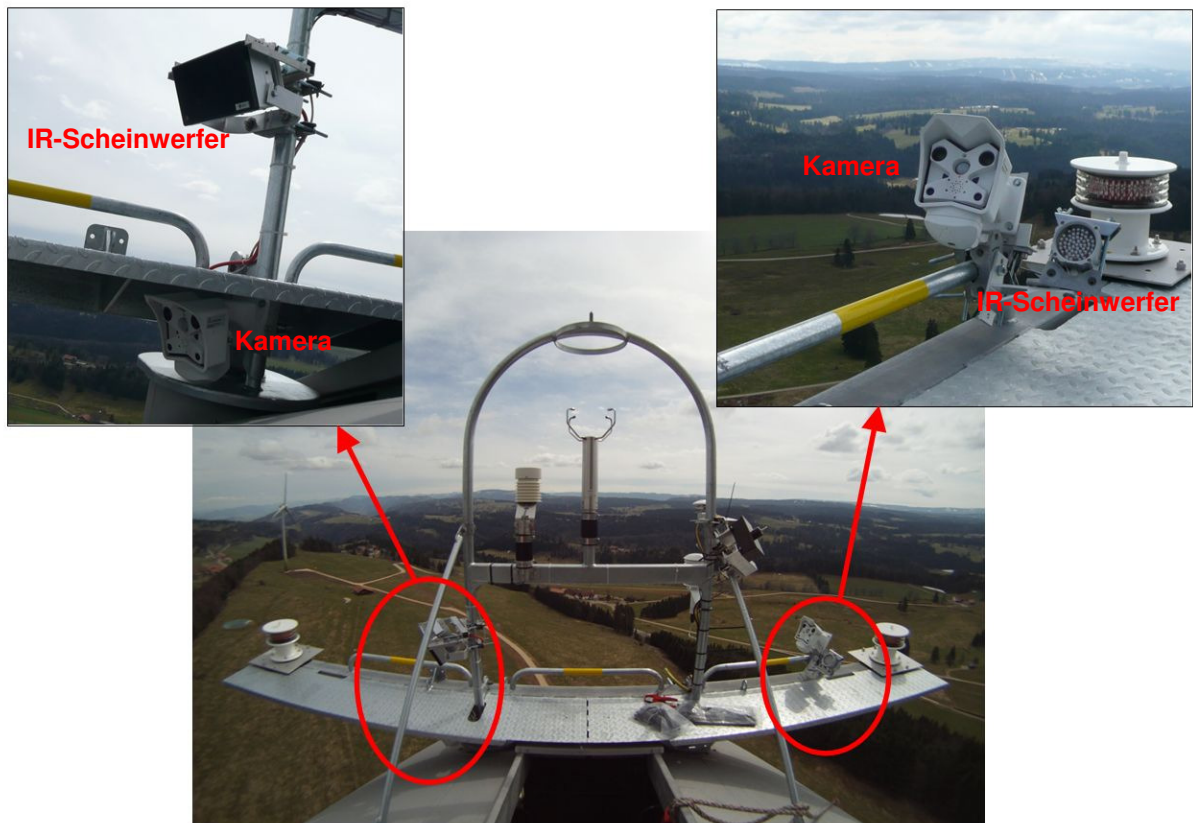


Abb. 3: Installierte Kameras und IR-Scheinwerfer auf der Gondel der WEA in St. Brais. Links: Auf das Rotorblatt gerichtete Kamera. Rechts: Auf die Sensoren gerichtete Kamera.

Der zu Beginn des Projekts installierte IR-Scheinwerfer erwies sich als zu schwach um während der Nacht aussagekräftige Bilder des Rotorblatts zu machen. Aus diesem Grund wurde am 27. Januar 2011 ein stärkerer IR Scheinwerfer installiert. Abb. 4 zeigt links den zuerst installierten und rechts den später installierten, stärkeren IR-Scheinwerfer.



Abb. 4: Links: zuerst installierter IR-Scheinwerfer welcher sich als zu schwach erwies. Rechts: Später installierter stärkerer IR-Scheinwerfer.

Die Erkennung des Rotorblatts geschieht über die in der Kamera serienmässig eingebaute „Video Motion Detection“¹. Dabei werden im Kamerabild vom Benutzer bestimmte, sensitive Bereiche markiert. Diese Bereiche werden ständig miteinander verglichen. Ändert sich im

¹ Cattin R., 2008, Handbuch für den Betrieb von Windkraftanlagen unter vereisenden Bedingungen,

markierten Bereich eine bestimmte Anzahl Pixel in einem bestimmten Mass, wird dies als Bewegung taxiert und das entsprechende Bild gespeichert. Zusätzlich können sogenannte „Referenzfenster“ definiert werden, in welchen gleichzeitig keine Bewegung auftreten darf. So können Fehlalarme verhindert werden. Nach jedem Ereignis wird eine „Totzeit“ von 30 Minuten abgewartet, bevor die Bewegungserkennung von neuem startet. So erhält man ca. alle 30 Minuten ein neues Bild eines Rotorblatts. Jedes dieser Ereignisbilder wird automatisch auf einen ftp-Server von Meteotest überspielt.

In einem ersten Schritt wurde die Konfiguration der auf dem Gütsch installierten Kamera übernommen. Es zeigte sich aber, dass von Mobotix inzwischen Änderungen an der Software vorgenommen wurden, so dass diese Einstellungen nicht mehr verwendet werden konnten. Daher musste die Konfiguration von Beginn neu erstellt werden. Folgende Situationen erwiesen sich als besonders schwierig:

- In einer klaren Nacht ist der IR-Scheinwerfer tendenziell zu schwach um den ganzen Flügel genügend stark auszuleuchten und ein vernünftiges Bild zu erhalten (Abb .4). Es zeigte sich jedoch, dass bei nassem oder vereistem Flügel eine stärkerer Kontrast und damit ein besseres Bild vorliegen. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn der Flügel noch warm ist, d.h. kurz vorher beheizt wurde. Ebenfalls gut zu erkennen ist der Flügel, wenn er nicht rotiert, zum Beispiel während eines Heizvorgangs.

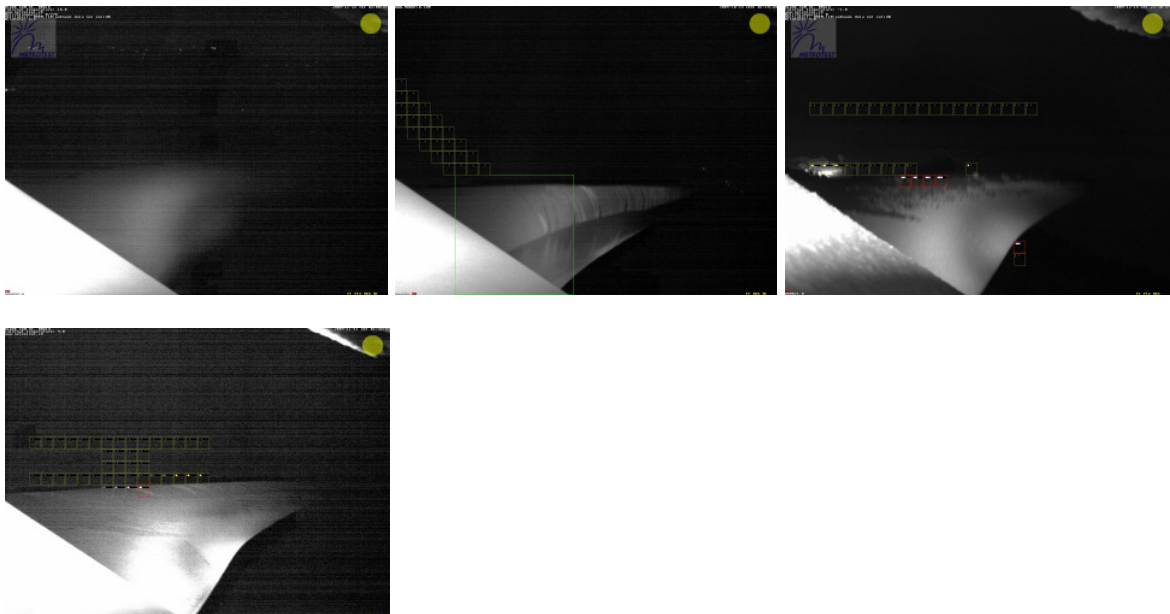


Abb. 4: Nachtbilder des Rotorblatts: Oben links: Beleuchtung ist zu schwach. Oben Mitte und rechts: Bei nassem oder vereistem Flügel sind die Konturen besser zu erkennen. Unten: Während des Heizvorgangs ist der Flügel deutlich zu erkennen.

Im Januar 2011 wurde ein stärkerer IR-Scheinwerfer installiert. Damit konnten auch während der Nacht deutlich schärfere Bilder gemacht werden. Abb. 5 zeigt links ein Nachtbild mit dem alten IR-Scheinwerfer und rechts ein Bild mit dem neuen IR-Scheinwerfer.

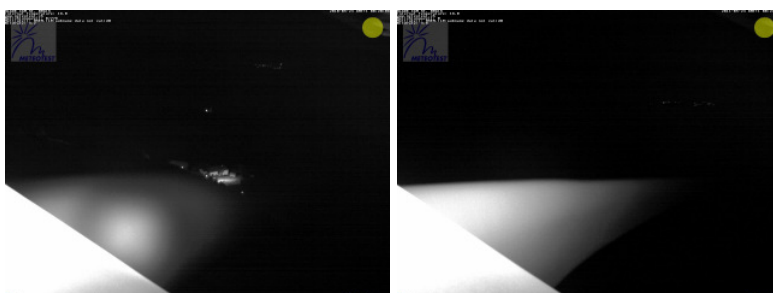


Abb. 5: Links: Nachtbild mit dem alten IR-Scheinwerfer. Rechts: Nachtbild mit dem neuen IR-Scheinwerfer.

- WEA ist tagsüber im Nebel. Daher nur sehr kleiner Kontrast zwischen grauem Flügel und grauem Hintergrund. In diesen Situationen wurde oft die untere dunklere Flügelkante detektiert, was dazu führte, dass die obere Kante nicht mehr erkennbar war (Abb. 6). Dieses Problem konnte durch erhöhte Empfindlichkeit, Anbringen von weiteren Referenzfenstern und einem zusätzlichen Erkennungsfenster für die Flügelunterkante (rotes Quadrat in Abbildung 6) behoben werden.

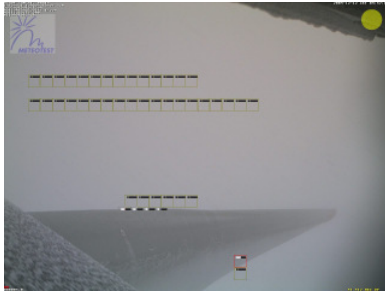


Abb. 6: Aufnahmen des Rotorblatts im Nebel: Korrekte Aufnahme des Flügels auch im Nebel dank zusätzlichem Erkennungsfenster für die Flügelunterkante.

- WEA ist nachts im Nebel. Das Licht des IR-Scheinwerfers wird vom Nebel reflektiert und macht eine Aufnahme des Flügels unmöglich: Hierfür konnte bisher keine Lösung gefunden werden (Abb. 7).

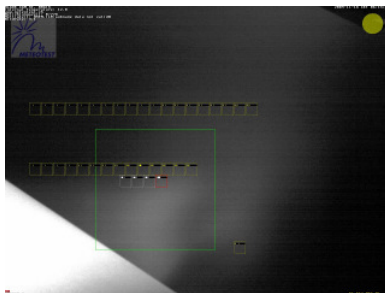


Abb. 7: IR-Scheinwerferlicht wird vom Nebel reflektiert.

- Vorbeiziehende Wolkenfetzen werden als Bewegung detektiert. Dieses Problem konnte durch zusätzliches Anbringen von Referenzfenstern behoben werden
- Nachts bei dichtem Schneefall können Schneeflocken fälschlicherweise als Bewegung taxiert werden (Abb. 8). Zudem wird das IR-Licht von den Flocken reflektiert und verhindert eine freie Sicht auf den Flügel. Hierfür konnte bisher keine Lösung gefunden werden, bei Schneefall ist aber in der Regel keine Vereisung zu erwarten.

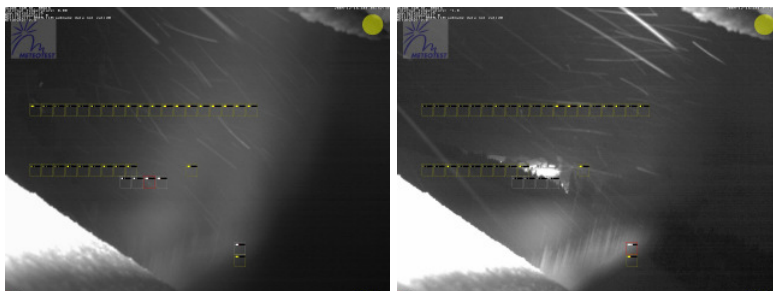


Abb. 8: Schneefall wird als Bewegung taxiert.

- Nachts können andere Lichtquellen (Autos, Häuser etc.) zu einer fälschlichen Detektion führen (Abb. 9). Dies ist schwierig zu vermeiden, kommt aber auch nur selten vor.

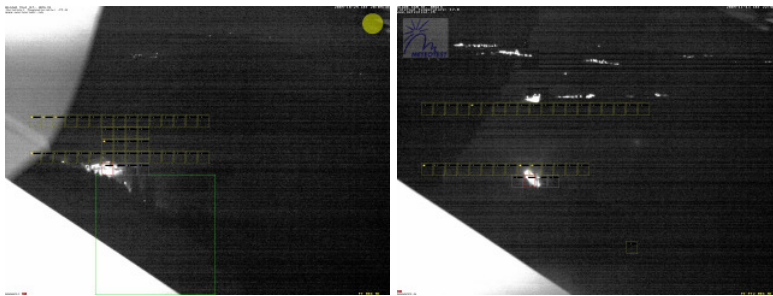


Abb. 9: Die Beleuchtung von Häusern wird als Bewegung erkannt.

- Die Kamera ist nicht beheizt, jedoch relativ gut geschützt montiert. Dennoch kann es bei stärkerer Vereisung vorkommen, dass Eisansatz den Blick auf die Flügel verhindert (Abb. 10). Das Nachtsichtobjektiv ist davor besser geschützt und kann deshalb auch tagsüber zur Abhilfe eingesetzt werden. Es wird geprüft, ob ein einfacher Plexiglasschutz auf der dem Wind zugewandten Seite der Kamera eventuell auf einfache Weise Abhilfe schaffen könnte.

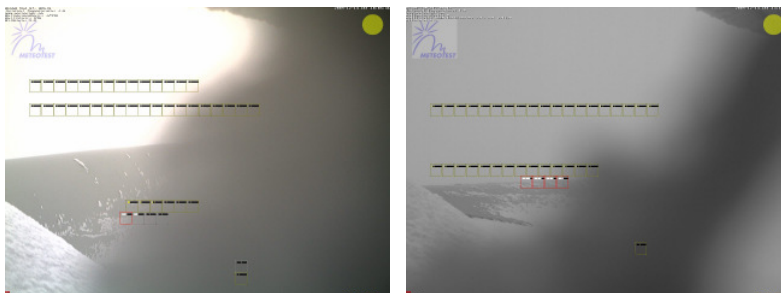


Abb. 10: Vereisung der Kamera.

- In der Übergangsphase zwischen Tag und Nacht kann es je nach Lichtverhältnissen zu Situationen kommen, in denen die Umschaltung zwischen Tag- und Nachtsichtobjektiv nicht optimal erfolgt und die Flügelerkennung zu empfindlich oder zu wenig empfindlich reagiert. In dieser Zeit werden keine Bilder gemacht.

Die Konfiguration der Kamera wurde laufend angepasst und verbessert, so dass inzwischen der Rotorflügel mit einer hohen Zuverlässigkeit erfasst werden kann. Es zeigte sich dabei auch, dass diese auf dem Gütsch an einer kleinen WEA entwickelte Methodik auch für grosse WEA angewandt werden kann. Als Weiterentwicklung für eine noch bessere Erfassung der Rotorblätter wäre die Verwendung eines elektronischen Triggers für das Auslösen der Kamera denkbar.

Als Nebeneffekt werden von der Kamera immer wieder sehr schöne Naturstimmungen festgehalten (Abb. 11)

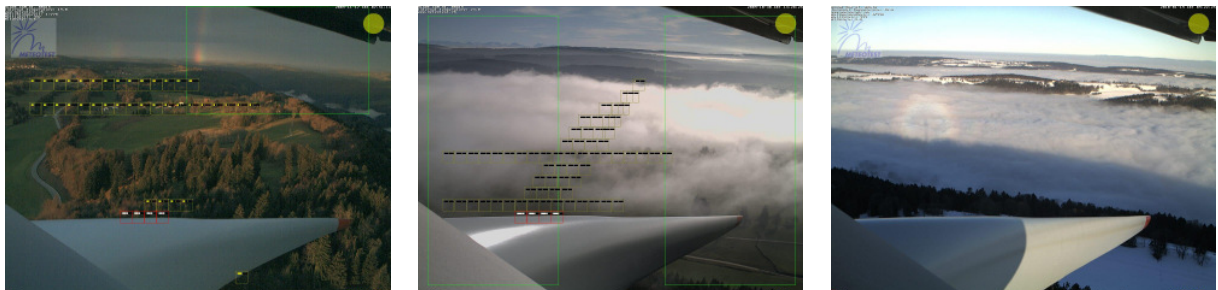


Abb. 11: Schöne Stimmungsbilder aufgenommen von der Kamera.

Eine zweite Webcam wurde auf die Windmessung auf der Gondel der WEA gerichtet werden, um deren Verhalten unter Vereisungsbedingungen aufzuzeichnen. Auch für diese Kamera wurde ein IR-Scheinwerfer angebracht, um während der Nacht Informationen erhalten zu können.

Diese Kamera macht alle 30 Minuten ein Bild und verschickt diese ebenfalls an den ftp-Server von Meteotest.

Die Kamera lieferte in den allermeisten Fällen sowohl bei Tag als auch bei Nacht gute Bilder, einzig während eines stärkeren Vereisungsereignisses war die ebenfalls unbeheizte Kamera von Eisansatz betroffen (Abb. 12).

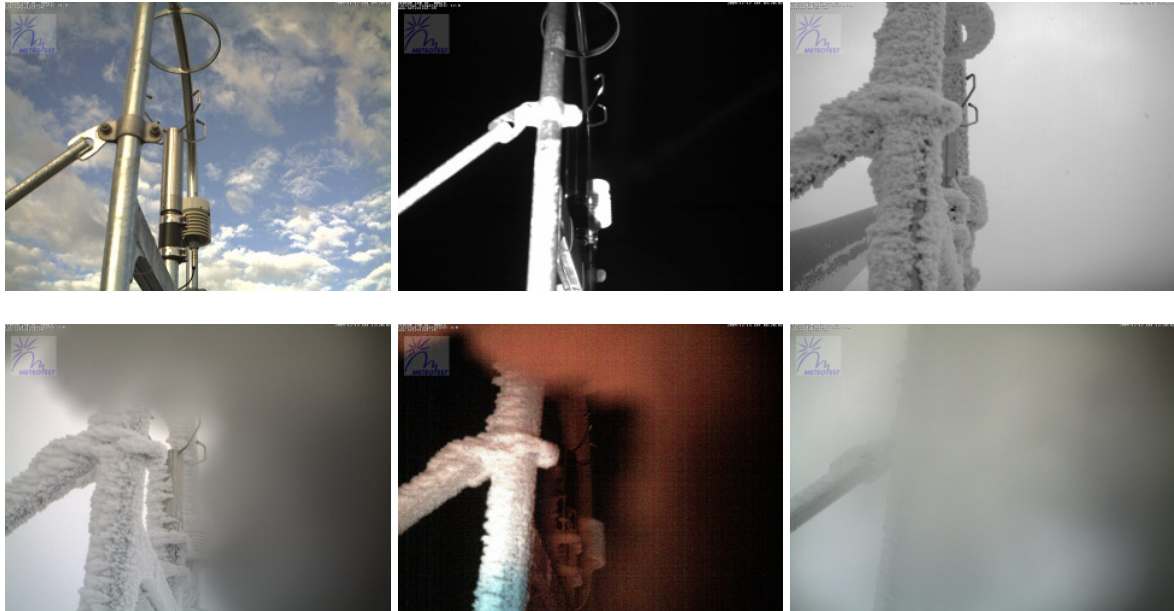


Abb. 12: Oben: Bilder der Sensorkamera tagsüber (links), bei Nacht (Mitte) und während eines Vereisungsereignisses (rechts). Unten: Beeinträchtigte Sicht auf die Sensorik wegen vereister Kamera.

