

Sebastian Haym BSc

# Entwurf einer Messanordnung zur Abschätzung der Vereisungsdauer von Windkraftanlagen an alpinen Standorten

## Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science.

Masterstudiengang Maschinenbau

Technische Universität Graz

Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung

Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Brasseur

Begutachter: Assoc.Prof. Dr. Hubert Zangl

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Johannes Moser

In Zusammenarbeit mit:

Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation

Betreuer: DI Erich Feldbaumer, Leiter Stabsstelle erneuerbare Energie

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, TU Graz

Vorstand: o.Uni.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens

Betreuer: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader



## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Date: .....

.....

(signature)



## Kurzfassung

**Titel:** Entwurf einer Messanordnung zur Abschätzung der Vereisungsdauer von Windkraftanlagen an alpinen Standorten

**Autor:** Sebastian Haym Bsc

**Schlagwörter:** Vereisung, Windkraftanlagen, synoptische Eisdetektion;

Aufgabenstellung der vorliegenden Masterarbeit ist die Definition notwendiger Parameter, Sensoren und Auswertemethoden, anhand derer die Vereisungsdauer an potentiellen Standorten von Windkraftanlagen abgeschätzt werden kann. Damit soll eine genauere Wirtschaftlichkeitsrechnung ermöglicht werden.

Es werden die wichtigsten Fakten über Windenergie in Österreich, die Einflussfaktoren auf und Auswirkungen von Vereisung an Rotorblättern sowie aktuelle Möglichkeiten zur Abschätzung der Ausfallszeit einer Windkraftanlage aufgrund von Vereisung gezeigt.

Für Messwerte des Winters 2011/12 wird eine Auswertung durchgeführt, die eine Bildauswertung als Referenzwert verwendet und die einzelnen Detektionsmethoden untereinander vergleicht. Zusätzlich wird ausgehend von Standardverfahren (ISO 12 494) und Erfahrungen von Meteorologen und Windparkbetreibern ein synoptischer Algorithmus entwickelt, der die Häufigkeit von Vereisungsbedingungen anhand einer Kombination der gemessenen Werte von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ermittelt („*T&krF-Methodik*“). Im ausgewerteten Zeitraum (März - Mai 2012) führt diese Methodik mit 93,2 % Übereinstimmungen zu einem besseren Ergebnis als andere Detektionsmethoden oder Eissensoren.

Weiters wird eine beheizte Sensorhülle für einen Hygro/Thermosensor entwickelt, durch deren Gestalt sich Tröpfchen und Schneeflocken von der Luft abscheiden und Eisansammlungen verhindert werden sollen. Um die Auswirkungen der Heizung auf die gemessene Temperatur abzuschätzen, werden CFD (Computational Fluid Dynamics)-Simulationen durchgeführt sowie ein Prototyp gebaut und getestet.

## Abstract

**Title:** Draft of a measurement arrangement for estimating the icing duration of wind turbines at elevated sites

**Author:** Sebastian Haym Bsc

**Tags:** Icing, wind turbines, synoptical ice detection;

This master thesis investigates possible improvements in the estimation of shut-down times of wind turbines due to blade icing before their construction, in order to decrease uncertainties in economic calculations.

Besides giving information about the current state of wind energy use in Austria and the potential of wind turbines in elevated areas, the most important parameters for the blade icing and the effects thereof are explained. Common icing time estimation methods and State-of-the-art icing sensors are reviewed and experiences of wind park operators using these methods have been collected. Using measurement data from a field test in winter 2011/12, various estimation methods and sensors were compared and a novel algorithm was developed, which allows to calculate the so called "Relevant Icing Time" by weighting air temperature and relative air humidity. During a 3-month field test in March-May 2012, the results of this "T&krF Algorithm" matched in 93.2 % of examined cases with manually evaluated camera pictures, thus yielding the best results compared to both common estimation methods and state-of-the-art icing sensors used in the field test. Furthermore, investigations on the effect on elevation have been conducted, showing promising results.

Additionally, analyses were made to increase the reliability of temperature and humidity measurements under heavy icing conditions by developing a heated housing for a commercial sensor. CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations showed that this approach would add a small but correctable error on the measured temperature. A first test run using a simple prototype of a housing showed the feasibility of this approach.

## Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Zuge des Projekts „Vereisungsmessung Windsfeld“ der Salzburg AG ab August 2011. Für die Möglichkeit, im Rahmen dieser Tätigkeit auch meine Masterarbeit am Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung zu verfassen, möchte ich mich bei allen Beteiligten herzlich bedanken: Es sind dies DI Erich Feldbaumer seitens der Salzburg AG, sowie DI Michael J. Moser seitens der Technischen Universität Graz – ich weiß die konstruktive und kreative Zusammenarbeit sehr zu schätzen, vielen Dank für die Unterstützung. Weiterer Dank gilt Ass.Prof. Dr.techn. DI Michael Bader vom Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik der TU Graz, dessen Fähigkeiten als Motivator und Input-Geber unbeschreiblich sind. Assoc.Prof. Dr. DI Hubert Zangl vom Institut für elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung danke ich für seine Tätigkeit als Begutachter dieser Masterarbeit.

Ebenso möchte ich folgenden Personen danken, die mich mit fachkundigen Informationen und Vorschlägen zur Verbesserung der Arbeit versorgt haben: DI Thomas Höll (EMT, TU Graz), DI Andreas Krenn (Verein energiewerkstatt), Ao. Univ.-Prof. DI Dr. techn. Wolfgang Sanz (TTM, TU Graz).

*Besonderer Dank gebührt jedoch auch anderen Menschen:*

Meinen Eltern, die mir durch ihre uneingeschränkte Unterstützung viele Türen öffneten und mir auch den Mut gaben, durch sie hindurchzugehen. Meiner Freundin Maria, die in den vergangenen Jahren mir zu Liebe oftmals über ihren Schatten gesprungen ist und immer kompromisslos hinter mir gestanden hat – es ist wunderschön, dass wir uns gefunden haben. Franziska und Norbert, deren bedingungslose Aufnahme und Großzügigkeit mir neue Perspektiven eröffnet haben.

Sabine und Daniel, die in den vergangenen fünf Jahren so oft ihre eigene, knapp bemessene Zeit für mich geopfert haben und ohne deren Unterstützung mein Studium sicherlich länger gedauert hätte. Otto Prem, der mir in der entscheidenden Phase die Begeisterung für Mathematik vorgelebt hat. Und natürlich Gerald.

# Inhaltsverzeichnis

1	Windenergie .....	1
1.1	Windenergie weltweit .....	1
1.2	Windenergie in Österreich .....	1
1.3	Windenergie im alpinen Raum .....	2
1.4	Windenergie in Salzburg.....	4
1.5	Problembeschreibung .....	5
2	Vereisung.....	7
2.1	Auswirkungen von Vereisung auf Windkraftanlagen.....	7
2.1.1	Technische Auswirkungen von Vereisung .....	8
2.1.2	Wirtschaftliche Auswirkungen von Vereisung .....	8
2.1.3	Rechtliche Rahmenbedingungen bei Vereisung/Vereisungsgefahr .....	10
2.2	Arten von Vereisung.....	11
2.2.1	Raureif .....	11
2.2.2	Klareis .....	11
2.2.3	Nassschnee .....	11
2.2.4	Eisregen .....	12
2.3	Orte der Vereisungsbildung.....	12
2.4	Zeitliche Qualifizierung von Vereisung.....	13
2.4.1	Meteorological Icing.....	13
2.4.2	Instrumental Icing.....	13
2.5	Verfügbare Sensorik zur Vereisungsdetektion .....	14
2.5.1	Externe Vereisungssensoren .....	14
2.5.2	In die WKA integrierte Vereisungssensoren.....	16
2.5.2.1	Vergleich der Leistungskurven .....	16
2.5.2.2	IGUS BladeControl® .....	17
2.5.2.3	Andere integrierte Messprinzipien.....	17
2.6	Anti-Icing und De-Icing .....	18
2.6.1	Anti-Icing.....	19
2.6.2	De-Icing.....	19
3	Aktuelle Methoden zur Abschätzung der Vereisungsdauer und relevante Größen .....	21
3.1	Möglichkeiten zur groben Abschätzung.....	21
3.1.1	WECO-Vereisungskarte .....	21
3.1.2	Zusammenhang Seehöhe und Vereisung.....	23



