

Eis im Kanal

Ice Tunnel

Richert, Frank, Institut für Flugmechanik, Technische Universität Braunschweig
Seifert, Henry, DEWI

Summary

Icing has been observed during the operation of the small wind turbine INVENTUS 6 which is operated at the test site of the Deutsches Windenergie-Institut (DEWI) by the Technical College of Wilhelmshaven. Within the frame of a JOULE II research project the turbine was equipped with a data acquisition system for measuring the blade root bending moments, the tower bending, and the operational data such as power, pitch angle and rotor speed. The meteorological data were recorded by a met-mast in the vicinity of the turbine and by the test station's long term data acquisition for meteorological data. The loads and the power curve have been documented in during normal, non-iced operation. The rated power of the turbine is 5 kW, the four-bladed rotor features a passive pitch control and runs at two fixed rotor speeds 89 and 128 rpm, respectively. The guyed tower of the turbine is retractable by means of a mechanically operated winch. Ice fragments were taken from the blades in order to catalogue its shape and mass and to prepare a wind tunnel model.

The model has been investigated in the wind tunnel of the University of Braunschweig. Aerodynamic coefficients of the original clean rotor blade section were compared against those gained from two different ice events. Finally power curves of the iced and non-iced turbine have been calculated in order to predict energy losses due to icing.

1. Vereisung von Windenergieanlagen, ein beliebtes Thema der letzten 2 Winter

Die beiden letzten Winter haben das Thema Vereisung von Windenergieanlagen zu einem Dauerbrenner werden lassen. Die zunehmende Anzahl von im Binnenland aufgestellten Anlagen trug dazu ebenso bei wie die Tatsache, daß auch in den bisher von Vereisungswetterlagen weitgehendst verschont gebliebenen Küstenregionen Europas an einigen Tagen Ausfälle wegen Vereisung auftraten. Viele Fragen, schon im ersten von DEWI und FMI¹ im Rahmen eines JOULE II Projektes [1] gestellt, erhielten für Hersteller, Betreiber und Genehmigungsbehörden besondere Priorität. Neben den Untersuchungen wo, in welchem Umfang und wie lange Vereisung auftritt, sind besonders die Auswirkungen auf die Betriebslasten und den Energieertrag von entscheidendem Interesse. Seit Anfang 1996 bearbeiten mehrere Forschungsinstitutionen, Energieversorger und Hersteller von Windenergieanlagen und meteorologischen Instrumenten unter der Leitung des Finnischen Meteorologischen Instituts das JOULE III Projekt WECO (Wind Energy in Cold Climates), um, basierend auf den Ergebnissen des ersten Forschungsvorhabens, Beobachtungen, Messungen, Simulationen und Berechnungen auf dem Gebiet der Vereisung von WEA durchzuführen und Empfehlungen für den Bau und Betrieb von Windenergieanlagen in vereisungsgefährdeten Gebieten zu formulieren [2].



Abb. 1: Rotorblatt mit Eisansatz.
Fig. 1: Ice accretion at leading edge
(Foto: Kranz)

¹ FMI Finnish Meteorological Institute

Eines der ersten Anzeichen beginnender Rotorblattvereisung ist der typische von der Blattwurzel zur Blattspitze zunehmende dreiecksförmige Eisansatz an der Profilverkante, der zwar meistens den Betrieb der Anlage nicht unterbricht, aber zur Erhöhung der Lasten und des Geräuschs und zur Verminderung der Leistung beiträgt (Abb. 1). Zur genaueren Abschätzung des Einflusses von verschiedenen vereisten Rotorblattprofilen müssen entsprechende Kennwerte der Profile vorliegen, um weiterführende Berechnungen durchführen zu können. Das konsequente Sammeln und Konservieren von typischen Eisstücken von der Nase der Rotorblattprofile füllte dabei eine Datenbank verschiedener Anlagentypen und -größen sowie von Eisansätzen verschiedener Stadien. Ebenso konnten Fragmente von gleichen Anlagen, aber unterschiedlichen Eisformen, bei verschiedenen Temperaturen untersucht werden. Diese Informationen, die nicht nur die Teilnehmer der Forschungsvorhaben, sondern auch Betreiber und Hersteller von WEA zusammentrugen, dienen nicht nur der Untersuchung an der Anlage selbst, sondern geben auch Aufschluß darüber, wie weit vom Turmfuß der WEA entfernt beispielsweise von den Blättern abgeworfene Eisstücke am Boden auftreffen können. Ein entsprechendes Rechenprogramm wurde im Rahmen des WECO-Projektes erstellt und mit den Werten aus den Datenbanken verglichen [3]. Die in diesem Artikel veröffentlichten Ergebnisse dienen auch diesen Simulationen als Eingabe und werden in einer Empfehlung zur Abstandsregelung resultieren.



Abb. 2: Abnahme des Eisansatzes.

Fig. 2: Collecting ice accretion.

