

Rotorblätter, eiskalt erwischt

Glacial Period for Rotor Blades

Seifert, Henry, DEWI

Summary

Ice happens. The more wind turbines are erected inland the more ice accretion is reported by the operators. Especially in December 1995 and in January 1996 numerous icing events occurred in Germany. Even close to the coast heavy icing on wind turbines during operation was monitored. The research programme "Icing of Wind Turbines" which is carried out by the German Wind Energy Institute (DEWI) and the Finnish Meteorological Institute (FMI) analyses wind turbine operation under icing conditions within Europe. The final report is available at DEWI by end of March '96 and gives some answers on the questions asked previously:

*Which weather conditions cause icing and at which sites do they occur ?
Which types of ice accretion can influence wind turbine operation ?
What are the influences on aerodynamics, loads, control system, etc. ?*

Measurements carried out by DEWI at the small wind turbine INVENTUS 6 during the icing events in January and the preliminary results of the questionnaires which have been distributed and evaluated within the project proved the load assumptions published in [1] to be conservative. The information has been used to set up recommendations how to take icing during operation of wind turbines into account.

In the frame of the continuation project WECO, "Wind Energy in Cold Climates", the next BOREAS Conference will be held at Saariselkä in Northern Finland from 19 to 21 March 1996. WECO is co-funded by the European Commission.

1. Eisgekühlte Windenergieanlagen

In den vergangenen zwei Jahren untersuchte das Deutsche Windenergie-Institut zusammen mit dem Finnischen Meteorologischen Institut (FMI) im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsvorhabens den Betrieb von Windenergieanlagen (WEA) unter Vereisungsbedingungen [2]. Die Ansätze für diese Untersuchungen gehen dabei zurück auf das Jahr 1985, in dem auf dem damaligen Windenergie Testfeld der DFVLR (heute DLR) auf der Schwäbischen Alb systematische Beobachtungen an vereisten WEA durchgeführt wurden. 1988 wurden in Lappland erste Untersuchungen über Vereisung von Windmeßgeräten und WEA begonnen. Von den „Flachländern“ weitgehend vernachlässigt, fand 1992 in Finnland die erste BOREAS¹ - Konferenz im kleinen Rahmen statt, die sich ausschließlich mit dem Thema Windenergienutzung in kaltem Klima befaßte. Etwa 40 Wissenschaftler, Vertreter von Herstellern von Windkraftanlagen und Windmeßgeräten und Betreiber trafen sich zwei Jahre später zur BOREAS II Konferenz. Im gleichen Jahr startete das oben genannte Forschungsprogramm, dem auch eine Fragebogenaktion angeschlossen war [3], um eine möglichst große Datenbasis über Vereisungsvorkommen in Europa zu erhalten.



Abb. 1: 600 kW WEA mit Eisansatz
Fig. 1: Wind turbine with ice accretion

¹ BOREAS Gott des Windes in Lappland

Woher kommt nun das in der letzten Zeit verstärkte Interesse an der Vereisung? Die neuesten Auswertungen der Statistik über die aufgestellten WEA in Deutschland geben zwei Gründe: Einerseits besteht bei mehr als 3500 WEA eine wesentlich größere Wahrscheinlichkeit auf Erfahrungen mit Vereisungsbetrieb zu stoßen, andererseits zeigt die Standortstatistik den deutlichen Trend, Anlagen verstärkt im Binnenland aufzustellen, wo meteorologisch bedingt häufiger Vereisungswetterlagen anzutreffen sind. An den küstennahen Standorten, mit der größten Anzahl von aufgestellten Anlagen, traten bislang offensichtlich selten gravierende Eisansätze auf. Dies änderte sich im Dezember 1995 und im Januar 1996. In beiden Monaten berichteten Betreiber, sowohl von Binnenlandstandorten als auch von küstennahen Standorten, von starken Vereisungen an stillstehenden und laufenden Anlagen. Gleich drei prinzipiell verschiedene Vereisungssituationen konnten selbst an der Küste beobachtet und dokumentiert werden. Diese gesammelten Informationen fließen in das laufende Forschungsprogramm ein und führen zu Empfehlungen, wie Vereisungswetterlagen beim Betrieb von WEA zu berücksichtigen sind. Im folgenden wird am Beispiel der Messung an einer kleinen 5 kW Windenergieanlage gezeigt, wie sich die „Januarvereisung“ auf den Betrieb von Windturbinen auswirkte.

