



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

ALPINE TEST SITE GUETSCH

HANDBUCH UND FACHTAGUNG

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

René Cattin, Meteotest

Fabrikstrasse 14, 3012 Bern, rene.cattin@meteotest.ch, www.meteotest.ch

Impressum

Datum: 31. Dezember 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Windenergie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Robert Horbaty, robert.horbaty@enco-ag.ch

Projektnummer: 101'318

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

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

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	13
2. Vereisung an Strukturen.....	15
2.1. Definition.....	15
2.2. Arten der Vereisung	15
2.3. Vereisung von Windkraftanlagen	16
2.4. Meteorological und Instrumental Icing.....	17
2.5. Gängige Normen und Standards.....	18
2.6. Internationale Projekte	19
3. Planung von Windkraftanlagen unter Vereisungsbedingungen.....	20
3.1. Windmessung unter Vereisungsbedingungen	20
3.2. Messmasten	23
3.3. Häufigkeit der Vereisung.....	24
3.4. Unsicherheit / Risikoabschätzung	28
4. Betrieb von Windkraftanlagen unter Vereisungsbedingungen	29
4.1. Vereisung von Windkraftanlagen	29
4.2. Erkennen von Vereisung an Windkraftanlagen	30
4.3. De-Icing Massnahmen	32
4.4. Anti-Icing Massnahmen	33
4.5. Eiswurf.....	34
5. Literaturliste	38
6. Anhang A: Messung der relative Feuchte.....	40
7. Anhang B: Berechnung der Himmelstemperatur	43
8. Anhang C: Webcam für Beobachtung einer WKA	45
9. Anhang D: Eiswurfstudie Gütsch - Methodik	47

Zusammenfassung

Vereisung beeinflusst die Planung und den Betrieb einer Windkraftanlage (WKA) in verschiedener Art und Weise: Eisansatz an den Rotorblättern führt zu einer gestörten Aerodynamik der Flügel und damit zu Produktionseinbussen. Ausserdem entstehen Zusatzlasten und Unwuchten, welche zu Materialermüdung führen. Vereiste Windmessgeräte auf der Gondel einer Windkraftanlage führen zu einem fehlerhaften Betrieb bis hin zur Sicherheitsabschaltung. Schliesslich stellt der Eiswurf von Windkraftanlagen ein Sicherheitsrisiko für Passanten und Servicepersonal dar.

Innerhalb des Schweizer Forschungsprojekts „Alpine Test Site Guetsch“, welches in die europäische COST Action 727: „measuring and forecasting atmospheric icing on structures“ eingebettet ist, wurden auf dem Gütsch oberhalb von Andermatt intensive Vereisungsstudien durchgeführt.

Um die Forschungsergebnisse einem breiteren Publikum zugänglich zu machen, wurde am 21. und 22. Juni 2007 die Fachtagung „Eis & Fels 07“ in Andermatt mit einer Teilnehmerzahl von 43 Personen aus fünf Ländern (CH: 24, D: 9, A: 5, I: 4, DK: 1) durchgeführt.

Zusätzlich werden in diesem Handbuch die gesammelten Resultate sowie die international zugänglichen Forschungsergebnisse in einer verdichteten und für den Windenergie-Planer verständlichen Art und Weise dargestellt. Das Handbuch soll als Grundlage für eine angepasste Planung und einen zuverlässigen Betrieb von WKA unter vereisenden Bedingungen dienen.

Das Handbuch behandelt die folgenden Themen:

- Grundlagen zur Vereisung von Strukturen im Allgemeinen und in Bezug auf Windkraftanlagen (Kapitel 2.1 bis 2.4)
- Gängige Normen und Standards sowie Überblick über die internationale Vereisungsforschung (Kapitel 2.5 und 2.6)
- Windmessungen unter Vereisungsbedingungen – Einfluss der Vereisung auf Sensoren und Messmasten (Kapitel 3.1 und 3.2)
- Bestimmung der Häufigkeit der Vereisung – Messung der Vereisung mit direkten und indirekten Methoden (Kapitel 3.3)
- Effekte der Vereisung auf Windkraftanlagen (Kapitel 4.1)
- Eiserkennung an einer Windkraftanlage (Kapitel 4.2)
- Massnahmen zum Entfernen (De-Icing) und Verhindern (Anti-Icing) von Eisansatz an Windkraftanlagen (Kapitel 4.3 und 4.4)
- Eiswurf (Kapitel 4.5)

Die folgenden Punkte sind von Planern und Betreibern unbedingt zu beachten:

Generell

- Die Planung und der Betrieb einer WKA unter vereisenden Bedingungen führen zu erhöhten Investitions- und Betriebskosten.
- Grundsätzlich gilt, dass in der Schweiz alle Windenergiestandorte in Lagen oberhalb von 1'000 m.ü.M. von Vereisung betroffen sind.
- WKA-Standorte sind in erster Linie von Raureif- oder Klareisbildung aus Wolken und Nebel betroffen, seltener von Nassschnee und Eisregen. Dies gilt speziell in der Schweiz, wo sich die meisten WKA-Standorte auf windexponierten Bergrücken und Pässen befinden.

Windmessungen / Ertragsprognosen

- Windmessungen unter vereisenden Bedingungen sind sowohl an Messmasten als auch auf WKA immer mit vollständig beheizten Anemometern und Windfahnen durchzuführen.
- Zurzeit ist auf dem Markt kein beheiztes Windmessgerät verfügbar, das unter allen Vereisungsbedingungen funktioniert. Ausserdem kann eine Messung auch durch Eisansatz am Auslegerarm beeinflusst werden. Deshalb ist bei der Analyse von Windmessdaten unter vereisenden Bedingungen immer von einer erhöhten Unsicherheit der Messresultate auszugehen.
- Bei der Datenauswertung ist eine sorgfältige Filterung der Messdaten vorzunehmen, um durch Vereisung verfälschte Daten identifizieren zu können (Quervergleiche mit anderen Messhöhen oder Sensoren, Einbezug zusätzlicher Messgrössen oder Eisdetektoren etc.).
- Beim Einsatz von hohen Messmasten ist deren Design in Bezug auf Eislasten genau zu prüfen. Kritisch für den Mast ist der Eisansatz an den Abspannseilen. Im Zweifelsfall soll auf weniger hohe Masten in Kombination mit SODAR oder LIDAR-Messungen zurückgegriffen werden.
- Ertragsgutachten für WKA unter vereisenden Bedingungen haben eine höhere Unsicherheit als in wärmerem Klima, weil die Ertragsverluste durch Vereisung nur schwer vorhersagbar sind.
- Die Kenntnis der Vereisungshäufigkeit bildet die Basis für den Entscheid ob eine WKA mit einem De-Icing System ausgerüstet werden soll. Windmessungen unter vereisenden Bedingungen sind deshalb im Minimum mit einer zusätzlichen Messung der Temperatur und der relativen Feuchte zu ergänzen. Bevorzugt ist aber ein Eisdetektor einzusetzen. Dabei ist auch zu beachten, dass die Häufigkeit und Intensität der Vereisung in der Regel mit der Höhe über Grund zunimmt.

Anlagenwahl / Betrieb der WKA

- An Standorten mit Vereisung ist es unbedingt nötig, die WKA mit einer entsprechenden Sensorik für Eiserkennung und Eisentfernung auszurüsten. Dies ist einerseits nötig, um Beschädigungen der Flügel durch Zusatzlasten und Unwuchten sowie des Generators durch Überproduktion zu vermeiden,

andererseits auch aus Sicherheitsgründen (Eiswurf). Eine derartige Ausrüstung erhöht die Investitionskosten im Vergleich zu einer herkömmlichen WKA.

- WKA-Standorte mit Vereisungsbedingungen sind im Winter in der Regel schlecht erreichbar für Kontroll-, Wartungs- und Servicearbeiten. Dieser Umstand kann die Verfügbarkeit einer WKA reduzieren.
- Der Eiswurf einer WKA ist ein Sicherheitsrisiko sowohl für Servicepersonal wie auch für Personen, die sich zufällig in der Nähe aufhalten. Deshalb sind in der Umgebung der WKA Warnschilder anzubringen und das Servicepersonal zur Vorsicht zu mahnen. Für die Platzierung von Hinweisschildern ist zu berücksichtigen, dass die Sichtweite häufig stark eingeschränkt ist, wenn die meteorologischen Bedingungen für die Eisbildung gegeben sind.
- Vereiste Rotorblätter führen zu einer höheren Lärm-Emission der WKA. Diesem Umstand ist auch bei der Erstellung des Lärmgutachtens Rechnung zu tragen.
- Die Installation einer Kamera auf der Gondel der WKA liefert hilfreiche Zusatzinformationen für Betreiber und Servicepersonal zum Zustand der Rotorblätter.

Resumé

Le problème du givrage peut avoir des répercussions diverses sur la planification et l'exploitation d'une éolienne: la formation de glace sur les pales du rotor a un effet négatif sur leur aérodynamisme entraînant ainsi des pertes de production. Le givrage crée aussi des charges supplémentaires et des déséquilibres qui fatiguent le matériel. Lorsque les instruments de mesure installés dans la nacelle d'une éolienne sont givrés, ils empêchent son bon fonctionnement et peuvent même provoquer un arrêt de sécurité. Finalement, la glace projetée par les éoliennes peut représenter un risque pour la sécurité des passants et du personnel de service.

Dans le cadre du projet d'étude „Alpine Test Site Guetsch“, qui fait partie de l'action COST 727: „measuring and forecasting atmospheric icing on structures“ de la coopération scientifique européenne, des études intensives sur la formation de glace ont été menées au Gütsch au-dessus d'Andermatt.

Afin de rendre les résultats de la recherche accessibles à un large public, un séminaire professionnel a été organisé à Andermatt les 21 et 22 juin 2007 sous le titre „Eis & Fels 07“. Il a réuni 43 personnes de cinq pays (CH: 24, D: 9, A: 5, I: 4, DK: 1).

En outre, l'ensemble des résultats ainsi que les données de la recherche disponibles sur le plan international sont présentés dans un manuel sous une forme concentrée et compréhensible pour les planificateurs dans le domaine de l'énergie éolienne. Ce manuel est un outil de base pour une planification adéquate et une exploitation fiable d'éoliennes dans des conditions de givrage.

Le manuel traite des thèmes suivants:

- Considérations fondamentales sur le givrage de structures en général et plus particulièrement des installations éoliennes (chapitres 2.1 à 2.4)
- Normes et standards usuels ainsi que vue d'ensemble de la recherche internationale sur le givrage (chapitres 2.5 et 2.6)
- Mesures des vents dans des conditions de givrage – influence de la formation de glace sur les senseurs et les mâts de mesure (chapitres 3.1 et 3.2)
- Détermination de la fréquence du givrage – mesure du givrage par des méthodes directes et indirectes (chapitre 3.3)
- Effets de la formation de glace sur les éoliennes (chapitre 4.1)
- Comment reconnaître la formation de glace sur une éolienne (chapitre 4.2)
- Mesures permettant de dégivrer les éoliennes (de-icing) et de prévenir la formation de givre (anti-icing) (chapitres 4.3 et 4.4)
- Projection de glace (chapitre 4.5)

Les points suivants doivent être pris en compte par les planificateurs et les exploitants:

Généralités

- Planifier et exploiter une éolienne sur un site qui présente des conditions de givrage entraîne une hausse des coûts d'investissement et d'exploitation.
- En Suisse, tous les sites d'éoliennes qui se trouvent au-dessus 1'000 m d'altitude sont concernés par le problème de la formation de glace.
- Les sites d'éoliennes sont touchés en premier lieu par le givre ou la glace claire provenant des nuages ou du brouillard, plus rarement par la neige mouillée et la pluie givrante. C'est en particulier le cas en Suisse, où le plus grand nombre de sites se trouve sur des crêtes exposées et des cols.

Mesures des vents / prévisions de rendement

- Dans des conditions de givrage, les vents doivent toujours être mesurés sur les mâts et les éoliennes au moyen de girouettes et d'anémomètres chauffés.
- Actuellement, on ne trouve sur le marché aucun instrument de mesure chauffé qui fonctionne dans toutes les conditions de givrage. Les mesures peuvent aussi être influencées par la formation de glace sur le bras articulé. C'est pourquoi il faut toujours prendre en compte un plus grand degré d'incertitude lorsqu'on analyse des données mesurées dans des conditions de givrage.
- Lors de l'exploitation des données, il convient de filtrer soigneusement les mesures enregistrées afin de pouvoir identifier celles qui sont faussées par le givrage (comparaisons croisées avec des mesures ou des capteurs à d'autres hauteurs, prise en compte de paramètres de mesure supplémentaires ou détecteurs de glace etc.).
- Lorsqu'on utilise des mâts de mesure hauts, il faut déterminer où les charges dues à la formation de glace pourraient poser des problèmes. Les endroits critiques sont les câbles de hauban. En cas de doute, il vaut mieux utiliser des mâts moins hauts en combinaison avec des mesures effectuées avec des systèmes SODAR ou LIDAR.
- Les études de rendement réalisées sur des éoliennes soumises à des conditions de givrage font apparaître un plus grand degré d'incertitude que lorsque le climat est plus chaud. Il est en effet difficile de prévoir les pertes de rendement dues à la formation de glace.
- Pour décider s'il convient d'équiper une éolienne d'un système de dégivrage (de-icing), il faut connaître la fréquence des événements de givrage. Lorsqu'on mesure la vitesse du vent dans des conditions givrantes, il faut donc compléter les données en mesurant au moins la température et l'humidité relative de l'air. La meilleure option est toutefois d'utiliser un détecteur de givre en tenant compte du fait que la fréquence et l'intensité de la formation de glace augmentent généralement avec la hauteur.

