

Eiszeit am Standort Ice Conditions for Wind Turbines

H. Seifert, DEWI Wilhelmshaven



Summary

Wind turbines are increasingly erected at inland sites, as the coastal areas are already used for wind energy and the offshore projects are still under development for the next years. Furthermore, due to their higher towers, today's serial production turbines easily reach lower clouds at winter time even close to the sea coasts and therefore will meet icing conditions more often. How future large offshore plants will be affected by icing events is not clear at the moment, as necessary information based on meteorological measurements at various offshore sites are not yet available. Inland sites and especially sites in mountainous and northern regions as well as large turbines will be affected by ice during standstill and operation. Experience with operation of wind farms at ice endangered sites is available today. Prototypes of turbines up to the megawatt scale have been equipped with blade heating systems, with special sensors, and other features in order to fit them to cold climate conditions. However, no standard cold climate serial production wind turbines are available on today's market.

Wind turbines are normally erected far away from houses, industry, etc., as the wind conditions are not favourable in the vicinity of large obstacles. Furthermore, certain distances according to acoustic noise emission and shadow flicker are required by national regulations, if wind farms are planned in the neighbourhood of residential areas. Thus, wind turbines should not cause risks as far as ice throw is concerned. However, the turbines are erected close to roads or agricultural infrastructure in order to avoid long and expensive access roads for erection and maintenance. This induces a risk for persons passing by the wind turbines, or cars passing the streets, if ice fragments fall down from a turbine. Especially in the mountainous sites or in the northern areas icing may occur frequently, and any exposed structure - including wind turbines - will be covered by ice under special meteorological conditions. This is also true for today's Multi Megawatt turbines with heights from ground to the top rotor blade tip of more than 150 m, which can easily reach lower clouds with supercooled rain in the cold season, causing icing if it hits the upper blade's leading edge. If a wind turbine operates in icing conditions two types of risks may occur if the rotor blades collect ice. The fragments from the rotor are thrown off due to aerodynamic and centrifugal forces from the operating turbine or they fall down from the turbine when it is shut down or idling without power production. It depends upon the weather and especially the wind conditions, on the instrumentation of the wind turbine's control system, and on the strategy of the control system itself.

This paper summarises and discusses the above-mentioned effects and gives guidance for systems and instrumentation which can be used for the various cold climate conditions. For more detailed information in English language, please visit our web site www.dewi.de, from where two English papers [6],[8] can be downloaded.

1. Heutiger Stand

Mit zunehmender Anzahl von Windenergieanlagen, die in Gebieten aufgestellt werden in denen häufig aber auch nur ab und zu mit Vereisung zu rechnen ist, häufen sich Berichte von abfallenden und weggeschleuderten Eisfragmenten, die ein Gefährdungspotential darstellen können. Baubehörden verlangen daher entsprechende Aus-



Abb.: 1 Eisansatz an Zaun und Ästen, ein Zeichen dafür, dass an diesem Standort mit Vereisungsbedingungen zu rechnen ist.

Fig. 1 Ice accretion on a fence and on branches, indicating that at this location icing conditions are to be expected

sagen von Experten, wie groß eine solche Gefährdung für Mensch und Gut sein kann und fordern Maßnahmen, solche Gefährdungen auszuschließen. Als Grundlagen für solche Gutachten dienen zum Beispiel Ergebnisse von Forschungsprojekten [1,2,3], in denen die meteorologischen Parameter, die unterschiedliche Vereisung der Rotorblätter und Sensoren und das Betriebsverhalten vereister WEA theoretisch und experimentell untersucht und entsprechende Empfehlungen ausgesprochen wurden.

Zwei unterschiedliche Wege werden zur Zeit in der Genehmigungspraxis in Deutschland und in Österreich beschritten. Wenn

eine Straße oder ein Weg durch möglichen Eisabwurf gefährdet erscheinen, wird ein entsprechendes Gutachten über den Eisabwurf gefordert, das entweder die Wurfweite von der rotierenden oder die Fallweite von der stillgesetzten Anlage abschätzt. Im zweiten Fall wird vorausgesetzt, dass die Betriebsführung der WEA automatisch erkennt, dass eine Vereisungssituation eingetreten ist, und dass die Anlage sicher abgestellt wird, bevor Eisstücke vom drehenden Rotor weggeschleudert werden. Dies kann z. B. durch Eissensoren oder durch die Beobachtung der Leistungskurve in Kombination mit der Temperatur geschehen. Weiterhin wird in den Gutachten geprüft, wie die Anlage nach Beendigung der Vereisungssituation ohne Gefährdung wieder in Betrieb genommen wird. Der zuletzt beschriebene Fall ist dabei der am häufigsten vorkommende: Eisabfall von einer geparkten Anlage.

Mit der zunehmenden Größe der heutigen Multimegawatt-WEA kommt noch ein weiterer Parameter hinzu. Bei Turmhöhen von 100 m und mehr und gleichzeitiger Blattlänge von mehr als 50 m kann der äußere Teil des Rotors selbst in ebenem Gelände leicht in niedrige Wolken eintauchen und dort auf Vereisungsbedingungen treffen. Ein auf der Gondel angebrachter Eissensor alleine würde die Vereisung der Blattspitze unter solchen Bedingungen nicht registrieren.