3.2	Anforderungen an die Messanordnung .....	24
3.3	Ablauf eines Vereisungsereignisses .....	26
3.3.1	Eiszunahme.....	26
3.3.2	Zustand der konstanten Eismenge .....	27
3.3.3	Eisabnahme: Tauprozess/Sublimation .....	27
3.4	Vorgehen bei synoptischer Vereisungsdetektion .....	28
3.4.1	Makkonen-Algorithmus.....	28
3.4.2	ISO 12 494 – Atmospheric icing of structures .....	30
3.4.3	Weitere synoptische Detektionsmethoden .....	31
3.5	Maßgebliche meteorologische Größen bei Vereisung und deren Messung.....	32
3.5.1	Temperatur.....	32
3.5.2	Relative Luftfeuchte .....	32
3.5.3	Flüssigwasseranteil/Liquid Water Content (LWC).....	33
3.5.4	Mittlerer Volumsdurchmesser/MVD.....	33
3.5.5	Wolkenhöhe/Cloud base height (CBH).....	35
3.5.6	Windgeschwindigkeit .....	36
3.6	Zusätzliche Sensorik zur Eiserfassung .....	36
3.6.1	Labkotec LID-3300 IP .....	36
3.6.2	Sensoren der Fa. Sommer Messtechnik.....	37
3.6.3	Kapazitiver Eissensor der TU Graz .....	38
3.6.4	Kamera.....	38
3.7	Zusammenfassung der relevanten Größen und Zusammenhänge .....	39
4	Zur Auswertung verwendete Messstationen .....	41
4.1	Messanlage Faschina .....	41
4.1.1	Standort.....	41
4.1.2	Ausstattung der Vereisungsmessstation Faschina .....	42
4.1.3	Ausstattung Wetterstation Faschina .....	42
4.1.4	Aufgezeichnete Größen der Messanlage Faschina .....	43
4.1.5	Messzeitraum und Datenverfügbarkeit Messanlage Faschina .....	44
4.2	Messstation Großglockner .....	44
4.2.1	Lage.....	44
4.2.2	Ausstattung der Messstation Großglockner.....	45
4.2.3	Aufgezeichnete Messgrößen der Messstation Großglockner .....	46
4.2.4	Messzeitraum und Datenverfügbarkeit Station Großglockner .....	47
4.3	Unterschiede zwischen den Messstationen/Standorten .....	47

5	Auswertung Messanlage Faschina und Entwicklung T&krF-Methodik .....	49
5.1	Aufbereitung der Auswertung.....	49
5.1.1	Einschränkung der verwendeten Daten.....	49
5.1.1.1	Sommer-Eissensoren.....	49
5.1.1.2	Sensor Labko LID 3300-IP .....	50
5.1.1.3	Kapazitive Eissensoren der TU Graz .....	51
5.1.1.4	Datensätze der Wetterstation Faschina.....	51
5.1.2	Zeitliche Gewichtung.....	52
5.1.3	Umrechnung der Temperatur .....	53
5.1.4	Korrektur der relativen Feuchtigkeit.....	53
5.1.5	Abschätzung der Wolkenuntergrenze/Cloud-Base-Height (CBH) .....	55
5.1.6	Manuelle Bildauswertung .....	56
5.1.7	Automatisierte Bildauswertung .....	62
5.2	Auswertung der Daten .....	66
5.2.1	Sommer Eissensor .....	66
5.2.2	Labko LID-3300 IP .....	67
5.2.3	Synoptische Auswertung nach Krenn.....	67
5.2.4	Auswertung nach ISO 12 494 .....	68
5.2.5	Entwicklung T/krF-Methodik ( <i>Temperatur/korr. relative Feuchte</i> ).....	68
5.2.5.1	$B_{RIT,T}$ Faschina.....	70
5.2.5.2	$B_{RIT,krF}$ Faschina.....	72
5.2.5.3	Schwellwert T&krF-Methodik.....	73
5.3	Ergebnisse.....	74
5.3.1	Zeitliche Gewichtung.....	74
5.3.2	Sensitivitätsanalyse T&krF-Methodik.....	75
5.3.3	Vergleich der Detektionsmethoden .....	76
5.3.4	Kapazitiver Eissensor .....	78
5.3.5	Interpretationen/aufgetretene Probleme.....	80
6	Auswertung Messstation Großglockner.....	87
6.1	Aufbereitung der Messdaten .....	87
6.1.1	Einschränkung der verwendeten Sensoren, zeitliche Mittelung .....	87
6.1.2	Umrechnung der Temperatur und Korrektur der relativen Feuchtigkeit .....	87
6.1.3	Wolkenuntergrenze/Cloud-Base-Height .....	88
6.1.4	Bildauswertung.....	88
6.2	Auswertung .....	89

6.2.1	Anemometervergleich.....	89
6.2.2	Auswertung nach ISO 12 494 und nach Krenn.....	89
6.2.3	T&krF-Methodik.....	89
6.2.4	Ergebnisse inkl. nicht adaptierter T&krF-Methodik.....	89
6.2.5	Anpassung der T&krF-Methodik an den Standort Großglockner.....	91
6.2.5.1	$B_{RIT,T}$ Großglockner.....	91
6.2.5.2	$B_{RIT,krF}$ Großglockner.....	91
6.2.5.3	Sensitivitätsanalyse zur Abhängigkeit von der Seehöhe.....	93
6.2.6	Unsicherheiten.....	94
6.3	Ergebnisse.....	95
6.4	Erkenntnisse.....	96
7	Vereisungsmessstation Windsfeld.....	97
7.1	Beschreibung.....	97
7.1.1	Verwendete Sensoren und gemessene Größen.....	98
7.1.2	Datenübertragung und –sicherung.....	99
7.2	Kameraaufnahmen.....	100
7.3	Gewählte Parameter der Methoden zur RIT-Detektion.....	102
7.3.1	T&krF-Methodik.....	102
7.3.2	Sommer-Eissensor.....	102
7.3.3	LID-3300 IP.....	102
7.3.4	Kapazitiver Eissensor.....	102
7.3.5	Anemometervergleich.....	102
7.3.6	Auswertung nach Krenn und nach ISO 12 494.....	102
7.4	Vereisungsereignis: 20./21. November 2012, Bilder siehe Anhang H.....	103
7.5	Abschließende Bemerkungen zur RIT-Auswertung.....	106
8	Exkurs: Konzept einer beheizten Schutzhülle für Hygro-Thermosensoren.....	107
8.1	Problemstellung und Idee.....	107
8.2	Design.....	107
8.3	CFD-Simulation in Ansys Fluent.....	109
8.3.1	Geometrie.....	109
8.3.2	Netz.....	110
8.3.3	Eigenschaften.....	111
8.3.4	Verwendetes Modell.....	111
8.3.5	Boundary Conditions.....	112
8.3.6	Solution Methods.....	112

8.4	Ergebnisse der Simulation .....	112
8.4.1	Allgemein .....	112
8.4.2	Unterschiedliche Netze .....	113
8.4.3	Unterschiedliche Anströmwinkel .....	113
8.4.4	Variationen von $T_{in}$ und $v_{in}$ .....	114
8.5	Prototyp der beheizten Schutzhülle .....	115
8.5.1	Fertigung.....	115
8.5.2	Gründe für Abweichungen .....	116
8.6	Versuch.....	117
8.6.1	Messanordnung.....	117
8.6.2	Messung .....	118
8.6.3	Messergebnisse .....	119
8.6.4	Interpretation .....	119
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	121
10	Literaturverzeichnis .....	123
11	Abbildungsverzeichnis .....	127
12	Tabellenverzeichnis .....	131

## Abkürzungsverzeichnis

CBH	Cloud Base Height
CC	Cold Climate
FKT	Feuchtkugeltemperatur
krF	Korrigierte relative Feuchte
LT	Lufttemperatur
LWC	Liquid Water Content
MVD	Medium Volume Diameter
RIT	Relevant Icing Time
WEA	Windenergieanlage
WECO	Wind Energy Production in Cold Climate
WKA	Windkraftanlage

## Definitionen

### *Meteorological Icing*

Jene Zeitspanne, die auf Grund der physikalischen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck etc.) die Entstehung von Eis zulässt (siehe Absatz 2.4.1).