Choix de l'installation / exploitation de l'éolienne

- Sur les sites exposés au givrage, il est indispensable d'équiper les éoliennes d'un système permettant de détecter et d'enlever le givre. Il s'agit d'éviter que les pales soient endommagées par des charges supplémentaires et des déséquilibres ou que le générateur subisse des pannes dues à une surproduction. Il faut également assurer la sécurité (projection de glace). Un tel équipement augmente les frais d'investissement par rapport au coût d'une éolienne normale.
- En règle générale, les sites exposés au givrage sont difficilement accessibles en hiver pour les travaux de contrôle, d'entretien et de service, ce qui peut réduire le taux de disponibilité d'une éolienne.
- La projection de glace d'une éolienne représente un risque pour la sécurité du personnel de service ainsi que de toute personne qui se trouve à proximité. C'est pourquoi des panneaux de mise en garde doivent être installés. Pour déterminer l'emplacement des panneaux, il faut tenir compte du fait que la visibilité est souvent réduite lorsque les conditions météorologiques sont propices à la formation de glace.
- Les émissions de bruit d'une éolienne sont plus importantes quand les pales du rotor sont givrées. Il faut également tenir compte de ce facteur dans le cadre de l'étude sur le bruit.
- L'installation d'une caméra sur la nacelle de l'éolienne fournit des informations supplémentaires utiles pour les exploitants et le personnel de service sur l'état des pales du rotor.

Abstract

Icing has a strong effect on the planning and the operation of wind turbines: It influences the aerodynamics of the blades and causes production losses. Moreover, additional ice loads lead to extreme and fatigue loads. Iced wind measurement sensors at the wind turbine's nacelle lead to erroneous behaviour and security stops. Finally, ice throw represents a significant safety risk for pedestrians and service personnel.

Within the Swiss research project „Alpine Test Site Guetsch“, extensive icing studies were carried out at the Guetsch site near Andermatt. The project was embedded in the COST Action 727 “measuring and forecasting atmospheric icing on structures”.

To make the results available to a wider audience, the workshop “Eis & Fels 07” was held in Andermatt on June 21 and 22, 2007. 43 participants from five countries attended the workshop (CH: 24, D: 9, A: 5, I: 4, DK: 1).

In addition, the results as well as the findings of the international research activities are summarized as guidelines in this report in a dense and understandable way for planners of wind energy projects. These guidelines shall act as a basis for adapted planning and reliable operation of wind turbines under icing conditions.

The present document treats the following subjects:

- Information about icing on structures in general and with respect to wind turbines (chapter 2.1 to 2.4)
- Available standards and overview of international research activities (chapter 2.5 and 2.6)
- Wind measurements under icing conditions – influence of icing on instruments and measurement towers (chapter 3.1 and 3.2)
- Estimation of the icing frequency – icing measurements with direct and indirect methods (chapter 3.3)
- Effects of icing on wind turbines (chapter 4.1)
- Ice detection at wind turbines (chapter 4.2)
- Measures to remove (De-Icing) or prevent (Anti-Icing) icing on wind turbines (chapter 4.3 and 4.4)
- Ice throw (chapter 4.5)

The following points are to be taken into consideration by planners and operators:

General

- Planning and operation of wind turbines under icing conditions lead to increased investment and operational costs.
- In general, in Switzerland icing can occur at any site which is located at an altitude above 1'000 m asl.
- Wind turbine sites are mostly affected by rime and clear ice accretion out of clouds and fog, especially in Switzerland, where most of the sites are located on exposed ridges and passes. Wet snow and freezing rain occur less frequently.

Wind measurements / yield assessments

- Wind measurements at masts or wind turbines should always be carried out with fully heated anemometers and wind vanes.
- Currently, no instrument is available on the market which is capable of measuring wind speed correctly under all icing conditions. Moreover, even an instrument that is free of ice can be influenced by ice accretion on the mounting boom. Therefore, an increased uncertainty has to be applied for every analysis of wind data measured under icing conditions.
- When analysing data which was measured under icing conditions, the dataset has to be filtered very carefully in order to identify falsified data (cross-checks with other sensors from other levels, use of additional parameters or of ice detectors etc.).
- When using high measurement masts, it is essential to carefully review their design regarding ice loads. Ice accretion on the guy wires of the tower is usually most critical. In case of doubt, lower masts should be used in combination with SODAR or LIDAR measurements.
- Yield assessments under icing conditions have a higher uncertainty than in warmer climates as the production losses due to icing are difficult to estimate.
- Information about icing frequency is the basis for the decision whether a wind turbine has to be equipped with a de-icing system or not. Therefore, wind measurements should be supplemented with additional measurements of temperature and relative humidity at least. Preferably, an ice detector should be used. Furthermore, it should be taken into consideration that intensity and frequency of icing increase as a function of height above ground.

Turbine choice / operation

- At sites with icing conditions, wind turbines have to be equipped with instruments for the detection and the removal of ice. On one hand, this is necessary in order to avoid damage of the blades due to additional loads and imbalances as well as damage of the generator due to over production, on the other hand for safety reasons (ice throw). The use of such instrumentation will increase the investment costs compared to a common wind turbine.

- Wind turbine sites with icing conditions are generally hard to reach in winter-time for control or maintenance works. This might lead to a lower availability of the wind turbine.
- Ice throw off a wind turbine represents a significant safety risk for service personnel as well as pedestrians. Therefore, warning signs should be installed in the proximity of the wind turbine. Additionally, service personnel should be warned. When placing warning signs, keep in mind that the visibility under icing conditions is usually very low.
- Iced wind turbine blades lead to higher noise emissions. This has to be considered in noise assessments.
- The installation of a camera system on the nacelle of a wind turbine delivers useful additional information about the state of the rotor blades for operators and service personnel.

1. Einleitung

Die Nutzung der Windenergie hat sich längst aufs Binnenland ausgeweitet und ist jüngst auch im Alpenraum zur Option geworden. Heute wird diese Entwicklung durch die erhöhte Nachfrage nach erneuerbarer Energie beschleunigt. Für Hersteller, Planer und Betreiber von Windkraftanlagen im Gebirge sind komplexe Geländestrukturen, turbulente Winde und die Vereisung aber nach wie vor eine grosse Herausforderung.

In der Schweiz ist die Nutzung der Windenergie in der Regel nur an erhöhten, exponierten Standorten rentabel. Dies hat zur Folge, dass Windenergie-Standorte in der Schweiz grösstenteils in Regionen liegen, in welchen mit Vereisung gerechnet werden muss. Hinzu kommt, dass in der Schweiz der Grossteil des Windstroms im Winterhalbjahr, also unter Vereisungsbedingungen, produziert wird.

Die Vereisung von Windkraftanlagen führt zu einer gestörten Aerodynamik der Flügel und damit zu Produktionseinbussen. Vereiste Windmessgeräte auf der Gondel einer Windkraftanlage führen zu einem fehlerhaften Betrieb bis hin zur Sicherheitsabschaltung. Eisansatz an den Rotorblättern erzeugt Zusatzlasten und Unwuchten welche zu Materialermüdung führen. Schliesslich stellt der Eiswurf von Windkraftanlagen ein Sicherheitsrisiko für Passanten und Servicepersonal dar.

Zur Verbesserung der Entscheidungsgrundlage für die Installation von neuen Windkraftanlagen unter vereisenden Bedingungen wurde 2001 das Forschungsprogramm der Internationalen Energie-Agentur Annex XIX «Wind Energy in Cold Climates» ins Leben gerufen. Es hat zum Ziel, Informationen zu Betriebserfahrungen unter klimatisch harschen Bedingungen zusammenzutragen, zu systematisieren und darauf basierend einen Praxisleitfaden für Anlagenhersteller und -betreiber sowie Messgerätehersteller zu erarbeiten.

2004 wurde die europäische COST Action 727: „measuring and forecasting atmospheric icing on structures gestartet“, mit dem Ziel, die Kenntnisse über das Phänomen Vereisung auf europäischer Ebene zu vertiefen. Im Rahmen dieser COST Action 727 wurde 2005 das Schweizer Forschungsprojekt „Alpine Test Site Gütsch“ lanciert. Dieses Projekt hat das Ziel, auf dem Gütsch ob Andermatt intensive Vereisungsforschung einerseits an der Enercon E-40 Windkraftanlage, andererseits an der nahe gelegenen Meteostation des Bundesamts für Klimatologie und Meteorologie MeteoSchweiz zu betreiben.

Um die Forschungsergebnisse einem breiteren Publikum zugänglich zu machen, wurde am 21. und 22. Juni 2007 die Fachtagung „Eis & Fels 07“ in Andermatt durchgeführt, mit einer Teilnehmerzahl von 43 Personen aus fünf Ländern (CH: 24, D: 9, A: 5, I: 4, DK: 1). Das Detailprogramm, die Teilnehmerliste, Fotos und die Folien der Präsentationen sowie weitere Publikationen zum Thema können unter [1] abgerufen werden.

Zudem werden im vorliegenden Handbuch die im Projekt „Alpine Test Site Gütsch“ gesammelten Resultate sowie die international zugänglichen Forschungsergebnisse

se in einer verdichteten und für den Windenergie-Planer verständlichen Art und Weise dargestellt. Das Handbuch soll als Grundlage für eine angepasste Planung und einen zuverlässigen Betrieb von WKA unter vereisenden Bedingungen dienen.

2. Vereisung an Strukturen

2.1. Definition

Vereisung an Strukturen ist definiert als Eis- oder Schneeansatz an Objekten, welche der Atmosphäre ausgesetzt sind, zum Beispiel an Windkraftanlagen (WKA), Überlandleitungen, Seilbahnen, meteorologischen Instrumenten oder Telekommunikationsmasten (Abb. 1).



Abb. 1: Die Vereisung an Strukturen betrifft viele Bereiche. Oben links: Wegen Vereisung eingestürzter Mast einer Hochspannungsleitung. Oben rechts: Vereisung am Rotorblatt einer WKA. Unter links: Vereistes Propellernemometer. Unter rechts: Vereisung am Mast einer Seilbahn.

2.2. Arten der Vereisung

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. 2):

- **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 auftaut. Diese Wassertropfen gefrieren beim Auftreffen auf eine Struktur mit einer Oberflächentemperatur unter dem Gefrierpunkt und bilden so eine gleichmässige Klareisschicht.



Abb. 2: Verschiedene Arten der Vereisung. Links: Raureif, Mitte: Klareis, Rechts: Nassschnee

2.3. Vereisung von Windkraftanlagen

WKA-Standorte sind in erster Linie von Raureif- oder Klareisbildung aus Wolken und Nebel betroffen, seltener von Nassschnee und Eisregen. Dies gilt speziell in der Schweiz, wo sich die meisten WKA-Standorte auf windexponierten Bergrücken befinden. Diese begünstigen die Hebung und Abkühlung von feuchter Luft und damit die Bildung von Raureif oder Klareis.

Die Vereisung beeinflusst die Planung und den Betrieb einer WKA in verschiedener Art und Weise und führt damit auch zu erhöhten Investitions- und Betriebskosten:

- Während der Planungsphase einer WKA führt die Vereisung der Anemometer einer Windmessung zu fehlerhaften Ertragsprognosen.

- Ertragsprognosen für WKA unter vereisenden Bedingungen haben eine höhere Unsicherheit als in wärmerem Klima, weil die Ertragsverluste durch Vereisung nur schwer vorhersagbar sind.
- Ungenügend dimensionierte Messmasten können während der Messkampagne wegen Eisansatz einstürzen.
- Bei der Anlagenwahl muss der Einsatz von Eiserkennungsinstrumenten sowie Anti-Icing oder De-Icing Massnahmen berücksichtigt werden.
- Vereisung an den Rotorblättern einer WKA führt wegen der gestörten Aerodynamik bei leichter Vereisung zu einem Produktionsverlust, bei starker Vereisung zum Produktionsstopp.
- Die Zusatzlasten wegen Eisansatz sowie die durch ungleichmässigen Eisansatz hervorgerufene Unwucht führen zu erhöhter Materialbelastung und –ermüdung.
- Klareis kann wegen seiner gleichmässigen Verteilung über den Flügel zu einer Überproduktion führen und damit eine Gefahr für den Generator darstellen.
- Vereisung der Windmessinstrumente auf der Gondel der WKA führen zu einem fehlerhaften Betrieb bis hin zur Sicherheitsabschaltung der WKA. Falsche Messwerte wegen Vereisung können auch zu einer Überproduktion mit Schaden am Generator führen.
- Vereiste Rotorblätter führen zu einer höheren Lärm-Emission der Anlage was sich für Anwohner störend auswirken kann.
- Der Eiswurf einer WKA ist ein Sicherheitsrisiko sowohl für Servicepersonal wie auch für Personen, die sich zufällig in der Nähe aufhalten. Gegebenenfalls muss eine WKA aus Sicherheitsgründen abgeschaltet werden.

2.4. Meteorological und Instrumental Icing

Die Vereisung von meteorologischen Instrumenten oder von einer WKA kann durch folgende Begriffe beschrieben werden [3]:

- **Meteorological Icing M_{icing}** : Zeitraum während dessen die meteorologischen Bedingungen für Eisansatz gegeben sind, das heisst aktiv Eis gebildet wird
- **Instrumental Icing I_{icing}** : Dauer der technischen Störung eines Instruments oder einer WKA durch Vereisung, der Zeitraum während dessen Eis am Instrument vorhanden ist
- **Incubation Time**: Verzögerung zwischen dem Beginn des Meteorological Icing und dem Beginn des Instrumental Icing
- **Recovery Time**: Verzögerung zwischen dem Ende des Meteorological Icing und der Wiederaufnahme des normalen, eisfreien Betriebs eines Instruments oder einer WKA

Abbildung 3 illustriert die obigen Definitionen am Beispiel einer Windmessung. Das gleiche Prinzip gilt aber auch für eine WKA.