Die auf dem Testfeld des DEWI von der Fachhochschule Wilhelmshaven betriebene kleine Windenergieanlage INVENTUS 6 zeigte im Januar 1996 an zwei Tagen unterschiedliche Vereisung an den Rotorblättern [4]. Die vierblättrige, passiv pitchgeregelte Anlage hat einen Rotordurchmesser von 6 m und speist über

einen zweistufigen Asynchrongenerator mit 5 kW Leistung die Energie direkt ins Netz ein. Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes [5] wurden Betriebslasten und das Leistungsverhalten gemessen, so daß die Sensoren zum Aufzeichnen von Leistung, Drehzahl, Wind- und Windrichtung sowie der Blattwurzelbiegemomente für die Vereisungsbeobachtungen noch zur Verfügung standen. Sowohl die geänderten Lasten und die Dynamik der Anlage, als auch die Leistung während des „Eisbetriebs“ konnten aufgezeichnet und ausgewertet werden [4,6]. Da sich der Turm der INVENTUS sehr einfach umlegen läßt, konnte nach der Datenaufzeichnung des Betriebs des symmetrisch vereisten Rotors das an der Profilvorderkante angewachsene Eis abgenommen und in Gips konserviert werden (Abb. 2). Die Wiederinbetriebnahme mit zwei fehlenden, etwa 300 mm langen und ca. 300 g schweren Eisstücken, die von der Blattspitze zweier benachbarter Rotorblätter entnommen wurden, mußte wegen zu großer Unwucht und den damit verbundenen extremen Auslenkungen der Turmspitze abgebrochen werden [6].

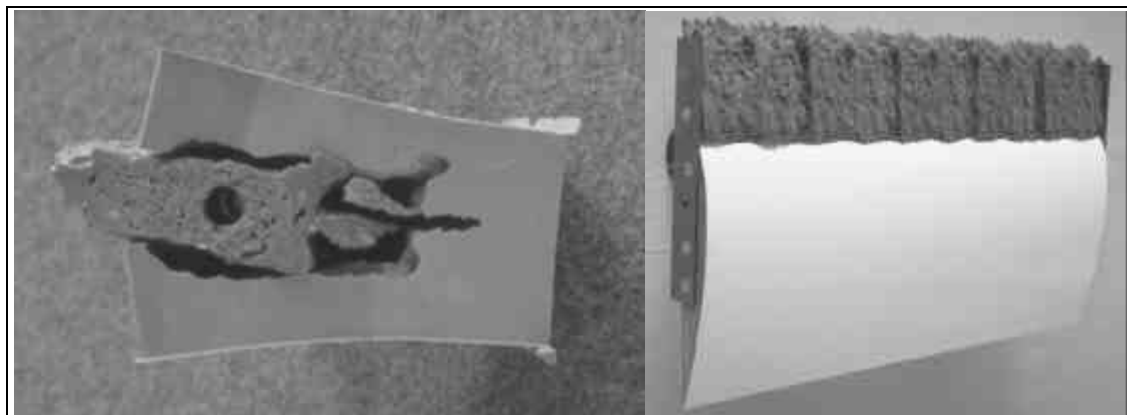


Abb. 3: Silikonform mit Duplikat und Windkanalmodell aus [7].

Fig. 3: Silicon valley and resulting duplicate and wind tunnel model [7].

2. Eis für den Windkanal

Bereits 1990 wurde im Stuttgarter Laminarwindkanal des Instituts für Aero- und Gasdynamik ein „vereistes“ Profil vermessen [7]. Der zugehörige Eisansatz an der Profilvorderkante von ca. 38 % bezogen auf die Länge der Profilhöhe, konnte nach einem Hubwageneinsatz von der 100 kW WEA DEBRA-25 auf dem DLR-Testfeld „Ulrich Hütter“ auf der Schwäbischen Alb abgenommen und konserviert werden (Abb. 3). Sowohl bei der DEBRA-25 als auch bei der INVENTUS 6 finden NACA4415 Profile im Bereich der Blattspitze Verwendung, so daß beide Vermessungen vergleichbar sind. Von dem Negativabdruck des INVENTUS Eisstückes in Gips wurde zunächst ein Positivmodell aus Polyesterharz mit Aluminiumstaub hergestellt (Abb. 4), dann eine Silikonform abgenommen, um darin mehrere Duplikate zu produzieren, um schließlich die 0.5 m „Eisansatz“ für das Windkanalmodell zu erhalten.



Abb. 4: Eisstück, Positivform und Windkanalmodell des Eisansatzes der INVENTUS.

Fig. 4: Collected ice fragment, master piece and wind tunnel model of INVENTUS ice accretion.

3. Vermessung von Profilen mit Eisansatz im Windkanal

Zur Beurteilung des Belastungsniveaus und des Leistungsverhaltens von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen werden unter anderem für Simulationsrechnungen die aerodynamischen Kraftbeiwerte von vereisten Rotorblättern benötigt. Der Einfluß von zwei an der oben beschriebenen INVENTUS 6 abgenommenen Eisformationen (Abb. 5, Eisansätze 5, 8 und 9) auf die aerodynamischen Eigenschaften des Rotorblattes wurde experimentell in einem Windkanal der Technischen Universität Braunschweig untersucht.