Die jeweils aktuellsten drei Bilder beider Kameras werden automatisch auf der mit einem Passwort geschützten Internet-Seite stbrais.meteotest.ch dargestellt (Ab. 13).

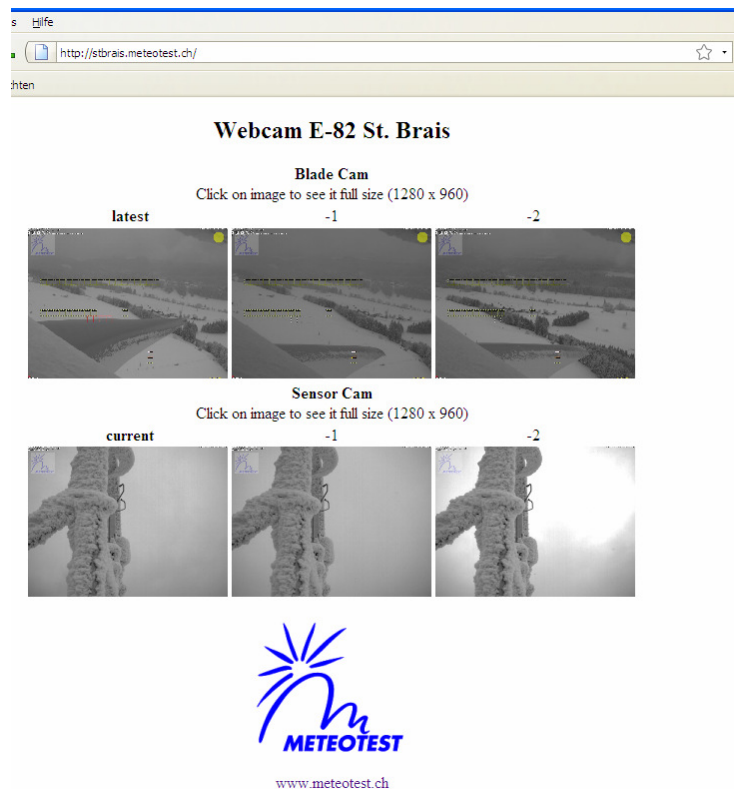


Abb. 13: Webseite mit den aktuellen Kamerabildern.

Meteorologische Sensoren

Die Bestimmung der Häufigkeit der Vereisung ist ein wichtiger Parameter für die Ertragsprognose und später auch für die Anlagenwahl. Die folgenden meteorologischen Parameter können mit geringem Zusatzaufwand gemessen werden und liefern Zusatzinformationen für die Bestimmung der meteorologischen Verhältnisse während Vereisungsereignissen:

- Temperatur
- Relative Feuchte
- Langwellige einfallende Strahlung

Die folgenden Instrumente wurden hierfür am 30. März 2010 auf der Anlage Installiert:

- Kipp & Zonen CG3 (einfallende langwellige Strahlung)
- Rotronic MP101A (Temperatur und relative Feuchte)

Die Firma Goodrich aus den USA stellte Meteotest zudem zwei Prototypen ihres neuen Eisdetektors mit einer verbesserten Heizung zur Verfügung. Eines dieser Geräte wurde auf der Teststation des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie auf dem Gütsch installiert. Das zweite Exemplar wurde am 30. März 2010 auf der WEA in St. Brais montiert.

Leider verzögerte sich die Lieferung der Datenerfassungseinheit massiv. Aus diesem Grund konnte die Installation der meteorologischen Messungen sowie des Goodrich Eisdetektors erst Ende Winter 2009/10 stattfinden. Ab diesem Zeitpunkt konnte in diesem Winter kein Vereisungsereignis mehr erfasst werden. Der Test des Eisdetektors im zweiten Projektwinter 2010/11 konnte keine brauchbaren Daten liefern wegen einer fehlerhaften Verbindung mit der Datenerfassungseinheit.

Von Seiten Enercon wurde zu Testzwecken ebenfalls ein Temperatur- und Feuchtesensor auf der Gondel der WEA installiert. Diese Daten wurden von Enercon für die beiden Winter 2009/10 und 2010/11 zu Verfügung gestellt und konnten für die Auswertung verwendet werden. Abbildung 14 zeigt die installierten meteorologischen Sensoren auf der Gondel der WEA.

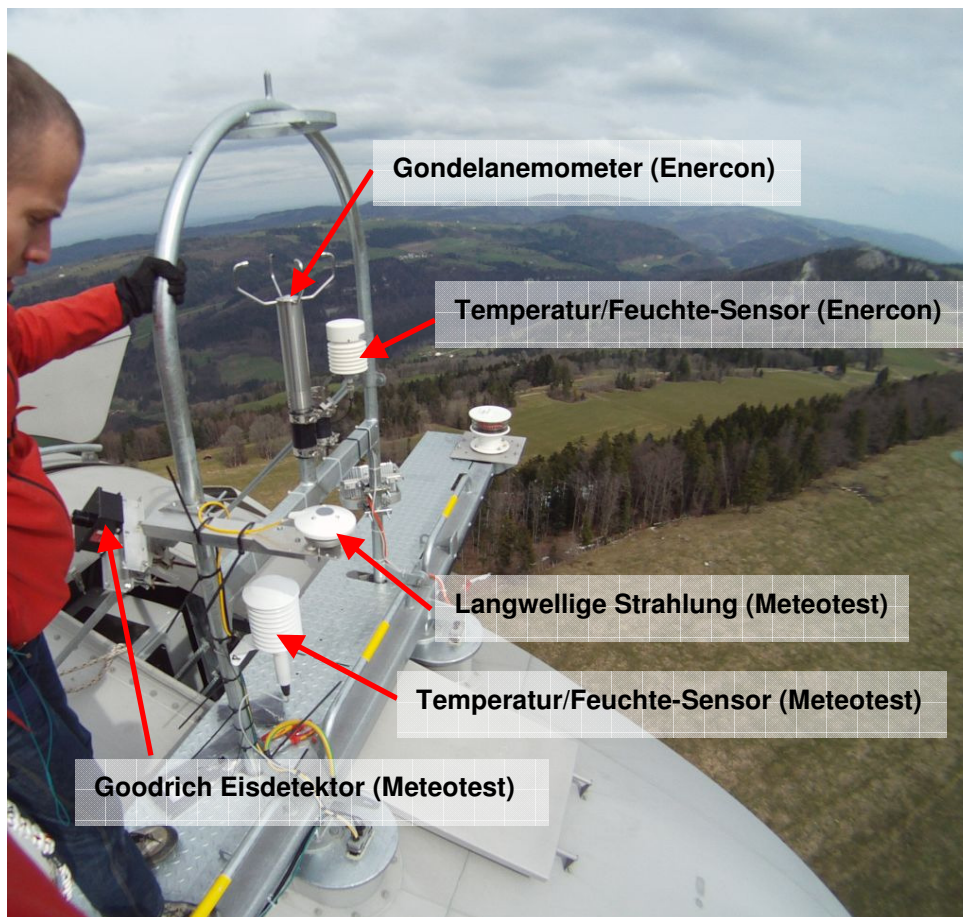


Abb. 14: Installierte meteorologische Instrumente auf der Gondel der WEA in St. Brais.

Datenübertragung

Die Datenübertragung des Insensys RMS Systems erfolgt via GPRS direkt zu Insensys. Für die Kameras wurde eine eigene ADSL Leistung in die Gondel der WEA gezogen. Über die gleiche Leitung werden die Daten der meteorologischen Messungen übermittelt. Die Kosten für den Telefonanschluss und die ADSL Leitung werden während der Projektdauer vom Projekt getragen, ebenso die Kosten für die GPRS-Übertragung.

Damit wurde den Wünschen der ADEV Windkraft AG entsprochen, dass alle Zusatzsysteme getrennt vom Standardbetrieb der WEA installiert werden.

Meteotest hat Zugang zu den Betriebsdaten der beiden WEA (10-Minuten-Werte) erhalten. Die Daten werden täglich heruntergeladen.

Der Datentransfer aller Systeme funktionierte während der beiden Projektwinter 2009/10 und 2010/11 sehr zuverlässig.

Resultate

Einleitung – Grundlagen der Vereisung

Vereisung an Strukturen ist definiert als Eis- oder Schneeansatz an Objekten, welche der Atmosphäre ausgesetzt sind, zum Beispiel an Windkraftanlagen, Überlandleitungen, Seilbahnen, meteorologischen Instrumenten oder Telekommunikationsmasten (Abb. 15).



Abb. 15: Die Vereisung an Strukturen betrifft viele Bereiche. Oben links: Wegen Vereisung eingestürzter Mast einer Hochspannungsleitung. Oben rechts: Vereisung am Rotorblatt einer WEA. Unter links: Vereistes Propelleranemometer. Unter rechts: Vereisung am Mast einer Seilbahn.

Es wird zwischen zwei Formen von Vereisung an Strukturen unterschieden: einerseits der Eisbildung aus Wolken und Nebel (Raureif und Klareis), andererseits der Eisbildung aus Niederschlag (Nassschnee und Eisregen). Die verschiedenen Auftretensformen können wie folgt charakterisiert werden (Abb. 16):

- **Raureif:** Unterkühlte Wassertropfen aus Wolken oder Nebel werden vom Wind auf eine Struktur getragen und gefrieren dort sofort, ohne dass dabei flüssiges Wasser entsteht. Wenn die Wassertropfen in der Luft eher klein sind, entsteht weicher Raureif, sind die Tropfen grösser, entsteht harter Raureif. Raureif hat eine geringere Dichte als Klareis (weicher Raureif: 200 bis 600 kg/m³, harter Raureif: 600 bis 900 kg/m³) und bildet sich asymmetrisch (oft nadelförmig) auf der dem Wind zugewandten Seite einer Struktur. Er ist opak bis weiss und tritt bei Temperaturen von 0 bis zu -20 °C auf. Dieser Prozess findet häufig an exponierten Lagen mit Hebung von feuchter Luft statt.
- **Klareis:** Wenn sich die Oberflächentemperatur einer Struktur nahe bei 0 °C befindet, gefrieren die auf einer Struktur auftreffenden Wassertropfen aus Wolken oder Nebel nicht vollständig. Es bildet sich eine Schicht mit flüssigem Wasser auf der Oberfläche, welche vom Wind auf der Struktur verteilt wird und erst nach und nach gefriert. So entsteht eine glatte, gleichmässig verteilte durchsichtige Eisschicht. Klareis hat eine hohe Dichte (900 kg/m³), tritt meistens bei Temperaturen zwischen 0 und -4 °C auf und haftet viel stärker an einer Oberfläche als Raureif.
- **Nassschnee:** Teilweise geschmolzene Schneeflocken bleiben an einer Struktur kleben und bilden so eine Schicht von Nassschnee. Nassschnee tritt typischerweise bei Temperaturen zwischen 0 und 3 °C auf und hat eine Dichte von 300 bis 600 kg/m³. Sinkt die Temperatur später unter den Gefrierpunkt, kann der Nassschnee einfrieren.

- **Eisregen:** Diese Form der Vereisung entsteht typischerweise, wenn Schnee durch eine wärmere Inversionsschicht fällt und dabei auftauft. Diese Wassertropfen gefrieren beim Auftreffen auf eine Struktur mit einer Oberflächentemperatur unter dem Gefrierpunkt und bilden so eine gleichmässige Klareisschicht.



Abb. 16: Verschiedene Arten der Vereisung. Links: Raureif, Mitte: Klareis, Rechts: Nassschnee

Die Vereisung von meteorologischen Instrumenten oder anderen Strukturen kann durch folgende Begriffe beschrieben werden:

- **Meteorologische Vereisung** (meteorological Icing M_{icing}): Zeitraum während dessen die meteorologischen Bedingungen für Eisansatz gegeben sind, das heisst aktiv Eis gebildet wird
- **Instrumentelle Vereisung** (Instrumental Icing I_{icing}): Dauer der technischen Störung eines Instruments oder einer WKA durch Vereisung, der Zeitraum während dessen Eis am Instrument vorhanden ist
- **Inkubationszeit** (incubation time): Verzögerung zwischen dem Beginn der meteorologischen Vereisung und dem Beginn der instrumentellen Vereisung.
- **Erholungsphase** (recovery time): Verzögerung zwischen dem Ende der meteorologischen Vereisung und der Wiederaufnahme des normalen, eisfreien Betriebs eines Instruments oder einer WKA

Abbildung 17 illustriert die obigen Definitionen am Beispiel einer Windmessung.

Zu Beginn liegt keine Vereisung vor und das Instrument arbeitet normal (links). Ab einem bestimmten Zeitpunkt (linke Seite der blauen Box) sind die meteorologischen Bedingungen für Eisbildung gegeben, die meteorologische Vereisung beginnt. Nach einer gewissen Verzögerung, der Inkubationszeit, beginnt der Eisansatz am Anemometer, die instrumentelle Vereisung (linke Seite der orangen Box). Die Dauer der Inkubationszeit ist abhängig von Faktoren wie der Oberflächenbeschaffenheit (gegebenenfalls beeinflusst durch Anti-Icing Massnahmen), der Form sowie der Temperatur der Struktur. Ab dem 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 (rechte Seite der blauen Box). Der Eisansatz am Instrument bleibt jedoch weiter bestehen, bis das Eis entweder von selber verschwindet (schmilzt, sublimiert, abfällt) oder mit geeigneten Massnahmen entfernt wird (manuelle Entfernung, Beheizung, andere De-icing Methoden). Erst dann ist das Ende der instrumentellen Vereisung erreicht (rechte Seite der orangen Box) und das Instrument bzw. die WEA arbeitet wieder normal.

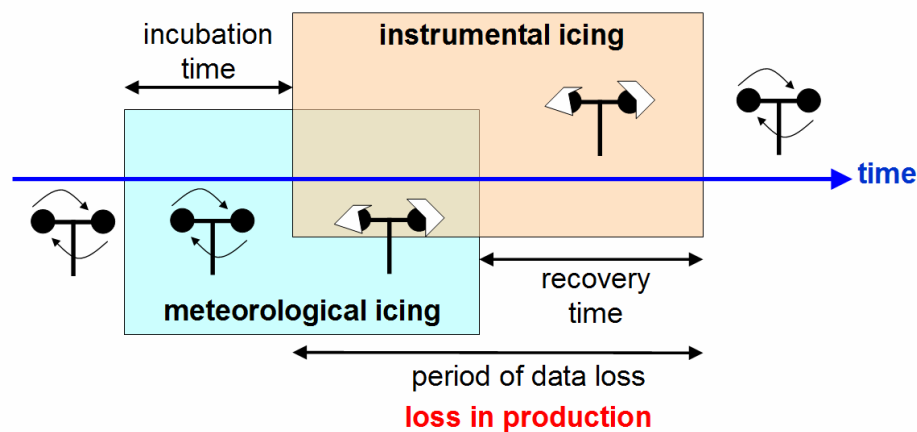


Abb. 17: Beschreibung der Vereisung von meteorologischen Instrumenten oder von einer WKA durch die Begriffe meteorologische Vereisung, instrumentelle Vereisung, Inkubationszeit und Erholungsphase.

Vereisungsereignisse

Um Informationen über die Häufigkeit von meteorologischer und instrumenteller Vereisung zu erhalten, wurden die Kamerabilder der auf die Sensoren gerichteten Kamera manuell ausgewertet. Als Annäherung wurde der Beginn der meteorologischen sowie der instrumentellen Vereisung mit dem Zeitpunkt des ersten Auftretens von Eis an der Sensorik gleichgesetzt, d.h. die Inkubationszeit wurde auf Null gesetzt. Der Zeitraum, während welchem ein Zuwachs des Eises beobachtet werden konnte, wurde als meteorologische Vereisung bezeichnet. Der Zeitpunkt ab welchem kein Eis mehr an der Sensorik erkannt werden konnte, wurde als das Ende der instrumentellen Vereisung bezeichnet.

Winter 2009/10

Abbildung 18 zeigt die so bestimmten Vereisungsereignisse des Winters 2009/10 im Überblick. Zusätzlich ist die Zeitdauer vom ersten Auftreten von Eis bis zum Zeitpunkt des Auftretens einer Lufttemperatur von mehr als $+2^{\circ}\text{C}$ während mindestens sechs Stunden aufgezeigt. Dies entspricht der Stillstandzeit einer Windturbine ohne Enteisungssystem.

Die Auswertung zeigte, dass während des Winters 2009/10 (November bis Mai) total 12 Ereignisse mit meteorologischer Vereisung (aktive Bildung von Eis) mit einer Gesamtdauer von 276h oder ca. 11.5 Tagen auftraten. Das längste Ereignis hatte eine Zeitdauer von 63h oder 2.6 Tagen. Demgegenüber stehen 997h oder ca. 41.5 Tage instrumentelle Vereisung, d.h. Perioden während welcher an der Sensorik auf der Gondel der Anlage Eis zu erkennen war. Das längste derartige Ereignis dauerte 241h oder 10 Tage.

Zudem ist erkennbar, dass das Ende der instrumentellen Vereisung gut mit dem Auftreten positiver Lufttemperaturen übereinstimmt. Einzige Ausnahme ist das letzte Ereignis im März 2010, wo das Eis schon nach kurzer Zeit verschwunden war obwohl die Lufttemperatur noch längere Zeit negativ blieb.

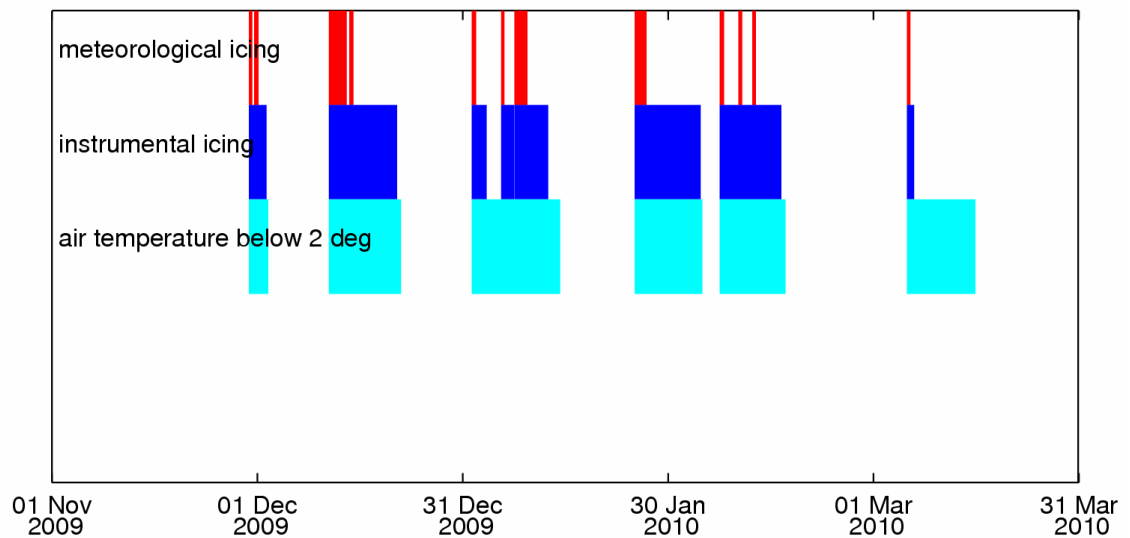


Abb. 18: Perioden mit meteorologischer (rot) und mit instrumenteller Vereisung (blau) während des Winters 2009/10 am Standort St. Brais. In türkis ist die Zeitdauer vom ersten Auftreten von Eis bis zum Zeitpunkt des Auftretens einer Lufttemperatur von mehr als +2°C während mindestens sechs Stunden aufgezeigt.