Erfahrungen mit einzelnen kleineren und mittleren Anlagen existieren, eine systematische Auswertung mit einer statistisch belegbaren Anzahl von Vereisungsereignissen erwies sich aber in den o. g. Forschungsprojekten als sehr schwierig durchführbar, da die Ereignisse oft vom Betreiber nicht erkannt oder nicht an die Forscher weitergeleitet wurden. Neue experimentelle Ergebnisse brachten die Windturbinen im Tauernwindpark (www.tauernwind.com) [4], deren Rotorblätter mit einer Kamera über das Internet beobachtet werden konnten. Dieser Windpark in 1800 m Höhe in den österreichischen Alpen ist allerdings nicht repräsentativ für die Parks in ebenen und leicht hügeligen Geländen.

Wird nur der Fall der stillstehenden WEA unter Vereisungsbedingungen untersucht, so wird angenommen, dass, wenn die Anlage während einer Vereisungswetterlage Eis an der Rotorblattvorderkante (Blattnase) ansetzt, die Betriebsführung der WEA dies erkennt und die Anlage stillsetzt, bevor sich Eisstücke vom drehenden Rotor lösen und weggeschleudert werden.

Eine nicht in Betrieb befindliche, vereiste WEA unterscheidet sich prinzipiell nicht von anderen Strukturen mit



Abb.: 2 Typischer Eisansatz an der Rotorblattnase (Beispiel äußeres Rotorblatt einer 2 MW WEA).

Fig. 2 Typical ice accretion on the rotor blade leading edge (Example: tip of the rotor blade of a 2-MW turbine)



Abb.: 3 Typische Fundstücke in der näheren Umgebung von WEA nach dem Betrieb unter Vereisungsbedingungen. Die Form der Rotorblattnase ist noch deutlich zu sehen.

Fig.: 3 Typical ice fragments found on the ground in the vicinity of wind turbines after operation under icing conditions. The shape of the leading edge can still be recognized.



Abb.: 4 Wetterlage mit Wolkenvereisung. Während die Anlagen in der rechten Seite des Bildes noch nicht betroffen sind, tauchen die etwas höher gelegenen Rotoren schon in die Wolken ein.

Fig.: 4 Meteorological situation with in-cloud icing. While the turbines on the right are not yet affected, the rotors in the higher positions are already immersed in the clouds.

Eisansatz, wie zum Beispiel Türme oder Masten von Hochspannungsfreileitungen. Je nach Rotorstellung der stillstehenden Anlage ergeben sich für die beim einsetzenden Tauwetter abfallenden Eisstücke verschiedene Fallweiten in Lee-Richtung der Anlage. Die Größe, Masse und die aerodynamischen Eigenschaften der Eisstücke werden auf der Basis der oben genannten Forschungsergebnisse abgeschätzt.

2. Was beeinflusst die Wurf- oder Fallweite von Eisstücken

Auf der meteorologischen Seite ist dies in erster Linie die Temperatur. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch schon bei Temperaturen leicht über dem Gefrierpunkt Vereisung auftreten kann, wenn bei entsprechender Umströmung und ausreichender Luftfeuchte örtlicher Unterdruck entsteht, zum Beispiel an den Rotorblattprofilen. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes kann es allerdings nur zur Vereisung kommen, wenn auch eine entsprechende unterkühlte Flüssigkeitsmenge in der Luft enthalten ist, die beim Auftreffen auf einen Gegenstand als Eis auskristallisiert. Eis setzt sich nur auf der windzugewandten Seite an. Dies ist bei Maschendrahtzäunen oder Grashalmen deutlich sichtbar. Bei Leiterseilen von Hochspannungsfreileitungen oder Abspannseilen von Meteorologiemessmasten verhält sich dies anders. Hier werden die Seile durch aerodynamische Kräfte tordiert und vereisen auf allen Seiten, so dass eine Aufdickung des Seildurchmessers durch das Eis entsteht. Vereisung von Leiterseilen ist bei den Stromversorgungsunternehmen (EVU) bekannt und kann als erstes Indiz für Vereisungsbedingungen an WEA für einen geplanten Standort herangezogen werden. Forstämter können auch Auskunft über Eisbruch in standortnahen Wäldern geben.

Die angesammelte Eismasse ist abhängig von der Anströmgeschwindigkeit und der Zeit [5]. Bei stillstehenden WEA ist die Anströmgeschwindigkeit identisch mit der Windgeschwindigkeit. Bei drehendem Rotor ist dies in erster Näherung die Winkelgeschwindigkeit des Rotors mal dem örtlichen Radius, d. h., die örtliche Umfangsgeschwindigkeit, die an der Rotorblattspitze bis zu 80 m/s betragen kann. Das bedeutet auch, dass ein drehender Rotor sehr viel schneller Eismassen sammelt, insbesondere im äußeren Bereich.