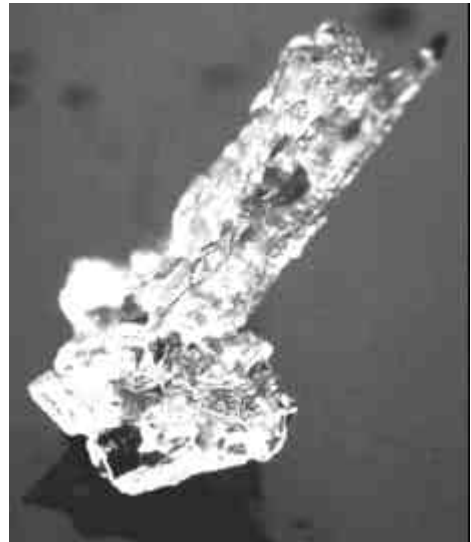


Abb. 2: Eisstück von der Blattspitze
Fig. 2: Ice debris from blade tip

2. Im Betrieb vereiste Rotorblätter

Gleich drei Vereisungsformen konnten im Januar beobachtet werden. An allen Tagen, an denen Vereisung auftrat, war auch die Windgeschwindigkeit hoch genug, um die WEA im Teillastbetrieb zu halten. Beim Umschwung von einer kalten Hochdruckwetterlage setzte gefrierender Regen ein, der nicht nur die Straßen mit einem Eisüberzug versah, sondern auch die Rotorblätter der Windkraftanlagen. Da anschließend die Temperatur rasch anstieg und die Windgeschwindigkeiten relativ gering waren, beschränkte sich der Betrieb unter diesen Bedingungen auf nur wenige Stunden. Bei einer weiteren Wetterlage setzte sich Eis an die Rotorblattnasen an. Grund war das Auftreffen unterkühlten Nebels auf das Rotorblatt bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt. Abb. 1 zeigt eine 600 kW Anlage in der Nähe von Wilhelmshaven mit Eisansatz aus dem Betrieb an der Rotorblattvorderkante. Abb. 2 zeigt ein solches Eisstück von der Nähe der Blattspitze, das sich schon durch die steigende Temperatur gelöst hatte, am Boden lag und so aufgesammelt werden konnte. Die dritte beobachtete Vereisungssituation trat bei Temperaturen deutlich unter Null auf und führte zu ähnlichen Vereisungsbildern, wie sie von Mittelgebirgslagen her schon länger bekannt sind. Ein Beispiel für diese Eisform, die mit Windgeschwindigkeiten um die 7 m/s einherging, ist in Abb. 3 und in Abb. 4 gezeigt. Hier ist das gesamte Rotorblatt und die Blattspitze einer kleinen 5 kW Anlage mit 6 m Durchmesser (INVENTUS 6) zu sehen, die auf dem DEWI Testfeld betrieben wird. Einige Eisstücke konnten direkt für weitere Untersuchungen abgeformt werden. Einen auch für größere Anlagen typischen Querschnitt zeigt der Negativgipsabdruck in Abb. 5. Deutlich ist auf der linken Seite die Kontur der Rotorblattspitze zu sehen, die Anströmung kam also von rechts. Eine Anleitung, wie solche Gipsabdrücke, auch von heruntergefallenen Eisstücken, abgenommen werden können, wird übrigens zusammen mit dem Fragebogen über



Abb. 3: Rotorblatt der INVENTUS mit Eisansatz vom 19. Januar 96
Fig. 3: Iced rotor blade of INVENTUS



Abb. 4: Ansicht der vereisten Blattspitze

Fig. 4: View of iced blade tip

Vereisung verschickt oder kann beim DEWI angefordert werden. Die Dokumentation der Vereisung der größeren Anlagen in der Nähe des DEWI Testfeldes beschränkte sich auf das Fotografieren, das Sammeln und Wiegen von Eisstücken am Boden und das Abformen der Fundstücke. Weitere Fotos wurden von verschiedenen anderen Anlagen aufgenommen und Gipsabdrücke von unterschiedlichen Radiuspositionen

abgeformt. Alle Unterlagen werden zur Zeit ausgewertet.