Die Stärke der Ereignisse war sehr unterschiedlich. Es konnten zwei sehr starke Ereignisse beobachtet werden, eines Mitte Dezember 2009, das andere Ende Januar 2010, die übrigen Ereignisse waren deutlich schwächer. Abbildung 19 zeigt eine Übersicht über die maximalen Eislasten der einzelnen Ereignisse.



Abb. 19: Maximaler Eisansatz während der einzelnen Vereisungsereignisse im Winter 2009/10.

Winter 2010/11

Abbildung 20 zeigt einen Überblick über die Vereisungsereignisse im Winter 2010/11.

In der Zeitspanne von Oktober 2010 bis April 2011 wurden 28 Ereignisse mit meteorologischer Vereisung (aktive Bildung von Eis) detektiert. Es ergaben sich 247h oder 10.3 Tage mit meteorologischer Vereisung. Das längste Ereignis hatte eine Zeitdauer von 25h, wobei die Mehrzahl der Ereignisse 2 bis 3h dauerten. Während insgesamt 853h oder 35.5 Tagen war eine Anlagerung von Eis an den Messsensoren auf der Gondel sichtbar (instrumentelle Vereisung). Das längste derartige Ereignis dauerte 239.5h oder 10 Tage.

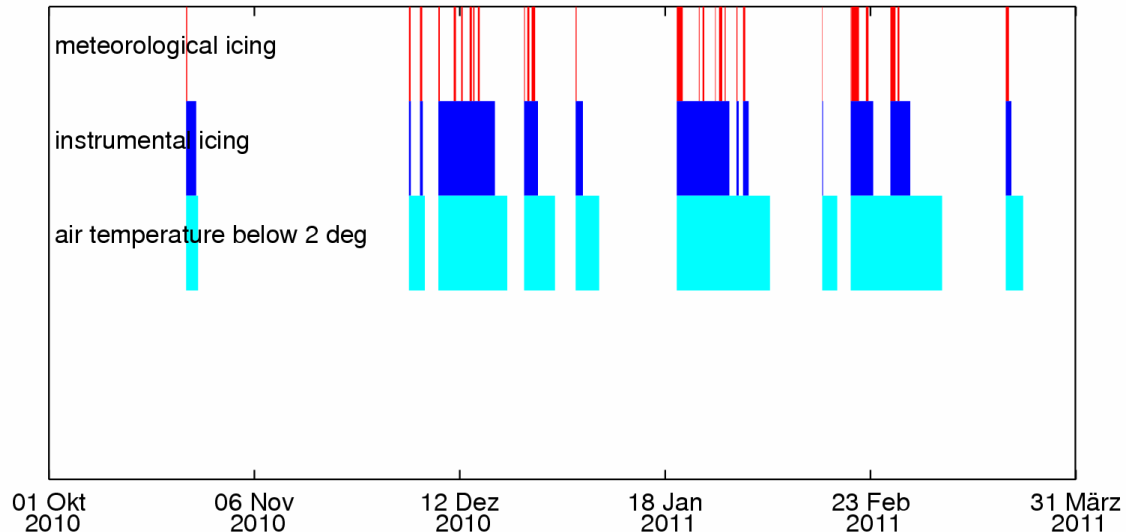


Abb. 20: Perioden mit meteorologischer (rot) und mit instrumenteller Vereisung (blau) während des Winters 2010/11 am Standort St. Brais. In türkis ist die Zeitdauer vom ersten Auftreten von Eis bis zum Zeitpunkt des Auftretens einer Lufttemperatur von mehr als +2°C während mindestens sechs Stunden aufgezeigt.

Die Stärke der Ereignisse war geringer als im Winter 2009/10. Abbildung 21 zeigt eine Übersicht über die maximalen Eislasten der einzelnen Ereignisse.

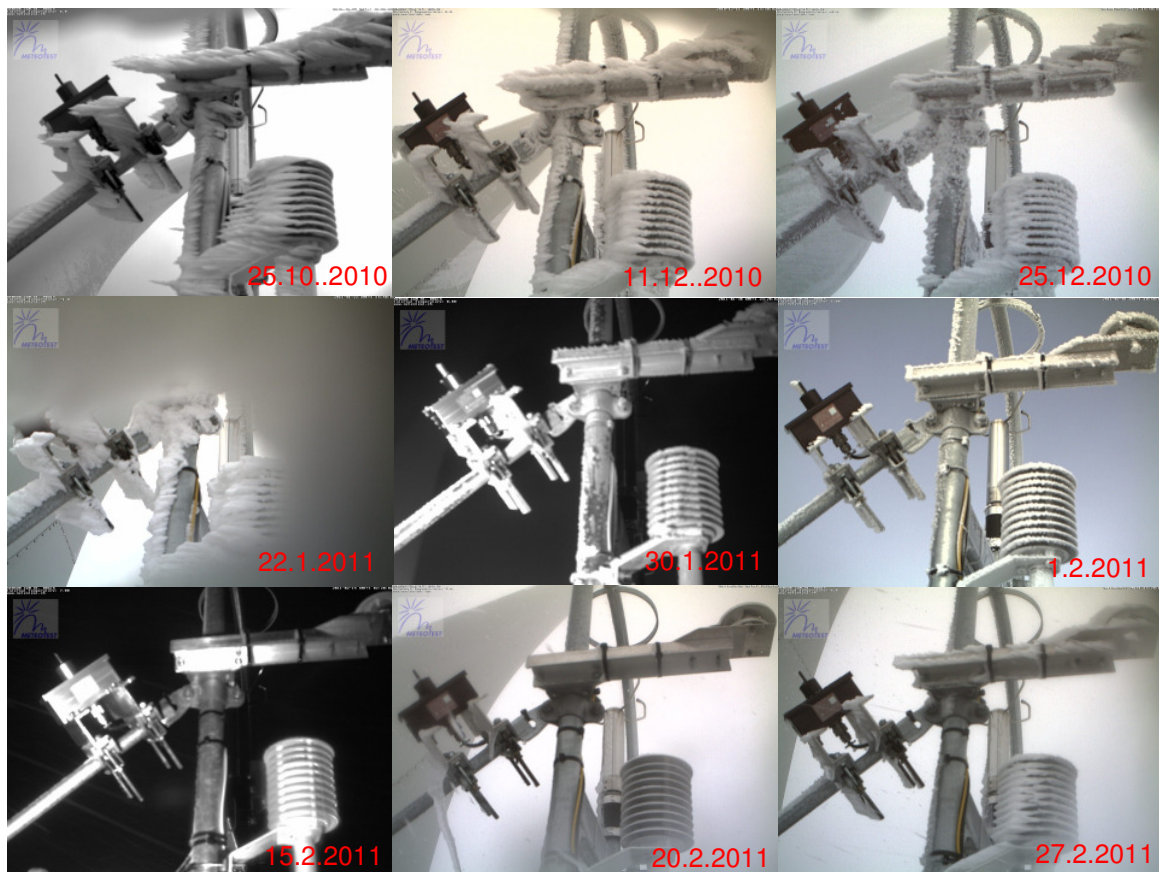


Abb. 21: Überblick über maximaler Eislasten während der einzelnen Vereisungsereignisse im Winter 2010/11.

Vergleich mit dem Standort Gütsch

Je nach Standort können die Vereisungsbedingungen stark variieren. Bei einem Vergleich eines Standorts im Jurabogen (St. Brais, 1'100 müM) mit einem Standort in den Alpen (Gütsch, 2'300 müM) sind klare Unterschiede in der Anzahl und Länge der Vereisungsereignisse erkennbar. In der Abbildung 22 ist für den Winter 2009/10 am Standort Gütsch dieselbe Analyse durchgeführt worden, wie bei St. Brais.

Auf dem Gütsch treten Vereisungsereignisse viel früher im Jahr auf als am Standort St. Brais und sie dauern auch weiter in den Frühling hinein. Es traten 24 Ereignisse mit meteorologischer Vereisung auf. Dabei lagerte sich während 129.5 Stunden oder 5.4 Tagen Eis an. Nach Ende der meteorologischen Vereisung bleibt das Eis maximal 103h oder rund 4.3 Tage haften (instrumentelle Vereisung), bevor es ganz abgeschmolzen ist. Insgesamt wurde während 674 Stunden oder 28 Tagen instrumentelle Vereisung detektiert. Es gibt nur wenige Ereignisse, während welcher meteorologische Vereisung mehr als einmal auftritt bevor das Eis wieder abschmilzt.

Deutlich zeigt sich, dass Mitte Dezember die Lufttemperatur unter den Gefrierpunkt sinkt und erst Ende März 2010 wieder positive Werte erreicht.

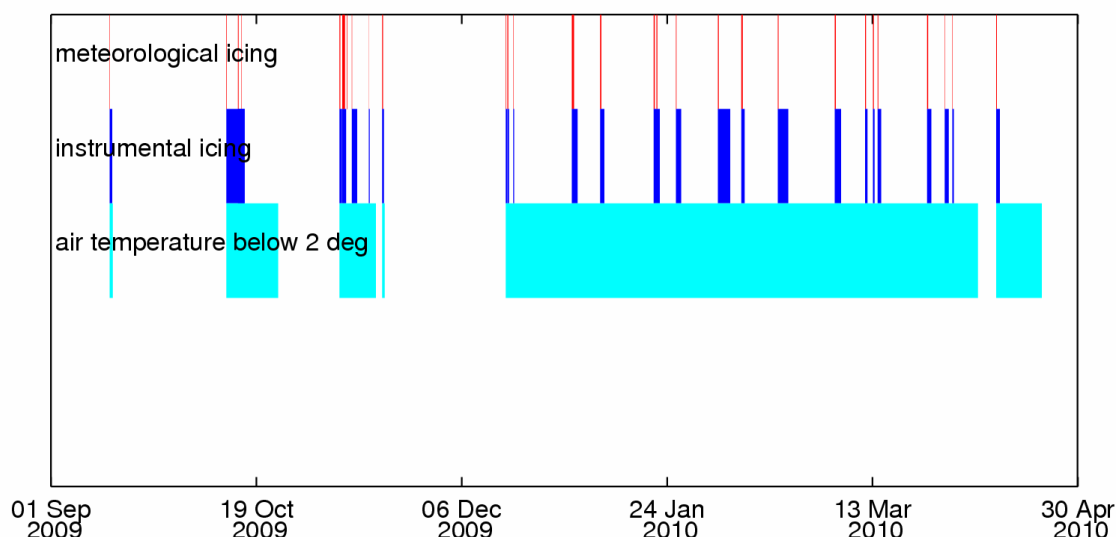


Abb. 22: Perioden mit meteorologischer (rot) und mit instrumenteller Vereisung (blau) während des Winters 2009/10 am Standort Gütsch. In türkis ist die Zeitdauer vom ersten Auftreten von Eis bis zum Zeitpunkt des Auftretens einer Lufttemperatur von mehr als +2°C während mindestens sechs Stunden aufgezeigt.

Schlussfolgerungen

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Resultate.

Tab. 1: Übersicht über die Vereisungsereignisse an den Standorten St. Brais und Gütsch.

	Anzahl Ereignisse met. Vereisung	Meteorologische Vereisung	Instrumentelle Vereisung	Faktor
St. Brais 2009/10	12	276h / 11.5 Tage	997h / 41.5 Tage	3.6
St. Brais 2010/11	26	247h / 10.3 Tage	853h / 35.5 Tage	3.4
Gütsch 2009/10	24	130h / 5.4 Tage	674h / 28.1 Tage	5.2

Die Auswertung der beiden Messwinter am Standort St. Brais zeigt deutlich, dass die Perioden der meteorologischen Vereisung relativ kurz sind im Gegensatz zur instrumentellen Vereisung. In beiden Messwintern wurde ein ähnliches Verhältnis zwischen meteorologischer und instrumenteller Vereisung von 3.4 bis 3.6 ermittelt. Insgesamt trat im Winter 2010/11 leicht weniger Vereisung auf, als im ersten Projektwinter. Dies ist unter anderem auf einen sehr trockenen Februar zurückzuführen.

Der Vergleich mit dem Standort Gütsch zeigte, dass sich das Vereisungsklima an einem Jura-Standort stark von einem hochalpinen Standort unterscheidet. Die Vereisung auf dem Gütsch beginnt im Herbst ca. 1 Monat früher und dauert im Frühling ca. 1-2 Monate länger. Die Perioden mit meteorologischer Vereisung sind kürzer als im Jura, dafür dauert die instrumentelle Vereisung im Verhältnis dazu länger. Es wurde im Winter 2009/10 ein Verhältnis zwischen meteorologischer und instrumenteller Vereisung von 5.2 ermittelt.

Unter Bedingungen, wie sie in St. Brais und auf dem Gütsch beobachtet werden konnten, ist der Einsatz von Eisentfernungsmassnahmen an der WEA stark empfohlen, da auf diese Weise der Einfluss der Vereisung auf die Produktion stark verringert werden kann.

Eine WEA ohne Blattheizung, welche automatisch den Betrieb einstellt sobald Eis detektiert wird und sich nicht wieder in Gang setzt bis während mindestens sechs Stunden mehr als 2°C gemessen würden (Annahme, da der genaue Algorithmus nicht bekannt war), wäre auf dem Gütsch während mehr als 3 1/2 Monate stillgestanden. Ohne den Einsatz von

Eisentfernungsmassnahmen an der WEA hätte der Betreiber grosse Verluste in Kauf nehmen müssen.

Im Vergleich zu den Kamerabilderauswertungen wurde in der Vereisungskarte der Schweiz für den Standort St. Brais auf 100 m über Grund für die meteorologische Vereisung ein Wert von 9 Tagen ermittelt. Es konnte also eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der Karte gefunden werden. In der Vereisungskarte ist für den Standort Gütsch eine Häufigkeit der meteorologischen Vereisung von 11.7 Tagen auf 100 m über Grund angegeben. Dies ist etwa doppelt so viel wie in der Auswertung ermittelt wurde. Gründe dafür sind einerseits eine höhere Unsicherheit der Vereisungskarte im komplexen inneralpinen Gelände. Auf der anderen Seite betrifft der Wert der Vereisungskarte eine Höhe von 100 m über Grund, während die Kamerabildauswertung auf Nabenhöhe der Anlage von 50 m durchgeführt wurde. Grundsätzlich steigt die Vereisungshäufigkeit mit der Höhe über Grund an, da die Wahrscheinlichkeit steigt, sich innerhalb einer Wolke zu befinden.

Blattheizung der WEA

Winter 2009/2010 – Heizen während Stillstand

Die Blattheizung der WEA wurde während des Winters 2009/10 so betrieben, dass nach jeder Eiserkennung die Anlage automatisch abgeschaltet wird. Danach werden die Rotorblätter während drei Stunden beheizt. Nach diesem Enteisungszyklus startet sich die Anlage automatisch wieder. Im Vergleich dazu wird eine gleiche WEA ohne Blattheizung die Produktion nach der ersten Eiserkennung ebenfalls stoppen. Ein automatischer Neustart der Anlage ist jedoch erst wieder nach Abtauen des Eises nach entsprechend andauerndem Anstieg der Außentemperatur über +2 °C möglich. In Abhängigkeit von der Außentemperatur wird von der Anlage automatisch eine erforderliche Abtauzeit ermittelt, in der die Anlage nicht automatisch startet.

Insgesamt wurde während des Winters 2009/10 die Blattheizung an beiden WEA 124 Mal aktiviert. Diese aufgewendete Heizleistung entspricht ca. 0.5% des budgetierten Jahresertrags der beiden Anlagen. Die Blattheizung war in erster Linie während Perioden der meteorologischen Vereisung aktiv (siehe Abb. 23). Sobald kein Eis mehr gebildet wurde, musste die Blattheizung in der Regel nicht mehr oder nur noch vereinzelt zur Entfernung von Resteis aktiviert werden.

Unter der Annahme, dass eine Anlage ohne Blattheizung während der Perioden der instrumentellen Vereisung stillgestanden wäre, konnte in St. Brais die Stillstandzeit der Anlage im Vergleich zu einer Anlage ohne Blattheizung um mindestens den Faktor 4 reduziert werden. Dies entspricht einem Mehrertrag von rund 6% im Vergleich zur budgetierten Jahresproduktion der beiden Anlagen. Auf der anderen Seite führte das Abschalten der Anlagen während der Beheizung nach wie vor zu einer nicht unerheblichen Stillstandzeit von ca. 7.5 Tagen pro Anlage oder einem Produktionsverlust von rund 3% im Vergleich zur budgetierten Jahresproduktion.

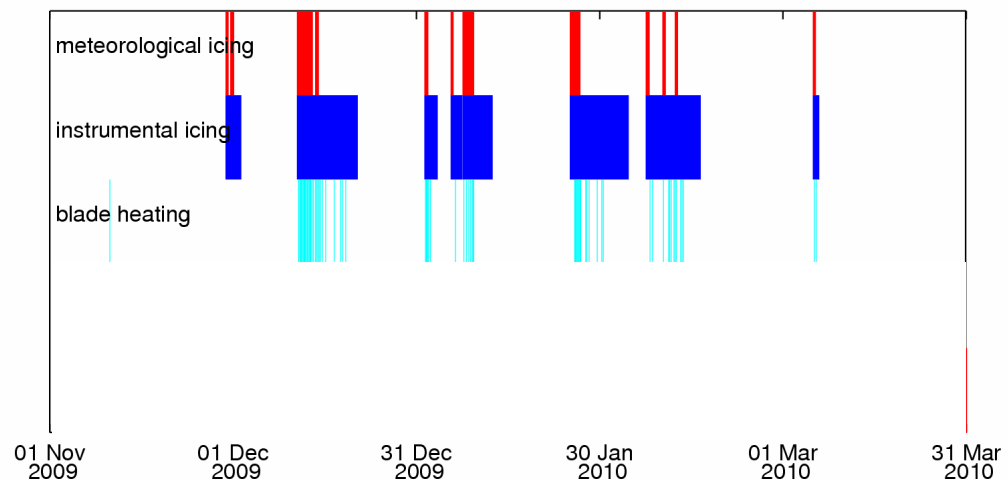


Abb. 23: Perioden mit aktiver Blattheizung (türkis) im Vergleich zu meteorologischer (rot) und instrumenteller Vereisung (blau) während des Winters 2009/10 am Standort St. Brais.

Der Hauptgrund für diese Stillstandzeiten lag in erster Linie darin, dass die Blattheizung während eines Vereisungsereignisses oftmals mehrere Heizzyklen hintereinander durchführen musste um das Eis vollständig abzuschmelzen zu können (siehe Abb. 24). In der Regel trat dies während der Dauer der meteorologischen Vereisung auf. Sobald keine Eisbildung mehr vorlag, waren nur noch wenige Heizzyklen notwendig um das Eis vollständig zu schmelzen und den normalen Betrieb wieder aufnehmen zu können.