### *Relevant Icing Time – RIT*

Die *Relevant Icing Time* umfasst *Meteorological Icing*, sowie die Zeit während der die angesammelte Eismenge auf einer Oberfläche konstant bleibt (siehe Absatz 3.3.3).

### *Instrumental Icing*

*Instrumental Icing* bezeichnet die Zeitspanne, während der Eis auf einer Oberfläche vorhanden ist (siehe Absatz 2.4.2).

„Ich bin weder Psychologe noch Soziologe. Aber meine Selbst- und Alltagserfahrung zeigt, dass Bequemlichkeit und Ignoranz die größten Charaktermängel des Menschen sind. Das ist eine potentiell tödliche Mixtur.“

Hans Joachim Schellnhuber (\*1950), CBE, Physiker & Klimaforscher

„Only babies in wet nappies want change.“

Unbekannt

*Wandel*, ein einfaches Wort mit, laut den Gebrüdern Grimm, zwei Bedeutungen: „[1] Veränderung, Übergang von einem Zustand zu einem anderen, [2] Lebensführung“. (Deutsches Wörterbuch, 1525) Betrachtet man dieses Wort unter dem Aspekt des Energieverbrauchs, so lassen sich beide Bedeutungen sogar in einem Satz anwenden: Mit unserem derzeitigen (*Lebens-*)Wandel werden wir den Wandel (*die Energiewende*) nicht schaffen.

Da sich der allgemeine Wandel durch die nur begrenzt verfügbaren Ressourcen aber nicht aufhalten lässt, muss sich in diesem Kontext wohl der Umgang der Menschheit mit diesen ändern – und dies fällt den Bewohnern der westlich entwickelten Welt offensichtlich schwer. Wie sonst könnte es sein, dass die Administration eines Präsidenten der Vereinigten Staaten im 21. Jahrhundert den menschlichen Einfluss auf den Klimawandel - durch regierungsnah wissenschaftliche Institute unterstützt - bestreitet? (Vgl. Seibt, 2011) Für mich als jungen und zukunftsorientierten Menschen ist es oft erschreckend, wie viele Mittel und wie viel Energie manche Industriesparten, Interessens- und/oder Gesinnungsgemeinschaften dafür verwenden, einen Status quo zu halten und zu verteidigen, der für jeden realistisch denkenden Menschen langfristig weder finanzierbar, noch vor der aktuellen „jungen“ und auch den nachfolgenden Generationen aus ethischen Gründen zu rechtfertigen ist. Beispiele hierfür kann man aus nahezu allen Bereichen der Politik, der Wirtschaft oder der Wissenschaft nennen, wobei sich der oben angeführte Themenkomplex **Energie** hervorragend dazu anbietet, da er durch seine immense Bedeutung im Alltag in allen drei genannten Bereichen eine wichtige Rolle spielt.

Während noch im Jahr eins nach Fukushima die ersten japanischen Atomkraftwerke wieder hochgefahren werden, haben auch in Europa nur wenige Regierungen den Mut, jene Entscheidungen zu treffen, die für die Realisierung der Energiewende weg von Atomstrom und CO<sub>2</sub>-intensiver Stromerzeugung, hin zur erneuerbaren Energie so wichtig sind. Auch wenn derzeit noch viele Fragen zu den Themen Energiespeicherung und -übertragung offen sind, so ist man bei der Erzeugung schon einen Schritt weiter: Wasserkraft, Photovoltaik und Windenergie haben das Potenzial, bei richtiger Kombination mit konventionellen Kraftwerken wesentliche Verbesserungen zu erreichen.

Wir müssen nur wollen.

# 1 Windenergie

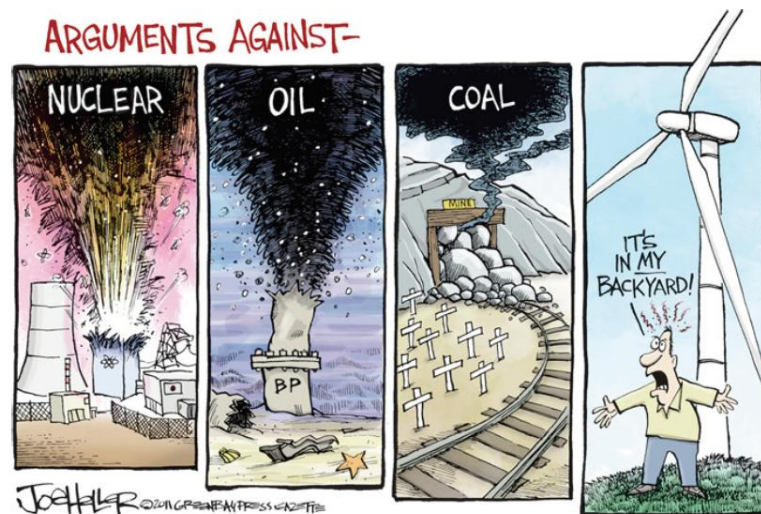


Abbildung 1: Ohne Worte (Grosch, 2011)

## 1.1 Windenergie weltweit

Trotz teils starken gesellschaftlichen Gegenwinds kann die Windenergiebranche sowohl weltweit, als auch österreichweit Zuwächse verzeichnen. So wurde die weltweit installierte Windkraftleistung 2011 um 40.500 MW auf insgesamt 238.000 MW erhöht, dies entspricht einer Steigerung von knapp 20 %. Die größte Dynamik entwickelt sich dabei seit Jahren in China, wo 43 % der Neuanlagen errichtet wurden. Derzeit liegt Europa mit 96.600 MW installierter Leistung noch an der Spitze der Windenergieproduzenten, knapp dahinter ist jedoch mit 82.000 MW schon China, das durch oben erwähnte Wachstumsraten bald Platz 1 übernehmen wird. Dieser globale Wachstumstrend wird sich auch in Zukunft nicht abschwächen: Durch den Aufschwung und Energiehunger der Schwellenländer geht das Global Wind Energy Council (GWEC) 2011 in seinen Prognosen von einem Verdoppeln der weltweiten Windleistung in den nächsten fünf Jahren aus (vgl. Fliegenschnee-Jaksch, 2011).

## 1.2 Windenergie in Österreich

Österreich liegt mit 1.084 MW installierter Windenergieleistung unter jenen 20 Ländern weltweit, die mehr als 1.000 MW Leistung aufweisen können (vgl. Fliegenschnee-Jaksch, 2011). Berücksichtigt man die kleine Fläche und die geringe Einwohnerzahl Österreichs, so ergibt sich ein Schnitt von 132 Watt/Einwohner, was europaweit sogar Rang acht bedeutet (vgl. Proidl, 2011). Aber auch abseits der absoluten Zahlen kann Österreich mit Erfolgen im Windenergiesektor aufzeigen: Beispielsweise wurden im Februar 2012 die beiden ersten Anlagen des Typs E 126 des Herstellers Enercon in Betrieb genommen. Mit einer Nennleistung von je 7,58 MW sind dies die zu diesem Zeitpunkt leistungsstärksten Windkraftanlagen (WKA) der Welt. (Vgl. IG Windkraft, <http://www.igwindkraft.at>, 17. 07. 2012) Ebenso kann Österreich als kleines Land den Windkraft-Cluster Kärnten vorweisen, der mit der AMSC Windtec (Klagenfurt) über einen weltweit operierenden Systemanbieter und der alpswind GmbH (Klagenfurt) über einen Anlagenhersteller von Windkraftanlagen (WKA) „Made in Austria“

verfügt. Diese Unternehmen brachten in den vergangenen Jahren Innovationen wie beispielsweise einen Holzturm in 12 m-Segmentbauweise hervor, der vor allem bei Standorten im Gebirge und mit schwieriger Infrastrukturanbindung große Erleichterungen beim Wegebau mit sich bringen sollte (vgl. Jesenko, 2011).