Die in [3] angenommenen Lastannahmen scheinen sich durch alle vorliegenden Informationen zu bestätigen. Prinzipiell wird dort bei drehenden Anlagen von einem, linear von der Blattwurzel zur Blattspitze anwachsenden Eisansatz ausgegangen. Die prozentuale, maximale Eistiefe, bezogen auf die Rotorblatt-Tiefe $t_{Ea}(R)/t_a$, wobei t_{Ea} die maximale Tiefe des Eisansatzes und t_a die Rotorblatt-Tiefe an der Blattspitze darstellen und R den Radius der WEA, wird dabei für größere Anlagen kleiner angenommen als für kleine (siehe Abb. 7). In diesem Diagramm sind die tatsächlichen Beobachtungen als Einzelpunkte eingetragen. Weiterhin ähneln die Eisansätze an der Profillinse denen, die im



Abb. 5: Negativgipsabdruck des Eisansatzes von Abb. 4

Fig. 5: Negative plaster template taken from ice accretion shown in Fig.4

Vereisungswindkanal der Kanagawa Universität in Tokio von S. Kimura während des Workshops über Vereisung im Oktober 1995 beim DEWI vorgestellt wurden. Diese Ähnlichkeit ist deshalb bedeutend, da in diesem Windkanal reproduzierbarer Eisansatz an Profilen im vergleichbaren Reynoldszahlenbereich bei unterschiedlichen Temperaturen, LWC (Liquid Water Content, d.h. Tröpfchengröße des unterkühlten Wassers in der anströmenden Luft) und Anstellwinkeln untersucht werden können. Ein wesentliches Ergebnis aus diesem Windkanal ist ebenso, daß bei den untersuchten Profilen eine doppelte Anströmgeschwindigkeit einen doppelten Eisansatz in Richtung der Profillinse verursachte. Dieser Effekt ist deutlich in Abb. 3 wiederzufinden: Der Eisansatz nimmt zur Rotorblattspitze mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit linear zu.

3. Belastungsmessungen mit Eisansatz

Im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Meßprogramms zur Verifizierung von Lastannahmen an kleinen Windenergieanlagen führt das DEWI in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Wilhelmshaven Messungen dynamischer Größen an der INVENTUS 6 auf dem DEWI-Testfeld durch. Während der letzten Vereisungswetterlage konnten an dieser Anlage Belastungsmessungen an Turm und Rotorblättern, sowie Leistungsmessungen unter Vereisungsbedingungen durchgeführt werden. Wie schon in [4] beschrieben, wird beim Betrieb einer WEA mit Eisansatz eine Verringerung der Leistung und eine Erhöhung der Betriebslasten erwartet. Außerdem wird sich, je nach Masse des Eises, das dynamische Verhalten der Komponenten, vorrangig der Rotorblätter, ändern. Da die Anemometer leicht vereist und die zusätzlichen Anemometer des Meteorologiemast festgefroren waren, sind die Angaben für die Windgeschwindigkeit mit entsprechender Ungenauigkeit behaftet. Bei gemessenen 5,5 m/s oberhalb Nabenhöhe kam die INVENTUS 6 nur noch auf etwa

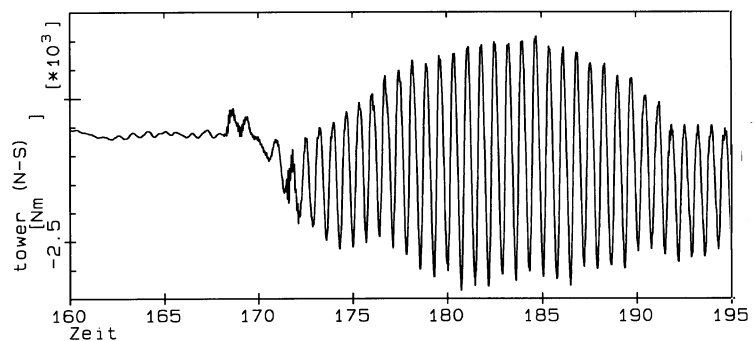


Abb. 6: Turmbiegemoment der INVENTUS 6 mit Unwucht durch asymmetrischen Eisansatz