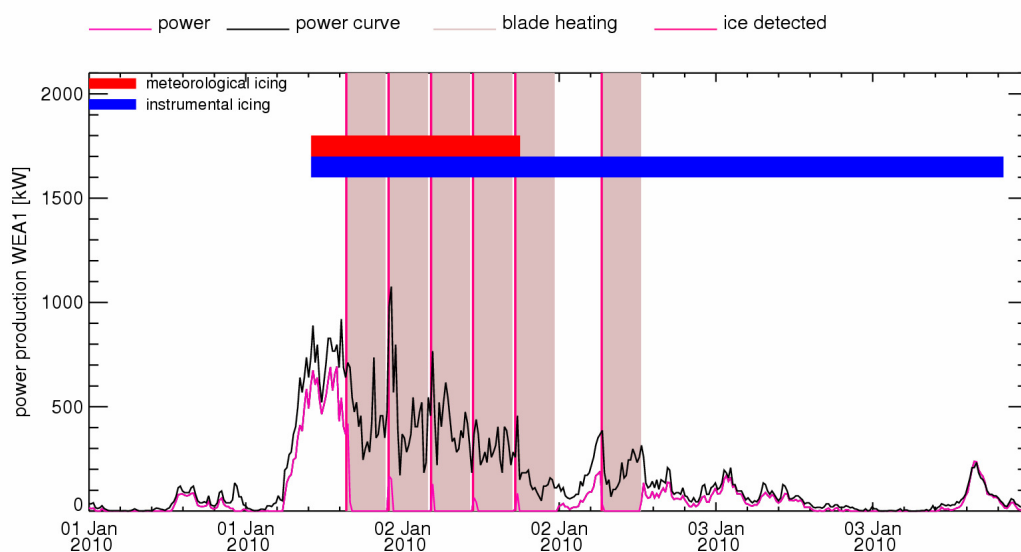


Abb. 24: Beispiel für das Verhalten der Blattheizung (hellrote Flächen) während eines Vereisungsereignisses. Der rote Balken bezeichnet die Periode mit meteorologischer Vereisung, der blaue Balken die instrumentelle Vereisung.

Aus den Kamerabildern konnte beobachtet werden, dass in einigen Fällen das Eis an der Vorderkante des Flügels jeweils vollständig geschmolzen werden konnte, während es im hinteren Teil des Flügels bestehen blieb (Abb. 25). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die warme Luft durch Kanäle durch die Vorderkante des Flügels geführt wird, die Hinterkante jedoch nicht beheizt wird. Eventuell wird der Eisansatz an der Hinterkante des Flügels bei Stillstand der Anlage dadurch begünstigt, dass das Schmelzwasser des geschmolzenen Eises durch den Wind zur unbeheizten Hinterkante des Flügels transportiert wird und dort wieder gefriert. Möglicherweise ist zudem der hintere Bereich des Flügels stärker anfällig für Vereisung, wenn die Anlage im Leerlauf ist, als wenn sie produziert.

Die Anlage ist so parametrisiert, dass sie nach einem Heizvorgang automatisch startet. Es wäre auch möglich, die Anlage so zu parametrisieren, dass sie nach Eiserkennung nicht

automatisch anläuft. Da die WEA Eisansatz an den Flügeln nur im Betrieb detektieren kann, schaltet sich die Anlage mit vereisten Flügeln automatisch ein, um sofort wieder Eis zu erkennen und sich abzuschalten. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis das Eis vollständig abgeschmolzen werden konnte. Hier zeigt sich ein Manko der Eiserkennung über die Leistungskurve: im abgeschalteten Zustand kann nicht bestimmt werden, ob die Rotorblätter wieder eisfrei sind oder nicht. Dieser Umstand kann das Sicherheitsrisiko durch wegfallende Eisstücke beim automatischen Start der Anlage erhöhen.

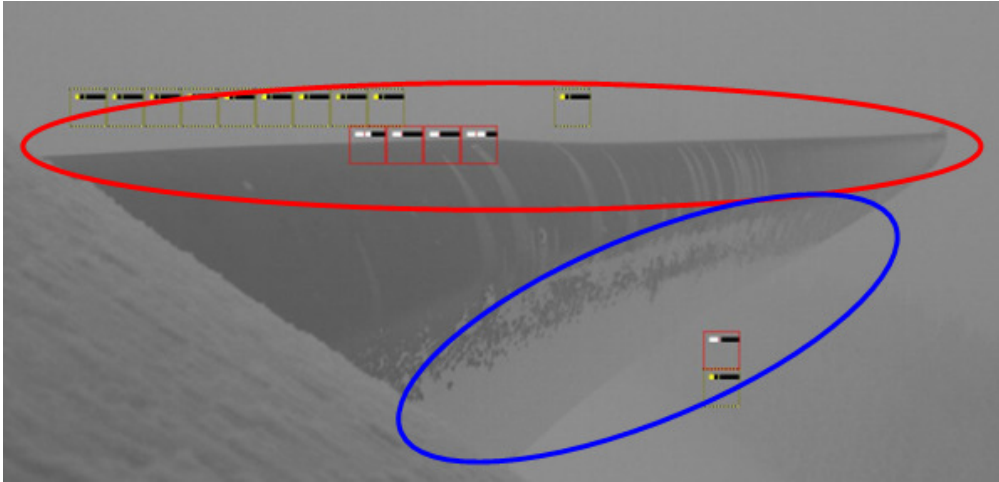


Abb. 25: Rot: Vorderkante des Flügels ist nach Einsatz der Blattheizung eisfrei. Blau: Eis bleibt im hinteren Teil des Flügels bestehen.

Um das Verhalten der WEA in St. Brais mit einer identischen WEA ohne Blattheizung vergleichen zu können, wurde die tatsächliche Produktion der Anlagen in St. Brais mit einer berechneten Produktion verglichen. Dies unter der Annahme, dass eine WEA ohne Blattheizung sich bei der ersten Detektion von Eis ausschalten wird und den Betrieb erst wieder aufnehmen würde, wenn die Lufttemperatur während mindestens 6h mehr als $+2^{\circ}\text{C}$ betrug. Das Resultat ist in Abbildung 26 dargestellt. Eine WEA ohne Blattheizung wäre während des Winters 2009/10 während ca. 1'349h oder 56 Tagen still gestanden. Im Vergleich zu einer WEA mit Blattheizung entspricht das einem Produktionsverlust von ca. 10% im Vergleich zur budgetierten Jahresproduktion. Die für die Heizung aufgewendete Energie entspricht rund 4.5% des dadurch gewonnenen Ertrags was ein sehr gutes Kosten-Nutzen Verhältnis darstellt.

In der Regel entspricht die Stillstandsperiode mehr oder weniger der Zeitdauer der instrumentellen Vereisung. Sobald die Lufttemperatur über dem Gefrierpunkt liegt, schmilzt das Eis wieder ab. Interessant ist das letzte Ereignis im März 2010, bei welchem sowohl meteorologische wie auch instrumentelle Vereisung während eines nur kurzen Zeitraumes vorlag. Die Lufttemperatur hingegen blieb noch für weitere 10 Tage unter dem Gefrierpunkt. Das Eis wurde vermutlich durch Sonnenstrahlung oder Sublimation wieder von den Strukturen entfernt. In dieser Situation wäre eine WEA ohne Blattheizung die ganze Zeit stillgestanden, obwohl sich kein Eis mehr an der Anlage befunden hätte (ausser eine Inspektion hätte stattgefunden nach welcher die Anlage manuell hätte gestartet werden können).

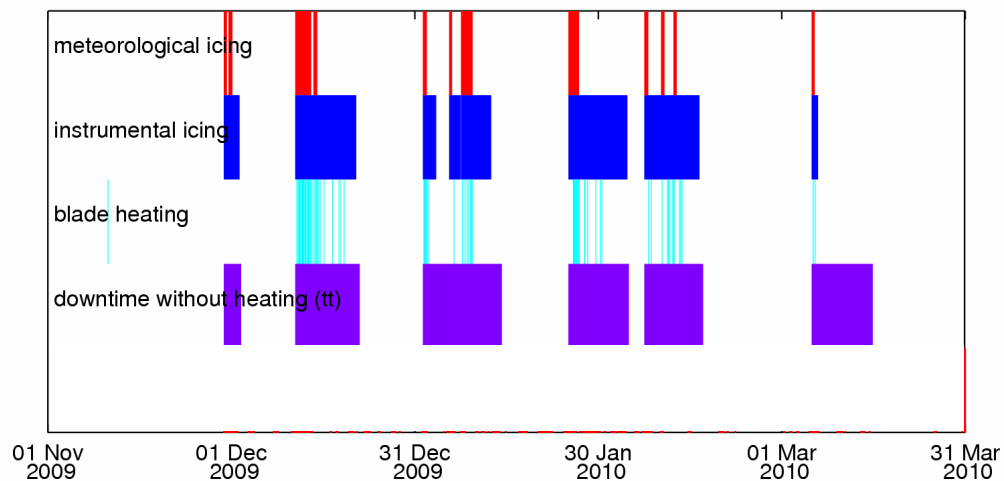


Abb. 26: Perioden während welcher eine WEA ohne Blattheizung stillstehen würde (violett) im Vergleich mit Perioden aktiver Blattheizung (türkis), meteorologischer (rot) und instrumenteller Vereisung (blau) während des Winters 2009/10 am Standort St. Brais.

Gemäss Informationen von Enercon wurden im Winter 2009/10 in Österreich, Schweden und der Tschechei Tests gemacht, bei welchen die Rotorblätter während des Betriebs beheizt wurden. Sobald über die Leistungskurve Eis erkannt wird, schaltet sich die Heizung während des Betriebs der WEA ein. Dabei wird ein engeres Toleranzband eingesetzt, als dies bei Heizen im Stillstand der Fall ist. Falls die Heizung den Eisansatz nicht verhindern kann, wird dies über die reguläre Toleranzschwelle im Leistungsabfall erkannt und die WEA geht zurück in den Heizbetrieb im Stillstand. Durch diese Kontrolle kann das Risiko des Betriebs mit stark vereisten Rotorblättern verkleinert werden. Ausserdem wird in denjenigen Situation wo es nicht zu einem Abschalten der Anlage kommt, das Eiswafrisiko reduziert, da die Anlage nicht mehr mit möglicherweise vereisten Rotorblättern gestartet werden muss.

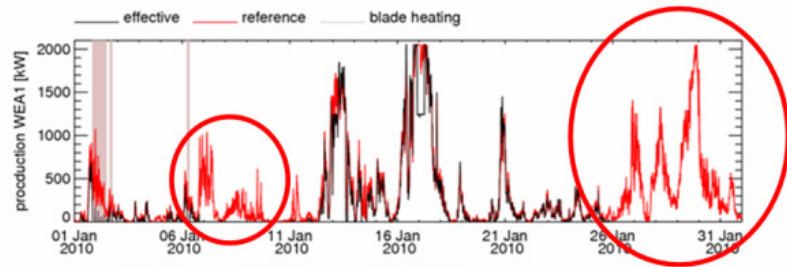
Offenbar führte dies zu einer deutlich erhöhten Produktion im Vergleich zu Anlagen, die während des Heizvorgangs abgeschaltet wurden. Die WEA in St. Brais sind technisch für einen derartigen Betrieb konfiguriert, das heisst es bedarf einzig einer Anpassung der Steuerungssoftware, um die Rotorblätter während des Betriebs beheizen zu können. Enercon empfahl, diese Anpassung für den zweiten Projektwinter 2010/11 zu machen und das vorliegende Projekt zu nutzen um den Betrieb der Anlage mit der neuen Konfiguration eingehend zu validieren.

Winter 2009/2010 - Experimenteller Vergleich zwischen WEA mit und ohne Blattheizung

Bei WEA 1 wurde die Blattheizung vom 6. Januar bis 8. Februar 2010 deaktiviert, WEA 2 wurde normal betrieben. Aus den Resultaten wurde ein Vergleich zwischen der zusätzlich gewonnenen Energie und der eingesetzten Heizenergie erstellt und daraus eine Aussage über das Kosten-Nutzen Verhältnis des eingesetzten Enteisungssystems gemacht. Dabei wurde angenommen, dass die Produktion von WEA 1 und 2 identisch sind, d.h. der Mehrertrag von WEA 2 während der in diesem Zeitraum auftretenden Vereisungsereignisse wurde als Verlust von WEA 1 wegen abgeschalteter Blattheizung angenommen.

Während der Periode traten 3 Vereisungsereignisse auf. Tabelle 2 zeigt Anfang und Ende der Vereisungsereignisse sowie den während dieser Zeiten produzierten Mehrertrag von WEA 2 im Vergleich zur aufgewendeten Heizleistung. Die Resultate bestätigen die im vorherigen Kapitel beschriebenen Erkenntnisse. Die aufgewendete Heizleistung entspricht für diese Periode in etwa 6.5% der gewonnenen Energie. Abbildung 27 zeigt der Verlauf der Produktion an den beiden WEA während dieser Zeit. Mit den roten Kreisen markiert sind zwei Perioden während welcher WEA 1 (ohne Blattheizung) wegen Vereisung still stand. Abbildung 28 zeigt die vereiste WEA 1 während dieser Periode.

blade heating **off**
ice detection **on**



blade heating **on**
ice detection **on**

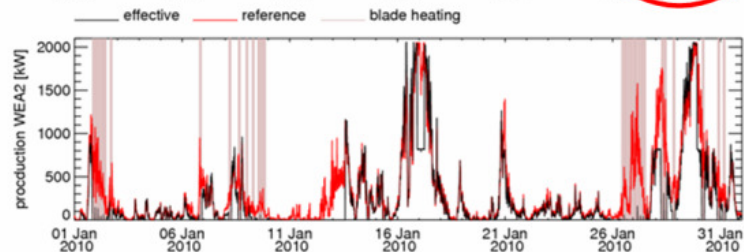


Abb. 27: Verlauf der Produktion an WEA 1 (oben) und WEA 2 (unten).

Tab. 2: Heizleistung im Vergleich zum Produktionsverlust wegen abgeschalteter Blattheizung.

Start Ereignis	Ende Ereignis	Produktion WEA 2 [kWh]
6. Jan. 2010 18:48	7. Jan. 2010 16:30	3'892
25. Jan. 2010 20:01	2. Feb. 2010 18:41	96'608
7. Feb. 2010 11:35	8. Feb. 2010 20:27	2'993
Produktionsverlust WEA 1		103'493
Eingesparte Energie durch deaktivierte Blattheizung		-7'020
Total Produktionsverlust WEA 1		96'473



Abb. 28: WEA 1 mit abgeschalteter Blattheizung und vereisten Rotorblättern.

Da das Budget für die Entschädigung der Produktionsverluste schon mit diesem ersten Experiment nahezu aufgebraucht wurde und weil die Erkenntnisse so überzeugend waren, wurde auf eine Wiederholung der Experiments im zweiten Messwinter verzichtet.

Winter 2010/2011 – Heizen während des Betriebs

Die Firma Enercon hat während der Projektlaufzeit ihr Heizsystem laufend weiterentwickelt. Dabei flossen auch Ergebnisse des Projekts St. Brais ein. Neu kann die Heizung einer Windturbine auch während des Betriebs der Anlage betrieben werden. Dabei handelt es sich um eine reine Anpassung der Betriebssoftware, es sind keine technischen Eingriffe an der Anlage nötig. Sobald die Anlage Eis via den Leistungsabfall detektiert, schaltet sich die Heizung ein. Dabei wird ein engeres Toleranzband eingesetzt, als dies bei Heizen im Stillstand der Fall ist. Das Ende der Heizperiode wird ebenfalls über die Leistungskurve sowie über meteorologische Parameter ermittelt. Wird trotz der Beheizung die reguläre Toleranzschwelle im Leistungsabfall überschritten, schaltet sich die Anlage wie bisher aus und heizt im Stillstand weiter.

Das Heizen im Betrieb der Anlage hat die folgenden Vorteile:

- Während des Betriebs bildet sich das Eis grösstenteils an der dem Wind zugewandten Vorderkante des Rotorblatts. So wird die warme Luft durch die Kanäle im Innern des Rotorblatts optimal eingesetzt.
- Wenn sich die Anlage nicht abschalten muss, entfällt das automatische Wiedereinschalten der Anlage nach dem Heizzyklus, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Eiswurf von grossen Eisstücken reduziert werden kann.
- Die benötigte Heizleistung ist im Vergleich zur Nennleistung sehr klein.
- Das Eiswurfrisiko reduziert sich vermutlich, da sich nur kleine Eismengen am Flügel bilden können.

Auf Grund administrativer Verzögerungen konnte die Umstellung auf Heizen im Betrieb an WEA1 erst am 18. Januar 2011 vollzogen werden. Ab diesem Zeitpunkt wurden für den Rest des Winters noch vier Vereisungsereignisse registriert, welche alle nur relative schwach waren. Insbesondere der Februar war aussergewöhnlich vereisungsarm. Dennoch war die Datengrundlage gross genug, um das Heizen im Betrieb anhand von vier Fallstudien zu untersuchen und erste Hinweise zu liefern.

Bei der Untersuchung wurde die produzierte Leistung von WEA1 auf Basis der Windgeschwindigkeitsdaten und einer luftdichtekorrigierten Leistungskurve berechnet. Um dies Resultate zwischen den beiden WEA vergleichbar zu machen, wurde für WEA2 eine identische Produktion angenommen. Die Stillstandzeiten während der Beheizung wurden den Statusdaten entnommen und während dieser Perioden wurde die Produktion von WEA 2 auf Null gesetzt. Damit wurde es möglich Kosten und Nutzen der beiden Heizarten direkt zu vergleichen.

Fall 1: 20. bis 23. Januar 2011

Abbildung 29 zeigt das Verhalten der beiden WEA während dieses Vereisungsereignisses. Tabelle 3 eine Auswertung der Produktion im Vergleich zur Heizleistung

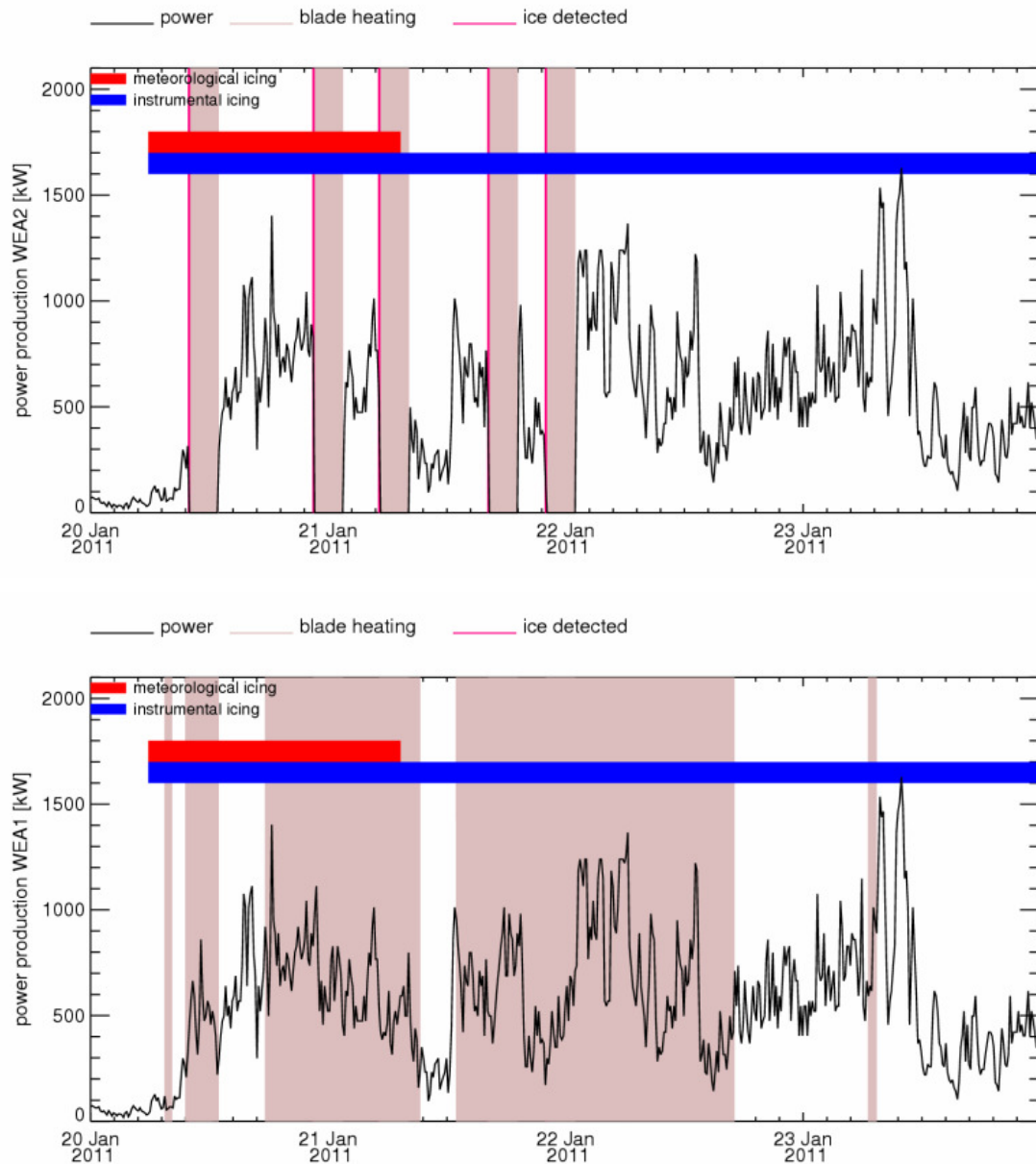


Abb. 29: Oben: Produktion von WEA2 (Heizen im Stillstand). Unten: Produktion von WEA 1 (Heizen im Betrieb). In Hellrot sind die Perioden aktiver Heizung dargestellt. In rot ist die meteorologische Vereisung und in blau die instrumentelle Vereisung dargestellt.