Die Windrichtung ist ein wesentlicher Parameter für die Beurteilung der Fall- oder Wurfweiten. Bei laufendem Rotor werden die Eisstücke im Wesentlichen quer zur Hauptwindrichtung weggeschleudert und dann mit dem Wind mitgetragen [6]. Bei der stillstehenden WEA, dies gilt prinzipiell auch für Leerlaufbetrieb (idling) ist hauptsächlich der Leebereich des Rotors betroffen. Die Verteilung der Windrichtung und die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten pro Windrichtung stellen eine wichtige Eingabe für die Abschätzung des Eisschlagrisikos dar. Diese Informationen sind üblicherweise in den Energieertragsprognosen enthalten, die für jeden Standort vorliegen sollten. Basieren sie auf Messungen am Standort und gibt es Korrelationen¹ zu benachbarten Langjahresmessungen², kann eine mögliche Gefährdung eingegrenzt werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn in den Meteorologiedaten richtungs- und windgeschwindigkeitsabhängig auch die Umgebungstemperaturen aufgezeichnet wurden. Als Beispiel können hier Gegenden genannt werden, in denen im Winterhalbjahr die Kombinationen von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt mit hohen Windgeschwindigkeiten nicht vorkommen.

Mit wachsender Anlagengröße kommt der Höhe der Wolkenunterkante eine besondere Bedeutung bei der Betrachtung von Vereisungsrisiken zu. Hier müssen mehr Standorte hinsichtlich der Gefährdung durch Eis untersucht werden, als dies bisher notwendig war. Das sogenannte „in cloud icing“ ist in den einschlägigen Literaturen beschrieben [1, 2, 7] und stellt eine der häufigsten Vereisungsbedingungen dar, wobei im Gebirge aufliegende Wolken oft auch als „Bodennebel“ betrachtet werden.

Betriebsparameter der Anlage:

Neben den meteorologischen Bedingungen für die Vereisung von WEA ist die Anlage selbst und deren Sensorik für die Erkennung einer Vereisungssituation zu untersuchen. In [8] ist dies genauer beschrieben. Je nach Regelungsart (pitch, stall, active stall) oder Betriebsart (feste Drehzahl, variable Drehzahl) ergeben sich andere Strategien, die notwendig sind, um Vereisung zu erkennen und die Anlage in einen entsprechenden Zustand zu versetzen. Die Sensorik der Anlage spielt dabei eine wesentliche Rolle. An vereisungsgefährdeten Standorten werden mehr und mehr spezielle Eissensoren eingesetzt. Funktionsweise, Beschreibungen und erste Tests unter realen Bedingungen sind in [7, 2, 3] beschrieben. In vielen Fällen reicht auch schon eine Überwachung der Leistungskennlinie mit dem Gondelanemometer aus, das allerdings mit beheizten Schalen ausgestattet sein muss. Zusammen mit einer Messung der Außentemperatur kann die Verschlechterung der Leistungskennlinie, die sich schon bei geringem Eisansatz einstellt, als Eiserkennung ausreichen, um beispielsweise die Anlage stillzusetzen. Im Tauernwindpark wurden ausgewähl-

¹ MCP Verfahren (Measure Correlate and Predict) [Quelle DEWI Magazin]

² z. B. Meteorologiestationen

te Anlagen per Kamera überwacht, d. h., der Eissensor, eines der Rotorblätter und der Blick auf die Gondel mit einem Rotorblattausschnitt konnten über das Internet beobachtet werden [4]. Für einen automatischen Betrieb ist dies zwar nicht ausreichend, eine WEA kann aber nach einer Vereisungsperiode „fernerkundet“ werden, um wieder sicher in Betrieb zu gehen. Wird der Eissensor auf diese Weise „optisch“ überwacht, können zumindest Fehlalarme sicher erkannt werden und der Windpark kann in diesem Falle ohne große Ertragsverluste und ohne aufwändigen Wartungspersonaleinsatz wieder ans Netz gehen.

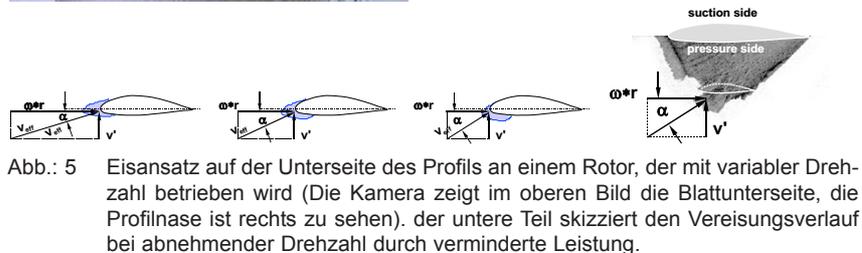
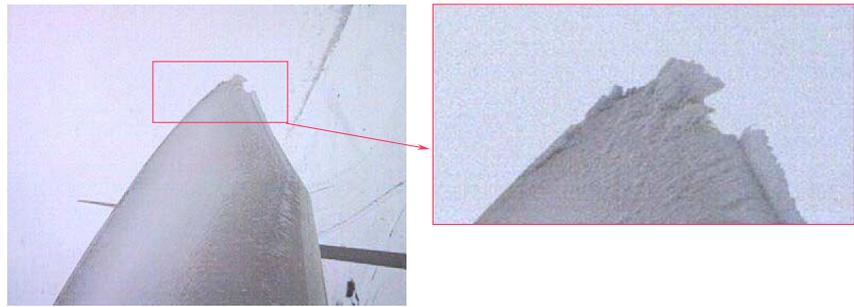


Abb.: 5 Eisansatz auf der Unterseite des Profils an einem Rotor, der mit variabler Drehzahl betrieben wird (Die Kamera zeigt im oberen Bild die Blattunterseite, die Profilnase ist rechts zu sehen). der untere Teil skizziert den Vereisungsverlauf bei abnehmender Drehzahl durch verminderte Leistung.