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, das Meteorological Icing M_{icing} beginnt. Nach einer gewissen Verzögerung, der Incubation Time, beginnt der Eisansatz am Anemometer, das Instrumental Icing I_{icing} (linke Seite der orangen Box). Die Dauer der Incubation Time ist abhängig von Faktoren wie der Oberflächenbeschaffenheit (gegebenenfalls beeinflusst durch Anti-Icing Massnahmen), der Form sowie der Temperatur der Struktur. Ab dem Beginn des Instrumental Icing sind die Messwerte des Anemometers fehlerhaft bzw. der Betrieb einer WKA gestört. Sobald die meteorologischen Bedingungen für die Eisbildung nicht mehr gegeben sind, ist das Meteorological Icing zu Ende (rechte Seite der blauen Box). Der Eisansatz am Instrument bleibt jedoch weiter bestehen, bis das Eis entweder von selber verschwindet (schmilzt) oder mit geeigneten Massnahmen entfernt wird (manuelle Entfernung, Beheizung, andere De-icing Methoden). Erst dann ist das Ende des Instrumental Icing erreicht (rechte Seite der orangen Box) und das Instrument bzw. die WKA arbeitet wieder normal.

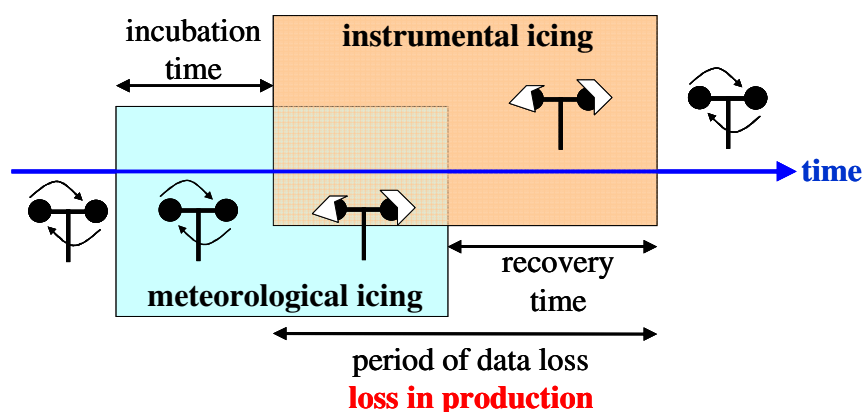


Abb. 3: Beschreibung der Vereisung von meteorologischen Instrumenten oder von einer WKA durch die Begriffe Meteorological Icing, Instrumental Icing, Incubation Time und Recovery Time.

2.5. Normen und Standards

Für den Einsatz von WKA unter vereisenden Bedingungen existieren wenige Standards. Für die Vereisung an Strukturen im Allgemeinen sowie Vereisung an Überlandleitungen existieren jedoch Dokumente, deren Inhalte auch für WKA angewandt werden können:

- **International Electrotechnical Commission IEC:** Die Richtlinie IEC 61400 "Part 1: Design requirements" [4] empfiehlt, dass Vereisungslasten beim Design einer WKA einbezogen werden sollen. Es werden aber keine minimalen Anforderungen definiert. In der Richtlinie IEC 60826 [5] werden An-

gaben zum Design von Überlandleitungen, auch in Bezug auf Vereisung, gegeben.

- **Germanischer Lloyd:** Der Wind-Leitfaden 607 „Zertifizierung von Windenergieanlagen für Extremtemperaturen (hier: Cold Climate)“ [6] legt den Hauptfokus auf den Betrieb von WKA bei extrem niedrigen Temperaturen. Es werden aber auch Anforderungen an Einrichtungen zur automatischen Erkennung von Eisansatz definiert.
- **International Standardisation Organisation ISO:** Die Richtlinie ISO 12494 [7] behandelt die Vereisung von Strukturen im Allgemeinen. Unter anderem ist eine Definition für einen standardisierten Eisdetektor gegeben.

2.6. Internationale Projekte

Innerhalb verschiedener internationaler Forschungs- und Demonstrationsprojekte wurden weitere wichtige Informationen zu Vereisung an Strukturen erarbeitet und dokumentiert:

- **COST Action 727** „measuring and forecasting atmospheric icing on structures“: Die europäische COST Action 727 wurde 2004 gestartet. 2006 wurde ein State-of-the-art Report zum Thema Vereisungsmessungen erstellt ([3], erhältlich unter www.cost727.org)
- **International Energy Agency Task XIX „Wind Energy in Cold Climate“:** Seit 2001 werden innerhalb des Tasks XIX der IEA auf internationaler Ebene Informationen zum Betrieb von WKA in kaltem Klima gesammelt und dokumentiert. Im Rahmen der Arbeiten wurden 2003 die folgenden Berichte erstellt (erhältlich unter arcticwind.vtt.fi):
 - State-of-the-art report „wind energy in cold climates“ [8]
 - Recommendations for wind energy projects in cold climates [9]Zurzeit werden die Berichte aktualisiert. Neue Versionen sollen Ende 2008 verfügbar sein.
- **EUMETNET: Severe Weather Sensors I und II:** Im Rahmen des Projekts „Severe Weather Sensors“ wurden von 1997 bis 2002 in Finnland und in der Schweiz intensive Tests mit meteorologischen Sensoren unter Vereisungsbedingungen durchgeführt. Alle Resultate wurden in einem Schlussbericht festgehalten ([10], erhältlich beim Finnischen Meteorologischen Institut FMI, www.fmi.fi).
- **NEW ICETOOLS:** Innerhalb dieses europäischen Forschungsprojekts wurden von 2002 bis 2004 verschiedene Aspekte der Vereisung von WKA genauer untersucht und in einem Bericht festgehalten ([11], erhältlich beim Finnischen Meteorologischen Institut FMI, www.fmi.fi).
- **WMO/CIMO Wind Instrument Intercomparison:** Im Winter 1992/93 wurde auf dem Mont Aigoual in Frankreich ein extensiver Test verschiedener Windmessinstrumente durchgeführt [12].

3. Planung von Windkraftanlagen unter Vereisungsbedingungen

3.1. Windmessung unter Vereisungsbedingungen

Eine Windmessung wird durch Vereisung beeinflusst (Abb. 4). Dies führt einerseits zu falschen Ertragsprognosen wegen fehlerhafter Messwerte der Windgeschwindigkeit, andererseits zu Problemen mit der WKA-Steuerung. Schon leichter Eisansatz beeinflusst die gemessene Windgeschwindigkeit signifikant, starker Eisansatz führt zum Stillstand des Sensors. Gleiches gilt für die Messung der Windrichtung.



Abb. 4: Links: Vereiste unbeheizte Windmessgeräte an einem Messmast (Matzendorf Stierenberg). Rechts: Vereiste unbeheiztes und eisfreies beheiztes Windmessgerät (Sternstein, Österreich).

Abbildung 5 zeigt den typischen Verlauf einer von Vereisung beeinflussten Messung der Windgeschwindigkeit. Am Mittag des 10. Dezembers beginnen die unbeheizten Sensoren (blau, türkis) tiefere Windgeschwindigkeiten zu messen als der beheizte Sensor (gelb, hellroter Bereich). Gegen Abend des 11. Dezember stehen die unbeheizten Sensoren praktisch still (hellgrüner Bereich). Am Ende des 14. Dezembers steigt die Temperatur, das Eis schmilzt und alle Sensoren funktionieren wieder normal.

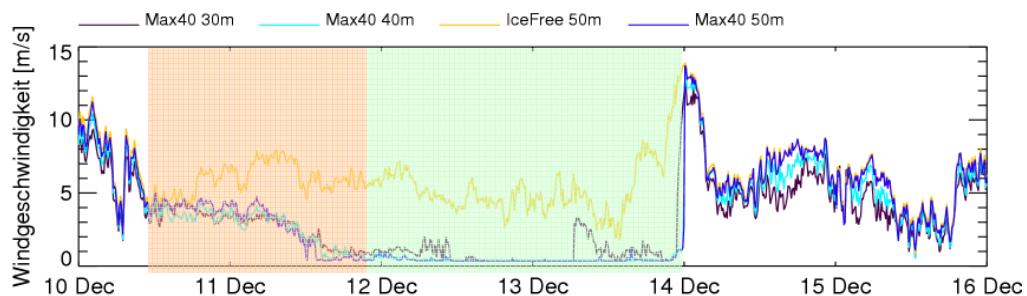


Abb. 5: Einfluss der Vereisung auf eine Windmessung. Gelb: beheizter Sensor, blau/türkis: unbeheizte Sensoren (Schweizer Jura).

Wenn unbeheizte Sensoren eingesetzt werden, können bei der Datenauswertung nur diejenigen Perioden, welche einen Stillstand der Sensoren zur Folge haben (sofern ein Sensordefekt ausgeschlossen werden kann) eliminiert werden (hellgrüner Bereich). Es ist jedoch nicht möglich, die Perioden mit reduzierter Funktion des Sensors herauszufiltern (hellroter Bereich). Werden hingegen nur beheizte Sensoren verwendet werden, geht die Information zur Häufigkeit der Vereisung verloren.

Um eine möglichst zuverlässige Windmessung unter vereisenden Bedingungen zu erhalten, sollten sowohl an den Messmasten als auch auf der WKA selber immer auch beheizte Anemometer und Windfahnen eingesetzt werden. Auf dem Markt sind verschiedene Typen beheizter Anemometer verfügbar:

- Schalenstern-Anemometer, bei welchen sowohl der Schaft als auch die Schalen beheizt sind (z.B. Vaisala WAA252 oder NRG IceFree III)
- Schalenstern-Anemometer bei welchen nur der Schaft beheizt ist (z.B. Thies first class oder Vector Instruments mit Internal Anti-Icing Heater Option HE-4)
- Sonic-Anemometer mit Sensorkopfheizung (z.B. METEK USA 1, Thies Ultrasonic 2D, Vaisala WS425 F/G)
- Andere Messprinzipien wie Pitot-Tube oder Heizdraht Anemometer, die aber in der Windenergie bisher nicht als Standard akzeptiert sind.

Im Rahmen des WMO-Projekts „Wind Instrument Intercomparison“ [12] sowie dem EUMETNET-Projekt „Severe Weather Sensors I and II“ [10] wurden extensive Tests von meteorologischen Messgeräten unter vereisenden Bedingungen durchgeführt. Aus den Resultaten konnte gefolgert werden, dass zurzeit auf dem Markt kein beheiztes Windmessgerät existiert, das unter allen Vereisungsbedingungen funktioniert. Die folgenden Erkenntnisse konnten ausserdem aus diesen Studien gewonnen werden:

- Alle kommerziell erhältlichen Sensoren zeigten irgendwann eine Beeinflussung durch Vereisung.
- Diejenigen beiden Sensoren, welche immer funktionierten, die Rosemount Pitot Tube und der Hydro-tech WS3, werden leider nicht mehr hergestellt (und benötigen eine sehr grosse Heizleistung).
- Anemometer, bei welchen nur der Schaft beheizt ist, werden durch Eisansatz an den Schalen gestört.
- Eisansatz der Sensorarme kann eine Messung mit einem vollständig beheizten Sensor beeinflussen (Abb. 6, links).
- Schmelzwasser von Anemometern mit beheizten Schalen kann sich aussen an den Schalen ansetzen und so die Messung verfälschen (Abb. 6, Mitte). Bei starkem Schneefall kann der Schnee an den beheizten Schalen schmelzen. Das Schmelzwasser kann sich aussen an den Schalen als Eis wieder ansetzen (Abb. 6, rechts). Letzteres kann auch auftreten, wenn eigentlich keine Vereisungsbedingungen gegeben sind.

- Bei Klareis kann sich durch den gleichmässigen Eisansatz am Anemometer die Masse der Schalen ohne Veränderung der Form erhöhen. So können auch zu hohe Windgeschwindigkeiten gemessen werden.



Abb. 6: Verschiedene Vereisungseffekte an Anemometern. Links: Eisansatz am Sensorarm beeinflusst die Messung mit einem beheizten Sensor (Gottshard). Mitte und rechts: Schmelzwasser setzt sich aussen an einem beheizten Anemometer an (Sternstein, Österreich).

Gemäss den oben beschriebenen Resultaten muss also bei einer Windmessung unter vereisenden Bedingungen immer von einer erhöhten Messunsicherheit ausgegangen werden, auch bei der Verwendung von vollständig beheizten Sensoren.

Beheizte Sensoren haben während des Heizbetriebs einen erhöhten Strombedarf, weshalb ein Netzanschluss unabdingbar ist. Oft ist jedoch in unmittelbarer Nähe von Windenergiestandorten kein Stromanschluss und Solarpanel produzieren während der Winterzeit zu wenig Energie. In solchen Fällen kann mit den folgenden Massnahmen der Einfluss der Vereisung auf die Windmessung zumindest reduziert werden:

- Einsatz einer Kleinwindanlage: Mit einer Kleinwindanlage und genügend grossen Batterien kann eine Sensorheizung zumindest an einem Sensor betrieben werden. Um Energie zu sparen, kann das Ein- und Ausschalten der Sensorheizung zudem von einer intelligenten Steuerung basierend auf Batteriespannung und Lufttemperatur geregelt werden.
- Einsatz eines Propelleranemometers (z.B. Young Windmonitor). Propelleranemometer sind tendenziell weniger anfällig auf Vereisung als herkömmliche Schalenstern-Anemometer, vor allem was die Windrichtung betrifft. Diese Sensoren haben aber den Nachteil, dass sie bei Vereisung oft nicht stillstehen, sondern nur langsamer drehen. Dieses Verhalten ist bei der Datenanalyse nicht zu erkennen.
- Einsatz von Anemometern auf verschiedenen Messhöhen. Die Häufigkeit der Vereisung nimmt in der Regel mit zunehmender Höhe über Grund zu; Sensoren auf niedriger Höhe sind weniger oft von Vereisung betroffen. Mit Hilfe des Verhältnisses zwischen Messwerten verschiedener Messhöhen

während der Perioden ohne Vereisung können die Datenausfälle durch Vereisung rekonstruiert werden.