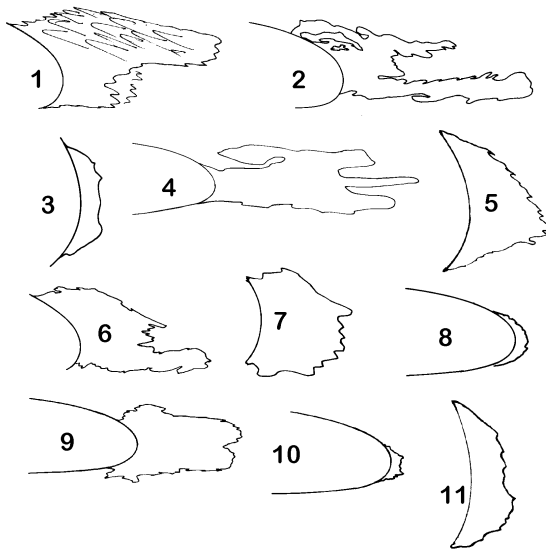


Abb. 5: Verschiedene als Modelle konservierte Vereisungsformen an der Profilvorderkante.

Fig. 5: Different leading edge ice accretion, preserved by DEWI.

Die Messungen der stationären, 2-dimensionalen Beiwerte für den Auftrieb, den Widerstand und das Nickmoment des Rotorblattprofils erfolgte bei einer Reynolds-Zahl von $Re = 0.63 \cdot 10^6$ durch direkte Kraftmessung für einen Anstellwinkelbereich von -10° bis 30° . Durch den Eisansatz werden die Profilbeiwerte gegenüber dem unvereisten Profil deutlich im Wert und auch im Verlauf verändert, wobei der Widerstand z. B. bis um das 6-fache ansteigt und das ursprüngliche Stallverhalten verändert wird. **Die Profilkennwerte sind für alle hier vorgestellten Messungen von „Eisansätzen“ trotz der dadurch vergrößerten Profiltiefe auf die Sehnenlänge des „unvereisten“ Originalprofils bezogen.** Die Vermessung eines Eisstückes für sich ergab Auftriebsbeiwerte mit Werten bis zu $c_a = 0.6$.

3.1 Windkanalmodell

Die Kontur des rechteckigen Flügelsegmentes für die Vermessung im Windkanal ist einem Profilschnitt des originalen INVENTUS Rotorblatt entnommen. Gegenüber dem vom Hersteller angegebenen NACA4415 Profil weist das tatsächlich gebaute Rotorblattprofil deutliche Veränderungen im Nasen- und Endkantenbereich auf (Abb. 6).

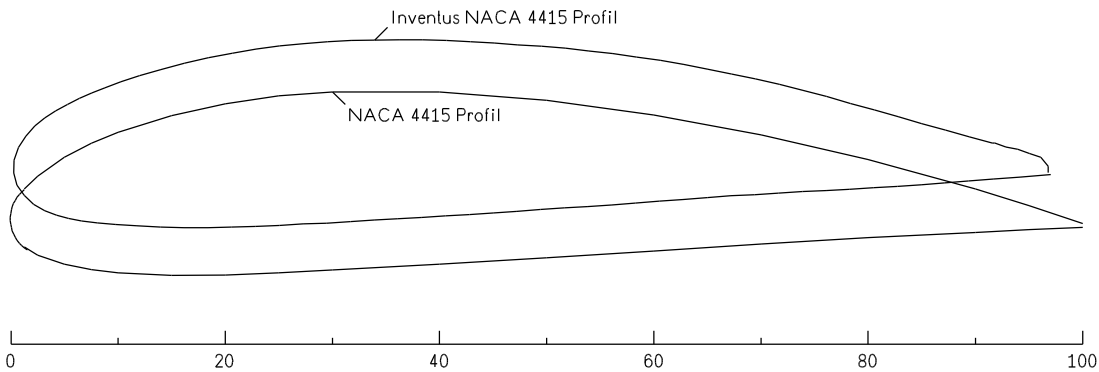


Abb. 6: Vergleich der Profilkontur des INVENTUS Profilschnittes mit einem NACA4415 Profil.

Fig. 6: Comparison of airfoil shape of INVENTUS cross section against NACA4415.

Das Windkanalmodell mit einer Profiltiefe von 225 mm und einer Spannweite von 500 mm wurde manuell in Positivbauweise aus einem Styroform-Kern mit einem Metall-Insert und einer GFK Oberfläche gefertigt. Die Oberfläche wurde abschließend poliert. Bauartbedingt treten bei diesem Herstellungsverfahren geringe Konturabweichungen gegenüber der Originalkontur auf. Die vom INVENTUS Rotorblatt abgenommenen und in Abb. 5 dargestellten Eisformationen wurden aus Polyester reproduziert und lösbar mit dem Blattsegment verbunden. Die ebenfalls in Abb. 5 wiedergegebene Eisformation, die an der DEBRA-25 im Betrieb beobachtet und im Stuttgarter Windkanal vermessen wurde [7], kann aufgrund der Tatsache, daß es sich prinzipiell um das gleiche Profil handelt, sehr gut zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