Tab. 3: Produktion im Vergleich zu Heizleistung.

	WEA2 [MWh]	WEA1 [MWh]	Differenz [MWh]	%
Energieproduktion	44	53	9	
Heizleistung	1.2	3.9	2.7	
Nettoproduktion	42.8	49.1	6.3	+12.8%

Fall 2: 27. bis 29. Januar 2011

Abbildung 30 zeigt das Verhalten der beiden WEA während dieses Vereisungsereignisses. Tabelle 4 eine Auswertung der Produktion im Vergleich zur Heizleistung

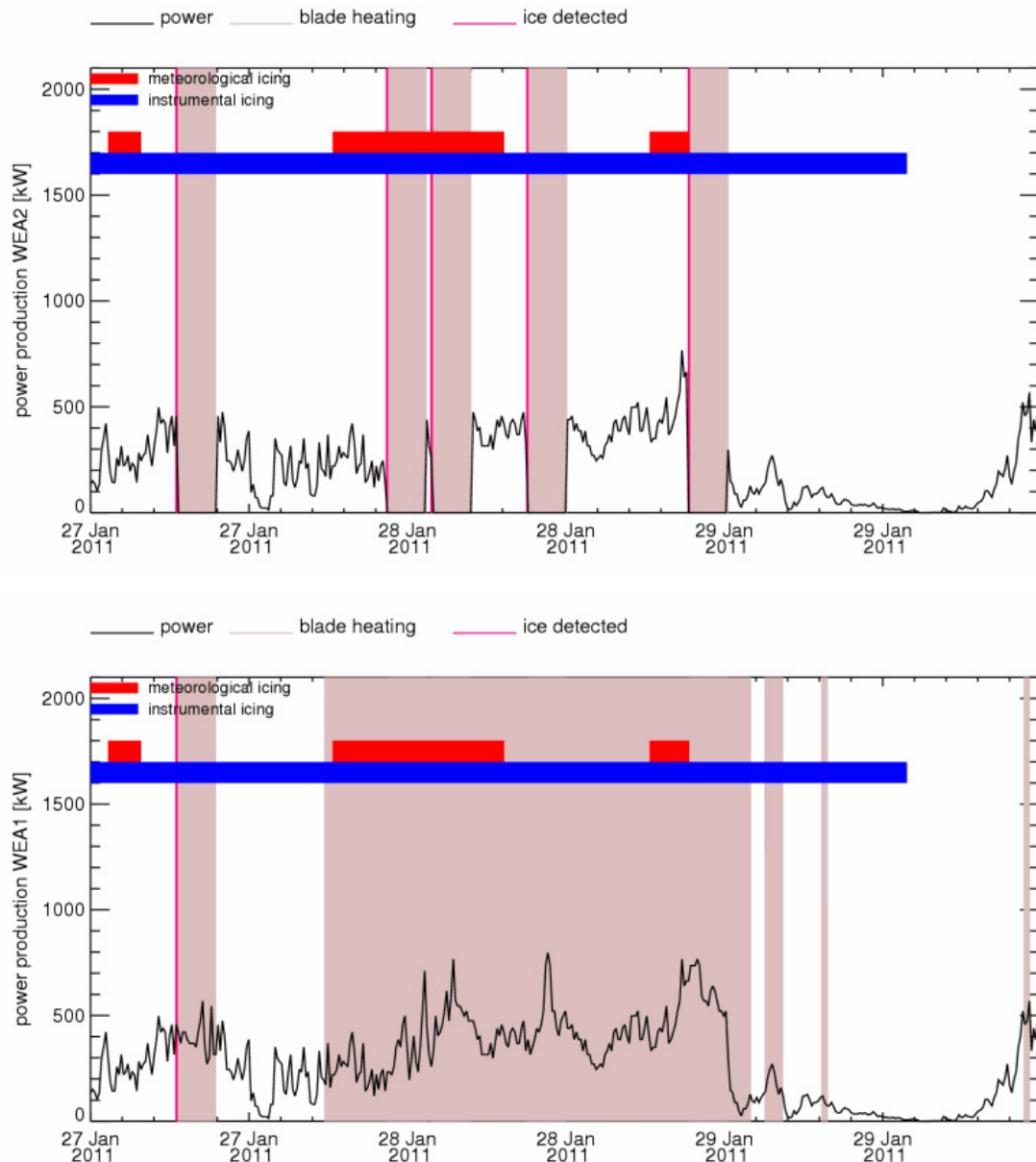


Abb. 30: Oben: Produktion von WEA2 (Heizen im Stillstand). Unten: Produktion von WEA 1 (Heizen im Betrieb). In Hellrot sind die Perioden aktiver Heizung dargestellt. In rot ist die meteorologische Vereisung und in blau die instrumentelle Vereisung dargestellt.

Tab. 4: Produktion im Vergleich zu Heizleistung.

	WEA2 [MWh]	WEA1 [MWh]	Differenz [MWh]	%
Energieproduktion	12.5	19.6	7.1	
Heizleistung	1.2	2.6	1.4	
Nettoproduktion	11.3	17.0	5.7	+33.5%

Fall 3: 30. bis 31. Januar 2011

Abbildung 31 zeigt das Verhalten der beiden WEA während dieses Vereisungsereignisses. Tabelle 5 eine Auswertung der Produktion im Vergleich zur Heizleistung

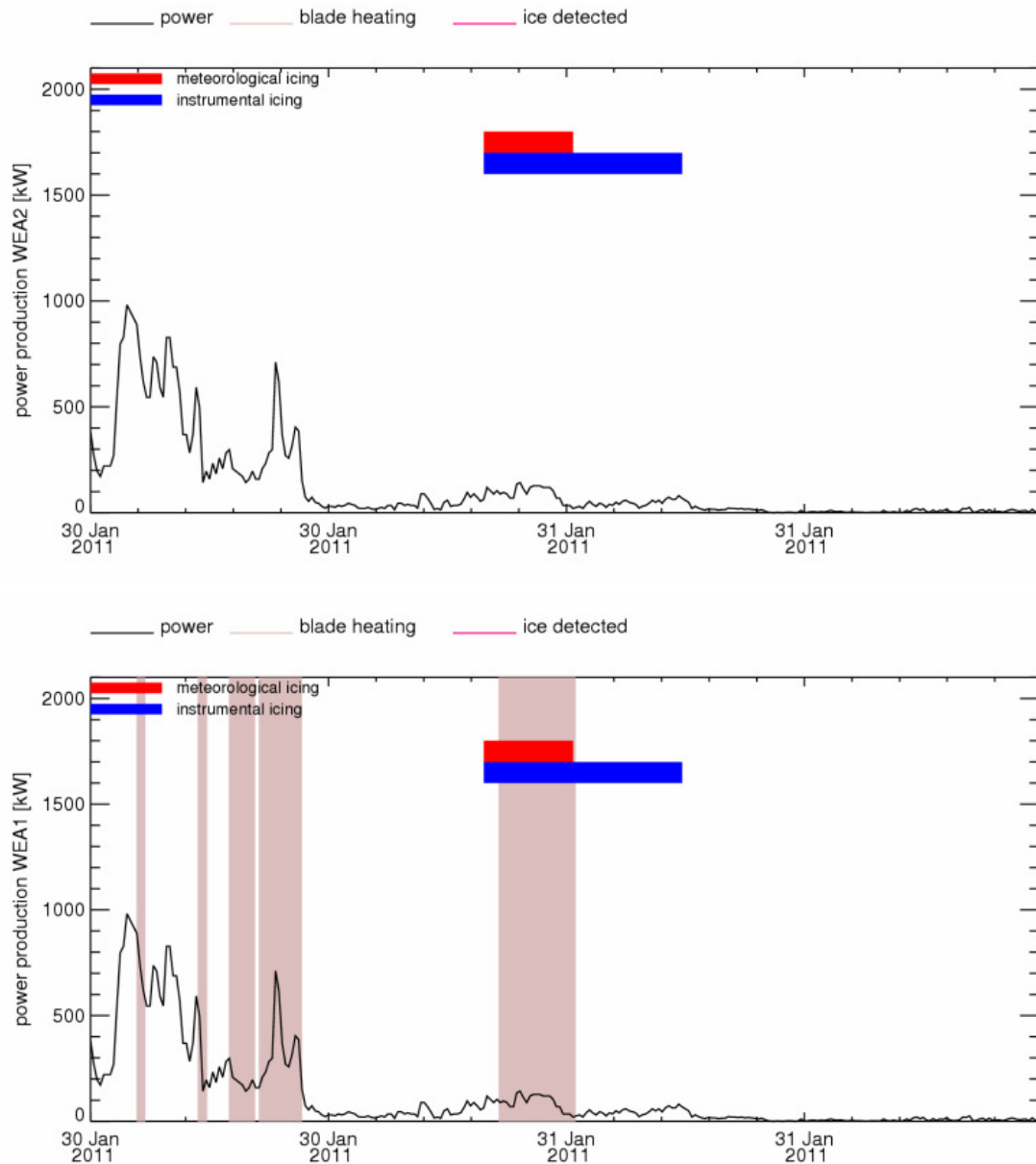


Abb. 31: Oben: Produktion von WEA2 (Heizen im Stillstand). Unten: Produktion von WEA 1 (Heizen im Betrieb). In Hellrot sind die Perioden aktiver Heizung dargestellt. In rot ist die meteorologische Vereisung und in blau die instrumentelle Vereisung dargestellt.

Tab. 5: Produktion im Vergleich zu Heizleistung.

	WEA2 [MWh]	WEA1 [MWh]	Differenz [MWh]	%
Energieproduktion	5.7	5.7	0	
Heizleistung	0	0.7	0.7	
Nettoproduktion	5.7	5.0	-0.7	-12%

Fall 4: 28. Februar bis 2. März 2011

Abbildung 32 zeigt das Verhalten der beiden WEA während dieses Vereisungsereignisses. Tabelle 6 eine Auswertung der Produktion im Vergleich zur Heizleistung

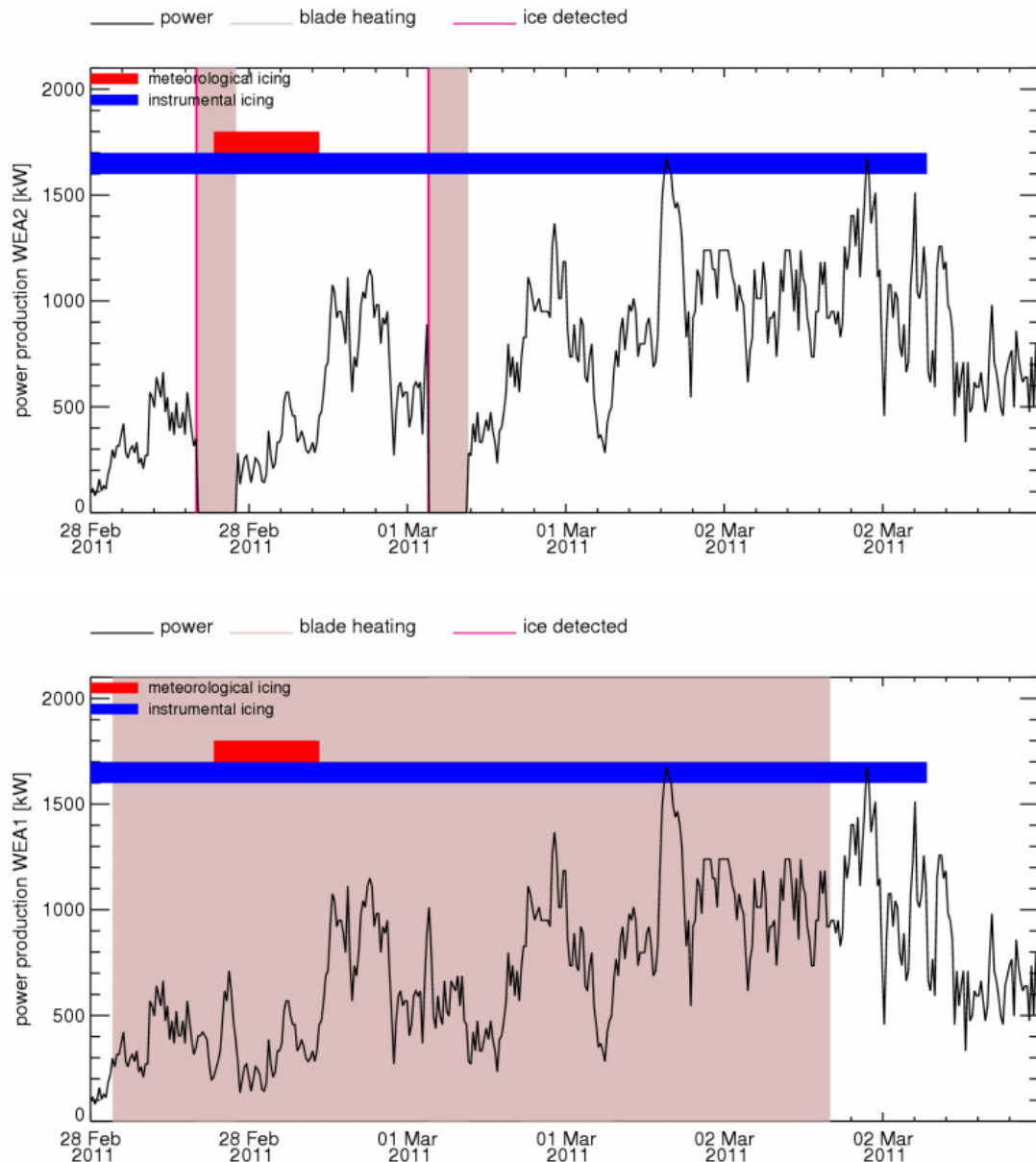


Abb. 32: Oben: Produktion von WEA2 (Heizen im Stillstand). Unten: Produktion von WEA 1 (Heizen im Betrieb). In Hellrot sind die Perioden aktiver Heizung dargestellt. In rot ist die meteorologische Vereisung und in blau die instrumentelle Vereisung dargestellt.

Tab. 6: Produktion im Vergleich zu Heizleistung.

	WEA2 [MWh]	WEA1 [MWh]	Differenz [MWh]	%
Energieproduktion	50	53	3	
Heizleistung	0.7	3	2.3	
Nettoproduktion	49.3	50	0.7	+1.4%

Fazit der Fallstudien

Die Analyse der Daten zeigte, dass in drei der vier Fälle bei Heizen im Betrieb eine höhere Produktion erzielt werden konnte, als bei Heizen im Stillstand. Der Gewinn lag im Bereich

von 10 bis 30%. Die erhöhte Produktion war dabei sowohl von der Windstärke während des Ereignisses als auch von der Dauer des Heizens im Betrieb abhängig. In allen drei Fällen wurden die Rotorblätter eine relativ lange Zeitdauer über die meteorologische Vereisung (Eisbildung) hinaus beheizt. Möglicherweise liegt hier noch ein Optimierungspotenzial vor bei Einbezug von anderen Parametern wie zum Beispiele der relative Feuchte (siehe mehr Informationen im entsprechenden Kapitel) für die Bestimmung des Endes der Beheizung.

In einem Fall wurde bei Heizen im Betrieb weniger produziert. Es handelte sich dabei um ein sehr schwaches und kurzes Ereignis. Der Grund lag vermutlich darin, dass sich bei der WEA 2 (Heizen im Stillstand) gar nie Eis detektiert wurde. Dies könnte auf Unterschiede in der Empfindlichkeit der Eisdetektion sowie auf leicht unterschiedliche Vereisungsbedingungen an den beiden Standorten zurückzuführen sein.

Wegen der reduzierten Datengrundlage, insbesondere des Fehlens von starken Vereisungsereignissen konnte das Verhalten der Anlage bei Heizen im Betrieb nicht abschliessend analysiert werden. Hierfür wäre ein weiterer voller Messwinter wünschenswert.

Eisdetektion

Eiserkennung der WEA

Die Analyse der von Enercon serienmässig eingesetzten Eiserkennung der WEA (Vergleich zwischen tatsächlicher Produktion und Produktion gemäss Leistungskurve) zeigte, dass ausser einem Ereignis Ende November/Anfang Dezember 2009 jedes der Ereignisse von der WEA korrekt erkannt wurde. Abbildung 33 zeigt eine Aufnahme des Rotorblatts aus dieser Periode mit leichtem Eisansatz am Flügel. Die Ursache, warum das erste Ereignis nicht erkannt werden konnte, ist zurzeit noch unklar. Das Ereignis fand kurz nach der Inbetriebnahme der Anlagen statt, möglicherweise war die Kalibration der Eiserkennung über die Leistungskurve zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen. Der untypische stärkere Eisansatz innen am Rotorblatt könnte daher rühren, dass es sich eher um den Ansatz von nassem Schnee als um den Ansatz von Eis gehandelt haben könnte.

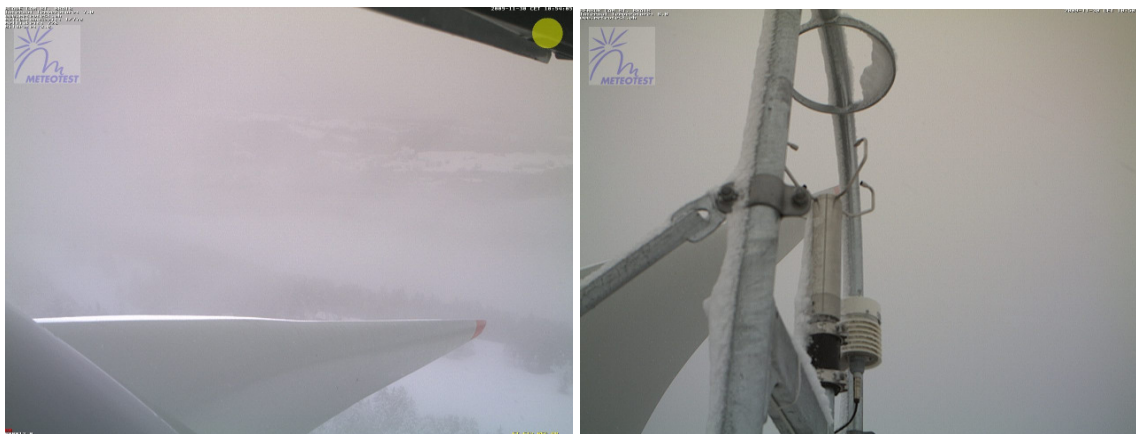


Abb. 33: Links: Eisansatz am Rotorblatt während des von der Eisdetektion nicht erkannten Ereignisses Ende November/Anfang Dezember 2010. Rechts: Eisansatz an der Sensorik der WEA. Die Bilder datieren vom 30. November 2009, 10:54 (links) und 10:50 (rechts).