Fig. 6: Tower bending moment of the INVENTUS 6 due to icing

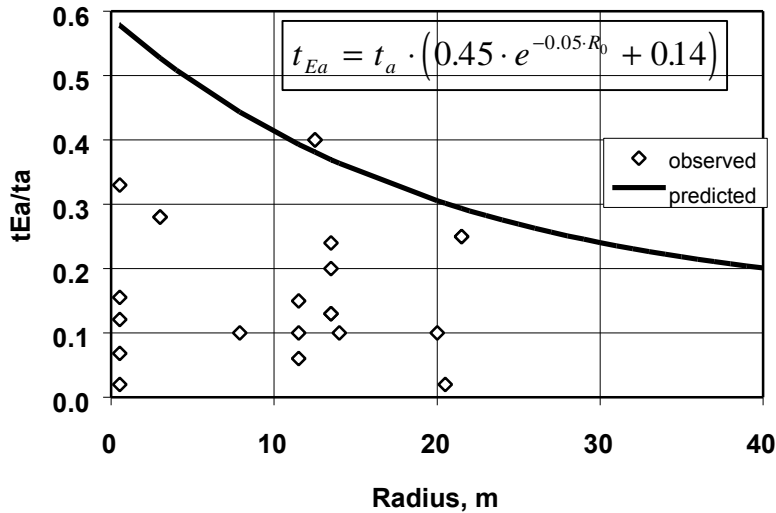


Abb. 7: Vergleich des geschätzten Eisansatzes aus [1] mit Beobachtungen

Fig. 7: Comparison of predicted with observed ice accretion

sätzliche Masse des Eises geht mit einer Verringerung der Rotorblatteigenfrequenzen einher, d.h. die Eigenfrequenz in Schwenkrichtung verringerte sich in diesem Fall um ca. 17%.

Es wurden mehrere Starts und Stops gefahren und die Belastungen aufgezeichnet. Waren die Rotorblätter während des Betriebs untereinander fast identisch vereist und nur wenig Unwucht zu bemerken, so führte das Abnehmen von den zwei 300 g Eisstücken an der Blattspitze nun zu deutlichen Unwuchten und zu damit verbundenen extremen Turmschwingungen, so daß die Anlage außer zum kurzzeitigen Meßbetrieb nicht mehr in den unbeaufsichtigten Dauerbetrieb übergeben werden konnte. Diese Daten wurden gespeichert und werden im Rahmen des Eisforschungsprogramms weiter ausgewertet.

65 % der zu diesem Wind gehörenden Leistung.

Trotz geringerer Leistungsabgabe stieg aber die Belastung, gemessen am Schwenkbiegemoment an der Blattwurzel, in der Amplitude um etwa 22 % an. Abb. 8 zeigt oben das Schwenkbiegemoment an der Blattwurzel ohne Eisansatz und unten mit Eisansatz von ca. 28 % der Blatt-Tiefe an der Rotorblattspitze. Abb. 6 zeigt das Turmbiegemoment im Betrieb, nachdem von zwei benachbarten Rotorblättern zwei ca. 300 mm lange Eisstücke von der Blattspitze entfernt wurden. Die zu-