3.2 Meßaufbau

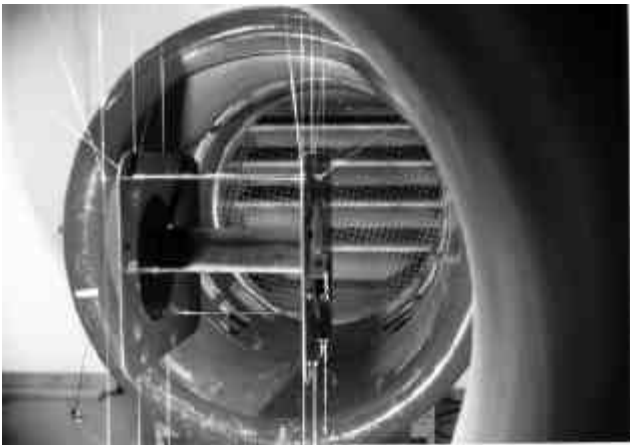


Abb. 7: Meßaufbau mit dem Profil zwischen den Endscheiben und der Drahtaufhängung.

Fig. 7: Wind tunnel model between plates fixed by wires in the centre of the measurement cross section.

(Foto: Richert)

Die Messungen wurden im Windkanal des Institutes für Strömungsmechanik der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Der Windkanal mit einer offenen Meßstrecke besitzt einen Düsendurchmesser von 1,3 m und erreicht eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s. Die Luftkräfte am Windkanalmodell, hier das rechteckige Flügelsegment des INVENTUS-Profils, werden über eine Drahtaufhängung von sechs Kraftmeßdosen erfaßt und über Meßverstärker und Digitalvoltmeter zur Datenweiterverarbeitung an einen PC weitergeleitet. Auftrieb und Widerstand werden somit unmittelbar gemessen, das Nickmoment ergibt sich aus der Differenz der Kräfte an den vorderen und hinteren Aufhängepunkten. Endscheiben verhindern die Umströmung der seitlichen Profilschneidkanten und gewährleisten eine annähernd zweidimensionale Profilmessung (Abb. 7).

3.3 Profil-Vermessungen

Die stationären Messungen wurden bei einer auf die Profiltiefe des Basis-Profils (ohne Eisansatz) bezogenen Reynolds-Zahl von $Re = 0.63 \cdot 10^6$ für einen Anstellwinkelbereich von -10° bis 30° durchgeführt. Im Vorfeld der Vermessung des Basis-Profils und der „vereisten“ Profile wurde der Einfluß der Aufhängung und der Endscheiben durch Kalibriermessungen bestimmt. Die Ermittlung der Kraftbeiwerte erfolgte unter Berücksichtigung einer bei offenen Meßstrecken auftretenden Strahlablenkung sowie des endlichen Strahldurchmessers. Die Meßergebnisse für das Basisprofil sind in Abb. 8 den Ergebnissen der Stuttgarter Messung von 1990 [7] gegenübergestellt. Bei allen dargestellten Beiwerten sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Dafür ist in erster Linie die abweichende Kontur des INVENTUS-Profils verantwortlich. Das abrupte Stallverhalten der Braunschweiger Messung deutet, bedingt durch die veränderte Nasenkontur, auf eine laminare Vorderkantenablösung hin. Untersuchungen mit einer auslaufenden Profilhinterkante - beim INVENTUS-Profil fehlen hier schlicht 15 mm - verbesserten das Verhalten im Bereich des Maximalauftriebs und reduzierten den Nullwiderstandsbeiwert c_{w0} . Weitere Ungenauigkeiten entstehen durch die verwendeten Kanalkorrekturen, die, auf potentialtheoretischen Überlegungen basierend, speziell für hohe Anstellwinkel nicht exakt bestimmt werden können [8], sowie in den Grenzen der Kraftmessung hinsichtlich der Auflösung der zum Beispiel beim Widerstand sehr geringen Kräfte. Im Rahmen vergleichender Untersuchungen zwischen dem Basisprofil und den „vereisten“ Profilen spielen diese Effekte jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

In Abb. 9 sind die Profilbeiwerte der „vereisten“ Profile, bezogen auf die Profiltiefe des Basis-Profils, im Vergleich zu dem jeweiligen Basisprofil dargestellt. Wie erwartet, führt der Eisansatz zu erheblichen Widerstandszunahmen des Profils. Es kommt zu einer deutlichen Abnahme der maximalen Auftriebsbeiwerte $c_{a \max}$ sowie zu einer Verringerung des Auftriebsanstieges $dc_a/d\alpha$. Interessant ist, daß das Stallverhalten beider Eisansätze deutlich gutmütiger verläuft. Offensichtlich verhindert der Eisansatz eine laminare Ablösung nahe der Profilhinterkante. Die Widerstandsverläufe sind konsistent zu den Auftriebsbeiwerten. Bei einer zum Teil erheblichen Widerstandserhöhung durch den Eisansatz im Pre-Stallbereich schwächt sich die Widerstandserhöhung im Stallbereich relativ zum Basisprofil ab. Das auf den 1/4 Punkt bezogene Nickmoment ändert sich im Stallbereich deutlich in Richtung eines Profilaufnickens, das Verhalten ist somit verstärkt

instabil. Tendenziell bestätigen die Braunschweiger Messungen damit die Ergebnisse aus der mit in die Abbildung eingetragenen Stuttgarter Messungen.