Fig.: 5 Ice accretion on the pressure side of the airfoil of a variable-speed controlled rotor (In the upper picture, the camera shows the pressure side of the blade; the leading edge is seen in the picture on the right). Below, the course of icing at decreasing speed due to reduced power output is sketched.

Bei drehzahlvariabel betriebenen Anlagen ist es wichtig, zu erkennen, ob eine Leistungseinbuße durch Eisansatz und nicht durch absinkende Windgeschwindigkeit verursacht wurde. Eisansatz an der Profilvorderkante kann dazu führen, dass die Drehzahl trotz hohem Wind heruntergefahren wird und die Anlage in den Stall fährt [9], erkennbar am großen Anstellwinkel und den daraus resultierenden Eisansatz an der Profilunterseite.



Abb.: 6 Wolkenvereisung verkehrt: Die unteren WEA sind diesmal betroffen. Im Vordergrund und in den Bildern rechts ein Eissensor mit unterschiedlichem Eisansatz und nach dem Abtauen.

Fig.: 6 In-cloud icing upside down: This time the lower wind turbines are affected. In the foreground and in the pictures on the right an ice sensor with different forms of ice accretion and after melting can be seen.

Für den Eisabfall vom still stehenden Rotor werden üblicherweise zwei Rotorstellungen untersucht. Ein Rotorblatt oben (Rotorazimuth 0°) und die sogenannte Y-Stellung des Rotors (Rotorazimut 60°), wobei der Rotor immer in den Wind zeigt. Diese Annahme ergibt sich aus der Philosophie der Lastannahmen in den internationalen Richtlinien, die als Betriebslastfälle eine Kombination von extremen äußeren Bedingungen, wie zum Beispiel Vereisung, mit einem Ausfall von Komponenten und Sensoren nicht vorsehen. Situationen, in denen ein Rotorblatt in Richtung Lee zeigt wären dann nur bei Windstille denkbar. Wenn es möglich ist, bei Vereisungsbedingungen den Rotor per Betriebsführung in der sogenannten Y-Stellung zu parken, kann die mögliche Fallweite der Eisstücke reduziert werden. Da der Eisansatz sich auf der Luvseite der Komponenten ansetzt, wird bei einsetzendem Tauwetter normalerweise das Eis auf der windzugewandten Seite herunterrutschen, bevor es sich vom Blatt ablöst und vom Wind weggetragen wird. Diese Effekte führen in der Praxis zu geringeren Fallweiten als in den Rechnungen angenommen wird.

3. Instrumentierung der Windenergieanlage

Eissensoren

Auf dem Markt sind Eissensoren verschiedenster Funktionsweisen zu beziehen. Der Einsatz an einer Windenergieanlage erfordert allerdings nicht nur die Information über mögliche Vereisung unbeweglicher Strukturen, sondern - sofern die Vereisung eines drehenden Rotors zugelassen wird - auch an bewegten Teilen. Windkanaluntersuchungen in einem Vereisungskanal [10] zeigen, dass bei Rotorblattprofilen die Eismenge proportional zur Anströmgeschwindigkeit zunimmt. Durch die unterschiedlichen Prinzipien ergibt sich auch eine unterschiedliche Empfindlichkeit der Eissensoren. Messungen an Extremstandorten im Rahmen von EU Forschungsprojekten [7, 2, 4] haben dies eindrucksvoll bestätigt. Einzig eine beheizte Kamera war im Stande, die tatsächliche Vereisung genau zu erkennen. Als „nachgeschaltete Auswerteein-

heit“ diene dazu das geschulte Auge eines Experten, was für eine automatische Observierung bei Tag und bei Nacht ausscheidet. Bedingt durch die Komplexität verschiedener klimatischer Einflussfaktoren auf die Vereisung ergibt sich die dringliche Notwendigkeit, geeignete Kalibrierbedingungen für solche Sensoren zu schaffen, um anhand dieser „Normbedingungen“ eindeutige Messwerte zu erhalten, die wiederum im automatischen Betrieb verlässliche Aussagen über den Grad der Vereisung zulassen. Als geeignete „kalibrierbare“ Umgebung bieten sich Klimawindkanäle an, wie zum Beispiel der Vereisungskanal der Kanagawa Universität in Japan [10], in dem die Tröpfchengröße (droplet size), LWC (Liquid Water Content), Temperatur und Windgeschwindigkeit, ja sogar Schneefall eingestellt werden können. Definierte Vereisungs- und Windbedingungen sind speziell für Demonstrations- oder Forschungsvorhaben wichtig, da nur durch geeignet kalibrierte Sensoren die realen Vereisungsbedingungen erkannt und als Vergleich zu den Simulationen bzw. Computermodellen [11] und deren Validierung und Optimierung herangezogen werden können.