Die Vereisung wurde ausschliesslich über den Abfall der Leistung erkannt. Vereisung des Anemometers sowie Abweichungen beim Blattwinkel wurden von der Anlage nicht festgestellt. Eine Vereisung des Anemometers auf der Gondel der WEA konnte anhand der Kamerabilder nicht festgestellt werden. Die Heizung des Windmessers scheint also den Bedingungen in St. Brais gewachsen zu sein.

Auf der anderen Seite wurde während starker Vereisungsereignisse durch den Eisansatz der Zwischenraum zwischen Anemometer und Blitzschutz signifikant verringert. Es besteht die Möglichkeit, dass der Windfluss zum Anemometer hierdurch gestört werden könnte (Abb. 34).

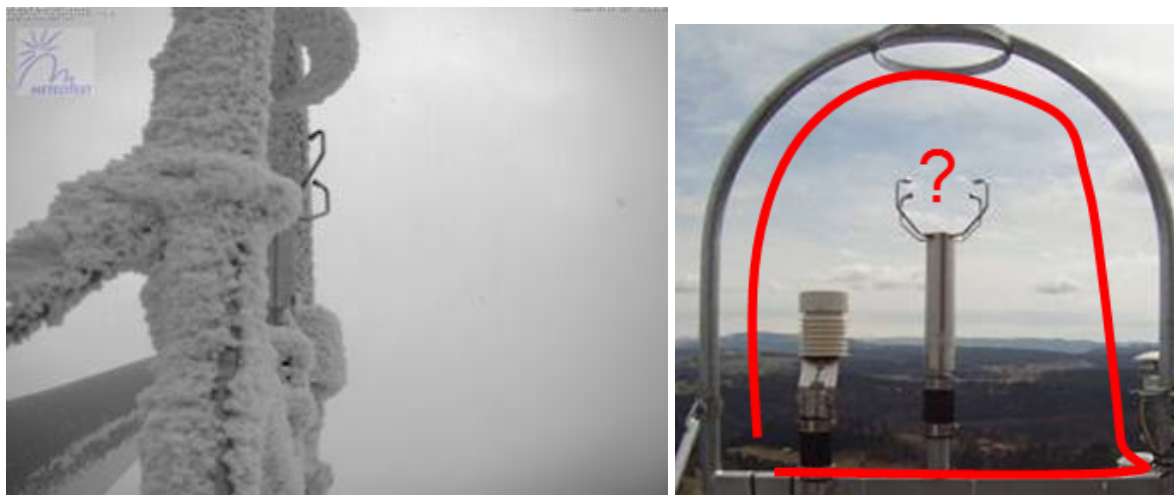


Abb. 34: Links: Eisansatz am Blitzschutz während eines starken Vereisungsereignisses. Rechts: Schematische Darstellung einer möglichen Beeinflussung der Windmessung durch starken Eisansatz am Blitzschutz.

Im Vergleich mit dem Beginn der meteorologischen Vereisung, wurde die Vereisung von der WEA mit einer Verzögerung zwischen 3 und 7 Stunden detektiert. Dies muss nicht zwingend eine verzögerte Reaktion der Eiserkennung bedeuten, sondern kann auch auf eine unterschiedliche Inkubationszeit der Sensorik und des Rotorblatts hindeuten (Zeitraum zwischen Beginn der meteorologischen und der instrumentellen Vereisung), d.h. der Eisansatz beginnt an den Metallstrukturen früher als am Rotorblatt.

Temperatur/relative Feuchte

Auf der Gondel von WEA 1 wurde von Enercon eine Temperatur/Feuchte Messung installiert. Diese Messdaten wurden für die beiden Winter 2009/10 und 2010/11 zu Verfügung gestellt und analysiert.

Abbildung 35 zeigt einen Scatter-Plot der Temperatur gegen die relative Feuchte. Es ist zu erkennen, dass bei Temperaturen tiefer als -7°C keine Sättigung mehr erreicht wird. Dies liegt daran, dass gemäss den Richtlinien der World Meteorological Organisation WMO eine Messung der relativen Feuchte immer vom Sättigungsdampfdruck in Bezug auf Wasser ausgehen muss². 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.

In Pink sind in Abbildung 35 diejenigen Werte dargestellt, die während Vereisungsereignissen aufgezeichnet wurden. Im Winter 2009/2010 fand am Standort St. Brais die Vereisung statt bei Temperaturen bis zu -13°C und bei Werten der relativen Feuchte zwischen 90 und 100%.

²

WMO/CIMO: Guide to Meteorological Instruments Observation, Chapter 4, Annex 4.A, Item 17

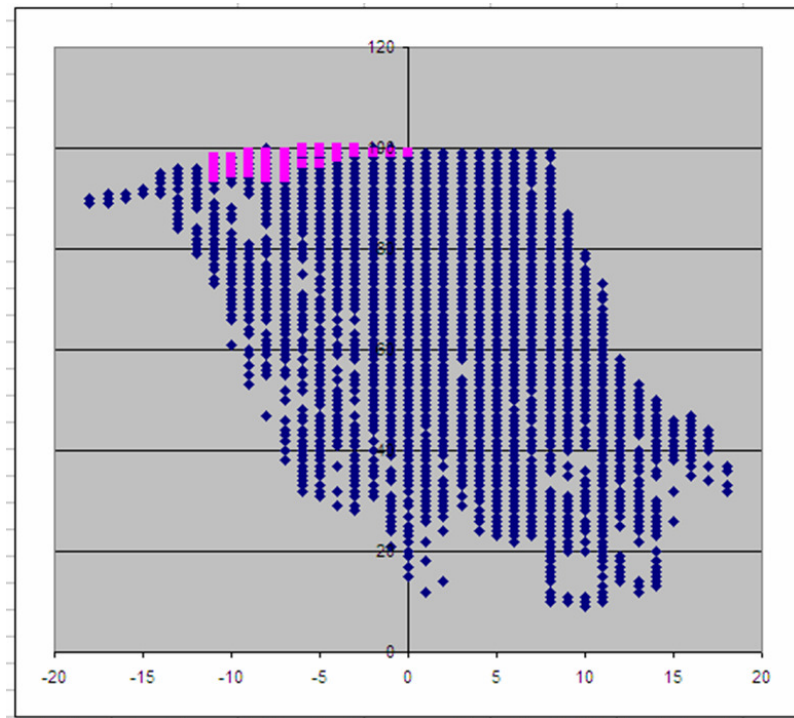


Abb. 35: Blau: Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Feuchte am Standort St. Brais während des Winters 2009/10. Bei Temperaturen unter ca. -7°C wird die Sättigung nicht mehr erreicht. Pink: Werte, die während Vereisungsereignissen aufgezeichnet wurden.

Eine häufig getroffene Annahme besagt, dass Vereisung bei Lufttemperaturen unter dem Gefrierpunkt und relativen Feuchten über 97% stattfindet. Abbildung 36 zeigt in der untersten Reihe Perioden, während welcher diese Bedingungen erfüllt waren.

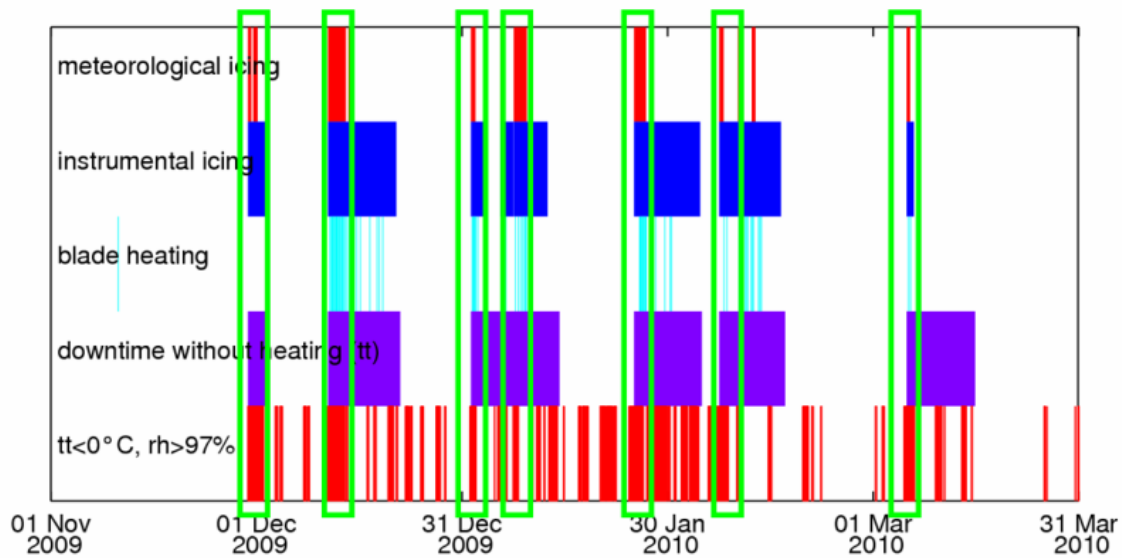


Abb. 36: Perioden während welcher eine Lufttemperatur unter dem Gefrierpunkt und eine relative Feuchte von mehr als 97% vorlagen (unterste Reihe) im Vergleich zur meteorologischen und zur instrumentellen Vereisung. Die grünen Boxen markieren Perioden mit meteorologischer Vereisung.

Es ist deutlich zu erkennen, dass kein Zusammenhang zwischen diesen Perioden und den tatsächlichen Vereisungsereignissen besteht. Die Bedingungen werden in vielen Fällen erfüllt, ohne dass sich Eis bildet. Dies liegt daran, dass die Vereisung über die Messung der relativen Feuchte nicht zuverlässig erkannt werden kann. Vielmehr von Bedeutung sind der Wassergehalt der Wolke (Liquid Water Content) und die Grössenverteilung der

Wassertröpfchen in der Luft³. Leichte, kleine Wassertropfen werden mit dem Wind um die Struktur herum getragen. Es kommt zu keiner Eisbildung. Schwere Wassertropfen hingegen treffen auf eine Struktur (Windmessung, Rotorblatt) und führen zu Eisbildung (Abb. 37).

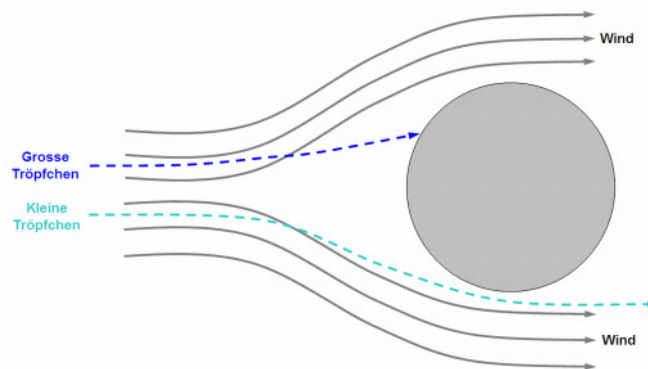


Abb. 37: Trajektorien von unterschiedlichen Wassertröpfchen um eine Struktur herum¹.

Leider können diese Werte bis heute nicht automatisch gemessen werden. Eine Kombination von Temperatur und Feuchtemessung kann wegen der grossen Wahrscheinlichkeit für „Fehlalarme“ nicht als Eisdetektor verwendet werden.

Auf der anderen Seite ist auch erkennbar, dass Anfang und Ende von Perioden meteorologischer Vereisung an sich korrekt erkannt werden (grüne Boxen). Demnach könnte die Messung von Temperatur und relativer Feuchte dazu dienen, das Ende von Perioden meteorologischer Vereisung zu bestimmen und so die Steuerung des Heizens im Betrieb weiter zu optimieren.

Eiserkennung mit Moog/Isensys Rotor Monitoring System

Die Datenauswertung des Moog/Isensys Rotor Monitoring Systems wurde vollständig durch Isensys erstellt. Die hier präsentierten Resultate stammen aus der Präsentation von Moog/Isensys anlässlich des Treffens mit Enercon vom 11. Mai 2010. Moog/Isensys wurden für die Datenanalyse die Kamerabilder zu Verfügung gestellt.

Solange die WEA in Betrieb ist, werden die Blattlasten dynamisch mittels Messung des Biegemoments bestimmt. Wenn die WEA stillsteht, werden die Lasten über die Änderung der Eigenfrequenz des Rotorblatts bestimmt. Abbildung 38 zeigt ein Beispiel eines so aufgezeichneten Vereisungsereignisses. Die schwarze Linie zeigt die dynamische Analyse, die roten Punkte die statische Analyse. Der Wechsel zwischen statischer und dynamischer Analyse während des Vereisungsereignisses wird durch den Stillstand der Anlage während der Beheizung und das automatische Wiederanlaufen nach dem Heizvorgang hervorgerufen. Die Erhöhung der Eismasse wird durch das System erkannt. Es ist aber auch deutlich zu erkennen, dass insbesondere das dynamische Signal ein grosses Rauschen aufweist.

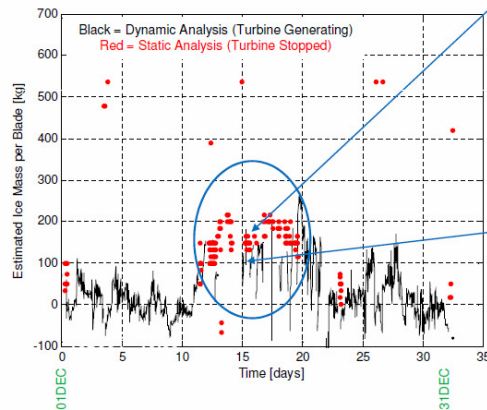
Dieser Effekt entsteht vermutlich durch die Windnachführung (Yawing) und die Verstellung des Blattwinkels (Pitching) der Anlage. Gemäss Angaben von Moog/Isensys könnte das System deutlich bessere Resultate liefern, wenn es Zugang auf diese Betriebsdaten der Anlage hätte. Da diese Angaben jedoch direkte Rückschlüssen auf die Anlagensteuerung zulassen würde, ist eine Herausgabe dieser Daten von Enercon nicht möglich. Vom Winter 2009/10 wurden für eine bestimmte Periode die Winddaten der Anlage freigegeben. Gemäss den Angaben von Moog/Isensys könnte dies schon zu einer signifikanten Verbesserung der Resultate führen. Diese Annahme bewahrheitete sich aber nicht.

³ Makkonen, L., 2000: "Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures", Philosophical Transactions of the royal society, vol. 358, no. 1776, pp. 2913-2939.

December 2009 Data

Clearly demonstrates an "Ice Event" in the middle of the month

Turbine started & stopped a number of times during this period,
(Presumably to see if ice was still there ?)



15Dec @ 17:59 Status = Ice and Turbine Stopped



15Dec @ 16:59 Status = Operating With Ice

Moog proprietary and/or confidential data

Abb. 38: Analyse der Daten des Insensys Systems für ein Vereisungsereignis Mitte Dezember 2009.

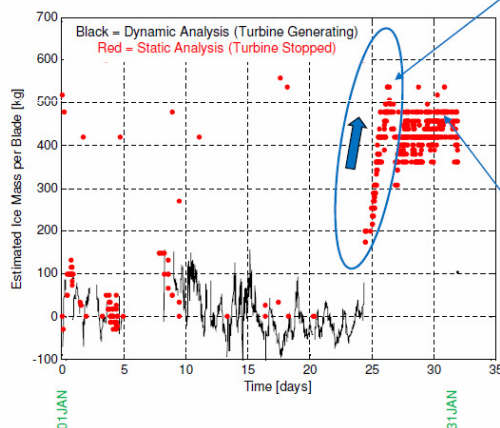
Um die Funktionalität des Systems weiter testen zu können wurde das Vereisungsereignis von Ende Januar speziell betrachtet. Während dieses Ereignisses war die Blattheizung der WEA deaktiviert. Deshalb stand die Anlage während des Ereignisses still und das Eis wurde nicht entfernt. Auf diese Weise entfiel der störende Einfluss der Windnachführung und der Blattverstellung. Abbildung 39 zeigt die Analyse dieses Ereignisses. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Eismasse bis ca. 400 kg pro Blatt zunimmt und dort über längere Zeit verbleibt. Dies deckt sich gut mit den Kamerabildern. Abbildung 40 zeigt, wie das Eis Anfang Februar abgeschmolzen wird und die Eismasse wieder abnimmt.

January 2010 Data

(Blade heating system de-activated 6Jan-7Feb for test purposes)

Ice level continues to rise then stabilises

Snow/Ice obstructing Webcam



27Jan @ 10:59 Status = Ice Building Up



31Jan @ 12:29 Status = Ice Staying There

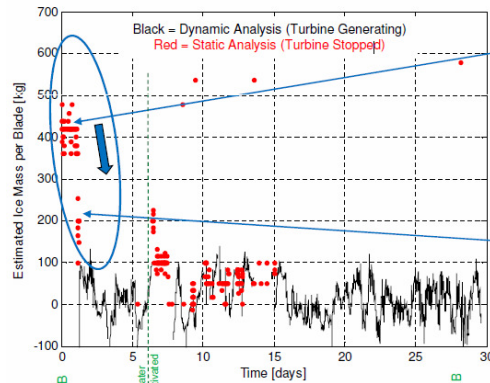
Moog proprietary and/or confidential data

Abb. 39: Eisbildung aufgezeichnet durch das Moog/Insensys Rotor Monitoring System während eines Vereisungsereignisses Ende Januar 2010.

February 2010 Data

(Blade heating system de-activated 6Jan-7Feb for test purposes)

Clearly shows Ice Level reducing at the start of the month whilst the turbine is stopped



Moog proprietary and/or confidential data

Abb. 40: Abschmelzen des Eises aufgezeichnet durch das Moog/Insensys Rotor Monitoring System am Ende eines Vereisungsereignisses Anfang Februar 2010.

Die ersten Resultate des Moog/Insensys Rotor Monitoring Systems in Bezug auf Eisdetektion waren somit grundsätzlich positiv. Es wurde jedoch auch deutlich, dass ein Einsatz des Systems ohne Zugang auf die Betriebsdaten der WEA nur bedingt möglich ist. Da Enercon bereits über ein zuverlässiges System zur Eiserkennung während des Betriebs besitzt, würde der Hauptnutzen in der Bereitstellung eines Freigabesignals bei abgeschalteter Anlage liegen. Sollte sich aber die Konfiguration durchsetzen, bei welcher die Rotorblätter während des Betriebs beheizt werden, wäre auch diese Information von untergeordneter Wichtigkeit. In diesem Sinn besteht von Seiten Enercon zurzeit kein augenblickliches Interesse an der Implementierung des Insensys Systems in die Betriebssteuerung. Aus diesem Grund konnten die Auswertungen mit dem System nicht weitergeführt werden. Inzwischen hat aber Moog/Insensys die Anforderungen dementsprechend angepasst und verkauft das System nur noch, wenn die Pitchdaten der WEA zugänglich sind. Diese Massnahme ist unter anderem eine direkte Folge von diesem Forschungsprojekt.

LIDAR-Messung

LIDAR ("light detection and ranging") ist ein Messsystem zur kontaktlosen dreidimensionalen Erfassung des Windes. Das Messprinzip beruht auf Lichtpulsen, die in vier Himmelsrichtungen in die Atmosphäre ausgesandt werden und an Aerosolen zurückgestreut werden. Die Aerosole bewegen sich mit der aktuellen Windgeschwindigkeit. Dadurch erfährt das zurückgestreute Signal eine Frequenzänderung, welche vom LIDAR erfasst wird. Aus der Laufzeit des Lichts kann die Entfernung des Aerosols berechnet werden und damit die Höhe auf der die Windgeschwindigkeit gemessen wurde. Damit kann die Windgeschwindigkeit zwischen 40 und 200 m über Grund gemessen werden.