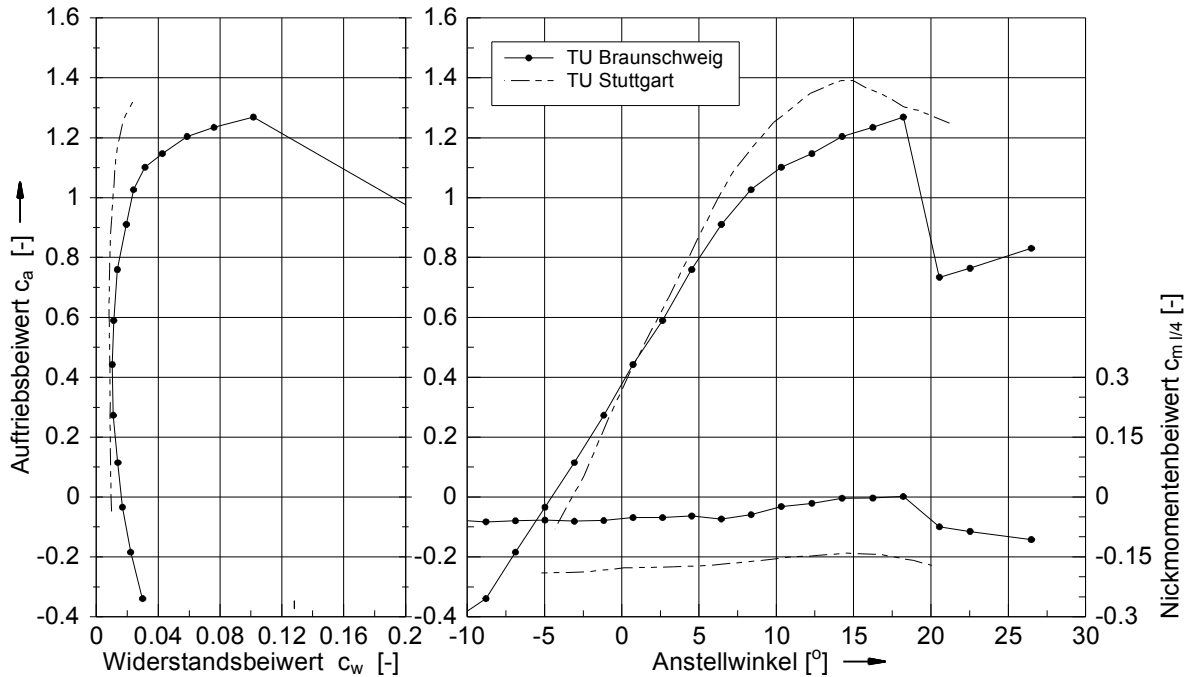


Abb. 8: Gemessene Profilbeiwerte der Basis Profile:
 ---•--- TU Braunschweig, Re-Zahl = $0.63 \cdot 10^6$, 2-D stationär zwischen Endscheiben.
 - - - - - TU Stuttgart, Re-Zahl = $1 \cdot 10^6$, 2-D stationär
 Fig. 8: Measured aerodynamic coefficients of the original non-iced profiles.