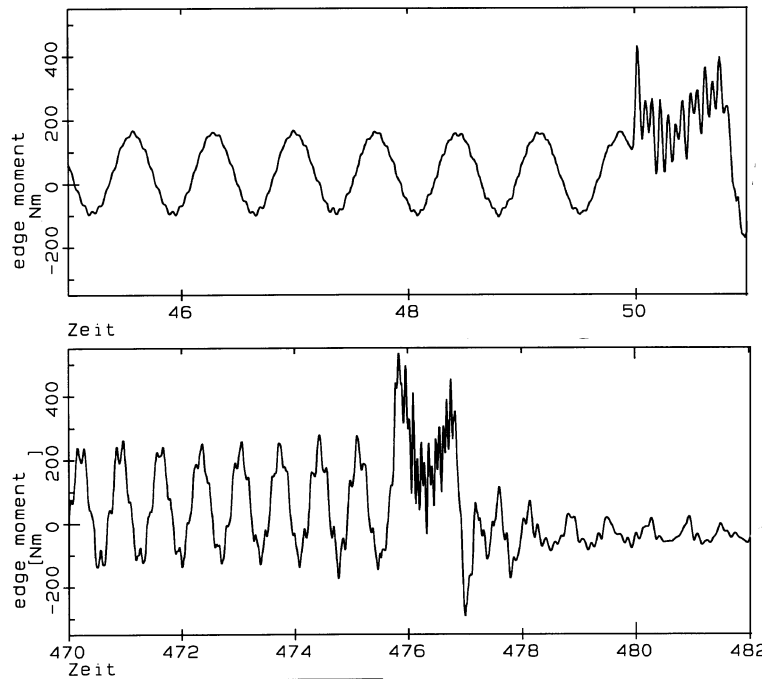


Abb. 8: Schwenkbiegemomente an der Blattwurzel ohne Eisansatz (oben) und mit Eisansatz. Zeitmaßstab unterschiedlich

Fig. 8: Edge wise blade root bending moment without (top) and with ice accretion. Different time scale

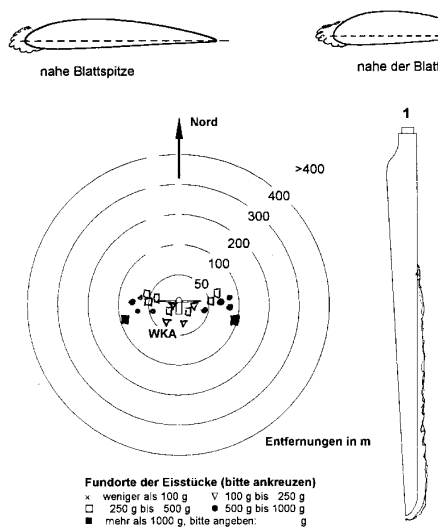


Abb. 9: Beispiel aus dem Fragebogen: Eingetragene Eisfundorte

Fig. 9: Example for reporting collected ice debris

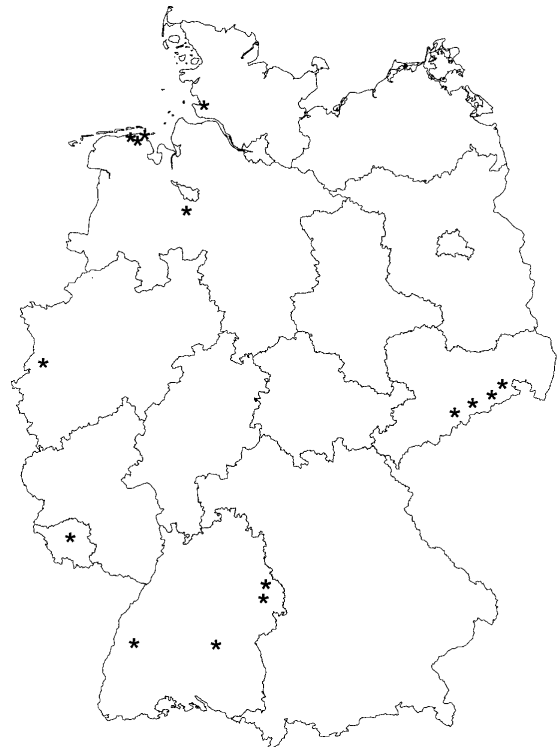


Abb. 10: Orte von denen starke Vereisungen gemeldet wurden

Fig. 10: Locations from where heavy icing has been reported

4. Fragebogenaktion wird fortgesetzt

Zuallererst sei den Teilnehmern der Fragebogenaktion an dieser Stelle nochmals herzlich für ihre Mitarbeit gedankt. Sie haben dem DEWI wichtige Informationen bezüglich Vereisung von WEA zur Verfügung gestellt. Auch den vielen Anrufern, die persönlich von ihren Erfahrungen und Beobachtungen berichteten, sei auf diesem Wege gedankt, denn auch diese Informationen tragen zur Vervollständigung des Puzzles bei.