Anemometer

Vereisungsbedingungen üben einen großen Einfluss auf Windmessungen aus. An erster Stelle sind Messungen der Windgeschwindigkeit mit unbeheizten Schalensternanemometern von Meteorologiestationen zur Langzeitbeobachtung der Windverhältnisse betroffen, aber auch Standortuntersuchungen im Vorfeld der Planung und Errichtung von Windparks. Die Schalen unbeheizter Anemometer verändern ihren aerodynamischen Widerstand (genauer gesagt, die Differenz der Widerstandsbeiwerte der aus unterschiedlicher Richtung angeströmten Halbschalen) durch Eisansatz und zeigen dadurch geringere Geschwindigkeitswerte an. Durch zunehmende Vereisung auch im Schaffbereich führt dies nicht selten bis zum Stillstand des Anemometers. Eine einfach zu realisierende Heizung des Schafts allein bringt nicht den gewünschten Erfolg, da eine genaue Anzeige der Windgeschwindigkeit nur mit unvereisten Schalen messbar ist. Heizungen der Schalen sind aufwändiger und - dies ist bei Windmessungen in unerschlossenem Gelände ein besonders kritischer Punkt - sie benötigen Heizenergie, die durch einen Netzanschluss oder eine geeignete Energieversorgung aufgebracht werden muss. Indizien für Vereisungsbedingungen am Standort sind gemessene monatliche Windhäufigkeitsverteilungen, die im Bereich niedrigster Windgeschwindigkeiten in den Wintermonaten überproportional hohe Anteile verzeichnen.

Erfahrungen mit diversen Anemometern mit Schalenheizung liegen vor [2, 7, 3], allerdings nicht in kalibrierter Umgebung. Messungen mit solchen Anemometern während Schneefalls und tiefen Temperaturen zeigen in mehreren Messkampagnen in Österreich eine drastisch reduzierte Windgeschwindigkeit gegenüber unbeheizten Anemometern an, was darauf zurückzuführen ist, dass der Schnee an den beheizten Schalen schmilzt und das nach außen geschleuderte Wasser am Rand der Schalen anfriert und so die Trägheit des Anemometers und die Aerodynamik verschlechtert. Bei den kalten unbeheizten Schalen prallen die Schneeflocken ab, die Messung wird dann nur geringfügig beeinflusst [6, 8].

Über die Eignung von beheizbaren Ultraschallanemometern liegen noch keine Langzeiterfahrungen unter Vereisungsbedingungen und Betrieb bei unterschiedlichen Niederschlagsarten vor. Gasbeheizte Instrumente sind oft robuste Konstruktionen, die sich durch hohe Trägheiten und damit große Wegkonstanten auszeichnen. Qualifizierende Windmessungen für Energieertragsberechnungen fordern sehr hohe Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten der Windsensoren [12], die unter Vereisungsbedingungen schwerlich einzuhalten sind. Ein einfacher und konservativer Ansatz ist beispielsweise, anzunehmen, dass die WEA bei Vereisungsbedingungen - d.h., wenn die ungeheizten vereisten Anemometer „wenig“ oder gar keinen Wind anzeigen - keinen Ertrag liefern. Für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung kann das sinnvoll sein, wenn für den geplanten Standort nur wenige Tage Vereisungsbedingungen im Jahr erwartet werden. Ob Vereisung vorkommen oder eventuell ganz ausgeschlossen werden kann ist für die Risikoanalyse des Eisabwurfs bzw. Eisabfalls aber entscheidend.

Der Einsatz von Anemometern auf der Gondel, als Sensor der Betriebsführung, wird von einigen Herstellern bereits zur Erkennung von Vereisungssituationen herangezogen. Die Verwendung von schalenbeheizten Instrumenten an Standorten mit Vereisungsgefährdung ist grundsätzlich vorzuziehen. Beim Abgleich der Leistungskennlinie kann es sonst in den vorgegebenen Toleranzen vorkommen, dass die Aerodynamik von Rotor und Anemometer durch den Eisansatz derart beeinflusst sind, dass die Leistungskurve - durch geringere Leistung des vereisten Rotors und gleichzeitige Anzeige niedrigerer Windgeschwindigkeiten des vereisten Anemometers - wieder getroffen wird.

Windfahne

Eingefrorene Windfahnen führen neben falsch gemessenen Windrichtungsverteilungen zu erhöhten Ermüdungslasten der WEA-Komponenten, wenn dieses Instrument als Sensor zur Gondelnachführung Verwendung findet. Im ungünstigsten Fall wird der Rotor bei unzulässiger Schräganströmung betrieben, wenn

weder eine Heizung des Sensors oder eine wie auch immer gestaltete Plausibilisierung der Signale erfolgt (z. B. die Auswertung der Standardabweichung des Windfahnsignals, die bei festgefrorener Windfahne gegen Null geht, im Betriebsbereich der Anlage aber stets durch die Leewirbel der Rotorblattwurzeln geprägt ist). Geheizt werden muss hier, im Gegensatz zu den Anemometern, nur der Schaft, da ein Eisansatz am Ausgleichsgewicht und an der sehr dünnen Fahne selbst nicht zu gravierenden Fehlmessungen führt. Werden die Windfahnen zur Richtungsmessung bei Windmessungen für Standortermittlungen oder für Meteorologiestationen verwendet, können längere Vereisungsbedingungen dazu führen, dass die Windrichtungsverteilungen als Basis für die Windparkauslegung ungenau werden. Zu häufiger Betrieb im Nachlauf von benachbarten WEA und Ertragseinbußen eines dort realisierten Windparks wären die Folgen.