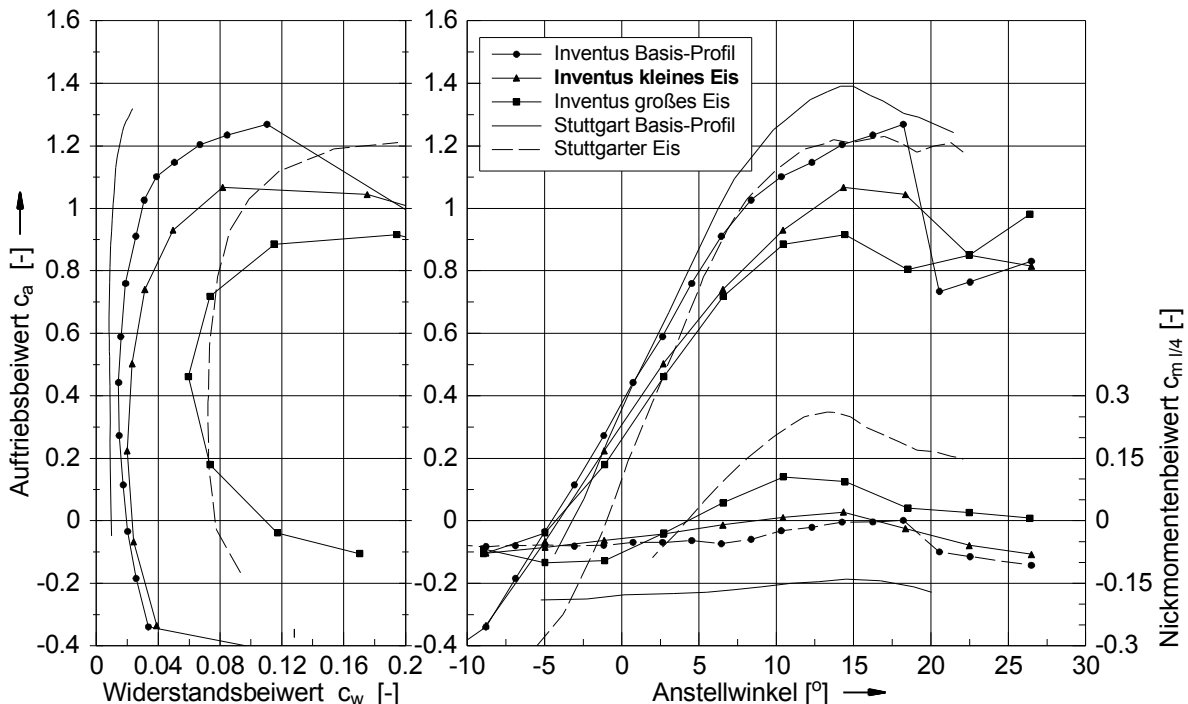


Abb. 9: Gemessene Profilbeiwerte der vereisten Profile im Vergleich zu den Basis Profilen.
 ---•---▲---■--- TU Braunschweig, Re-Zahl = $0.63 \cdot 10^6$, 2-D stationär zwischen Endscheiben.
 - - - - - TU Stuttgart, Re-Zahl = $1 \cdot 10^6$, 2-D stationär

Fig. 9: Measured aerodynamic coefficients of the iced profiles compared against their origins.
 In Abb. 10 sind die prozentualen Veränderungen der Beiwerte gegenüber den unvereisten Profildaten aufgetragen. Während bei den c_a -Werten im linearen Anstellwinkelbereich eine Reduzierung um 20 % nahezu unabhängig von der Eisform ist, ist sowohl bei den Widerstands- als auch bei den

Nickmomentenbeiwerten eine deutliche Verschlechterung der Werte mit wachsendem Eisansatz zu erkennen. Inwiefern eine Zuordnung zu spezifischen Eigenschaften der Eisformen einen empirischen Ansatz zur Bestimmung von durch Vereisung bedingten Leistungseinbußen bei den Profilbeiwerten zuläßt, wird hinsichtlich einer einfachen Modellierung im weiteren Verlauf des WECO - Projekts überprüft. Im Rahmen dieses Vorhabens spielen neben Fragen zum Belastungs- und Leistungsverhalten von WEA unter Vereisungsbedingungen auch Sicherheitsaspekte eine Rolle.

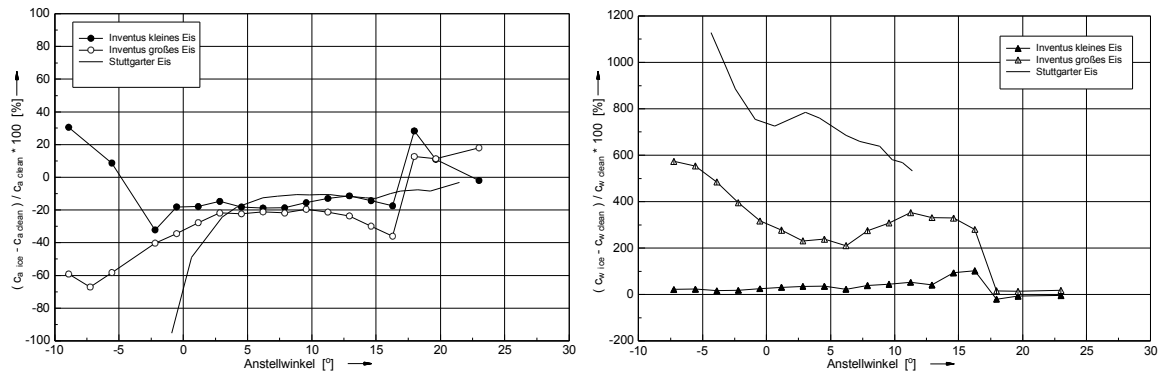


Abb. 10: Prozentuale Veränderung der vereisten Profilbeiwerte gegenüber den Basisdaten.
 Fig. 10: Percentages of the change due to leading edge icing in comparison to the original profiles.

Speziell durch im Betrieb vereiste Rotorblätter auftretender Eisabwurf gefährdet die nähere Umgebung. Eine erste Abschätzung der Gefahrenzone ermöglicht die Bestimmung der „Flugweiten“ von Eisfragmenten. Über die hierfür benötigten Widerstands- und Auftriebsbeiwerte sollte die Vermessung des großen INVENTUS - Eisstückes Auskunft geben.

In Abb. 11 sind die Ergebnisse für das Eisstück in einem Winkelbereich von 0-360° wiedergegeben. Neben den erwarteten hohen Widerstandsbeiwerten erstaunen die Auftriebsbeiwerte mit Werten bis zu $c_a = 0.6$, die das Flugverhalten eines solchen Eisstückes deutlich beeinflussen dürften.