Messung Winter 2009/2010

Die LIDAR-Messung wurde mit dem LIDAR von Suisse-Eole vom 4. bis 28. Januar 2010 durchgeführt. Das LIDAR wurde ca. 120 m östlich von WEA 1 aufgebaut. Ausser einer kurzen Datenlücke, wahrscheinlich bedingt durch einen Stromausfall, lief das LIDAR ununterbrochen durch. Aufgrund von mehreren Niederschlags- bzw. Schneefallereignissen

ist die Datenverfügbarkeit zeitweise stark eingeschränkt. Auf 100 m beträgt die Datenverfügbarkeit über die ganze Messperiode 85%. Ansonsten funktionierte das Gerät auch unter Vereisungsbedingungen einwandfrei. Abbildung 41 zeigt das installierte LIDAR mit WEA 1 im Hintergrund sowie das LIDAR mit Eisansatz. Die weiteren Auswertungen sind im separaten LIDAR-Bericht⁴ aufgeführt.

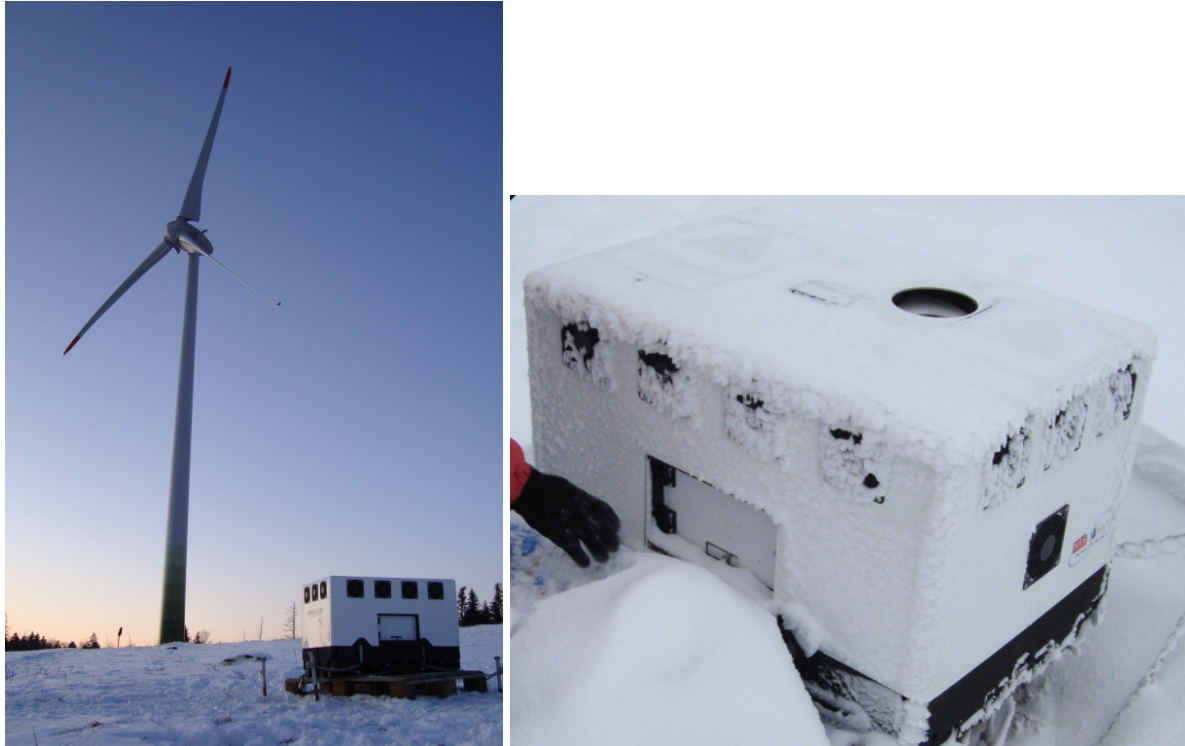


Abb. 41: Links: LIDAR mit WEA 1 im Hintergrund. Rechts: LIDAR mit Eisansatz.

Messung Winter 2010/2011

Der Messbeginn der zweiten LIDAR-Kampagne verspätete sich wegen verzögerter Gerätelieferung auf Anfang März. Aufgrund des ungewöhnlich milden Monat März konnte die Kampagne deshalb nicht unter Vereisungsbedingungen stattfinden. Das Ersatz-LIDAR von der Suisse Eole wurde am gleichen Ort wie im Vorjahr installiert. In der Abbildung 42 ist das LIDAR mit der WEA 1 im Hintergrund gezeigt. Während der Messperiode vom 9. März bis 11. April 2011 wurde auf 100 m eine Verfügbarkeit von knapp 94% mit einem mittleren Wind von 5.2 m/s erreicht. Die weiteren Resultate sind im separaten LIDAR-Bericht⁵ enthalten.

⁴ Kurzbericht zur LIDAR-Messung am Standort St. Brais vom 4. bis 28. Januar 2010 (3. Januar 2011)

⁵ Kurzbericht zur LIDAR-Messung am Standort St. Brais vom 9. März bis 11. April 2011 (9. Mai 2011)



Abb. 42: LIDAR mit WEA 1 im Hintergrund

Leistungskurvenberechnung

Für die Leistungskurvenberechnung wurden die Wind-Daten der beiden LIDAR-Kampagnen benutzt, sowie die Leistungswerte der Enercon Scada-Daten der WEA 1 während den zwei Mess-Zeiträumen. In der Abbildung 43 sind die 10-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit gegen die Leistung aufgezeichnet. Die zur Lärmreduktion eingeführte Beschränkung der maximalen Leistung auf rund 1'250 kWh während bestimmter Windbedingungen und Tageszeiten sind deutlich erkennbar.

Für die Datenbereinigung wurden Filterkriterien eingefügt. Bei folgenden Bedingungen wurden Windgeschwindigkeit und Leistung auf Fehlwert gesetzt:

- wenn Windgeschwindigkeit gleich 0 m/s und Leistung grösser 0 kW.
- wenn Leistung grösser 0 kW und Windgeschwindigkeit kleiner 4 m/s.
- wenn Windgeschwindigkeit grösser 10 m/s und Leistung zwischen 1'230 und 1'280 kWh.

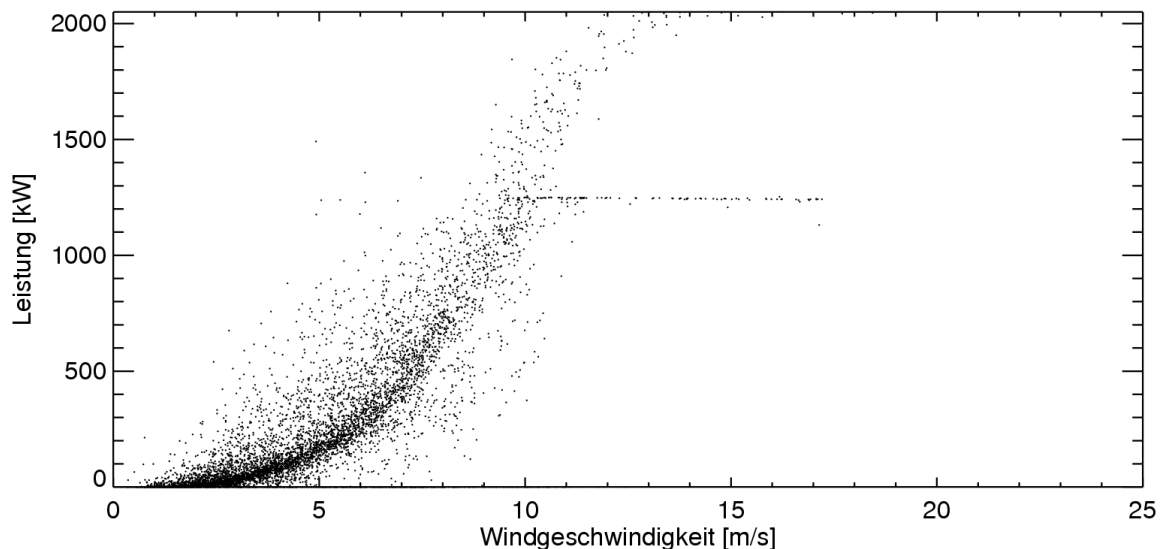


Abb. 43: Leistungskurve in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeitsdaten gemessen mit dem LIDAR für WEA 1.

Nach der Bereinigung beträgt die Datenverfügbarkeit der Leistungsdaten 91.8% mit 7'798 Werten und jene der verwendeten Windgeschwindigkeitsdaten 80.5% mit insgesamt 6'837 Werten.

In Abbildung 44 sind die Leistungswerte der WEA 1 gegen die LIDAR-Windgeschwindigkeiten in 30°-Windrichtungssektoren aufgezeichnet (schwarz). Die offizielle Leistungskurve von Enercon ist schwarz gestrichelt markiert, die berechnete mittlere Leistungskennlinie für den Standort St. Brais ist rot eingezeichnet.

Die LIDAR-Messdaten zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit der theoretischen Leistungskennlinie von Enercon, hingegen eine sehr grosse Streuung der Werte. Der Standort für die LIDAR-Messung war für eine Leistungskurvenvermessung nicht optimal. Bei Westwind wurde die LIDAR-Messung durch die WEA 1 gestört. Der Einfluss der WEA 1 auf das Windfeld, das von dem LIDAR gemessen wird, ist in den Sektoren W und WSW deutlich zu sehen.

Es ist zu beachten, dass es sich bei dieser Analyse um eine grobe Gegenüberstellung der Leistungskurven handelt, welche nicht einer offiziellen und nach Richtlinien durchgeführten Leistungskurvenvermessung entspricht. Dies war nicht das Ziel des Projekts. Das ursprüngliche Ziel war eine Analyse des Einflusses der Vereisung auf die Leistungskurve der WEA. Mangels genügend Messdaten während Vereisungsereignissen konnte dieses Ziel innerhalb des Projekts nicht erreicht werden.

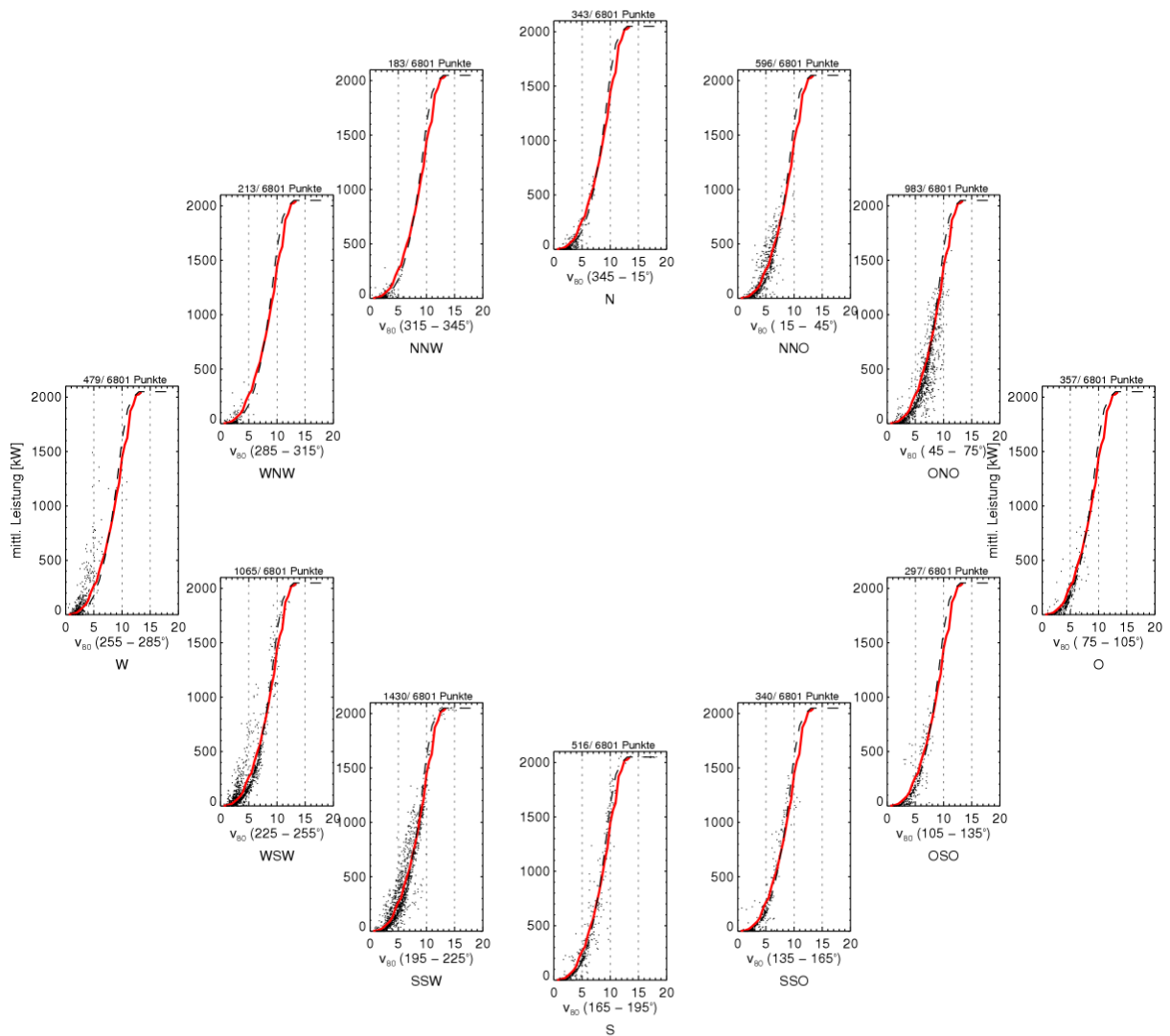


Abb. 44: LIDAR-Windmessung gegenüber den Leistungswerten von WEA 1 für 30°-Sektoren für die Zeitperiode der beiden LIDAR-Messkampagnen. Die offizielle Leistungskurve der Enercon E82 ist schwarz gestrichelt, die aus den Leistungswerten berechnete Leistungskurve ist rot eingezeichnet.

Schall-Messung

Die Schall-Messungen wurden vom 8. Januar bis 12. Februar 2010 und vom 8. März bis 7. April 2011 parallel zu den LIDAR-Messungen durchgeführt. Das Messgerät vom Typ Norsonic NOR 118 wurde von der Firma Norsonic ca. 120 m östlich von WEA 1 aufgebaut. Da sich das Messgerät nach Stromausfällen nicht automatisch wieder einschaltet und teilweise keine Fernabfrage möglich war, entstanden wegen kurzer Stromausfälle mehrere Datenlücken.

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die installierte Schallmessung und den zeitlichen Verlauf des Schallpegels der beiden Kampagnen.

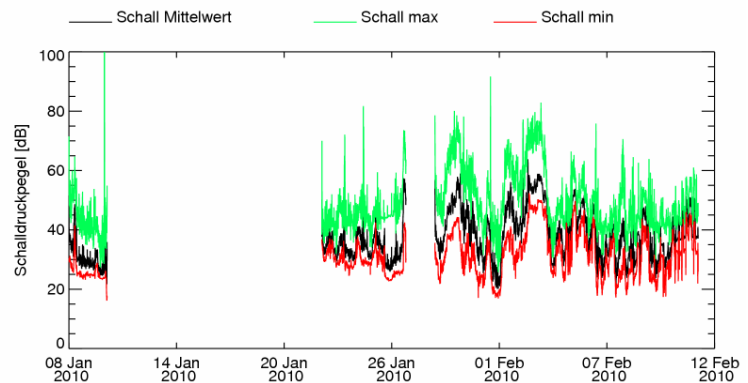


Abb. 45: Links: Installierte Schallmessung mit WEA 1 im Hintergrund. Rechts: Zeitlicher Verlauf des Schallpegels.

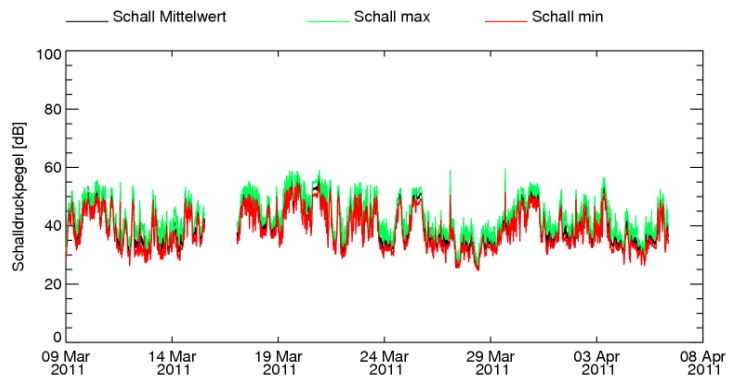


Abb. 46: Links: Installierte Schallmessung. Rechts: Zeitlicher Verlauf des Schallpegels.

In den Abbildungen 47 und 48 sind die Schallpegelwerte gegen die Umdrehungszahl der Windturbine aufgezeichnet. Die Auswertung der Schalldaten im Vergleich mit der Umdrehungszahl von WEA 1 zeigen sowohl für Umdrehungszahlen von 0 bis 4 rpm sowie ab 4 rpm einen deutlichen linearen Zusammenhang zwischen diesen Grössen. Interessant ist der Sprung des Schallpegels in der ersten Kampagne bei ca. 4 rpm, welcher im Moment nicht begründet werden kann. Auffallend ist auch, dass die Schallpegel in unmittelbarer Nähe der Anlage bei grossen Umdrehungszahlen in etwa auf gleichem Niveau liegen wie die Werte, welche im Schallgutachten für die deutlich weiter entfernten Siedlungen berechnet wurden. Auch dieser Umstand kann im Moment nicht erklärt werden.

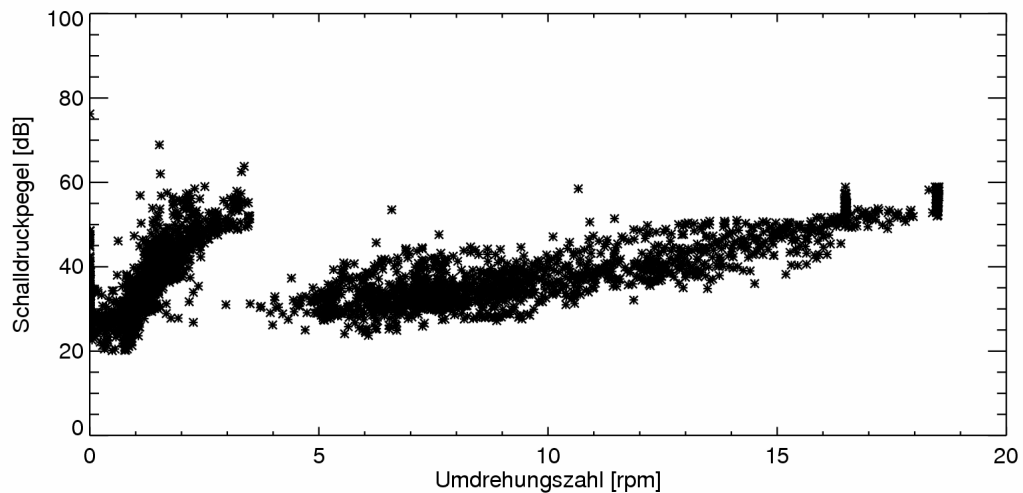


Abb. 47: Auswertung der Schalldaten im Vergleich mit der Umdrehungszahl von WEA1 im Winter 2009/10.