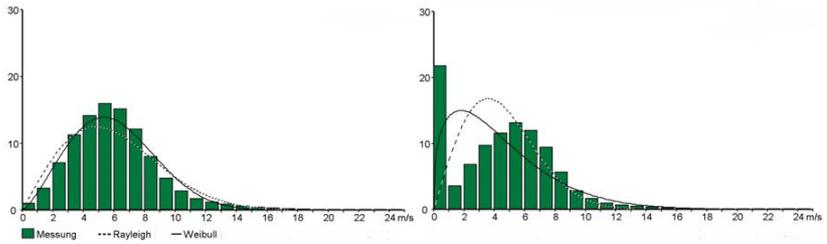


Abb.: 7 Gemessene Weibullverteilung der Windgeschwindigkeit an einem Standort mit Vereisung mit unbeheizten Anemometer (links) und schalenbeheiztem Anemometer (rechts). Quelle: Energiewerkstatt Verein.

Fig.: 7 Measured Weibull distribution of the wind speed at a site with icing conditions with unheated anemometer (left) and cup-heated anemometer (right). Source: Energiewerkstatt Verein.

Temperaturmessung

Messungen der Umgebungstemperatur können Vereisungswetterlagen ausschließen, wenn die Lufttemperatur in Nabenhöhe gemessen wird. Fehlinterpretationen von Leistungskurvenüberprüfungen mit dem Gondelanemometer sowie „Fehlalarme“ von Eissensoren können gegengeprüft werden.

Wolkenhöhenmessung

Die zunehmende Nabenhöhe und Rotordurchmesser heutiger WEA gerade auch im Binnenland birgt die zusätzliche Gefahr der sogenannten Wolkenvereisung. Die Rotorblattspitzen einer Multimegawatt-WEA mit beispielsweise 120 m Nabenhöhe und 60 m Rotorradius können bereits in niedrigen Wolken mit Vereisungsbedingungen eintauchen und entsprechenden Eisansatz verursachen. Ein Eissensor auf der Gondel würde in diesem Fall nicht reagieren, wohl aber ein Monitoring der Leistung. Messungen der Wolkenunterkante werden an Meteorologiemessstationen oft aufgezeichnet und wurden auch in [2] als ein Parameter zur Erstellung der Eiskarten herangezogen.

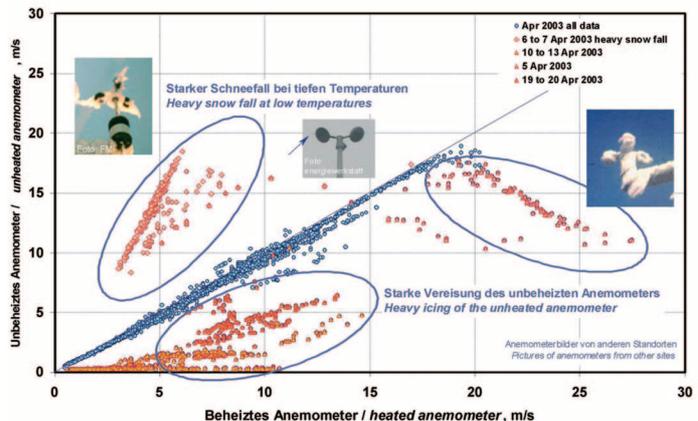


Abb.: 8 Vergleich zweier Anemometer, unbeheizt und schalenbeheizt bei unterschiedlichen Vereisungswetterlagen und Schneetreiben. Die Bilder der Anemometer zeigen andere Standorte, die Vereisungssituationen sind aber ähnlich. Der Pfeil am mittleren Bild zeigt kleine Eiszapfen bei Beginn des Schneetreibens.

Fig.: 8 Comparison of two anemometers, unheated and cup-heated under different icing weather conditions and blowing snow. The pictures of the anemometers show different sites, but the icing situations are similar. The arrow in the middle picture shows small icicles at the beginning of snowing.

4. Rotorblattenteisung

Im Flugzeugbau werden Flügel- und Leitwerksnasen, Außensensoren und Propellerblätter entweder beheizt, damit sich kein Eis ansetzt, oder bereits angesetztes Eis wird rechtzeitig durch geeignete Maßnahmen entfernt. Die Eiserkennung und das entsprechende Einleiten der Enteisungsmaßnahmen erfolgen meist durch den Piloten. Bei Windenergieanlagen wird ein unbeaufsichtigter Betrieb gefordert, die Eiserkennung und eine mögliche Enteisung müssen daher automatisch erfolgen. An einigen Prototypen und Demonstrationsanlagen mit Rotorblattheizung konnten schon Erfahrungen gesammelt werden [2, 3], es bleibt aber die Frage, ob solche Blattheizungen das Risiko von Eisschlag gänzlich ausschließen können. Verschiedene Möglichkeiten solcher de-icing- oder anti-icing-Systeme und deren Vor- und Nachteile sind in [8] beschrieben. Ob sich der Mehraufwand für eine Blattheizung rechnet hängt stark davon ab, wie Windgeschwindigkeit und Häufigkeit von Vereisung am geplanten Standort zusammentreffen und welche Entwicklungen die Industrie für die vereisungsgefährdeten Standorte in Zukunft realisiert und auf den Markt bringt.