### 1.3 Windenergie im alpinen Raum

Geografisch konzentriert sich der Großteil der installierten Windkraftanlagen Österreichs auf das östliche Niederösterreich sowie das nördliche Burgenland, während die Bundesländer Salzburg, Tirol und Vorarlberg derzeit keine Anlage vorweisen können (siehe Abbildung 2). Dieser Zustand ergibt sich aus mehreren Gründen: Einerseits sind die Steppenwinde im Osten Österreichs kontinuierlicher und häufiger (es werden bis zu 2.600 Volllaststunden erreicht) als die turbulenten und böigen Winde im Alpenraum. Andererseits erhalten alle österreichischen Parkbetreiber (ab gewissen Anlagengrößen) unabhängig vom Parkstandort dieselbe Vergütung laut Österreichischem Ökostromgesetz. Dies führt dazu, dass sich Infrastrukturkosten wie Wegerrichtung und –erhaltung, sowie die Herstellung des Netzanschlusses zwar stark auf der Ausgabenseite, jedoch gar nicht auf der Einnahmenseite des Parkbetreibers auswirken. Somit sind die leicht zu erschließenden Lagen im Osten Österreichs doppelt im Vorteil. Als weiteren Grund kann man die starke touristische Nutzung der westlichen Bundesländer anführen: Aus Angst vor einer Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und damit einhergehende Auswirkungen auf den Tourismus werden viele mögliche Standorte im Westen von Anrainergruppen bereits im Vorfeld erfolgreich bekämpft.

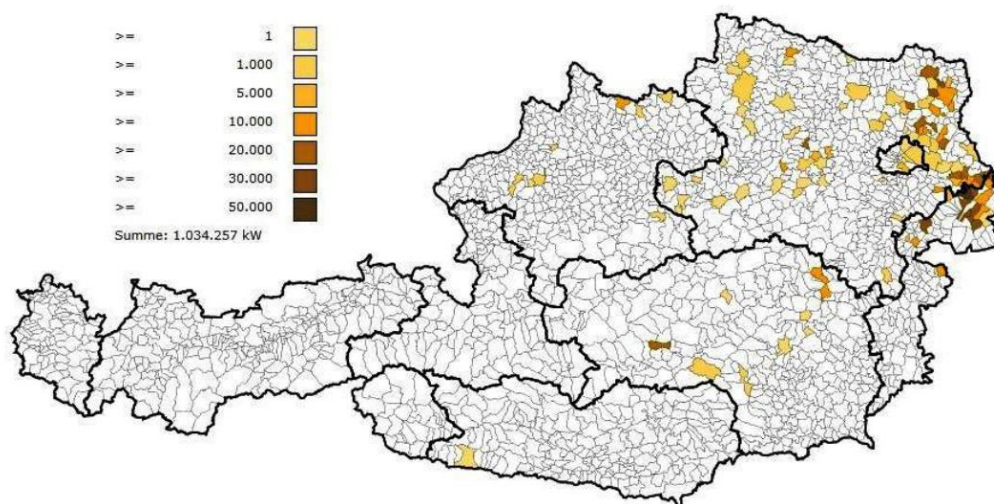


Abbildung 2: Installierte Windleistung in Österreich, Stand Juli 2011 (Proidl, 2011)

Dennoch stellen die Winde im Alpenraum ein Energiepotenzial dar, das es im Sinne einer tiefgreifenden Energiewende zu heben gilt. Dafür spricht auch eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Anlagen über ganz Österreich (und Europa), um schwankende Energieerträge aus der Windkraft aufgrund unterschiedlicher lokaler Witterungsbedingungen auszugleichen und somit die Verteilungs-/Speicherproblematik zu minimieren. Ebenso stellt die Nähe möglicher Anlagen im Westen zu den großen Pumpspeicherkraftwerken des Landes einen Vorteil aus Sicht der Netzbetreiber dar.



Derzeit zählt in Österreich vor allem der Tauernwindpark Oberzeiring (Steiermark) der ImWind Group unter Geschäftsführer Johannes Trauttmansdorff zu den Vorzeigeprojekten der Windenergie im Alpenraum. Hier wurden im Sommer 2002 elf Anlagen des Typs V66 des dänischen Herstellers Vestas mit einer Leistung von je 1,75 MW auf einer Seehöhe von 1.830-1.930 m errichtet. Im Herbst 2004 erfolgte die Erweiterung um zwei weitere Anlagen des selben Typs, somit beträgt die gesamte Parkleistung nunmehr 22,75 MW. Die Messungen im Vorfeld ergaben eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 7,3 m/s auf Nabenhöhe und einen prognostizierten Jahresertrag von 46 GWh. Diese Zahlen konnten nicht ganz erreicht werden, vielmehr pendelt der Jahresenergieertrag zwischen 38 und 44 GWh (vgl. Trauttmansdorff, 2011a, sowie [www.tauernwind.com](http://www.tauernwind.com), 28. 08. 2012).



Abbildung 3: Tauernwindpark Oberzeiring ([www.tauernwind.com](http://www.tauernwind.com), 17. 07. 2012)

Ein weiterer österreichischer Windpark im alpinen Raum wurde von der Viktor Kaplan Akademie unter Herrn Helmut Lotter am Moschkogel (Mürztal) auf ca. 1580 m Seehöhe errichtet. Hier wurden fünf Anlagen des Enercon-Typs E70E4 mit je 2,3 MW Nennleistung installiert. Bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 7 m/s in Nabenhöhe wurde mit einem Jahresenergieertrag des gesamten Parks von 19 GWh kalkuliert. Am Moschkogel konnten die berechneten Erträge erreicht bzw. sogar leicht übertroffen werden (vgl. <http://www.viktorkaplanakademie.at>, 17. 07. 2012).



Abbildung 4: Windpark Moschkogel ([www.magzin.at](http://www.magzin.at), 17.07.2012, © Michael Rothauer)

## 1.4 Windenergie in Salzburg

Die Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation hat es sich zum Ziel gesetzt, neben dem Ausbau der bestehenden Wasserkraft auch die Windkraft im Land Salzburg zu entwickeln. Dazu wurde als möglicher Windparkstandort das „Windsfeld“ auf 2.100 m Seehöhe im Gemeindegebiet Flachau, südöstlich des Nordportals des Tauerntunnels ausgewählt (Abbildung 5).

Im Jahr 2008 wurde vor Ort mit Windmessungen begonnen, deren Ergebnisse das Windsfeld als möglichen Standort für Windkraftanlagen bestätigten. Ein großer Unsicherheitsfaktor, der auch die Messungen störte, war jedoch die Vereisung der Messgeräte. Da die im Jahr 1974 errichtete 110 kV-Versorgungsleitung des Lungaus in den ersten Jahren ihres Bestehens immer wieder von Ausfällen aufgrund von Vereisung an den Phaseiselen betroffen war, wurde bereits 1976 eine Vereisungsmessstation inklusive eines Messseils am Windsfeld errichtet, welche die für Vereisung notwendigen Größen aufzeichnen und somit die Last auf die Seile abschätzbar machen sollte. Die Ergebnisse waren zwar teilweise lückenhaft, jedoch wurden extreme Belastungen von bis zu 168 N/lfm Messseil gemessen, was aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen Messseil und tatsächlichem Leiterseil einer Belastung von 235-269 N/lfm am Phaseiselen entspricht (vgl. ETA/SL/STJ: 1995).



Abbildung 5: Lage des Windsfelds ([www.maps.google.com](http://www.maps.google.com), 17.07.2012)

## 1.5 Problembeschreibung

Das Wissen um die Witterungs- und Vereisungsbedingungen am Windsfeld lässt in Kombination mit dem Ausfall einiger Messgeräte aufgrund von Vereisung bei der Windmessung 2008 den Schluss zu, dass auch die möglichen WKA starker Vereisung ausgesetzt sein werden. Wie im folgenden Kapitel beschrieben, ist Vereisung an Windkraftanlagen aus unterschiedlichen Gründen eine nicht zu unterschätzende Herausforderung für alle Projektbeteiligten, vom Hersteller über den Parkbetreiber, bis hin zum Mühlenwart.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Messanordnung inkl. eines Messprinzips gesucht, das aus der Kombination einfacher Messgeräte bzw. deren Messwerte eine Erhebung des Windpotentials an einem Standort ermöglicht und gleichzeitig Rückschlüsse auf die zu erwartende Vereisungsdauer einer WKA an diesem Standort zulässt.