Waren die Reaktionen der Betreiber und Hersteller auf die zugesandten Fragebögen im letzten Jahr eher gering, wahrscheinlich wegen der fehlenden Vereisungswetterlagen, so liefen gegen Ende '95 und Anfang '96 sehr viele Informationen über vereiste WEA ein (Abb. 10). Besonders nachgefragt wurde nach Windmessungen unter Vereisungsbedingungen - wichtig für das Betriebssystem der WEA und für die Bestimmung des Energieertrags - sowie nach Größe und Entfernung abgeworfener Eisstücke von den Rotorblättern. Von den bisher eingegangenen knapp über 40 Fragebögen enthielten beispielsweise 12 Angaben über im Bereich der WEA gefundene abgeworfene Eisstücke. Dies ergibt schon eine erste Abschätzung, wie weit Anlagen in vereisungsgefährdeten Gebieten von öffentlichen Wegen entfernt aufgestellt werden sollten. Die auf den Fragebögen angekreuzten Fundorte (siehe Abb. 9) können natürlich nur Abschätzungen sein, die sich aber in einer Faustformel zusammenfassen lassen. Nach den bisher vorliegenden Angaben, die sich weitestgehend mit eigenen Beobachtungen decken, sind abgefallene Eisstücke innerhalb eines Radius von $D+H$ von der WEA entfernt gefunden worden, wobei D für den Rotordurchmesser und H für die Nabenhöhe der Anlage stehen. Es ist also empfehlenswert, diesen Abstand von öffentlichen Wegen in vereisungsgefährdeten Gebieten, d.h. vornehmlich in höheren Lagen, in denen Vereisung für einen Zeitraum von einigen Tagen bis zu einigen Wochen auftreten kann, einzuhalten. Da dieser Abstand geringer ist, als der durch die Geräuschgrenzen geforderte, kann die Empfehlung auf öffentliche Wege beschränkt bleiben. Die oben beschriebene Vereisungssituation in Küstennähe war die erste dieser Art im Zeitraum der vergangenen 5 Jahre, seit Bestehen des DEWI, und stellt somit sicherlich einen Sonderfall für die Küstenstandorte dar.

Eine Statistik ist natürlich nur so gut, wie die Repräsentanz der Daten, mit der sie gefüttert wird und sie lebt auch nur von der Aktualität. Daher nochmals die Bitte an den interessierten Leser, sich weiterhin rege an der Vereisungs-Fragebogenaktion zu beteiligen und dem DEWI Informationen über vereiste WEA zukommen zu lassen. Abb. 10 zeigt, aus welchen Gebieten die Fragebögen zurückkamen. Deutlich zu sehen sind die Mittelgebirge wie zum Beispiel der

Schwarzwald (Westkante), die Schwäbische Alb, die Eifel und das Erzgebirge. Von dort wurde auch berichtet, daß Anlagen bis zu einer Woche unter Vereisungsbedingungen liefen oder aber auch wegen „eingefrorenem Anemometer“ gar nicht den Betrieb aufnahmen. Sicherlich ein „weiser“ Entschluß der Betriebsführung, was die Zusatzlasten und den Abwurf von Eisbrocken angeht, aber sicher nicht im Sinne des Betreibers, der stillstehende Zähler bei ausreichender Windgeschwindigkeit nicht so gerne sieht.

Daraus resultiert eine Empfehlung an die Hersteller von WEA, nämlich die Betriebsführungen der Anlagen für gefährdete Gebiete mit beheizbaren Anemometern auszustatten. Der Vorteil davon ist, daß, in Verbindung mit einem ungeheizten Windgeschwindigkeitsmesser, Vereisung erkannt und eine gezielte Entscheidung über Betrieb oder Stillsetzen der Anlage getroffen werden kann (Abb. 11 und 12).