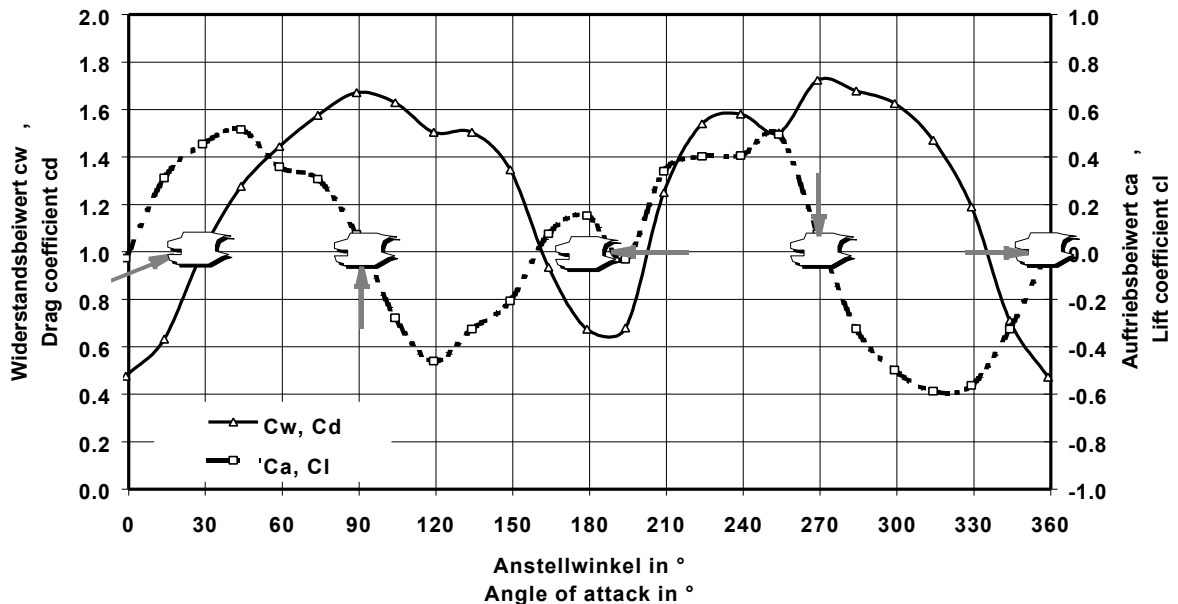


Abb. 11: Beiwerte eines isolierten Eisstückes, Anblasgeschwindigkeit 40 m/s.
 Fig. 11: Aerodynamic coefficients of an isolated ice fragment, wind tunnel speed 40 m/s.

4. Eingefrorene Leistung

Messungen an der DEBRA-25 [7] zeigten schon bei mäßig vereisten Rotorblättern einen sehr früh einsetzenden Stall unterhalb der Nennleistung der kleinen Betriebsstufe, noch bevor die Blattverstellung eingreifen mußte. Andererseits wurde von einem Betreiber berichtet, daß bei geringfügiger Vereisung seine Stall-geregelte Anlage Überleistung produzierte. Inwieweit die im Winter bei niedrigen Temperaturen höhere Luftdichte oder ein durch den Eisansatz geändertes Stallverhalten solche

Effekte bewirkten, konnte nicht geklärt werden. Beides scheint jedoch möglich. Windkanaluntersuchungen vereister Profile können hier wertvolle Eingaben in Simulationen liefern. Berechnungen der DEBRA-25 Leistungskurve unter Verwendung der „Eis“-Polaren ergaben genau die vor der Pitch-Regelung einsetzende Leistungsbegrenzung durch den Stall am Rotorblatt. Die gemessene INVENTUS Leistungskurve, gerechnet mit den aerodynamischen Koeffizienten aus Abb. 9 ohne Blattwinkelverstellung, wird sowohl für den unvereisten Zustand als auch für den Meßpunkt bei starker Vereisung bestätigt (Abb. 12). Für den höheren Windgeschwindigkeitsbereich lagen leider keine Meßergebnisse vor; die gerechnete Leistungskurve zeigt aber das gleiche Verhalten wie schon bei der pitch-geregelten DEBRA-25 beobachtet wurde, daß nämlich bei starker Profilnasenvereisung sehr früh eine Leistungsbegrenzung durch Stall eintritt. Dies ist sogar mit dem geringen Eisansatz (Abb. 12 Kurve mit Dreiecken) der Fall. In einem weiteren Schritt können jetzt die aerodynamischen Lasten und Massenkräfte ermittelt und den unvereisten Werten gegenübergestellt werden.