Da der Standort Windsfeld im Winter schwer zu erreichen ist und ein eventueller Messanlagenausfall daher zu großen Lücken in den Messreihen führt, wurden bereits im Winter 2011/12 im Rahmen von Vorarbeiten Messungen an einem Standort im Skigebiet Faschina (Vorarlberg) durchgeführt: Dies geschah, um die Zuverlässigkeit der Station zu überprüfen und um bei der Auswertung der Zusammenhänge auf einen erweiterten Datenpool zurückgreifen zu können.



## 2 Vereisung

„Eis“ ist physikalisch gesprochen  $H_2O$  im festen Aggregatzustand. Während gefrorenes Wasser für den österreichischen Wintertourismus als Schnee unersetzbar ist, so ist Eis für viele technische Anwendungen, wie eben die Windenergie, eine unerwünschte, teilweise auch gefährliche Randbedingung. Wurde Vereisung von Windkraftanlagen in den Anfangsjahren dieser Technologie hauptsächlich als zusätzliche statische Last für Turm und Rotorblätter verstanden, so finden seit Mitte der Neunzigerjahre umfangreiche internationale Forschungsprojekte statt, die Vereisung als ganzheitliche Auswirkung auf das System Windkraftanlage verstehen. Als Beispiele hierfür können die Programme COST Action 727 (EU), Task XIX „Wind Energy in Cold Climate“ (International Energy Agency IEA) oder das Projekt „New Icetools“ des Finnischen Meteorologischen Instituts genannt werden (vgl. Cattin, 2008). Diese Projekte haben die Perspektive auf das Auftreten von Vereisung verändert und bewirkt, dass bei möglichem Auftreten von Vereisung auf diesen Punkt aufgrund seiner weitreichenden Auswirkungen während der gesamten Projektplanungs- und Durchführungsphase besonderes Augenmerk gelegt werden muss. Ebenso hat knapp die Hälfte aller Hersteller aufgrund der verstärkten Nachfrage nach Anlagen für Standorte in den Alpen oder im hohen Norden besondere „Ausstattungslinien“ ihrer Modelle vorgesehen, sogenannte Cold-Climate (CC) Anlagen. Diese Anlagen verwenden beispielsweise Schmieröle, die auch bei tiefen Temperaturen die Grenzwerte der Viskosität einhalten können sowie spezielle elektrische Komponenten (vgl. Hehenberger, 2012).

### 2.1 Auswirkungen von Vereisung auf Windkraftanlagen

Das Auftreten von Vereisung muss aufgrund seiner vielfältigen Auswirkungen in nahezu allen Bereichen bei der Planung und im Betrieb eines Windkraftprojektes gesondert berücksichtigt werden (siehe Abbildung 6):



Abbildung 6: Auswirkungen von Vereisung

### **2.1.1 Technische Auswirkungen von Vereisung**

Der Betrieb einer WKA bei Vereisung und bei tiefen Umgebungstemperaturen bringt erhöhte Anforderungen an das Material mit sich. Es steigt die Gefahr von Sprödbrüchen bei Metallen und Kunststoffen, ebenso die Gefahr, dass Materialverbindungen wie Schweiß- oder Nietnähte aufreißen.

Eis an den Rotorblättern der Anlage stellt eine Zusatzlast dar, die Kräfte größer der in der Auslegung angenommenen Lasten bewirkt. Überdies sind die Eismassen nur im Idealfall gleichmäßig auf den Rotorblättern verteilt – im Regelfall werden die Rotorblätter unterschiedlich stark vereist sein, was zu ungleichmäßigen Belastungen der Lager und vom Regelbetrieb abweichenden Schwingungen im Triebstrang führt.

Die Kombination aus zusätzlichen Lasten und geändertem Schwingungsverhalten zieht sich von den Rotorblättern durch Gondel und Turm bis ins Fundament der Anlage. Somit müssen auch diese Teile der WKA stärker dimensioniert und eventuell besonders gefertigt werden. Gleichsam können in kalten Regionen auch besondere Bedingungen wie Permafrostboden oder (in den Bergen) besonders felsige Untergründe vorhanden sein, welche zusätzliche Herausforderungen für die Ingenieure darstellen.

Herrschen in der Umgebung einer Anlage Vereisungsbedingungen, so ist vor allem die Sensorik, welche ja im permanenten Kontakt mit der Umwelt steht, diesen Bedingungen ausgesetzt. Messgeräte müssen je nach Messprinzip teilweise dauernd eisfrei gehalten werden um ihre eigene, und somit auch die Funktionalität der Anlage, zu garantieren.

Um die wirtschaftlichen Einbußen durch Vereisung gering zu halten, bieten manche Hersteller für ihre CC-Anlagen Rotorblattheizungen an. Auf die unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten dieser wird später eingegangen, auf jeden Fall stellt sie jedoch einen verstärkten Regelungs- und Überwachungsaufwand dar.

Dies ist nur eine Auswahl der von Vereisung beeinflussten technischen Komponenten, tatsächlich beeinflusst der Betrieb bei extremen Temperaturen nahezu alle Bauteile einer WKA.

### **2.1.2 Wirtschaftliche Auswirkungen von Vereisung**

Aufgrund der oben beschriebenen höheren Anforderungen an Material, Konstruktion, Zusatzausstattung und Infrastruktur fallen bei Anlagen, die im kalten Klima betrieben werden, höhere Investitionskosten an, die über die Betriebsdauer abgeschrieben und somit auch verdient werden müssen. Gleichzeitig bieten nicht alle Hersteller CC-Anlagen an, was in diesem Segment zu weniger Konkurrenz zwischen den Produzenten führt und sich daher (aus Sicht des Kunden) negativ auf den Preis auswirkt. Vor allem das Fehlen von „Billigproduzenten“, die auf große Stückzahlen von Standardanlagen spezialisiert sind, führt dazu, dass die angebotenen Preise/kW Leistung wesentlich höher als bei Normbedingungen im Flachland sind. Beispielsweise gibt es derzeit nur einen Hersteller am Markt, der mehrjährige Erfahrung im Betrieb von Anlagen mit integrierter Rotorblattheizungsanlage vorweisen kann (Enercon) (vgl. Trauttmansdorff, 2011b).

Jedoch fallen nicht nur bei der Anschaffung, sondern auch im Betrieb von Cold-Climate-Anlagen höhere Kosten an als sonst üblich: eine Rotorblattheizung benötigt einen Teil des erzeugten elektrischen Stroms um die Rotorblätter eisfrei zu halten bzw. die Eismenge abzutauen. Ebenso führt die Vereisung zu häufigeren Störungen der Anlagen, darum muss diese öfter abgestellt werden und der Mühlenwart muss mehr Zeit vor Ort verbringen um diese Fehlermeldungen zu beheben bzw. die Anlage wieder in Betrieb zu nehmen (vgl. Trauttmansdorff, 2011b, sowie Lotter, 2011).