Für Anlagen im Betrieb ist eine Heizung der Profilvorderkante ausreichend, um das Rotorblatt weitgehend eisfrei zu halten [2]. Erste Erfahrungen zeigen, dass die Energiebilanz von Heizleistung zu erzeugter Leis-

tung gegenüber Rotorblättern ohne Enteisungsvorrichtung an windreichen Standorten mit häufiger Vereisung positiv ist, Langjahresefahrungen fehlen aber noch. Trotz Enteisungsmaßnahmen können Eisstücke von Gondel, Nabe und Blattspitzen abfallen bzw. weggeschleudert werden. Entsprechend unterschiedlich reagieren WEA mit Pitch-, Stall- oder Active-stall-Regelung mit Blattnasenheizung, wenn sie im abgeschalteten Zustand vereisen und dann in Betrieb genommen werden [8].

5. Wo stecken die Unsicherheiten der bisher verwendeten Verfahren?

Eine wesentliche Unsicherheit stellt die Erkennung von Vereisungssituationen dar. Dies beginnt mit der „Klassifizierung“ von Vereisungsbedingungen und deren Auswirkung auf die WEA- oder Sensorenvereisung. Für die Meteorologiestationen besteht der Wunsch zur eindeutigen Bestimmung der Vereisungsparameter, um Gebiete nach Art und Häufigkeit von Vereisungswetterlagen mit gleichzeitigem „nutzbarem“ Windangebot langfristig zu erfassen. Für die Eissensorik und „eisfreie“ Windmessgeräte besteht die Forderung nach einer „normierten“ Umgebung zur korrekten Kalibrierung.

Der Eisansatz an drehenden und stehenden Teilen einer WEA wird aufgrund praktischer Erfahrungen, Messungen und Berechnungen abgeschätzt. Die Flug- oder Fallweite, die Abwurf- bzw. Abfall- und die anschließende Auftreffwahrscheinlichkeit hängen stark von der Modellierung der Größe der Eisstücke und dem Vereisungstyp und der Anlagengröße ab. Eine komplexe Modellierung und Berechnung benötigt exakte Eingaben und die Validierung durch praktische Erfahrungen. Beides bedarf noch der Optimierung und der Anpassung an die großen Anlagen.

Die Bestimmung des eisfreien Zustands nach dem Auftreten von Vereisungsbedingungen wird in vielen Fällen durch „persönliche“ Begutachtung durchgeführt. Bei den entsprechenden Wetterlagen mit schlechten Sichtverhältnissen kann mitunter eine noch vereiste WEA wieder in Betrieb gehen. Mit Hilfe spezieller Sensorik könnte solch ein Risiko ausgeschlossen werden.

Bis ausreichende Erfahrungen und Methoden vorliegen, muss an vereisungsgefährdeten Standorten behutsam mit Anwendung entsprechender Sicherheitszuschlägen vorgegangen werden. Eine Gefährdung durch Eis kann nicht nur von den Rotorblättern ausgehen, sondern auch von der „warmen“ Gondel, wenn durch Schneefall sich auf einer glatten und mehr oder weniger ebenen Gondelverkleidung durch schmelzen und wiederanfrischen eine Eisplatte bildet. Ein Wasserfilm kann dann eine Eislawine auslösen. Konstruktive Änderungen an der Gondelverkleidung können hier Abhilfe schaffen.

6. Risikoabschätzung

Zur Abschätzung des Risikos, das durch Eisansatz für die Umgebung einer WEA auftreten kann sind zusätzlich zu den oben beschriebenen Kriterien für den Abwurf oder Abfall eines konkreten Eisstücks von einer WEA sowohl die meteorologischen Bedingungen, die Betriebsart und der Betriebszustand der Anlage als auch die Häufigkeit des Aufenthalts von möglicherweise gefährdeten Personen oder Sachen zu berücksichtigen [6]. Mit geeigneten statistischen Verfahren mündet dies zum Beispiel in einer Aussage: „Wenn 15.000 Personen eine Straße, die 150 Metern von der betreffenden WEA entfernt verläuft, pro Jahr passieren, kann es in 300 Jahren zu einem Unfall durch Eisfall kommen.“ Ist dieses Risiko geringer als das allgemeine Risiko, in unserer heutigen technisierten Welt Schaden zu erleiden, dann dürfte der Genehmigung der Anlage an diesem Standort aus „Vereisungsgründen“ die Baugenehmigung nicht verwehrt werden. In Österreich werden an besonders gefährdeten Stellen neben Warnschildern auch optische Warnsignale aufgestellt, um das Risiko weiter zu verringern.

7. Empfehlungen

Projektierer von Windparks sollten bei der Auswahl der Standorte die Möglichkeit der Gefährdung durch Anlagen mit Eisansatz in ihre Planungen einbeziehen und durch entsprechende Gutachten oder Pauschalabstände wie sie in [6] vorgeschlagen sind absichern. Die Hersteller von WEA und Sensoren sollten ihre Produkte für den Einsatz an vereisungsgefährdeten Standorten optimieren, um Gefährdungen der Umgebung aber auch Schäden an den Anlagen selbst durch Vereisung zu vermeiden. Betreiber von Windparks können den Wissenschaftlern helfen, in dem sie ihre Erfahrungen an die entsprechenden Experten weitergeben. Eine zentrale Erfassung von Vereisungsfällen kann helfen, die Mechanismen von Rotorvereisung besser kennen zu lernen, die meteorologischen Modelle zu validieren und die Risiken besser abschätzen zu können. Ein wesentlicher Schritt in diese Richtung ist die Kalibrierung von Eissensoren und die Entwicklung von zuverlässigen und wirtschaftlichen Enteisungssystemen, für WEA für Standorte, an denen häufig mit Eisansatz zu rechnen ist.