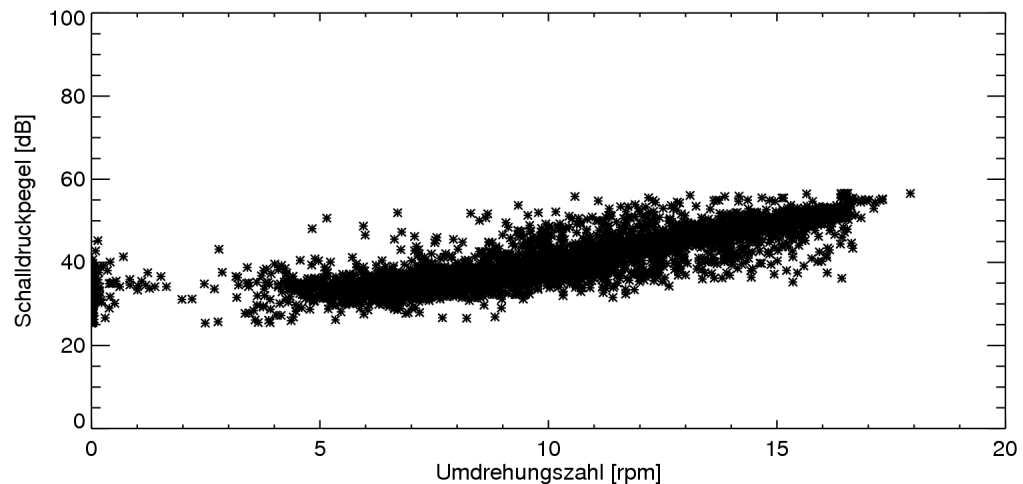


Abb. 48: Auswertung der Schalldaten im Vergleich mit der Umdrehungszahl von WEA1 im Winter 2010/11.

Die Auswertung des Schallpegels in Bezug auf Vereisungsereignisse im ersten Messwinter erwies sich als schwierig. Erstens führt die Eiserkennung der Enercon WEA dazu, dass die Anlage nur sehr kurze Zeit mit vereisten Rotorblättern betrieben wird und dann sofort abgeschaltet wurde (Deaktivierte Blattheizung im Januar 2010). Das bedeutet, dass nur sehr wenige Daten mit laufender Anlage und Vereisung vorliegen. Zweitens wurde die Schallmessung während der Periode durchgeführt, während welcher die Blattheizung von WEA deaktiviert war. Dies erwies sich als Nachteil, da WEA 1 in dieser Zeit während der Vereisungsereignisse meistens still stand und deshalb keine Schallpegel während des Betriebs gemessen werden konnten. Schliesslich muss angenommen werden, dass Eisansatz am Mikrophon selber ebenfalls zu einer Verfälschung der Resultate führte (Abb. 49).



Abb. 49: Eisansatz an der Schallmessung in St. Brais.

Trotzdem wurde versucht, eine Analyse der Schallwerte für Perioden mit instrumenteller Vereisung (Vorhandensein von Eis) herzustellen. Dabei wurden von Hand Perioden definiert, während welcher das Vorliegen der Anlage mit vereisten Flügeln wahrscheinlich war. Die entsprechenden Schallwerte sind in Abbildung 50 rot hervorgehoben. Es ist zu erkennen, dass sich alle Werte in einem niedrigen Umdrehungsbereich befinden. Es lässt sich aber nicht abschliessend sagen, ob diese Werte gegenüber den eisfreien Werten leicht erhöht sind. Was deutlich erkennbar ist, dass fast alle Werte bei Umdrehungszahlen unter 3 rpm mit vereisten Flügeln aufgezeichnet wurden. Dies legt den Schluss nahe, dass eine Anlage mit vereisten Flügeln im Stillstand deutlich höhere Lärmwerte produziert, als dies eine Anlage ohne Eisansatz tut (vgl. Abb. 48). Aber auch diese Schlussfolgerung ist nicht abschliessend, der Einfluss von Eisansatz am Mikrophon selber könnte hier auch einen entscheidenden Einfluss auf die Messwerte haben.

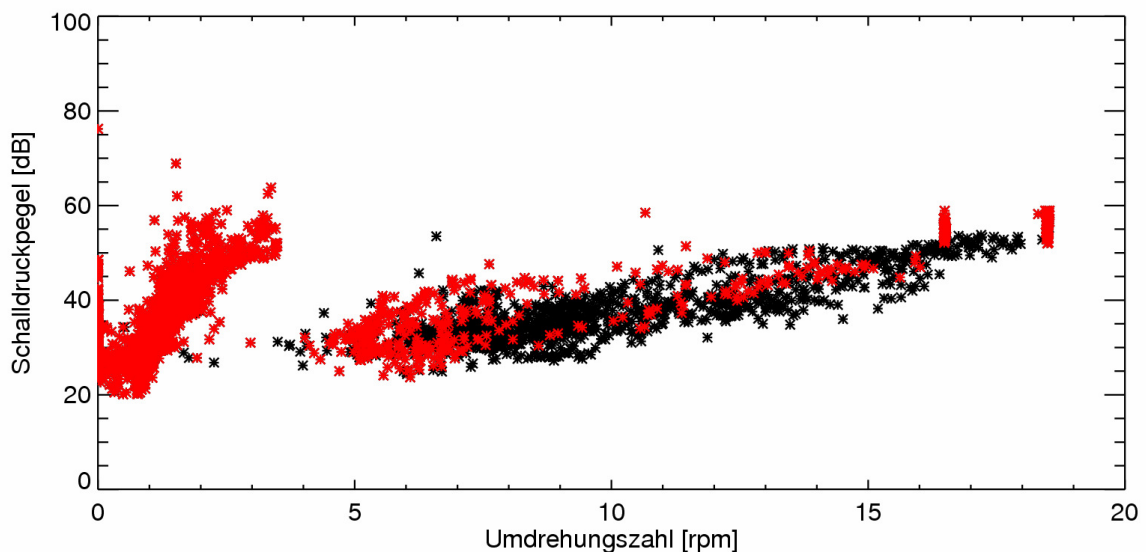


Abb. 50: Auswertung der Schalldaten für den Winter 2010 im Vergleich mit der Umdrehungszahl von WEA1. Perioden mit wahrscheinlicher Vereisung sind rot gekennzeichnet.

Der Betrieb der WEA 1 im zweiten Messwinter wurde bei Eisdetektion nicht unterbrochen, sondern mit aktivierter Blattheizung weitergeführt. Während der Schallmessung wurde von

der WEA 1 keine Vereisung detektiert. Aufgrund von Webcam-Bildanalysen konnte aber doch ein Vereisungsereignis festgestellt werden, welches Ansatz von Eisregen zeigt. Die Daten von diesem Ereignis wurden in der Abbildung 51 rot hervorgehoben. Obwohl die Datengrundlage eher schwach ist, sieht man, dass die Vereisung offenbar einen erhöhten Schalldruckpegel zur Folge hatte.

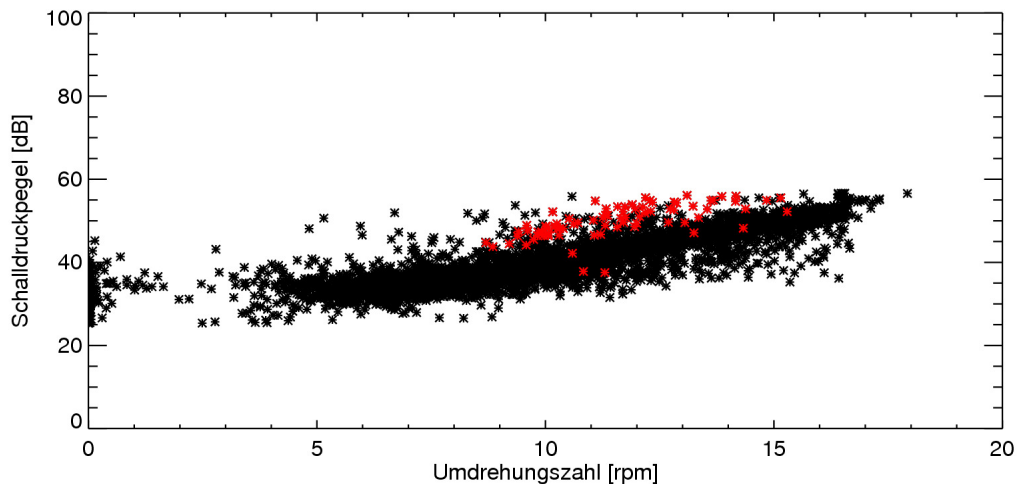


Abb. 51: Auswertung der Schalldaten für den Winter 2011 im Vergleich mit der Umdrehungszahl von WEA 1. Perioden mit wahrscheinlicher Vereisung sind rot gekennzeichnet.

Zusammenarbeit mit Enercon

Enercon beteiligt sich sowohl finanziell als auch durch Support vor Ort an dem Projekt. Von Enercon wurde folgende Person für die Projektbegleitung zugeteilt:

Michael Sponnier
+49 4941 927 402
michael.sponnier@enercon.de

Die Zusammenarbeit mit Enercon war während des gesamten Projektverlaufs sehr angenehm und offen. Für die Installationen auf der WEA 1 konnte immer auf die Unterstützung des Enercon Support Teams gezählt werden, was die Installationen deutlich vereinfachte. Zwischen Meteotest und Enercon wurde für dieses Projekt eine Geheimhaltungsvereinbarung unterzeichnet.

Am 11. Mai 2010 reisten René Cattin (Meteotest) sowie Nick Hudson und Steve Marson (Insensys) nach Aurich um die bisherigen Resultate des Projekts vorzustellen. Die Veranstaltung stiess auf grosses Interesse, insbesondere anwesend waren Werner Bohlen (Leitung F&E), Christoph Hilling (Leitung Site Assessment) und Sandra Hoffmann (Vertrieb Schweiz).

Am 21. Juni 2011 reiste René Cattin (Meteotest) noch einmal nach Aurich um die Schlussresultate des Projekts vorzustellen. Wiederum stiess die Veranstaltung auf grosses Interesse in den Bereichen Forschung & Entwicklung, Site Assessment, Vertrieb und Dokumentation. Insbesondere anwesend waren Werner Bohlen (Leitung F&E), Christoph Hilling (Leitung Site Assessment).

Masterarbeit Vereisungsvorhersage

Basierend auf dem Projekt erarbeitete Roger Oechslin seine Masterarbeit an der Universität Innsbruck. Er wurde dabei von Meteotest betreut. In seiner Arbeit untersuchte er die Möglichkeiten der Vereisungsvorhersage mit Wettermodellen sowie der Windenergieproduktionsvorhersage unter vereisenden Bedingungen. Er konnte zeigen, dass es möglich ist, die Vereisung mit Wettermodellen zu vorherzusagen und dass dies ein relevante Grösse ist für zuverlässige Produktionsvorhersagen unter vereisenden Bedingungen (Abb. 52).

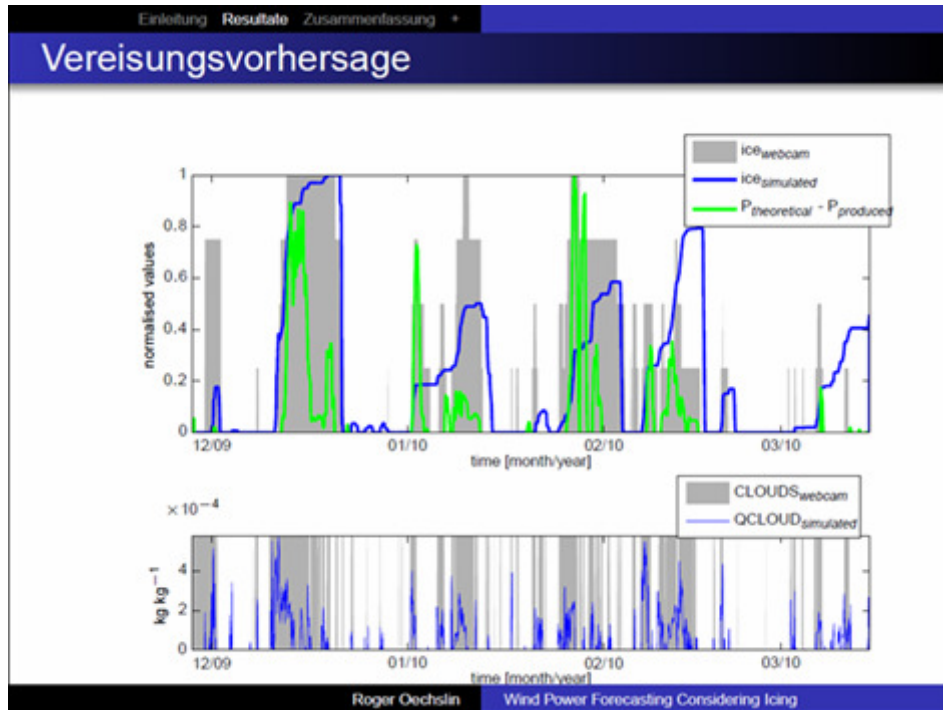


Abb. 51: Abhängigkeit des Produktionsverlusts einer Windkraftanlage (grün) in Abhängigkeit von der Eislast (blau). Grau markiert sind Bereiche mit instrumenteller Vereisung.

Der Titel seiner Arbeit lautet „Wind Power Forecasting Considering Icing“. Die Zusammenfassung lautet wie folgt:

A considerable amount of wind energy developments are situated in regions with a potential for atmospheric icing. The goal of this master's thesis is to investigate the potential of wind energy forecasting considering icing. The forecast system consists of the atmospheric model WRF using a Kalmanfilter post-processing and an icing algorithm. The system is applied and verified for a test-site in Switzerland which encounters frequent icing during winter. The Kalman-filtered model output of wind speed has a RMSE (root mean square error) of 2.05m/s. The icing model predicting the occurrence of most icing events with a Probability of Detection of 0.94 vs. a False Alarm Ratio of 0.34. The power forecast considering icing reduced the normalized RMSE to 22% compared to 27% without taking icing into account.

Die gesamte Masterarbeit wird diesem Bericht beigelegt.

Bewertung und Ausblick

Bewertung des Projekts

Das Projekt konnte innerhalb des vorgesehenen Zeitplans und in vollem Umfang durchgeführt werden.

Mit Hilfe der Analyse der Kamerabilder konnte erstmals eine verlässliche Aussage zur Vereisungshäufigkeit im Jura auf Nabenhöhe einer WEA gemacht werden. Die Erkenntnis, dass die Eisbildung nicht ausserordentlich häufig ist, das Eis aber relativ lange bestehen bleibt, ist eine wichtige Aussage für die Planung von WEA im Jurabogen.

Die Auswertung der Anlagedaten zeigte, dass der Einsatz einer Blattheizung in St. Brais im Vergleich zur eingesetzten Heizenergie zu einem deutlichen Mehrertrag im Vergleich zu einer WEA ohne Blattheizung geführt hat. Diese Erkenntnis wird bestätigt durch das Experiment mit dem gleichzeitigen Betrieb der WEA mit deaktivierter und aktivierter Blattheizung. Die Analyse machte aber auch deutlich, dass diese Heizphasen relativ häufig sind und dass hier noch Potenzial für eine weitere Ertragssteigerung vorliegt.

Insgesamt konnte während der Projektdauer das Wissen und die Erfahrungen mit dem Betrieb von grossen WEA im Jurabogen deutlich vergrössert werden und damit ein wichtiger Beitrag einerseits an zukünftige Projekte andererseits aber auch an die Weiterentwicklung der WEA-Technik unter vereisenden Bedingungen erarbeitet werden. So gesehen kann das Projekt als grosser Erfolg bezeichnet werden.

Die untenstehenden Tabellen zeigen den aktuellen Stand der Terminpläne für das Forschungs- und das Pilot- und Demonstrations- (P+D) Projekt (grün: abgeschlossen, rot: verspätet)

Tabelle: Zeitplan des Forschungsprojekts.

Teilschritt	Inhalt	Endtermin
1	Projektstart	15. Juli 2009
2	Bestellen der meteorologischen Messgeräte	15. August 2009
3	Installation und Inbetriebnahme der meteorologischen Messgeräte (in Koordination mit der Installation der Webcams)	15. Oktober 2009 30. März 2010
4	Alle Systeme in Betrieb, Datenfernübertragung installiert – Beginn der Messkampagne	31. Oktober 2009
5	Webseite online zugänglich	30. November 2009
6	Abschalten der Blattheizung der einen WEA Beginn der Schall und LIDAR-Messungen	4. Januar 2010 ea. 15. Februar 2010
7	Wiederinbetriebnahme der Blattheizung an beiden WEA Ende der Schall und LIDAR-Messungen	8. Februar 2010 ea. 31. März 2010
8	Zwischenbericht mit Resultaten des ersten Messwinters	31. Mai 2010
9	Abschalten der Blattheizung der einen WEA Beginn der Schall und LIDAR-Messungen	ea. 15. Februar 2011 8. März 2011
10	Wiederinbetriebnahme der Blattheizung an beiden WEA Ende der Schall und LIDAR-Messungen	ea. 31. März 2011 7. April 2011
11	Schlussbericht	14. Juli 2011
12	Projektende	14. Juli 2011

Tabelle: Zeitplan des P+D Projekts.

Teilschritt	Inhalt	Endtermin
1	Projektstart	15. Juli 2009
2	Bestellen der Messgeräte / Webcams	31. Juli 2009
3	Installation der Dehnmessstreifen des Insensys Rotorblatt-Monitoring Systems in den Rotorblättern der WEA im Enercon Werk in Aurich	31. August 2009
4	Installation und Inbetriebnahme des Insensys Rotorblatt-Monitoring-Systems auf den WEA in St. Brais (während des Aufbaus der WEA)	18. September 2009
5	Installation und Inbetriebnahme der Webcams auf der Gondel der WEA	15. Oktober 2009
6	Alle Systeme in Betrieb, Datenfernübertragung installiert – Beginn der Messkampagne	30. Oktober 2009
7	Abschalten der Blattheizung der einen WEA	4. Januar 2010 ea. 15. Februar 2010
8	Wiederinbetriebnahme der Blattheizung an beiden WEA	8. Februar 2010 ea. 31. März 2010
9	Zwischenbericht mit Resultaten des ersten Messwinters	31. Mai 2010
10	Abschalten der Blattheizung der einen WEA	ea. 15. Februar 2011
11	Wiederinbetriebnahme der Blattheizung an beiden WEA	ea. 31. März 2011
12	Schlussbericht	14. Juli 2011
13	Projektende	14. Juli 2011

Ausblick nach Projektende

Mit dem vorliegenden Projekt konnte eine Vielzahl neuer Erkenntnisse im Bereich der Windkraft unter vereisenden Bedingungen gewonnen werden. Diese Resultate werden zudem auf internationalem Level in ein „Best Practice Dokument“ des IEA Task 19 „Wind Energy in Cold Climate“ einfließen, in welchem die Klassifizierung von Standorten ein zentrales Thema sein soll. Das gute Feedback aus Präsentationen dieses Projekts bestätigte das grosse internationale Interesse und auch den Bedarf an diesen Arbeiten.

Dennoch konnten während des Projekts nicht alle Fragen beantwortet werden und neue Fragen sind ebenfalls aufgetaucht:

- Wie gross ist das Eiswafrisiko einer 2MW-WEA im Jura? Was sind die Unterschiede zwischen einer nicht beheizten, einer im Stillstand beheizten und einer im Betrieb beheizten Anlage in Bezug auf Produktionsverluste durch Vereisung?
- Können die Zeitpunkte für das Ein- und Ausschalten der Heizung bei Heizen im Betrieb noch optimiert werden? Kann die relative Feuchte hier helfen als Signal für das Ende der Beheizung?
- Können Wettervorhersagen helfen, den Beginn der Vereisung vorherzusagen und es damit ermöglichen, den Heizbetrieb schon vor dem Beginn der Eisbildung zu starten?
- Kann die Verfügbarkeit der Kamerabilder vom Rotorblatt durch einen elektronischen Trigger anstelle der Bewegungserkennung weiter verbessert werden?
- Wie gut funktioniert das Heizen im Betrieb bei einem starken Vereisungsereignis? Können die Rotorblätter eisfrei gehalten werden?
- Was für einen Einfluss hat das Heizen im Winter auf die Lebensdauer der Rotorblätter?

Mit der in diesem Projekt aufgebauten Infrastruktur wären die Anlagen in St. Brais sehr gut geeignet, um diesen Fragen weiter nachzugehen. Für die Fragen zur Funktionalität des Heizens im Betrieb (bei starken Vereisungsereignissen, optimierte Steuerung) sowie zum Eiswurf von grossen WEA im Jura würde vermutlich ein weiterer Messwinter schon einen relevante zusätzliche Informationen liefern.