- Vergleich der Messwerte mit den Daten einer nahe gelegenen und gut korrelierenden Wetterstation des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. An den Gebirgs-Stationen der MeteoSchweiz sind in der Regel beheizte Sensoren installiert. Mit Hilfe dieser Daten können durch Vereisung entstandene Datenlücken rekonstruiert werden.

Der Betrieb der Messung mit Netzanschluss und vollständig beheizten Sensoren ist jedoch immer einem Betrieb ohne Sensorheizung vorzuziehen, auch wenn dafür ein langes Stromkabel gezogen werden muss und so höhere Kosten entstehen.

3.2. Messmasten

Bei der Auswahl der Messmasten ist deren Design bezüglich Eislast genau zu überprüfen. Ein Mastkollaps während der Messkampagne hat einen dramatischen Einfluss auf die Messkampagne und deren Kosten und damit auf die gesamte Planung einer WKA: Die Messreihe wird unterbrochen, die Standorte sind im Winter oft nur schlecht zugänglich und ein neuer Mast wie auch neue Sensoren sind in der Regel nicht sofort verfügbar. Ausserdem stellt ein einstürzender Mast ein Sicherheitsrisiko für Passanten, Anwohner oder Verkehrswege dar.

Kritisch für den Mast ist der Eisansatz an den Abspannseilen. Sobald sich auf der dem Wind zugewandten Seite des Seiles Eis bildet, beginnt das Seil sich wegen der ungleichmässigen Gewichtsverteilung zu drehen. Diese Rotation führt dazu, dass sich ein gleichmässiger Eiszylinder um die Seile bildet (Abb. 7, links). Wenn dies an allen Seilen gleichzeitig und auf der ganzen Länge stattfindet, entsteht eine enorme Zusatzlast, welcher der Mast irgendwann nicht mehr gewachsen ist und deshalb einknickt (Abb. 7: rechts). Folgende Punkte sind ausserdem zu beachten:

- Höhere Masten haben längere Seile und sind somit stärker einsturzgefährdet.
- Die Häufigkeit und Intensität der Vereisung nimmt in der Regel mit der Höhe zu, d.h. höhere Masten sind dadurch nochmals grösseren Eislasten ausgesetzt.
- Eine vereisungsabstossende Beschichtung der Seile bringt bei starker Vereisung keinen Schutz.
- Gittermasten sind tendenziell weniger einsturzgefährdet als Rohrmasten, haben aber einen grösseren Einfluss auf die Abschattung der Windmessgeräte.
- Eislast in Kombination mit hohen Windgeschwindigkeiten bildet die grösste Gefahr für einen Messmast.

An Standorten mit vereisenden Bedingungen ist deshalb der Einsatz weniger hoher Masten gegebenenfalls in Kombination mit SODAR oder LIDAR Messungen zu prüfen.



Abb. 7: Links: Zylinderförmiger Eisansatz an Abspannung eines Messmasts (Schwyberg). Rechts: Wegen Vereisung eingestürzter Messmast (Schwyberg).

3.3. Häufigkeit der Vereisung

Die Bestimmung der Häufigkeit der Vereisung ist ein wichtiger Parameter für die Ertragsprognose und später auch für die Anlagenwahl. Bei der Entscheidung, ob eine WKA mit einem De-Icing oder Anti-Icing System ausgerüstet werden soll, spielt auch das Verhältnis zwischen Meteorological und Instrumental Icing eine wichtige Rolle: Ohne zusätzliche Ausrüstung kann die Zeitdauer des Instrumental Icing mit dem Produktionsverlust der WKA gleichgesetzt werden. Wenn ein De-Icing System vorhanden ist, kann die Zeit des Produktionsverlustes näherungsweise auf die Zeitdauer von Beginn des Instrumental Icing bis zum Ende des Meteorological Icing geschätzt werden. Wenn auch noch ein Anti-Icing System eingesetzt wird, kann durch den späteren Beginn des Instrumental Icing der Produktionsverlust weiter minimiert werden.

Die Häufigkeit der Vereisung kann entweder aus Vereisungskarten, aus der Messung zusätzlicher meteorologischer Parameter oder der direkten Messung der Vereisung mit Eisdetektoren abgeschätzt werden.

3.3.1. Vereisungskarten

In der Schweiz ist die Häufigkeit der Vereisung sehr stark von den lokalen topografischen und meteorologischen Bedingungen abhängig. Bis heute existieren nur rudimentäre Vereisungskarten für die Schweiz, welche die Bedingungen nur grob wiedergeben (Abb. 8). Grundsätzlich gilt, dass in der Schweiz alle Windenergiestandorte in Lagen ab 1'000 m.ü.M. von Vereisung betroffen sind.

Stetig wachsende Computerressourcen sowie bessere Parametrisierung der Wolkenphysik in Wettervorhersagemodellen erlauben heute die Simulation von Eis-

satz an Strukturen in horizontalen Auflösungen von bis zu 1 km. Zur Zeit sind innerhalb der europäischen COST Action 727 [2] sowie im Schweizer Forschungsprojekt „MEMFIS: measuring, modelling and forecasting ice loads on structures“ [13] Vorarbeiten im Gang, welche es im Laufe der nächste ein bis zwei Jahre möglich machen werden, detailliertere Vereisungskarten auf der Basis von Wettervorhersagemodellen zu berechnen.

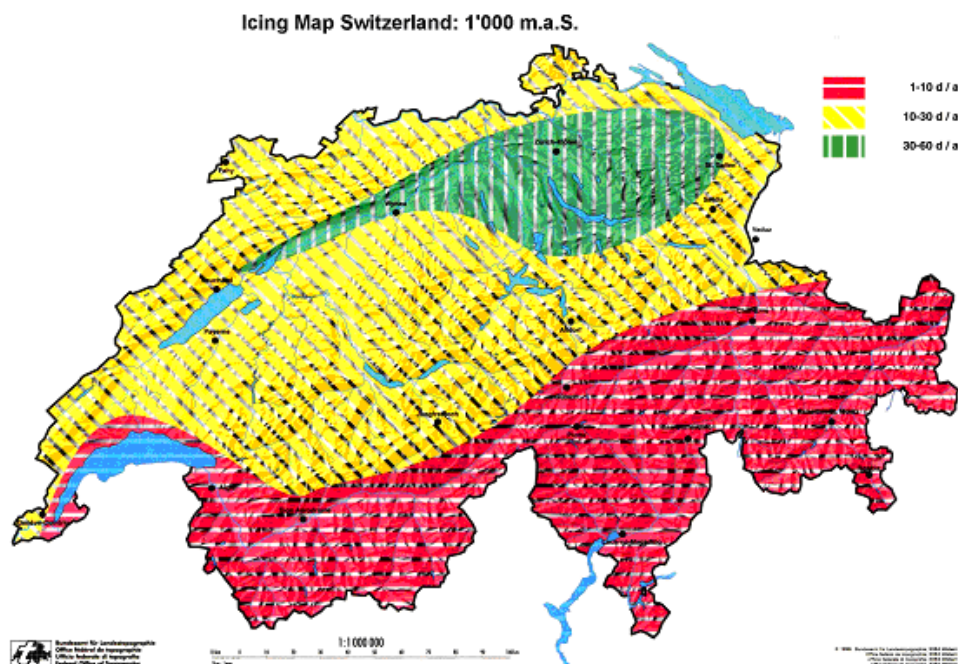


Abb. 8: Karte der Häufigkeit der Vereisung auf 1'000 m über Meer in der Schweiz.

3.3.2. Meteorologische Parameter

Die folgenden meteorologischen Parameter können mit geringem Zusatzaufwand gemessen werden und liefern zusätzliche Informationen für die Bestimmung des Vereisungsrisikos, für die Filterung fehlerhafter Winddaten sowie für die Unterscheidung zwischen Meteorological und Instrumental Icing. Keine dieser Methoden kann aber einen Eisdetektor ersetzen. Es gilt ausserdem zu beachten, dass die Vereisungshäufigkeit mit der Höhe über Grund zunimmt und derartige Messungen deshalb möglichst nahe an der Nabehöhe der zukünftigen WKA durchgeführt werden sollten.

- **Vergleich beheiztes und unbeheiztes Anemometer:** Mit dieser Methode kann die Gesamtdauer des Instrumental Icing bestimmt werden. Es ist jedoch nicht möglich, Angaben über die Häufigkeit des Auftretens von Vereisungsbedingungen (Meteorological Icing) zu machen.

- **Temperatur:** Zusätzliche Temperaturmessungen liefern wertvolle Informationen über das Auftreten von Extremtemperaturen am Standort, welche bei der Planung auch berücksichtigt werden müssen. Es ist jedoch nicht möglich, daraus direkt Aussagen zur Häufigkeit der Vereisung zu machen.
- **Temperatur und relativ Feuchte:** Aus der Messung von Temperatur und relativer Feuchte kann eine grobe Abschätzung der Häufigkeit von Vereisungsbedingungen (Meteorological Icing) gemacht werden (z.B. wenn die Temperatur kleiner 0°C und die relative Feuchte grösser 95% ist). Die für das Auftreten von Vereisung entscheidenden Parameter Wolkenwassergehalt sowie Tröpfchengrösse und -verteilung werden jedoch durch eine Messung der relativen Feuchte nicht vollständig wiedergegeben. Eine zusätzliche Schwierigkeit liegt darin, dass die Messung der relativen Feuchte bei Temperaturen unter 0°C schwierig ist [14] und von vielen Sensoren nicht korrekt durchgeführt wird. In Anhang A wird näher auf diese Problematik eingegangen und es werden Lösungsvorschläge vorgestellt.
- **Langwellige einfallende Strahlung:** Wenn ein Standort bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt innerhalb der Wolken liegt, tritt mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Vereisung ein. Aus der Messung der langwelligen einfallenden Strahlung (Wärmestrahlung aus der Atmosphäre) kann bestimmt werden, ob ein Standort in den Wolken liegt oder nicht. Mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes kann aus der einfallenden Wärmestrahlung die Temperatur des emittierenden Körpers bestimmt werden (Himmelstemperatur). Ist diese Himmelstemperatur deutlich unter der Lufttemperatur, liegt die Wolkenbasis höher als der Messstandort oder es ist wolkenlos. Ist die Differenz zwischen Luft- und Himmelstemperatur sehr klein ($< 1^{\circ}\text{C}$), liegt die Messung mit grossen Wahrscheinlichkeit innerhalb der Wolken. Die genaue Berechnungsmethode ist in Anhang B angegeben.

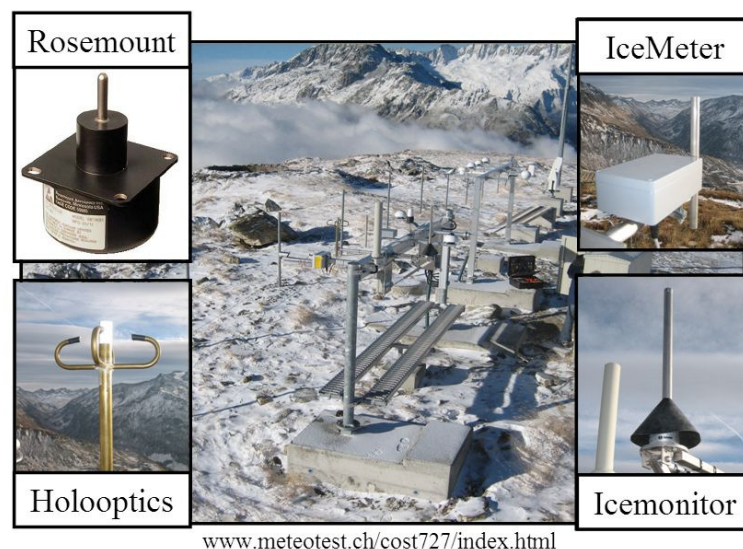
3.3.3. Eisdetektoren

Auf dem Markt existieren verschiedene Instrumente die das Auftreten von Vereisung messen. Leider gibt es zurzeit kein Instrument auf dem Markt, das die Vereisung zuverlässig und automatisch messen kann. Auch hier ist zu beachten, dass die Vereisungshäufigkeit mit zunehmender Höhe über Grund zunimmt und deshalb eine derartige Messung möglichst nahe an der Nabenhöhe der zukünftigen WKA durchgeführt werden sollte. Im Rahmen des Projekts „Alpine Test Site Gütsch“ wurden auf dem Gütsch folgende Sensoren getestet ([15], Abb. 9):

- **Rosemount/Goodrich 0871LH1 Eisdetektor (USA)** [16]: Dieser Sensor basiert auf einem mit 40 kHz vibrierenden kleinen Finger. Setzt sich Eis an, ändert die Frequenz, was vom Sensor erkannt wird. Das Instrument wird daraufhin beheizt, bis die Frequenz sich wieder normalisiert hat. Auf diese Weise kann ein Ja/Nein Signal zum Vorhandensein von Vereisung (Meteorological Icing) gemessen werden. Tests auf dem Gütsch und an anderen Stationen zeigten, dass dieser Sensor generell gut funktioniert. Bei starker Vereisung ist jedoch die Heizleistung des Sensors zu schwach um das Eis

vollständig abzuschmelzen. So bildet sich, unterstützt vom Schmelzwasser des Sensors, ein „Eiskäfig“ und die Vereisung wird nicht mehr korrekt aufgezeichnet. Ein weiteres Problem ist die Eisbildung am Sensorarm, welche bei starker Vereisung auf den Sensor übergreift. In der Schweiz ist ein Sensor dieses Typs an der Teststation auf dem Gütsch installiert

- **Saab IceMonitor Mk1** (SWE) [17]: Dieser Sensor besteht aus einem vertikal montierten, frei rotierenden Zylinder (gemäss ISO 12494, [7]). Sobald Vereisung auftritt, beginnt der Sensor auf Grund des unsymmetrischen Eisansatzes zu rotieren, so dass sich ein Eiszyylinder bildet, dessen Gewicht laufend gewogen wird. Die ersten Tests verliefen viel versprechend, inzwischen aber traten Probleme mit der Elektronik auf, Saab hat für Januar 2009 ein verbessertes Instrument in Aussicht gestellt. Zurzeit sind in der Schweiz vier derartige Instrumente im Einsatz.
- **Holooptics** (SWE) [18]: Dieser Sensor bestimmt die Vereisung aus der Reflektion eines infraroten Lichtstrahls von einem Reflektor. Das auf dem Gütsch getestete Instrument zeigte im Labor viel versprechende Resultate, war aber mechanisch den Bedingungen auf dem Gütsch nicht gewachsen. Das auf dem Gütsch getestete Gerät wurde demontiert und an den Hersteller zurückgeschickt.
- **IceMeter** (CZ) [19]: Dieses Instrument aus Tschechien misst die Eislast an einem Zylinder. Es erwies sich aber im automatischen Betrieb als sehr unzuverlässig [15, 35]. Das auf dem Gütsch getestete Gerät wurde demontiert und an den Hersteller zurückgeschickt.



www.meteotest.ch/cost727/index.html

Abb. 9: Die auf dem Gütsch getesteten Eisdetektoren

Weitere, auf dem Gütsch nicht getestete, Sensoren zur Eiserkennung:

- **Infralytic** (D) [20]: Dieser Sensor basiert auf dem Prinzip der Reflektion von infrarotem Licht welches durch ein Glasfaserkabel an die Oberfläche der

Struktur geführt wird. So kann das Auftreten von Eis am Ende des Lichtleiters detektiert werden.