5. WOWECO Empfehlungen

Der Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen spielt eine zunehmende Rolle in Europa. Zu dieser Kernaussage kamen Wissenschaftler aus Ländern der Europäischen Gemeinschaft und aus Japan während des eintägigen Experten-Workshops **WOWECO** am 5. Oktober 1995 im Deutschen Windenergie-Institut. Vorträge über das Projekt „Icing of Wind Turbines“ eröffneten das Programm. Über die bereits dargestellten Umfrageergebnisse hinaus wurde über Messungen an vereisten WEA in Finnland und über statistische Auswertungen der ISET² Datenbank im Rahmen des WMEP bezüglich Störfälle durch Eisansatz berichtet. Seine Experimente an Rotorblattprofilen unter Vereisungsbedingungen im Windkanal der Kanagawa Universität in Japan stellte Prof. Kimura vor.

Der Workshop bot den anwesenden Wissenschaftlern Gelegenheit, über die Problematik des Betriebs von WEA unter extremen klimatischen Bedingungen zu diskutieren. Folgende Empfehlungen wurden vorgeschlagen:

- Untersuchung von Anti-Eis- und Enteisungssystemen.
- Untersuchung von Heizungssystemen mit kombiniertem Blitzschutz.
- Automatische Erkennung von Vereisung durch die Betriebsführung von WEA.
- Systematische Untersuchung des Einflusses verschiedener Oberflächen auf den Eisansatz.
- Entwicklung eines europäischen „Eisatlas“, der Auskunft darüber gibt:
 - in welchen Gebieten mit starker Vereisung zu rechnen ist,
 - welche Dauer und welcher Eisansatz dort berücksichtigt werden muß,
 - welcher Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Vereisung besteht und
 - wie Vereisung in Abhängigkeit von der Standorthöhe auftritt.

Eine Einteilung in drei Kategorien wird für einen „Eisatlas“ vorgeschlagen:

1. Vereisung kommt nicht oder nur äußerst selten vor.
2. Vereisung kommt an wenigen Tagen im Jahr vor.
3. Vereisung kommt über einen längeren Zeitraum vor.



Abb. 11: Windmeßgeber der Betriebsführung unter Vereisungsbedingung
 Fig. 11: Iced wind measurement sensor of supervisory system (Foto: F. Pieper)

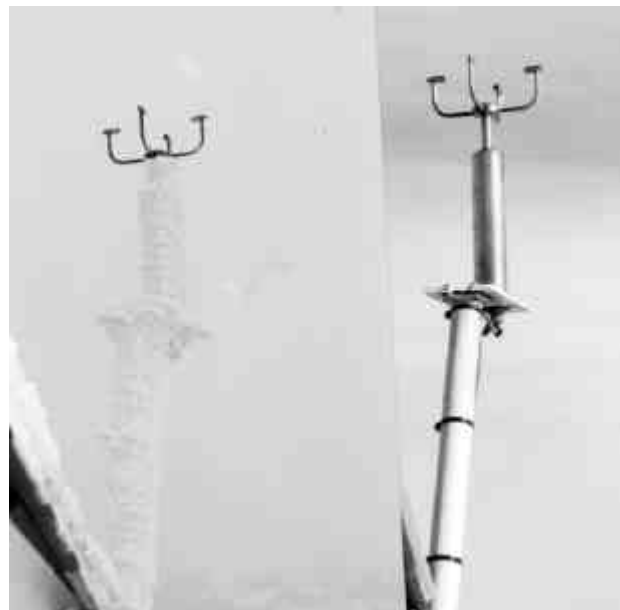


Abb. 12: Auswirkung der Anemometerheizung
 Fig. 12: Result of anemometer heating (Foto: Ch. Melzer, AMMONIT)

² ISET: Institut für Solare Energietechnik, Kassel

Empfehlungen für die drei Kategorien:

Zu 1.): Eislasten müssen bei der Zertifizierung nicht berücksichtigt werden. Zu 2.): Eislasten müssen bei der Zertifizierung berücksichtigt werden oder die Betriebsführung der WEA schaltet die Anlage unter Vereisungsbedingungen ab. Dies erfordert Eissensoren und heizbare Anemometer für die Betriebsführung der WEA. Zu 3.): Ein Anti-Eis-System oder ein Enteisungssystem wird zusätzlich zu 2) empfohlen.