8. Ausblick

Für den wissenschaftlichen Austausch von Industrie, Anwendung und Forschung stehen seit 1992 die BOREAS Konferenzen, die traditionell in der kalten Jahreshälfte in Lappland im Norden Finnlands alle zwei Jahre stattfinden. Die BOREAS VII Konferenz findet vom 7. bis 8. März 2005 in Saariselkä in Finnland statt und bietet neben Vorträgen zu den oben genannten Themenkreisen auch reichlich Raum zur Diskussion mit den Experten auf dem Gebiet der Vereisung.

Am 17./18. März findet in Österreich am Fuße des Tauernwindparks ein Seminar Eis und Felsen statt, das das Thema „Betrieb von Windkraftanlagen an Standorten mit extremen klimatischen Bedingungen und komplexen Geländestrukturen“ behandelt.

Seit Mitte 2004 tauschen sich im Rahmen der EU COST Action 727 „Measuring and forecasting atmospheric icing on structures“ Experten auf internationaler Ebene über Vereisung aus, mit dem Ziel Forschungsarbeiten zu initiieren und wissen zu bündeln. Erste Ergebnisse der Arbeitsgruppen werden auf der BOREAS VII Konferenz vorgestellt.

9. Literatur

- [1] Seifert, Henry; Tammelin, Bengt: Icing of wind turbines: Final Report; JOU2-CT93-0366; Deutsches Windenergie-Institut, Wilhelmshaven; Finnish Meteorological Institute, Helsinki. - DEWI, 1996.
- [2] Bengt Tammelin, Massimo Cavaliere, Hannele Holtinnen, Colin Morgan, Henry Seifert, Kristiina Sääntti; Wind Energy in Cold Climate, Final Report WECO (JOR3-CT95-0014), ISBN 951-679-518-6, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, February 2000.
- [3] M. Durstewitz, H. Dobesch, G. Kury, T. Laakso, G. Ronsten, K. Sääntti; Cold Climate Experiences in Europe; Proceedings DEWEK 2004, German Wind Energy Conference; 20.-21. October 2004, Wilhelmshaven, Germany.
- [4] Johannes Trauttmansdorff; Tauernwindpark Oberzeiring; highest windfarm in the world; erection and operational experience from winter 2002/03; BOREAS VI; 9 -11 April 2003; Pyhänturi, Finland
- [5] Shigeo Kimura, e.a.; The effect of airofoil motion on the shapes of ice accreted on an airofoil; BOREAS IV, 31 March - 2 April 1998; Hetta, Finland.
- [6] Seifert, H.; Westerhellweg, A.; Kröning, J.; Risk analysis of ice throw from wind turbines; BOREAS VI, 9 to 11 April 2003, Pyhänturi, Finland
- [7] Bengt Tammelin; Ice Free Wind Gauges - EUMETNET SWS 2; BOREAS V, 29 Nov. - 1 Dec., 2000, Levi, Finland
- [8] Henry Seifert; Technical Requirements for Rotor Blades Operating in Cold Climate; BOREAS VI, 9 to 11 April 2003, Pyhänturi, Finland
- [9] Henry Seifert, Vortrag auf dem Workshop der Energiewerkstatt „Windenergie in kaltem Klima“; Oberzeiring, Österreich, 18. - 19. Februar 2004.
- [10] Shigeo Kimura, Bengt Tammelin, K. Tsuboi; How much does ice affect wind speed measurements? BOREAS V, 29 Nov. - 1 Dec., 2000, Levi, Finland
- [11] Lasse Makkonen, Mauri Marjaniemi, Timo Laakso; TURBICE - The Wind Turbine Blade Icing Model; BOREAS V, 29 November - 1 December, 2000, Levi, Finland
- [12] Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation: Part 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry, 1. Edition 1999; Submitted to the Executive Committee of the International Energy Agency Programme for Research and Development on Wind Energy Conversion Systems.

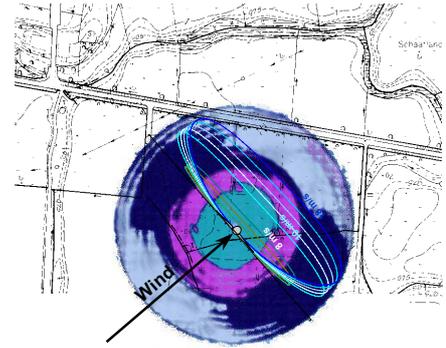


Abb.: 9 Risikoanalyse an einem Standort. Bei Hauptwindrichtung und Windgeschwindigkeiten unterhalb 18 m/s sind weder die Straße noch der Weg rechts der Anlage gefährdet. Bei Betrieb der Anlage auf kleiner Drehzahlstufe, die bei Rotorvereisung auch häufig bei höheren Windgeschwindigkeiten gefahren wird, sind die Wurfweiten deutlich reduziert.

Fig.: 9 Risk analysis of a site. In the main wind direction and at wind speeds below 18 m/s neither the road nor the path to the right of the wind turbine are endangered. When operating the turbine at low rotor speed, which is often the case even at higher wind speeds when the rotor blades are iced, the ice throwing range is reduced considerably.