- **Labko** (FIN) [21]: Der Sensor nutzt ein Ultraschallverfahren. Ein Draht schwingt ohne Eis bei einer gewissen Amplitude. Setzt sich Eis an, ändert die Amplitude, was vom Sensor erkannt wird. Das Instrument wird daraufhin beheizt, bis die Frequenz sich wieder normalisiert hat.

3.4. Unsicherheit / Risikoabschätzung

Bei der Erstellung von Energieertragsprognosen für Standorte mit vereisenden Bedingungen sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Bei der Datenauswertung ist eine sorgfältige Filterung der Messdaten (Quervergleiche mit anderen Messhöhen oder Sensoren, Einbezug zusätzlicher Messgrößen oder Eisdetektoren etc.) vorzunehmen, um durch Vereisung verfälschte Daten zu eliminieren.
- Bei der Abschätzung der Vereisungshäufigkeit aus meteorologischen Parametern oder mit Eisdetektoren ist ebenfalls eine Unsicherheit einzurechnen.
- Wenn für die Windmessung unbeheizte oder schwach beheizte Sensoren eingesetzt wurden, muss die Unsicherheit der Ertragsprognose dementsprechend erhöht werden.
- Auch vollständig beheizte Sensoren können von Vereisung beeinflusst werden. Deshalb sollte bei der Planung von WKA unter vereisenden Bedingungen immer von einer erhöhten Unsicherheit der Ertragsprognose ausgegangen werden.
- Bis heute sind nur wenige Erfahrungen mit dem Betrieb von WKA unter vereisenden Bedingungen vorhanden. Aus diesem Grund sollte eine Ertragsprognose ganz generell von konservativen Werten ausgehen.
- WKA-Standorte mit Vereisungsbedingungen sind im Winter in der Regel schlecht erreichbar für Kontroll-, Wartungs- und Servicearbeiten. Diesem Unstand muss bei der Berechnung der Verfügbarkeit Rechnung getragen werden.
- Bis heute liegen keine zuverlässigen Studien zum Produktionsverlust von Windkraftanlagen unter vereisenden Bedingungen vor. Falls keine Messungen vorliegen, kann Tabelle 1 bei der Abschätzung der Verluste helfen [8]:

Tab. 1: Produktionsverlust durch Vereisung.

Häufigkeit der Vereisung [Tage/Jahr]	Jährlicher Produktionsverlust
< 1	Unerheblich
1 – 10	Klein
10 – 30	5 – 15%
30 – 60	15 – 25%
> 60	> 25%

4. Betrieb von Windkraftanlagen unter Vereisungsbedingungen

4.1. Vereisung an Windkraftanlagen

Die Vereisung an WKA betrifft einerseits die Rotorblätter der WKA, andererseits die für die Anlagensteuerung zuständigen Windmessgeräte auf der Gondel (Abb. 10).

Die Vereisung an den Rotorblättern bildet sich hauptsächlich an der dem Wind zugewandten Vorderkante des Flügels. Der Ansatz beginnt in der Regel an der Blattspitze, wo die höchsten Windgeschwindigkeiten auftreten. Durch den im Lee entstehenden Unterdruck ist aber auch eine Eisbildung auf der dem Wind abgewandten Seite des Rotorblatts möglich.



Abb. 10: Typischer Eisansatz auf dem Rotorblatt einer WKA (links, Gütsch) und an den Windmessgeräten auf der Gondel einer WKA (rechts, Feldmoos, Entlebuch).

Sobald sich Eis an den Rotorblättern einer WKA ansetzt, ist die Aerodynamik der Flügel gestört. Dies geschieht schon bei leichtem Eisansatz und führt dazu, dass eine WKA nicht die volle Produktion gemäss der Leistungskurve liefern kann. Abbildung 11 zeigt, wie sich Eisansatz am Rotorblatt auf die Leistungskurve einer WKA auswirkt.

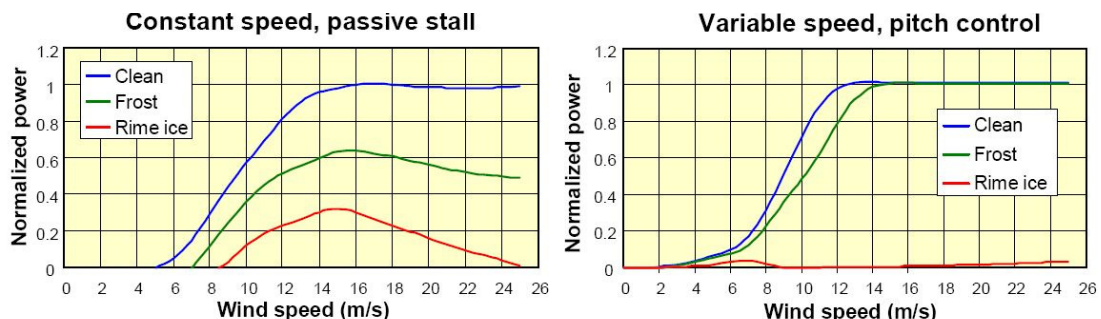


Abb. 11: Auswirkung von Vereisung auf die Leistungskurve einer WKA [22].

Zusätzlich führt der Eisansatz zu einer erhöhten Materialbelastung und damit zu Materialermüdung. Einerseits führt der Eisansatz zu Extremlasten, andererseits, vor

allem wenn einzelne Eisstücke abfallen, zu Unwucht wegen ungleichmässiger Gewichtsverteilung. Schliesslich erzeugt der Betrieb einer WKA mit Eis an den Flügeln eine erhöhte Geräuschemission (Abb. 12).

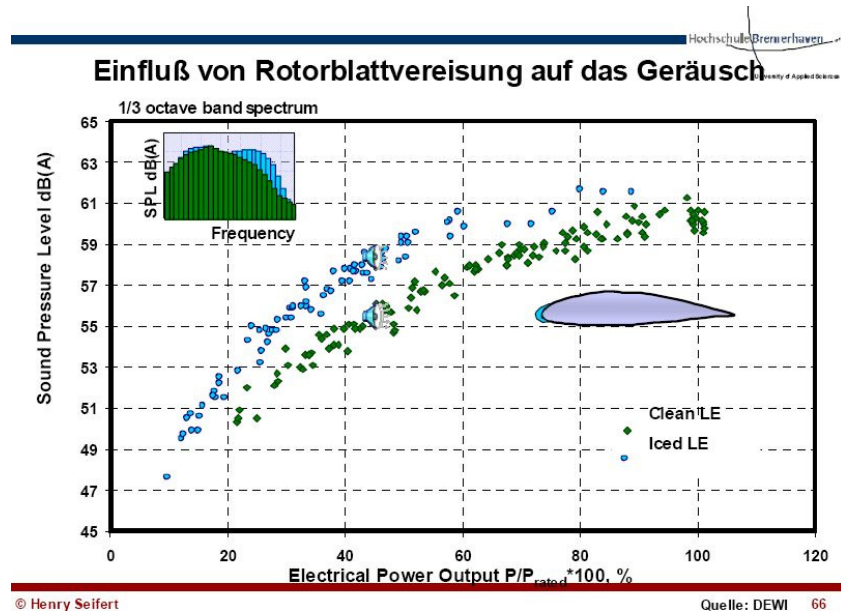


Abb. 12: Erhöhte Geräuschemission einer WKA wegen Vereisung: Grün: Geräuschemission ohne Eis, Blau: mit Eis (Quelle: H. Seifert).

4.2. Erkennen von Vereisung an Windkraftanlagen

Das Erkennen von Eisansatz an einer WKA ist einerseits ein wichtiger Betriebsparameter für die Steuerung der Anlage. Andererseits spielt die Detektion von Eis auch eine wichtige Rolle für die Anlagensicherheit, wenn zum Beispiel Servicepersonal sich einer vereisten Anlage nähern will. Aus diesem Grund ist es an Standorten mit Vereisung nötig, eine WKA mit entsprechender Sensorik auszurüsten. Auf dem Markt werden dazu verschiedene Systeme angeboten:

- **Eisdetektoren auf der Gondel der WKA:** Da die Vereisung auch von der Windgeschwindigkeit abhängig ist und deshalb an den Rotorblättern eher auftritt als an unbewegten Strukturen wie der Gondel, ist der Einsatz von Eisdetektoren auf der Gondel der WKA keine optimale Lösung zur Eiserkennung während des Betriebs. Ausserdem kann mit dieser Methode keine Aussage gemacht werden, ob das Rotorblatt, zum Beispiel nach dem Einsatz einer Rotorblattheizung, noch vereist ist oder nicht.
- **Eisdetektoren auf dem Flügel der WKA:** Die Installation von Lichtleitern oder Lichtschranken im Flügel erlauben die Erkennung von Eisansatz durch Änderung der Reflektion unter Vereisungsbedingungen. Die Firma Infralytic [20] bietet eine solche Lösung an.
- **Vergleich zwischen beheiztem und unbeheiztem Anemometer:** Diese Methode ist ein pragmatischer und einfach zu installierender Ansatz um

Vereisung zu erkennen. Es gelten aber die gleichen Einschränkungen wie bei der oben beschriebenen Eiserkennung durch Eisdetektoren.

- **Vergleich der effektiven Energieproduktion mit der Leistungskurve:** Bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt wird aus dem Vergleich der momentan produzierten Energie und der Windmessung auf der Gondel sowie dem Blattwinkel eine standortspezifische Leistungskurve berechnet. Sinkt bei Temperaturen unter 0°C die Produktion im Vergleich zum Sollwert unter einen bestimmte Schwelle, wird dies als Eisansatz bewertet. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine zusätzliche Sensorik im Flügel benötigt wird. Der Nachteil ist, dass diese Methode im Leerlauf oder bei geringer Produktion der WKA nicht zuverlässig einsetzbar ist. Ausserdem kann nach Abschalten der WKA nicht detektiert werden, ab wann das Rotorblatt wieder eisfrei ist. Dies führt zu einem hohen Risiko für Eiswurf beim automatischen Einschalten der WKA. Die Firma Enercon setzt diese Methode bei Ihren WKA ein. Die Resultate des Projekts „Alpine Test Site Gütsch“ zeigten, dass mit diesem Ansatz ein sicherer Betrieb der WKA gewährleistet werden konnte.
- **Messung von Vibrationen im Flügel:** Die Eigenfrequenzen der Rotorblätter werden während des Betriebs gemessen und aufgezeichnet. Sobald Eis am Flügel ansetzt, ändern diese Frequenzen und der Eisansatz wird erkannt. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass eine schon installierte WKA mit der entsprechenden Sensorik nachgerüstet werden kann. Derartige Systeme werden zum Beispiel von den Firmen IGUS (BLADEcontrol®, [23]) und Fetscher (d.mon [24]) angeboten.
- **Lastmessungen im Flügel:** Hier wird mittels Lastmessungen am Rotorblatt (Dehnungstreifen im Flügel) das Gewicht des Rotorblatts gemessen und eine Gewichtszunahme als Eisansatz taxiert. Auch dieses System kann nachträglich in eine WKA montiert werden und wird zum Beispiel durch das Produkt RMS der Firma Insensys angeboten [25].
- **Kameras:** Die Installation einer auf die Flügel der WKA gerichteten Kamera liefert hilfreiche Information über den Eisansatz an den Rotorblättern für den Betreiber oder das Servicepersonal, vor allem wenn letzteres sich einer WKA für Wartungsarbeiten nähern will [26]. Ausserdem kann der Betreiber vor dem Einschalten der WKA überprüfen ob sich noch Eis an den Flügeln befindet und gegebenenfalls manuell einen zusätzlichen Heizzyklus starten. Für eine automatische Eiserkennung ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet. Auf dem Gütsch wurde ein derartiges System erfolgreich installiert; eine detaillierte Beschreibung findet sich in Anhang C.
- **Messung der Geräuschveränderung:** Eisansatz an den Rotorblättern verändert das Geräusch einer laufenden WKA signifikant. Theoretisch könnte deshalb Eisansatz mit Hilfe von Mikrofonen erkannt werden. Dieser Ansatz wurde aber bisher nicht in die Praxis umgesetzt.