Meist ist der Staupunkt der Rotorblätter (Vorderkante) die erste Stelle der Anlage, welche von Vereisung betroffen ist. Dies führt dazu, dass sich ausgehend vom Staupunkt nach vorne und hinten über die gesamte Blattlänge von der Nabe bis zur Blattspitze ein Eisbehang ausbildet, wie er in Abbildung 7, gut erkennbar ist. Dieser Eisbehang führt dazu, dass die Strömungsverhältnisse am Rotorblatt gestört werden, die Luftströmung früher ablöst und somit die Umwandlung von kinetischer Windenergie in Rotationsenergie abnimmt – ein Leistungsabfall und somit ein Ertragsentgang der Anlage stellt sich ein. Untersuchungen haben ergeben, dass die Leistung des Rotors bereits bei einer Vereisung im Ausmaß von 3 % der örtlichen Profiltiefe (Abstand zwischen Blattvorder- und -hinterkante) vermindert wird, Anlagenhersteller berichten sogar von einem deutlichen Leistungseinbruch obwohl die Vereisung noch nicht sichtbar ist – dies ist durch eine Änderung der Oberflächenrauigkeit zu begründen (vgl. Seifert, 2003 sowie Trauttmansdorff, 2011b). Die Vereisung der Blattnase tritt sowohl im Leerlauf als auch während der Produktion auf. Tatsächlich ist zu bemerken, dass der Eisansatz im Leerlauf sogar wesentlich größer ist als im Betrieb, da die Trägheits- und Vibrationskräfte wegfallen, welche ansonsten regelmäßig zum Abbrechen/Wegwehen der Eisfahnen führen (vgl. Seifert, 1999).



**Abbildung 7: Vereisung an Rotorblättern (Baring-Gould et al., 2009, © Kent Larsson)**

Obwohl sich diese Faktoren negativ auf die Betriebskosten von vereisungsgefährdeten Anlagen auswirken, bietet die Stromproduktion bei niedrigen Temperaturen auch Vorteile: Bei kalten Temperaturen nimmt die Dichte der Luft erheblich zu (+27 % zwischen +35 °C und -30°C), was für gleichbleibenden Ertrag die notwendige durchschnittliche Windgeschwindigkeit im selben Ausmaß senkt (vgl. Baring-Gould et al., 2009). Hierbei ist zu beachten, dass niedrige Temperaturen nur während der kalten Jahreszeit auftreten, die durchschnittliche Windgeschwindigkeit jedoch für das Gesamtjahr berechnet wird.

### 2.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen bei Vereisung/Vereisungsgefahr

Anlagen, die in Gebieten erhöhter Vereisungsgefahr errichtet werden, befinden sich meist in alpinen, häufig landschaftlich geschützten Zonen. Dies führt zu länger dauernden, teureren Genehmigungsprozessen und härteren Umwelt- sowie strengeren Betriebsauflagen. In Österreich sind Betriebsgenehmigungen (elektrizitätsrechtliche Genehmigungen) für Windkraftanlagen der Landesgesetzgebung unterstellt. Auch wenn, wie erwähnt, in Salzburg bis dato keine solche Genehmigungen ausgestellt wurden, so ist es in den anderen österreichischen Bundesländern sowie in Deutschland und der Schweiz üblich, dass in diesem Genehmigungsbescheid die Auflage erteilt wird, dass eine Anlage mit Vereisungssensorik ausgestattet, bei Vereisung abgestellt und erst nach visueller Überprüfung des Mühlenwerts wieder in Betrieb genommen werden darf (vgl. Zelinka, 2012). Diese Auflage ist vor allem bei Anlagen im hochalpinen Gelände problematisch, da die Parkstandorte während des Winters nicht oder nur sehr schwer zugänglich sind und somit einerseits wesentliche Kosten für das Freiräumen der Wege kalkuliert werden müssen, andererseits enorme Stillstandszeiten anfallen können, wenn der Zugang zur Anlage beispielsweise aufgrund von Lawinengefahr nicht möglich ist. Die dadurch eingeschränkte Anlagenverfügbarkeit ist bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung eines Parks ein sehr wichtiger Punkt, sodass beispielsweise der Hersteller Enercon für seine Anlagen mit Rotorblattheizung auch eine Versicherung anbietet, die einen bestimmten Wert der Anlagenverfügbarkeit garantiert - diese schließt jedoch nur Ausfälle aufgrund der Anlage, nicht Stillstandszeiten aufgrund von Nichterreichbarkeit ein. Im Gegenzug muss der Betreiber einen gewissen Prozentsatz der Erlöse der erzeugten Strommenge an den Anlagenhersteller bezahlen (vgl. Lotter 2011). Dadurch kann der Hersteller sein Geschäftsmodell erweitern und nicht nur beim Verkauf, sondern auch beim Betrieb der Anlagen verdienen.

Der Grund für dieses rigide Vorgehen der Genehmigungsbehörden ist die Gefahr des Eiswurfs. Darunter versteht man die spontane Ablösung von Eisstücken vom Rotorblatt: Diese werden von der Anlage weggeschleudert und stellen sowohl für Menschen als auch für benachbarte Gebäude, Fahrzeuge etc. eine relevante Gefahr dar. Daher müssen auch rund um die Anlagen Warnschilder und -lichter installiert werden, um Passanten auch bei schlechter Sicht vor Eiswurf zu warnen.

Weiters erhöht die nicht mehr optimale Umströmung der Rotorblätter bei Vereisung die Lärmbelästigung der Anrainer. Aus diesem Grund müssen bei vereisungsgefährdeten Anlagen größere Abstände zu bewohntem Gebiet eingehalten werden. Diese Auflage ist bei Anlagen im alpinen Gelände meist kein großes Problem, bei vereisungsgefährdeten Anlagen im Flachland jedoch oft nicht unwesentlich.

Der Umfang dieser zusätzlich entstehenden Risiken und Kosten macht es verständlich, warum die Information, ob und wie häufig Vereisung auftreten wird, bereits im frühen Stadium einer Standortevaluierung verfügbar sein sollte und für eine verlässliche Wirtschaftlichkeitsrechnung unbedingt notwendig ist.



## 2.2 Arten von Vereisung

Bei der Vereisung von WKA spricht man von verschiedenen Eisarten, die sich in ihrer Entstehung und ihren Auswirkungen auf die Anlage unterscheiden. Grob kann man zwischen der „Eisbildung aus Wolken und Nebel (Raureif und Klareis)“, sogenanntes **In-Cloud Icing**, und der „Eisbildung aus Niederschlag (Nassschnee und Eisregen)“, **Precipitation Icing**, differenzieren (vgl. Cattin, 2008).

### 2.2.1 Raureif

Diese Art der Vereisung entsteht, wenn sogenannte „super-cooled droplets“, also Regentröpfchen mit einer Temperatur unter 0 °C auf eine deutlich kältere Oberfläche auftreffen. Durch die Oberflächenspannung der Tröpfchen bleiben diese in der Luft noch flüssig, obwohl ihre Temperatur bereits unter dem Gefrierpunkt liegt. Treffen sie jedoch auf eine Oberfläche platzen sie, die Oberflächenspannung sinkt, die Flüssigkeit gefriert sofort und bleibt ohne Flüssiganteil als Raureif zurück.

Raureif bildet sich immer an der dem Wind zugewandten Seite und meist bei Temperaturen zwischen 0 und -20°C bei Hebung feuchterer Luftmassen aus dem Tal hin zu vom Wind überströmten Bergrücken aus. Seine Dichte ist geringer als jene von Klareis, somit werden selten große Eismassen erreicht. Aus der Praxis wird berichtet, dass Raureifbehang meist von so geringer Dichte ist, dass er nur sehr schwer detektiert werden kann und häufig im Betrieb durch Rotationskräfte und die Vibrationen der Anlage weggeweht wird. Gefahr des Eiswurfs besteht selten, da sich die Reifansammlungen meist noch in der Luft wieder zerstäuben und somit nur ein geringes Risiko für Personen am Boden darstellen (vgl. Cattin, 2008 sowie Kaltenegger, 2012).

### 2.2.2 Klareis

Weist die Oberfläche, auf welche die unterkühlten Tröpfchen auftreffen, jedoch eine Temperatur knapp unter- oder oberhalb des Gefrierpunktes auf, so bilden sich transparente Eisschichten aus, die auch noch flüssiges Wasser beinhalten. Diese passen sich an die Oberfläche des Rotorblatts an und es werden viel höhere Dichten als bei Raureif erreicht. Überdies haftet Klareis wesentlich besser an der Struktur: die Belastung für die Anlage sowie das Risiko von Verletzungen bei Eiswurf sind wesentlich größer als bei Raureif. Klareis tritt bei Lufttemperaturen zwischen 0 und -4 °C und gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit auf (vgl. Cattin, 2008).