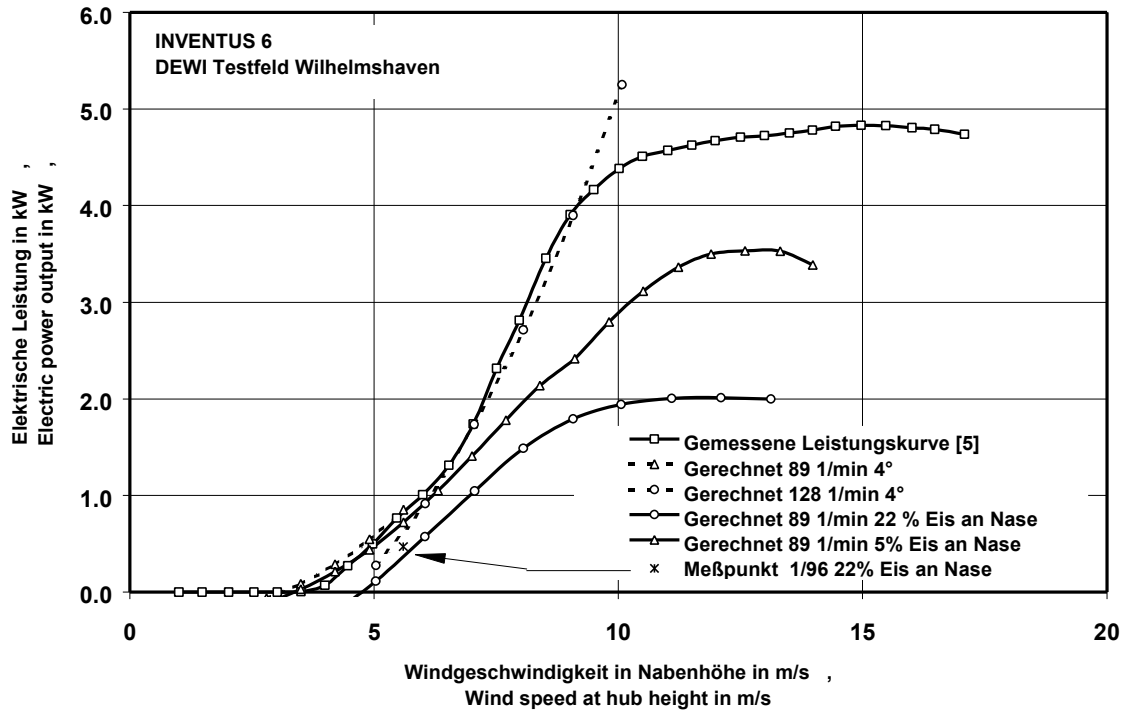


Abb. 12: Gemessene und gerechnete Leistungskurve der INVENTUS 6 mit und ohne Eis.
 Fig. 12: INVENTUS power curve measured and calculated with and without ice accretion.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Windkanaluntersuchungen stellen eine wertvolle Basis für weitere Berechnungen und Simulationen von vereisten Rotorblättern dar und sind darüber hinaus geeignet für Energieverlustprognosen und Belastungsrechnungen für WEA an vereisungsgefährdeten Standorten. Die Daten werden Herstellern und anderen Interessierten zugänglich gemacht. Weiterhin dienen die konservierten und katalogisierten Eisfragmente als „Verifizierungsobjekte“ für Simulationsmodelle, die versuchen, das Wachstum des Eisansatzes an der Profilnase numerisch nachzubilden. Für die meisten Formationen sind auch meteorologische Basiswerte vorhanden. Über weitere Ergebnisse zum Thema Vereisung von Windenergieanlagen wird in den BOREAS Konferenzen regelmäßig berichtet und diskutiert. Die Tagungsbände der im Jahr 1996 stattgefundenen BOREAS III Konferenz in Lappland sind jetzt beim Finnischen Meteorologischen Institut, Helsinki erhältlich. Die nächste Konferenz wird Anfang 1998 im Rahmen des EU-JOULE III Projektes WECO in Finnland stattfinden.

Die Autoren bedanken sich bei der Europäischen Kommission, die durch die Unterstützung der „Vereisungsforschung“ im Rahmen der JOULE Programme die vorgestellten Arbeiten ermöglicht hat, sowie bei der Fachhochschule Wilhelmshaven, an deren Windenergieanlage die Messungen durchgeführt wurden.

6. Literatur

- [1] Seifert, Henry; Tammelin Bengt: Icing of Wind Turbines in Europe. Paper presented at BOREAS III, Wind Energy in Cold Climates. March 19-21, 1996, Saariselkä / Finland. Pages 43-51.
 - [2] Tammelin, Bengt; Sääntti, Kristiina: Wind Energy production in COLD climate - a EU/JOULE III project for 1996-1998. Paper presented at BOREAS III, Wind Energy in COLD Climates. March 19-21, 1996, Saariselkä / Finland. Pages 38-42.
 - [3] Morgan, Colin; Bossanyi, Ervin: Wind Turbine Icing and Public Safety - a Quantifiable Risk? Paper presented at BOREAS III, Wind Energy in Cold Climates. March 19-21, 1996, Saariselkä / Finland. Pages 312-326.
 - [4] Seifert, Henry: Rotorblätter, eiskalt erwischt. In: DEWI - Magazin (1996) Nr. 8, S. 4-13.
 - [5] F. J. L. van Hulle, e.a.: Verification of Design Loads for Small Wind Turbines. Final Report Joule 2 Project CT93-0423, Netherland Energy Research Foundation ECN (Hrsg), ECN-C-96-033B, August 1996.
 - [6] Seifert, Henry: Big Ice on Small WEC. Paper presented at BOREAS III, Wind Energy in Cold Climates. March 19-21, 1996, Saariselkä / Finland. Pages 306-311.
 - [7] Schloz, Cornelia; Seifert, Henry: Additional Loads Caused by Ice on Rotor Blades During Operation. Paper presented at European Community Wind Energy Conference 1990, Sept. 10-14, Madrid / Spain.
 - [8] Lewis, R.I.: Theoretical Simulation of Open Jet Wind Tunnels for Testing Wind Generator Blade Profiles, Wind Engineering Vol. 14, No. 2, 1990.
-