4.3. De-Icing Massnahmen

De-icing bezeichnet den Prozess der Eisentfernung vom Flügel, also Massnahmen, die erst eingeleitet werden, wenn das Eis schon vorhanden ist. In diesem Bereich wurden verschiedene Ansätze entwickelt und getestet, serienmässig sind jedoch kaum Produkte verfügbar. Grundsätzlich werden zwei Ansätze verfolgt:

- **Warmluftheizung im Blattinnern:** Sobald die Anlage Eis detektiert, wird die Produktion gestoppt und während einer gewissen Zeit Warmluft von der Blattwurzel in die Flügel geblasen. Danach wird die Produktion wieder aufgenommen (Abb.13). Die Firma Enercon setzt dieses System an ihren WKA ein.

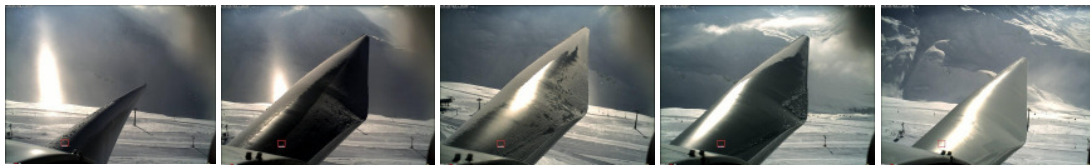


Abb. 13: Heizzyklus der Enercon E-40 WKA auf dem Gütsch. Von Links nach Rechts: Das Eis am Rotorblatt wird erkannt. Die Produktion wird gestoppt, warme Luft wird während 1.5 Stunden in den Flügel geblasen. Danach wird die Produktion wieder aufgenommen.

Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass einerseits der Wärmetransport zu der von Vereisung am stärksten betroffenen Flügelvorderkante nur sehr schwer zu erreichen ist, andererseits aber darf die Temperatur einen bestimmten Wert nicht überschreiten, da sonst das Flügelmaterial Schaden nimmt. Auf dem Gütsch wurde oft beobachtet, dass das Eis während eines Heizzyklus nicht vollständig entfernt werden konnte (Abb. 14). Aus diesem Grund waren oft mehrere Heizzyklen hintereinander nötig, um das Eis vollständig vom Flügel zu entfernen, was den Stillstand der Anlage verlängerte und damit den Produktionsverlust erhöhte.

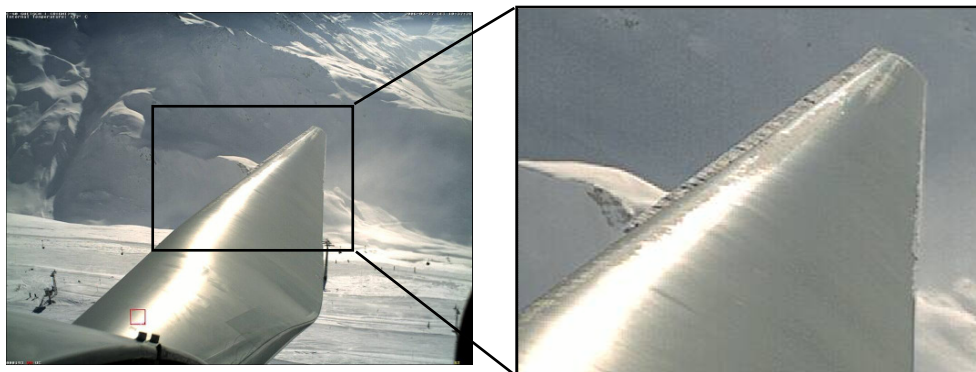


Abb. 14: Trotz Beheizung des Flügels bleibt das Eis an der Vorderkante des Rotorblattes bestehen (Gütsch).

- **Heizelemente in der Profilnase:** Bei diesem Ansatz werden Heizelemente (z.B. Heizfolien) auf der Flügelvorderkante angebracht. Der Vorteil dieser

Methode liegt darin, dass so ein optimaler Wärmetransport zur Flügelvorderkante gewährleistet ist. Zudem können derartige Folien nachträglich auf dem Flügel montiert werden. Auf der anderen Seite wird so die Kontur der Profilnase beeinträchtigt. Zudem kann das unterschiedliche Dehnungsverhalten solcher Folien im Vergleich zum Flügel zu Problemen führen. Schliesslich ist auch der Blitzschutz wegen des Einsatzes von metallischen Leitern im Flügel problematisch. Ein derartiges System der US-Firma Kelly Aerospace wird zurzeit in Schweden an einer Vestas V90 getestet (Abb. 15).



Abb. 15: Heizfolie montiert auf dem Rotorblatt einer Vestas V90 in Schweden.

4.4. Anti-Icing Massnahmen

Anti-Icing bezeichnet Methoden, bei welchen die Eisbildung von Beginn weg unterbunden oder zumindest eingeschränkt werden soll. In diesem Bereich wurden verschiedene Tests durchgeführt; es ist bis heute aber kein serientaugliches Produkt vorhanden. Eine Publikation des Bundesamts für Energie [27] gibt eine gute Übersicht über die vorhandenen Produkte.

- **Schwarz bemalte Flügel:** Schwarz bemalte Rotorblätter nehmen mehr Wärme aus der Atmosphäre auf und sind deshalb weniger anfällig für Vereisung. Ausserdem soll die schwarze Farbe nach Vereisungsereignissen eine schnellere Erwärmung der Rotorblätter durch die Sonne und damit ein schnelleres Abschmelzen des Eises bewirken.
- **Wasserabweisende Beschichtung der Flügel:** Eine wasserabweisende Beschichtung der Flügel soll den Eisansatz unterbinden bzw. vermindern. Verschiedene Tests haben gezeigt, dass es nicht möglich ist, die Vereisung von Rotorblättern nur durch eine Beschichtung zu verhindern [28, 29]. Die Adhäsion von Eis an die Oberfläche kann jedoch durch geeignete Beschichtungen zumindest verringert werden.

- **Nanotechnologie:** Frostschutzproteine und Frostschutzglykoproteine sind die Antwort, welche viele Tiere, Pflanzen und Bakterien einsetzen, um sicherzustellen, dass ihre Körperflüssigkeiten nicht einfrieren. Damit sollen zerstörte Zellmembranen und andere schwere Schäden vermeiden werden. Derartige „anti-freeze“ Proteine verhindern das Eiskristall-Wachstum, im Gegensatz zu eis-phoben Beschichtungen, welche die Haftung von Eis an die Oberfläche verkleinern. An der Zürcher Hochschule Winterthur wird zurzeit an der Entwicklung einer derartigen Beschichtung für den Einsatz auf WKA gearbeitet [27].

4.5. Eiswurf

Sobald sich Eis an den Flügeln einer WKA ansetzt, besteht automatisch das Risiko, dass dieses sich löst und von einer stehenden Anlage herunterfällt oder von einer laufenden Anlage weggeschleudert wird. Dieser so genannte Eisfall oder Eiswurf stellt eine Gefahr für Passanten wie auch für das Servicepersonal dar. Deshalb muss diesem Umstand bei der Planung wie auch beim Betrieb einer WKA unter vereisenden Bedingungen Rechnung getragen werden.

Um das Risiko des Eiswurfs besser einschätzen zu können, wurde ab 2005 im Rahmen des Projekts „Alpine Test Site Gütsch“ der Eiswurf der Enercon E-40 auf dem Gütsch (600 kW, Nabenhöhe 50 m, Rotordurchmesser 40 m) beobachtet und aufgezeichnet. Dabei wurde nach jedem automatischen Einschalten der Blattheizung eine Begehung durchgeführt und dabei das Gelände rund um die WKA nach Eisstücken abgesucht. Die Fundstücke wurden protokolliert sowie fotografiert und in eine Datenbank aufgenommen. Die Methodik ist in Anhang D im Detail dokumentiert.

Abbildung 16 zeigt Beispiele von Fundstücken vom Gütsch, Abbildung 17 die Verteilung des Eiswurfs um die Gütsch-Anlage. Direkt unter der WKA wurden die meisten Eisstücke gefunden. Im Nordostsektor wurden kaum Eisstücke gefunden, während im Nordwestsektor eine deutliche Häufung zu erkennen ist. Dies liegt daran, dass auf dem Gütsch während Vereisungsereignissen häufig Nordwind vorherrscht und deshalb die meisten Eisstücke in Richtung Westen, vom sich abwärts bewegenden Rotorblatt abgeworfen wurden. Diese Resultate zeigen also deutlich, dass das Eiswurfisiko im Umkreis der WKA stark von der Windstatistik während des Auftretens von Vereisung abhängig ist.



Abb. 16: Fundstücke von Eiswurf von der Enercon E-40 auf dem Gütsch.

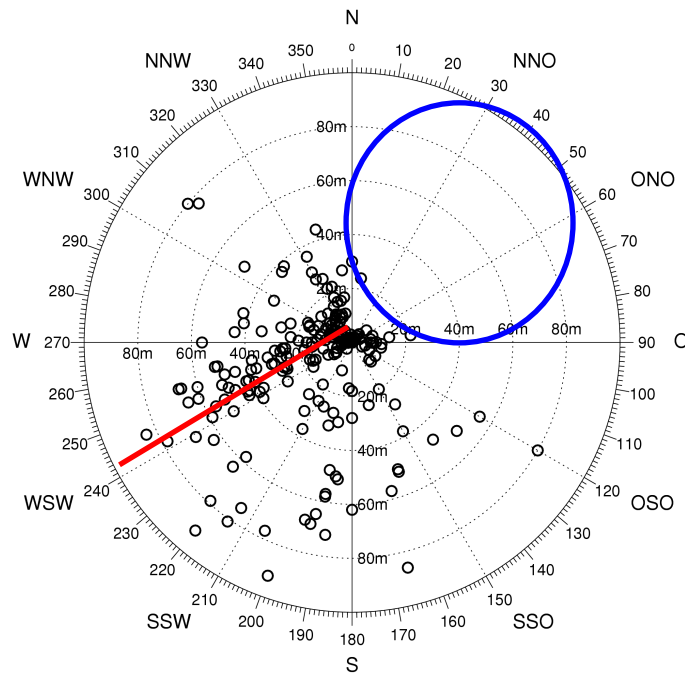


Abb. 17: Verteilung des Eiswurfs um die Enercon E-40 auf dem Gütsch. Im Nord-ostsektor wurden kaum Eisstücke gefunden (blauer Kreis); Im Nord-westsektor ist eine Häufung zu erkennen (rote Linie).

Folgende Resultate konnten zudem aus der Auswertung der über 220 Fundstücken gewonnen werden [30]:

- Eiswurf tritt auf dem Gütsch regelmässig auf, auch während der Sommermonate
- Eisstücke wurden in Distanzen von bis zu 92 m von der WKA gefunden. Die maximale Wurfdistanz von 135 m für eine laufende Anlage, gemäss der Formel auf der nächsten Seite, wurde nicht erreicht.
- Das maximale Gewicht eines Eisstücks lag bei 1.8 kg
- Etwa 50% der Fundstücke wurde in einem Abstand von 20 m oder weniger zur WKA gefunden (Radius Rotorblatt: 20 m). Somit ist in diesem Bereich das Risiko, von Eisstücken getroffen zu werden, am grössten.

- Die Eisstücke müssen nicht zwingend von der laufenden Anlage weggeschleudert werden, sondern können auch von der stehenden Anlage senkrecht nach unten fallen.
- Das grösste Eiswafrisiko besteht während der Beheizung der Flügel oder bei der Wiederaufnahme des Produktion direkt nach der Beheizung der Rotorblätter.
- Nach jedem Vereisungsereignis mit Einschalten der Blattheizung wurden in der Umgebung der WKA abgefallene Eisstücke gefunden.
- Aus Sicherheitsgründen wurden ein Winterwanderweg in grösserer Distanz um die WKA herum geführt und Warnschilder im Umkreis der WKA installiert (Abb.18).



Abb. 18: Auf dem Gütsch installiertes Warnschild gegen Eiswurf.

Für die Planung der WKA kann die maximale Reichweite für herabfallende Eisstücke bei **stillstehender Anlage** mit der folgenden Formel grob geschätzt werden [31]:

$$d = v \frac{(D/2 + H)}{15}$$

mit:

- d = maximale Reichweite des Eiswurfs in m
- v = momentane Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe in m/s
- D = Rotordurchmesser in m
- H = Nabenhöhe in m

Die maximale Eiswurfweite bei **laufender Anlage** kann mit folgender Formel geschätzt werden [31]:

$$d = 1.5 \cdot (D + H)$$

mit:

- d = maximale Reichweite des Eiswurfs in m
- D = Rotordurchmesser in m
- H = Nabenhöhe in m

Zurzeit gibt es in der Schweiz keine gesetzlichen Richtlinien was den sicheren Betrieb einer WKA unter Vereisungsbedingungen betrifft. Gemäss der Publikation des Bundesamts für Energie [32] wird aber folgendes empfohlen:

- Die Vereisung an den Messinstrumenten und den Rotorblättern einer WKA muss zuverlässig erkannt werden können.
- Geeignete De-Icing oder Anti-Icing Massnahmen sind an der WKA vorzusehen, um die Vereisung zu verhindern oder um sie nach dem Auftreten wieder zu entfernen.
- Wenn eine WKA kein De-Icing oder Anti-Icing System besitzt, so ist sie bei Eisansatz abzuschalten.
- Passanten sind mit entsprechenden Warnungen in sicherer Entfernung der Anlage auf die Gefahr des Eiswurfs aufmerksam zu machen und dürfen sich der Anlage nicht weiter nähern. Für die Platzierung von Hinweisschildern ist zu berücksichtigen ist, dass wenn die meteorologischen Bedingungen für die Eisbildung günstig sind, die Sichtweiten häufig stark eingeschränkt sind (Sichtweiten kleiner als 20m).
- Die Einschaltung der Windkraftanlage darf erst wieder erfolgen, wenn die Rotorblätter eisfrei sind.