6. Fortsetzung der Untersuchungen

Der Endbericht über das Forschungsprojekt "*Icing of Wind Turbines*" ist in englischer Sprache ab März 1996 vom DEWI zu beziehen. In diesem Bericht werden die verschiedenen Einflüsse von Vereisung beschrieben und bewertet, Lastannahmen getroffen und die Auswertungen der Fragebögen dokumentiert. Weiterhin enthält der Endbericht eine Literatursammlung von Veröffentlichungen über das Thema Vereisung von WEA sowie typische Bilder vereister Rotorblätter und Instrumente.

Das Vereisungsprogramm findet unter neuem Namen eine Fortsetzung: "*WECO, Wind Energy in Cold Climate*". In diesem europäischen Forschungsprogramm unter finnischer Leitung und Beteiligung von Herstellern von WEA und Meßinstrumenten, Betreibern, Forschungsinstituten und Universitäten werden die bisherigen Untersuchungen fortgesetzt und neuen, während des ersten Projekts aufgeworfenen Fragen nachgegangen. Die Fragebogenaktion wird fortgesetzt und soll in einer europäischen Vereisungskarte zusammengefaßt werden, in der Vorkommen, Häufigkeiten und Typen von Vereisungen dokumentiert werden sollen. Der Windmessung in kalten und vereisungsgefährdeten Gebieten wird ein zweiter Schwerpunkt gewidmet. Empfehlungen für Enteisungsmöglichkeiten und Lastannahmen sind weitere Themen. Sowohl der Anstieg der Projektpartner von 2 im ersten Vorhaben auf 15 im jetzt begonnenen, als auch die Beteiligung von Industriepartnern und EVU zeigt, daß das Thema Vereisung mit zunehmender Zahl von Binnenlandanlagen immer wichtiger genommen wird.

Ein Forum zum Informationsaustausch, aber auch, um sich über den Stand der Erforschung der kalten Seite der Windenergie zu informieren, wird die dritte BOREAS Konferenz sein, die vom 19.-21. März 1996 in Saariselkä, Finnland stattfindet. Informationen über die Konferenz und über die Konferenzunterlagen sind über das BOREAS III Organisationskommittee,

Herrn Bengt Tammelin,
oder

Tel.: 00358-0-1929-664
Fax.: 00358-0-1929-537 erhältlich.

Im Rahmen von WECO wird beim DEWI ein Workshop über Vereisung von WEA stattfinden. Insbesondere die Hersteller sind gefragt, welche speziellen Themen bezüglich des Betriebs von WEA in kaltem Klima für sie von Interesse sind und auf dem Workshop diskutiert werden sollten. Anregungen und Vorschläge nimmt das DEWI gerne entgegen (Stichwort WOWECO II).

7. Literatur

- [1] Seifert, Henry: Icing of Wind Turbine Rotor Blades During Operation. Paper presented at BOREAS, an international expert's meeting on wind power in icing conditions. Feb. 10-14, 1992, Enontekiö / Finland.
- [2] Seifert, H.; Tammelin B.: Icing of Wind Turbines. Paper presented at BOREAS II, an international expert's meeting on wind power in icing conditions. Mar. 21-25, 1994, Pyhänturi / Finland.
- [3] Seifert, Henry: Eiszeit für Windkraftanlagen. In: DEWI - Magazin (1995) Nr. 6, S. 67 -68.
- [4] Seifert, Henry; Schloz, Cornelia: Additional Loads Caused by Ice on Rotor Blades During Operation. Paper presented at European Community Wind Energy Conference 1990, Sept. 10-14, Madrid / Spain.