### 2.2.3 Nassschnee

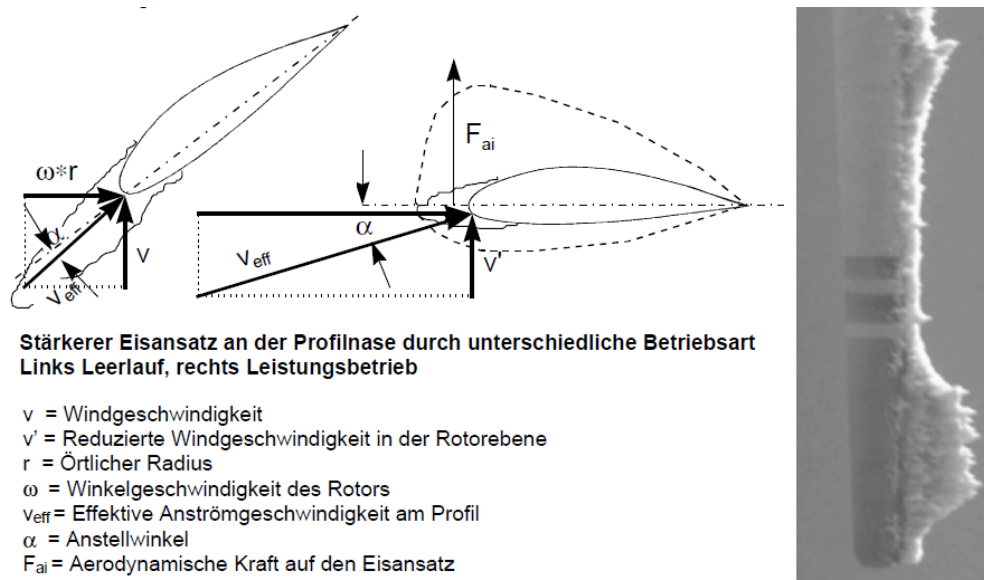
Man spricht von Nassschnee, wenn bei Temperaturen um die 0 °C Niederschlag herrscht, der noch nicht vollständig gefroren ist. Dieser feuchte Schnee bleibt an den Rotorblättern haften, was vor allem bei Stillstand der Anlage ein Problem darstellt, wenn die Temperaturen anschließend fallen und der Nassschnee anfriert.

## 2.2.4 Eisregen

Zur Entstehung von Eisregen muss Schnee aus kalten Luftschichten durch eine wärmere Inversionsschicht fallen, dabei etwas auftauen und beim Auftreffen auf die kalte Anlage wieder gefrieren. Somit bildet sich eine Klareisschicht mit denselben Eigenschaften und Gefahren wie in Absatz 2.2.2 angeführt (vgl. Cattin, 2008).

## 2.3 Orte der Vereisungsbildung

Wie auf Seite 9 beschrieben lagert sich Eis meist am Staupunkt (Vorderkante) der Rotorblätter ab. Hier können schwerere Feuchtigkeitströpfchen aufgrund ihrer Trägheit der raschen Richtungsänderung der Luft nicht mehr folgen und bleiben an der Oberfläche kleben. Diese Ansammlungen können vor allem bei Stillstand der Anlage Größen von bis zu 100 % der Rotorblatttiefe erreichen, siehe Abbildung 8 (vgl. Seifert, 1999).



**Abbildung 8: Unterschiedlicher Eisansatz an einer pitchgeregelten WKA im Leerlauf-(links) und im Produktionsbetrieb (Mitte), sowie Eisansatz nach Leerlaufbetrieb (rechts), (Seifert, 1999)**

Neben der Vorderkante ist auch die Hinterkante des Rotorblatts strömungsbedingt häufig von Vereisung betroffen: Der bei der Beschleunigung der Luftströmung entstehende Unterdruck führt dazu, dass sich ein Teil der kleineren Tröpfchen, die der Strömung rund um das Rotorblatt folgen konnte, hier abscheidet und sich ebenfalls eine Eisschicht von der Nabe bis zur Blattspitze ausbildet (vgl. Cattin, 2008).

## 2.4 Zeitliche Qualifizierung von Vereisung

Um die zeitliche Dimension beim Auftreten von Vereisung zu berücksichtigen, teilt man ein Vereisungsevent in „Meteorological Icing“ und „Instrumental Icing“ ein.

### 2.4.1 Meteorological Icing

Unter Meteorological Icing versteht man nach (Cattin, 2008) jene Zeitspanne, welche auf Grund der physikalischen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck etc.) die Entstehung von Eis zulässt. Sobald beispielsweise die Temperatur wieder ansteigt oder die Luftfeuchtigkeit fällt, sodass sich kein neues Eis mehr an der Oberfläche bildet, ist das Meteorological Icing beendet.

### 2.4.2 Instrumental Icing

Instrumental Icing steht nach (Cattin, 2008) für die Zeitdauer vom ersten Auftreten des Eises auf der Oberfläche (bzw. dessen Detektion) bis hin zum kompletten Abtauen desselben, also Eisfreiheit der Anlage. Da es Zeit benötigt bis sich eine detektierbare Eismenge gebildet hat, beginnt Instrumental Icing erst in einem gewissen Zeitabstand nach dem Meteorological Icing („Incubation Time“) und dauert dafür länger an, da das Eis auch wieder abtauen muss (was per Definition während Meteorological Icing ausgeschlossen wird). Die Zeitdifferenz zwischen Ende des Meteorological Icings und der Eisfreiheit bezeichnet man als „Recovery Time“.

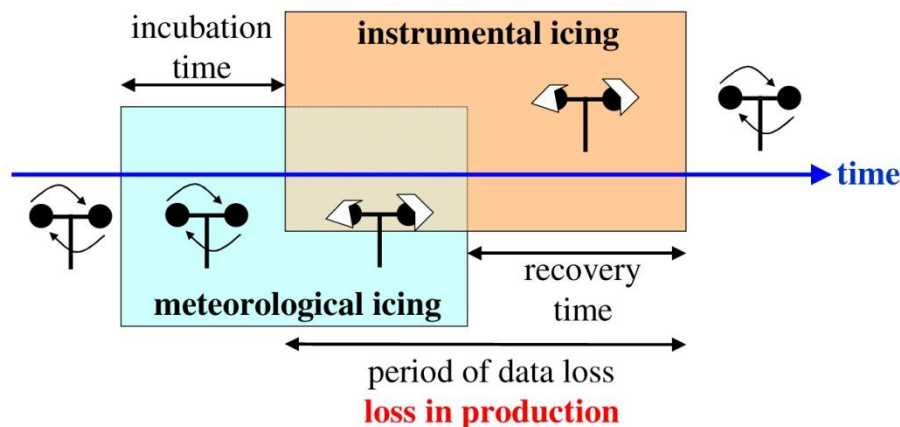


Abbildung 9: Zeitdefinitionen bei Vereisung, (Cattin, 2008)

In Abbildung 9 kann man erkennen, über welche Zeitdauer ein Produktionsverlust der Anlage entsteht. Ebenso wird ersichtlich, wo die unterschiedlichen Mechanismen der Hersteller zur Vermeidung von Stillstandszeiten der Anlagen ansetzen: Während Anti-Icing Maßnahmen darauf abzielen, das Instrumental Icing hinaus zu zögern, versuchen De-Icing Maßnahmen die Recovery Time zu verkürzen. Beide Ansätze führen, sofern sie wirken, zu geringeren Produktionsverlusten, ideal ist eine Kombination von beiden. Details dazu finden sich unter Absatz 2.6: „Anti-Icing und De-Icing“.