5. Literaturliste

- [1] <http://www.meteotest.ch/cost727/eisundfels.html>
- [2] COST Action 727: Memorandum of understanding
- [3] Fikke S., Ronsten G., Heimo A., Kunz S., Ostrozlik, M., Persson P.E., Sabata J., Wareing B., Wichura B., Chum J., Laakso T., Sääntti K., Makkonen L., COST-727, Atmospheric Icing on Structures: 2006, Measurements and data collection on icing: State of the Art, Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp.
- [4] IEC 61400-1: "Wind turbine generator systems - Part1: Safety requirements", Second Edition, 1999, ref. number IEC 61400-1:1999(E)
- [5] IEC 60826: Design criteria of overhead transmission lines, 2003.
- [6] GL Wind-Leitfaden 067 Zertifizierung von Windenergieanlagen für Extremtemperaturen (hier: Cold Climate), Revision 2, Ausgabe 2005 (German)
- [7] ISO 12494: Atmospheric icing of structures. ISO/TC 98/SC 3, 2000-07-20
- [8] T. Laakso, H. Holttinen, G. Ronsten, L.Tallhaug, R.Horbaty, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola, B. Tammelin, 2005: State-of-the-art of wind energy in cold climate, IEA Wind Annex XIX, 53 p. <http://arcticwind.vtt.fi>, date of access 20.3.2006
- [9] Wind Energy Projects in Cold Climates, T. Laakso, G. Ronsten, L.Tallhaug, R.Horbaty, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola, 2005: IEA Wind Annex XIX, 37p, 2005, <http://arcticwind.vtt.fi>, date of access 20.3.2006.
- [10] Tammelin, B., Joss, J. and Haapalainen, J., 1998: The Final report on the EUMETNET project "Specification of Severe Weather Sensors". Finnish Meteorological Institute, Helsinki.
- [11] Tammelin, B., Sääntti, K., Dobesch, H., Durstewich, M., Ganander, H., Kury, G., Laakso, T., Peltola, E. and Ronsten, G., 2005: Wind turbines in icing environment: improvement of tools for siting, certification and operation – NEW ICETOOLS. Reports 2005:6, Finnish meteorological Institute.127 p
- [12] WMO Wind Instrument Intercomparison, Mont Aigoual, France 1992-1993: Final report by P. Gregoire and G. Oualid. Instruments and observing methods report; no. 62 Technical document (WMO); no. 859
- [13] www.meteotest.ch/cost727/memfis.html
- [14] L. Makkonen, T. Laakso, „Humidity measurements in cold and humid environments“, Boundary Layer Meteorology (2005) 166: 131-147
- [15] Cattin R., Heimo A., Kunz S., Russi G., Russi M., Tiefgraber M., Schaffner S., Nygaard B.E., 2007, Alpine Test Site Guetsch: Meteorological measurements and wind turbine performance analysis, Proceedings of IWAIS 2007
- [16] <http://www.campbellsci.ca/Catalogue/0871LH1.html>
- [17] <http://www.saabgroup.com>
- [18] <http://www.holooptics.net>
- [19] <http://www.ufa.cas.cz/html/meteo/fog/icemeter.html>
- [20] http://www.infralytic.de/download/EissensorInfralytic_DE.pdf

- [21] http://www.labkotec.fi/en/products/ice_detector_for_wind_turbines
- [22] T. Wallenius, T. Laakso, "The effect of icing on energy production losses of wind turbines with different control strategies",
- [23] <http://www.igus-its.de>
- [24] <http://www.vibration.at>
- [25] <http://www.insensys.com>
- [26] Cattin R., Kunz S., Heimo A., 2006, Alpine Test Site GÜTSCH: Monitoring of a wind turbine under icing conditions, Proceedings of DEWEK 2006
- [27] K. Siegmann, André Kaufmann, M. Hirayama, Anti-freeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Windenergie
- [28] Kimura Shigeo, Takeshi Sato & Kenji Kosugi, 2003: The effect of anti-icing paint on the adhesion force of ice accreted on a wind turbine blade, Proc. of The International Meeting on Wind Power in Cold Climates BOREAS-VI, Finnish Meteorological Institute
- [29] Kimura, S., K. Furumi, T. Sato & K. Tsuboi, 2004: Evaluation of anti-icing coatings on the surface of wind turbine blades for the prevention of ice accretion, Proc. of The 7th International Symposium on Cold Region Development, CD-ROM, No.63, 10-pages
- [30] R. Cattin, S. Kunz, A. Heimo, G. Russi, M. Russi, M. Tiefgraber, "Wind turbine ice throw studies in the Swiss Alps", European Wind Energy Conference Milan, May 2007
- [31] Seifert H., Westerhellweg A., Kröning J., 2003, Risk analysis of ice throw from wind turbines, Proceedings of BOREAS VI
- [32] Dr. Eicher+Pauli AG, 2005: Sicherheit von Windkraftanlagen in der Schweiz – Richtlinien und Standards.
- [33] WMO/CIMO: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Chapter 4, Annex 4.A, Item 17
- [34] R. Cattin, S. Kunz, A. Heimo, G. Russi, M. Russi, "Two years of monitoring of a wind turbine under icing conditions", Proceedings of DEWEK 2008
- [35] H. Winkelmeier, Ch. Tiefgraber, A. Wölfler, "Vereisungsmessung Sternwald: Erfassung und Prognose von Vereisungszeiträumen als Grundlage zur Planung von Windkraftanlagen an vereisungsgefährdeten Standorten", Projektbericht zum Förderungsvertrag GZ A2.10354 vom 04.04.2003 im Rahmen der Umweltförderung der Österreichischen Kommunalkredit AG, Sept. 2006

6. Anhang A: Messung der relative Feuchte

Die relative Feuchte RH bezeichnet das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck der Atmosphäre bei der aktuellen Lufttemperatur. Die relative Feuchte lässt also erkennen, in welchem Grad die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist:

$$RH = \frac{e}{E} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

mit: e = Dampfdruck [hPa]

E = Sättigungsdampfdruck [hPa]

Der Sättigungsdampfdruck E bei einer bestimmten Temperatur kann näherungsweise mit der Magnus-Formel berechnet werden:

$$E = 6.1078 \cdot 10^{\frac{T_{\text{air}} \cdot a}{T_{\text{air}} + b}} \text{ [hPa]}$$

mit: T_{air} = Lufttemperatur [°C]

a und b : Konstanten der Magnusformel:

bei Sättigung **über Wasser**: $a_W=7.5$; $b_W=235.0^\circ\text{C}$

bei Sättigung **über Eis**: $a_E=9.5$; $b_E=265.5^\circ\text{C}$

Gemäss den Richtlinien der World Meteorological Organisation WMO [33] muss eine Messung der relativen Feuchte immer vom Sättigungsdampfdruck in Bezug auf Wasser ausgehen. 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. Abbildung 19 zeigt das Verhältnis zwischen relativer Feuchte und der Temperatur, gemessen mit einem Standardsensor. Es ist deutlich zu erkennen, dass unter dem Gefrierpunkt keine Sättigung der Luft mehr auftritt.

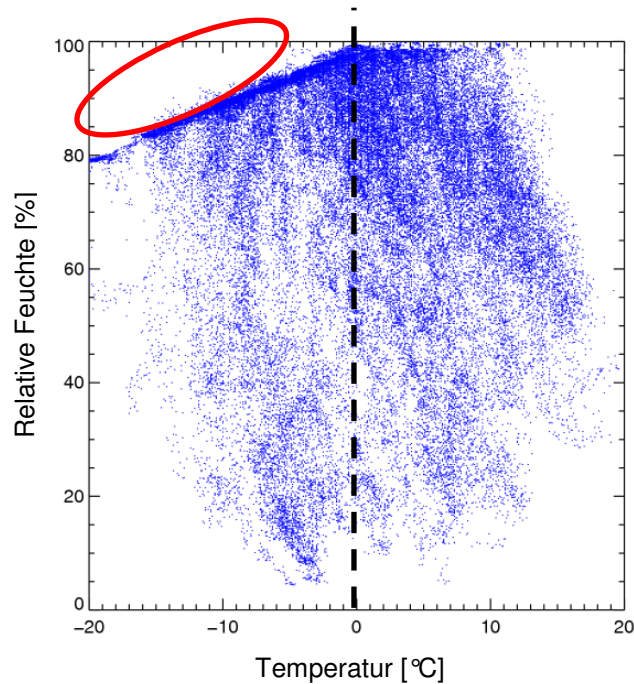


Abb. 19: Bei Temperaturen unter 0°C werden hohe relative Feuchten nicht mehr erreicht (roter Kreis).

Dieser Umstand kann nachträglich näherungsweise korrigiert werden. Dabei wird zuerst aus den Messwerten von Temperatur und relativer Feuchte der Sättigungsdampfdruck über Wasser und daraus der Dampfdruck berechnet. Anschliessend wird die relative Feuchte neu berechnet, diesmal aber unter Verwendung des Sättigungsdampfdrucks über Eis.

Das Vorgehen wird untenstehend an einem Beispiel illustriert. Das Messgerät zeigte eine Temperatur von $T_{Air} = -8^{\circ}\text{C}$ und eine relative Feuchte von $RH = 90\%$ an.

1. Berechnung des Sättigungsdampfdrucks E mit der Magnus-Formel über Wasser

$$E = 6.1078 \cdot 10^{\frac{T_{air} \cdot a_W}{T_{air} + b_W}} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{-8 \cdot 7.5}{-8 + 237.3}} = 3.34 \text{ hPa}$$

2. Berechnung des Dampfdrucks e :

$$e = \frac{RH \cdot E}{100} = \frac{90 \cdot 3.34}{100} = 3.01 \text{ hPa}$$

3. Berechnung des Sättigungsdampfdrucks E mit der Magnus-Formel über Eis

$$E = 6.1078 \cdot 10^{\frac{T_{air} \cdot a_E}{T_{air} + b_E}} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{-8 \cdot 9.5}{-8 + 265.5}} = 3.09 \text{ hPa}$$

4. Berechnung der relativen Feuchte RH:

$$RH = \frac{e}{E} \cdot 100 = \frac{3.01}{3.09} \cdot 100 = 97.4\%$$

Ein weiteres Instrument zur Messung der relativen Feuchte ist der Taupunktspiegel-Hygrometer, welches an den Messstationen des Bundesamts für Klimatologie und Meteorologie MeteoSchweiz eingesetzt wird. Die Luft wird über einen kleinen Spiegel geleitet, der thermoelektrisch abgekühlt wird. Beginnende Kondensation (Tau- oder Frostbildung) auf der Spiegeloberfläche wird über ein optisches System durch die Veränderung der Reflektionseigenschaften des Spiegels erkannt. Über einen Regelkreis wird die Temperatur des Spiegels genau an dem Punkt gehalten, an dem die Kondensation des Wassers aus dem feuchten Gas gerade einsetzt. Diese so genannte Taupunkttemperatur ist ein Mass für den absoluten Feuchtegehalt des Gases. Die MeteoSchweiz setzt das Gerät Thygan der Firma Meteolabor ein (www.meteolabor.ch, Abb. 20).



Abb. 20: Thygan Taupunktspiegel-Hygrometer der Firma Meteolabor.

7. Anhang B: Berechnung der Himmelstemperatur

Ob sich ein Standort in einer Wolke befindet oder nicht kann durch einen Vergleich der Himmelstemperatur mit der Umgebungstemperatur herausgefunden werden. Die Himmelstemperatur wird mit dem Gesetz von Stefan Boltzmann aus der gemessenen langwelligen Einstrahlung berechnet:

$$T_{Sky} = \sqrt[4]{\frac{L \downarrow}{\sigma}} - 273.15 \quad [^{\circ}C]$$

mit: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ = Stefan-Boltzmann-Konstante

$L \downarrow$ = Langwellige Einstrahlung [W/m^2]

Die langwellige einfallende Strahlung kann mit einem so genannten Pyrgeometer gemessen werden. Im Rahmen des Projekts „Alpine Test Site Gütsch“ wurde Auf dem Gütsch auf der Gondel der WKA ein Sensor der Firma Kipp&Zonen vom Typ CG3 installiert. Abbildung 21 zeigt den installierten Sensor.

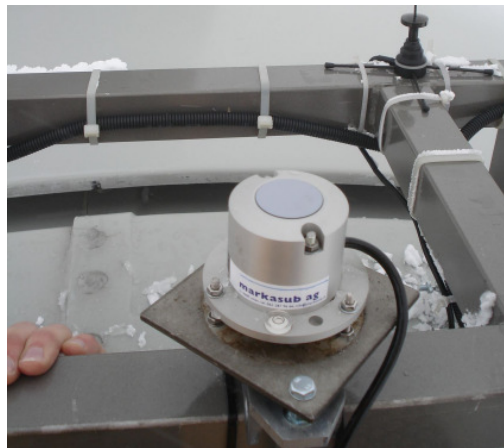


Abb. 21: Das auf dem Gütsch installierte Pyrgeometer CG3 der Firma Kipp&Zonen zur Messung der langwelligen einfallenden Strahlung.

Ist die Himmelstemperatur deutlich tiefer als die Lufttemperatur, liegt die Wolkenbasis höher als der Messstandort oder es ist wolkenlos. Ist die Differenz zwischen Luft- und Himmelstemperatur sehr klein ($< 1^{\circ}C$), liegt die Messung mit grossen Wahrscheinlichkeit innerhalb der Wolken (Abb. 22)

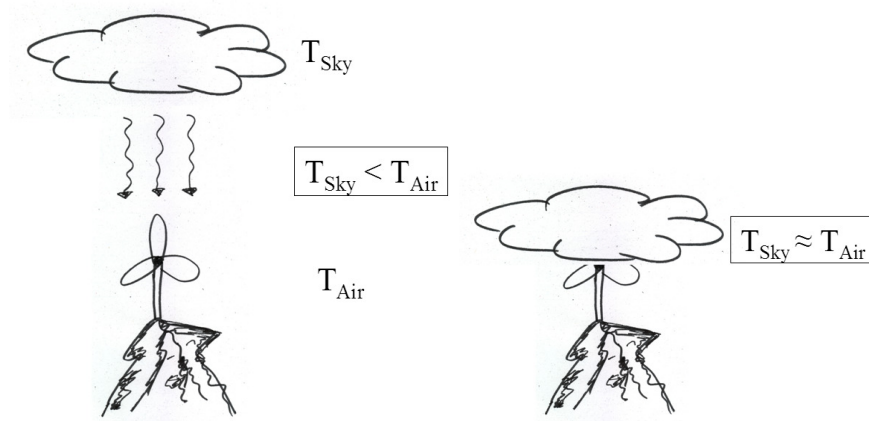


Abb. 22: Links: Wenn die Himmelstemperatur (T_{sky}) deutlich tiefer ist als die Lufttemperatur (T_{air}) ist der Standort nicht in den Wolken. Rechts: Sind Luft- und Himmelstemperatur etwa gleich gross, ist der Standort mit grosser Wahrscheinlichkeit innerhalb der Wolken.

8. Anhang C: Webcam für Beobachtung einer WKA

Visuelle Aufnahmen der Rotorblätter stellen eine wichtige Informationsquelle für die Überwachung einer WKA unter vereisenden Bedingungen dar. In vielen Studien wurde dabei die Kamera in der Nabe der WKA eingebaut, so dass sie mit dem Rotorblatt mitdrehte und immer den gleichen Ausschnitt zeigte. Dieses Vorgehen erwies sich als schwierig umzusetzen und nicht sehr zuverlässig. Im Rahmen des Projekts „Alpine Test Site Gütsch“ wurde deshalb ein neuer Ansatz zur Überwachung der Anlage mittels einer Webcam entwickelt.

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um eine Mobotix Netzwerkkamera M12 mit Dualoptik (Abb. 23). Diese Kameras sind in ihren Möglichkeiten und Funktionen sehr mächtig. Die Kamera besitzt einerseits einen Farbsensor mit einem Weitwinkelobjektiv welches während des Tages die Bilder macht. Andererseits ist ein Schwarzweiss-Sensor eingebaut, welcher empfindlicher und somit für die Nachtaufnahmen zuständig ist. Dieser Sensor hat im Gegensatz zum Farbsensor keinen Filter für Infrarotlicht. Für Nachtaufnahmen kann so eine Beleuchtung mittels Infrarotem Licht eingesetzt werden.



Abb. 23: Mobotix M12 mit Dualoptik.

Die Kamera wurde an der Gondel befestigt, so dass sie seitlich in Richtung der Rotorblätter blickt (Abb. 24, links). Um auch während der Nacht Informationen zu erhalten, wurde zudem ein Infrarotscheinwerfer auf der Gondel der WKA angebracht (Abb. 24, rechts, Abb. 25, rechts). Die Erkennung des Rotorblatts geschieht über die in der Kamera serienmässig eingebaute „Video Motion Detection“. Dabei werden im Kamerabild vom Benutzer bestimmte, sensitive Bereiche markiert (Abb. 25, links). Diese Bereiche werden ständig miteinander verglichen. Ändert sich im markierten Bereich eine bestimmte Anzahl Pixel in einem bestimmten Mass, wird dies als Bewegung taxiert und das entsprechende Bild gespeichert. Durch geschicktes Anordnen und Konfigurieren der Erkennungsfenster kann so ein Bild vom Rotorblatt während des Betriebs gemacht werden. Diese Methode hat den Vorteil, dass kein Eingriff in die Anlage gemacht werden muss, dass ein relativ steiler Blickwinkel auf den Flügel erreicht wird und dass die Kamera durch ihre seitliche Ausrichtung weniger anfällig auf Vereisung ist. Ausserdem ist eine derartige Überwachung mit sehr geringen Materialkosten zu bewerkstelligen. Die Nachteile liegen darin, dass bei

Stillstand der Anlage keine Bilder gemacht werden können sowie, dass die Vorderseite des Flügels nicht erkennbar ist. Um die Kamera gegen Vereisung zu schützen, wurde eine auf die Kamera gerichtete Heizlampe installiert

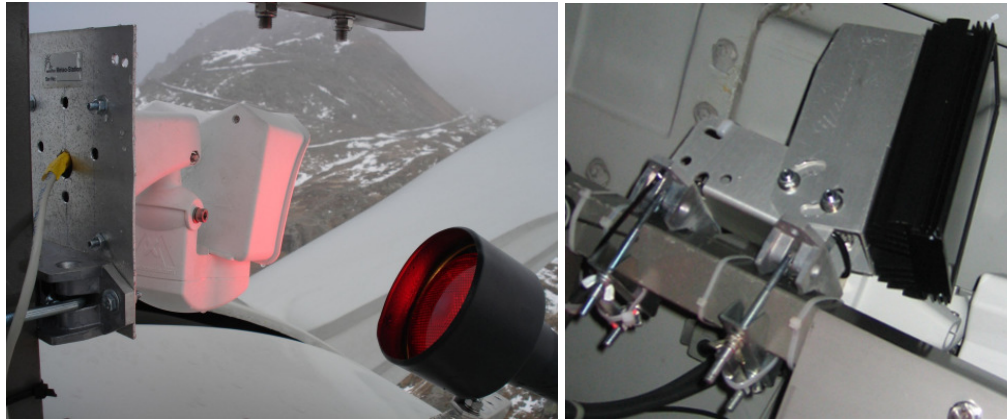


Abb. 24: Links: Die auf dem Gütsch installierte Kamera mit der Heizlampe. Rechts: Der Infrarotscheinwerfer.

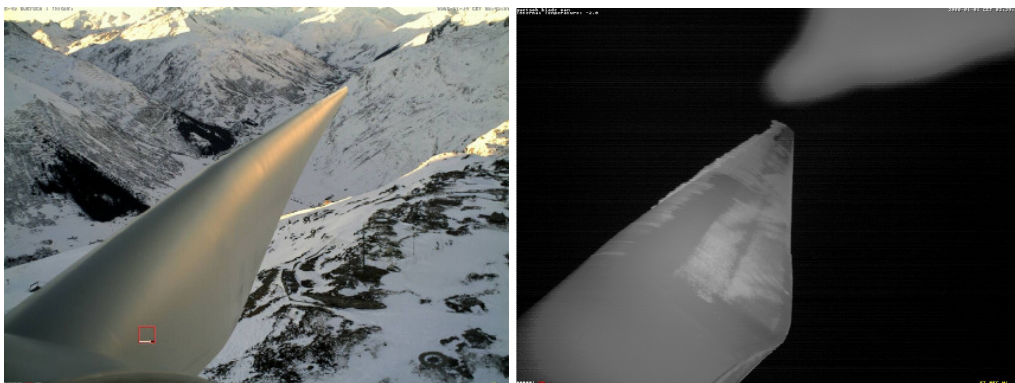


Abb. 25: Links: Aufnahme eines Rotorblatts der WKA auf dem Gütsch. Das rote Quadrat entspricht dem Erkennungsfenster für die „Video Motion Detection“. Rechts: Aufnahme eines Rotorblatts bei Nacht mit Beleuchtung durch den Infrarotscheinwerfer.

Die Kamera ist gleichzeitig ein Webserver. Sie kann auf einfache Weise für den selbständigen Versand von Bildern auf einen FTP-Server konfiguriert werden. Von da können die Bilder zum Beispiel in eine Internetseite eingebunden werden und stehen auf diese Weise sowohl dem Betreiber wie auch dem Servicepersonal zu Verfügung.

9. Anhang D: Eiswurfstudie Gütsch - Methodik

Nach jedem automatischen Einschalten der Blattheizung der WKA auf dem Gütsch wurde eine Begehung durchgeführt und das Gelände rund um die WKA nach Eisstücken abgesucht. Die Fundstücke wurden protokolliert sowie fotografiert und in eine Datenback aufgenommen. Dabei wurde die folgende Ausrüstung verwendet (Abb. 25):

1. Laserentfernungsmessgerät Bushnell Yardage Pro Legend
2. Digitalkamera Nikon Coolpix 4600 mit 128 MB Speicherkarte (ca. 60 Bilder)
3. Spiegelkompass Recta DP10 mit Peil-Fenster
4. Plastiksack um Eisbrocken an Waage zu hängen
5. Mappe mit Erfassungsprotokollen und Dokumentation
6. Verbindungskabel Kamera–PC, Netzkabel zu Ladegerät Kamera
7. Akkuladegerät Kamera
8. Massstab 30 cm
9. Schreibzeug
10. Federwaagen Pesola 0–500 g, 0–1000 g und 0–2500 g

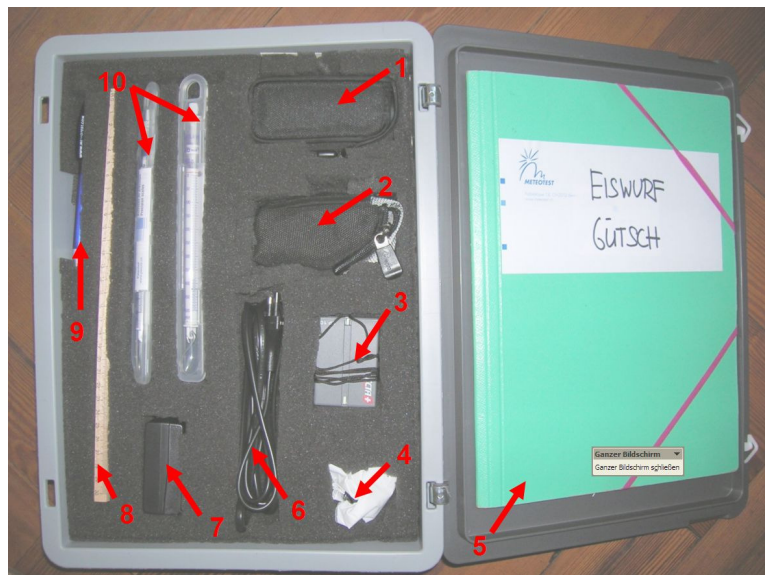


Abb. 26: Das Eiswurf-Erfassungs-Kit.

Von den gefundenen Eisstücken wurden folgende Parameter in einem Protokoll (Abb. 26) aufgezeichnet:

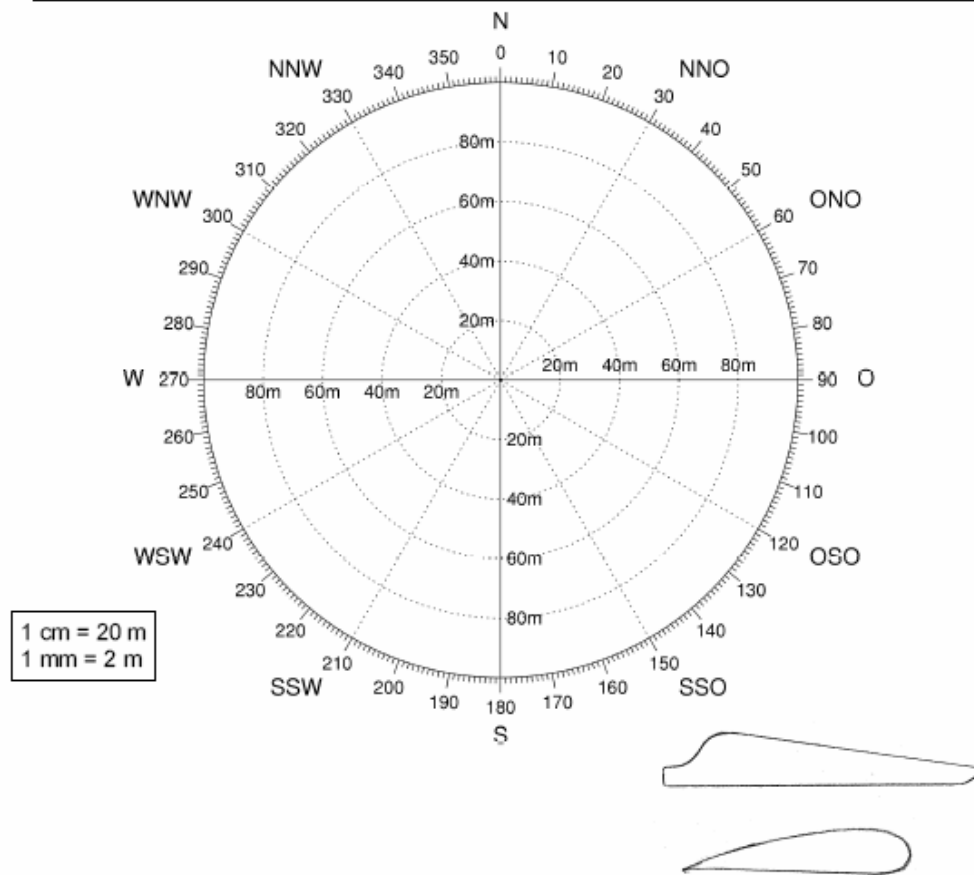
- Datum, Zeit
- Gewicht
- Grösse
- Winkel relativ zu WKA

Alpine Test Site Guetsch:
Meteorological measurements and wind turbine performance analysis

COST 727 Measuring and forecasting atmospheric icing on structures

Météo Suisse, Payere / METEOTEST Bern

Icethrow Protocol



WKA: ENERCON E-40 600 kW Gütsch Anlage in Betrieb? ☐ Ja ☐ Nein

Datum, Zeit des Fundes: _____ Name Beobachter: _____

Distanz zur WKA [m]: _____ Winkel zu WKA [Grad]: _____ Gewicht [g]: _____

Grösse (LxBxH) [cm]: _____ Art des Eises: ☐ Rauhereif ☐ klares Eis

Filename des Fotos (Foto inkl. Referenz, z.B. Taschenmesser): _____

Wettercharakter: Bewölkung ___/Achtel ☐ innerhalb der Wolken
☐ Schneefall ☐ Regen

Sonstige Bemerkungen (andere Vereisungseffekte): _____

Abb. 27: Das auf dem Gütsch verwendete Protokoll für die Aufzeichnung des Eiswurfs.