## 2.5 Verfügbare Sensorik zur Vereisungsdetektion

Derzeit sind verschiedene Geräte und Messsysteme auf dem Markt erhältlich, die mit unterschiedlichen Messprinzipien Vereisung detektieren. Studien, die diese Systeme miteinander verglichen und so Aussagen über ihre Zuverlässigkeit zulassen, wurden bereits mehrfach durchgeführt (siehe beispielsweise Carlsson, 2010). Dabei kann unterschieden werden zwischen Detektionsmechanismen, die nur auf einer Windkraftanlage installiert werden können (da sie vereisungsbedingte Änderungen im Betrieb detektieren) und jenen, die als Stand-Alone-Gerät konzipiert sind. Auch wenn diese WKA-unabhängigen Sensoren unter Laborbedingungen verschiedene Vereisungszustände gut erkennen können, so erfährt man von Parkbetreibern, dass die Performance dieser Messgeräte in der Praxis mehrheitlich unzufriedenstellend sei, während Sensorsysteme, die in der WKA integriert sind durchaus zuverlässig wären (vgl. Trauttmansdorff, 2011b). Dies entspricht auch den Ergebnissen der oben angeführten Vergleichsstudien.

### 2.5.1 Externe Vereisungssensoren

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die derzeit am Markt erhältlichen externen Vereisungssensoren und deren Messprinzipien, sie stellt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit:

**Tabelle 1: Externe Vereisungssensoren und das jeweilige Messprinzip, (vgl. Carlsson, 2010)**

<b>Sensorik:</b>	<b>Messprinzip:</b>
Beheiztes und unbeheiztes Anemometer	Evaluierung des Offset zwischen den gemessenen Windgeschwindigkeiten eines beheizten und eines unbeheizten Anemometers
Labkotec LID-3300IP	Auswertung der Änderungen von Eigenfrequenz und Amplitude der mechanischen Schwingung eines vereisten Hohldrahtes
HoloOptics T20-series	Messung der Intensität der Reflexion eines Infrarotlichtstrahls abhängig von der Vereisung des Reflektors
Combitech IceMonitor	Detektion der an einem unbeheizten Stahlstab anhaftenden Eismasse durch eine Waage
Sensoren der Fa. Goodrich/Rosemount	Auswertung der Eigenfrequenzänderung eines angeregten Metallstabs
Instrumar IM101	Messung von elektrischer Impedanz und Oberflächentemperatur einer Keramikprobe

Die Sensoren der Fa. Labkotec (Finnland) erreichen derzeit die größten Marktanteile, daher wird die Funktionsweise dieses Sensors in Absatz 5.1.1.2 genauer erklärt.

## Beheiztes und unbeheiztes Anemometer

Da der Vergleich zwischen den gemessenen Windgeschwindigkeiten eines beheizten und eines unbeheizten Anemometers den Stand der Technik bei der Vereisungsevaluierung von möglichen Windparkstandorten darstellt, soll auf diese Methode hier näher eingegangen werden:

Mit dieser Art der Vereisungsmessung kann nur die Dauer, nicht aber die Intensität der Vereisung abgeschätzt werden. Dabei werden zwei Anemometer (meist Schalenstern-Anemometer) an der Messstation montiert, eines davon ist beheizt, das andere nicht (Abbildung 10). Tritt am unbeheizten Anemometer Vereisung ein, so ergibt sich eine Differenz zwischen den gemessenen Windgeschwindigkeiten, die Dauer dieser Abweichung wird als Dauer für das Instrumental Icing angenommen. In Abbildung 11 ist diese Zeitspanne ersichtlich: Während im rot hinterlegten Zeitraum die unbeheizten Anemometer nur eine geringere Windgeschwindigkeit messen, stehen sie im grün hinterlegten Zeitraum komplett still. Nach dem Abtauen messen beheizte und unbeheizte Anemometer wieder die selbe Windgeschwindigkeit.



Abbildung 10: Links: Vereiste unbeheizte Messgeräte (Matzendörfer Stierenberg, Schweiz). Rechts: Beheiztes und unbeheiztes Anemometer (Sternstein, Österreich), (Cattin, 2008)

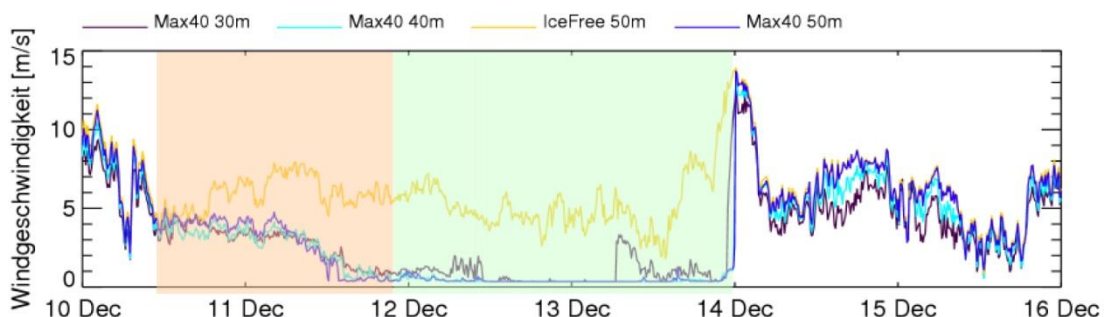


Abbildung 11: Vereisungsmessung mittels beheizten und unbeheizten Anemometers. Gelb: beheizter Sensor, blau/türkis: unbeheizte Sensoren, (Cattin, 2008)

Obwohl dieses Vorgehen derzeit den Standard bei der Bewertung des Vereisungspotenzials eines möglichen Windparkstandortes darstellt, beinhaltet es einige Nachteile: Es kann nicht garantiert werden, ob die Heizleistung des beheizten Anemometers ausreicht dieses eisfrei zu halten. Ebenso schmilzt durch die Beheizung der Schaufeln eventuell anhaftendes Eis, das so entstehende Wasser wird durch die Rotation nach außen transportiert und kann dort gefrieren. Es bilden sich Eiszapfen, die die Trägheit des Anemometers ändern und somit die *Wind*messung an sich wertlos machen (siehe Abbildung 12). Ebenso wurden bei der Eismessung am Windsfeld Fälle beobachtet, bei denen zwar die Anemometer selbst eisfrei blieben, sich jedoch rundherum Schneekugeln bildeten die es komplett einhüllten. In diesem Fall zeigen beide Anemometer dasselbe Resultat (kein Wind, keine Vereisung), obwohl Vereisungsbedingungen vorherrschen und Wind durchaus möglich, sogar wahrscheinlich ist.



**Abbildung 12: "Zäpfchenbildung" und somit Verfälschung der Messung eines beheizten Anemometers, (Lachinger, 2011)**

Diese Schwachstellen zeigen auf, warum einerseits die Kameraüberwachung einer Wetterstation große Vorteile bringt und andererseits eine bessere Messanordnung gefunden werden sollte, die die oben beschriebenen Probleme ausschließt oder zumindest minimiert.

## **2.5.2 In die WKA integrierte Vereisungssensoren**

In die WKA integrierte Sensorsysteme können Vereisung wesentlich besser detektieren, da sie direkt in die Steuerung der Anlage integriert sind. Ihr Nachteil ist jedoch, dass sie mangels einer Windturbinen für eine Standortevaluierung nicht herangezogen werden können.

### **2.5.2.1 Vergleich der Leistungskurven**

Zu jeder Anlage liefert der Hersteller eine bei der Zertifizierung vorzuweisende Leistungskurve, die die generierte elektrische Leistung der WKA bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit darstellt. Bildet sich Vereisung an den Rotorblättern, so weicht die tatsächliche Leistungskurve auch bei geringen Eismengen von jener im eisfreien Zustand ab, somit kann Vereisung detektiert werden. Dieses System ist relativ einfach, genau und kostengünstig und wird daher serienmäßig als Vereisungssensor in den Anlagen installiert (vgl. Trauttmandorff, 2011b).

### 2.5.2.2 IGUS BladeControl®

Dieses System misst mittels mehrdimensionaler, piezoelektrischer Beschleunigungssensoren in den Rotorblättern deren mechanischen Eigenfrequenzen und ist in der Lage, sehr genau zwischen Schäden der Oberfläche oder zusätzlichen Lasten aufgrund von Vereisung zu unterscheiden (siehe Abbildung 13). Dabei wird das gesamte Frequenzspektrum eines jeden Rotorblattes mit einer Auflösung von 0,004 Hz gemessen und mit jenem im unbeschädigten Zustand verglichen. Dabei kann nicht nur Vereisung „ja/nein“, sondern auch die Größe der Eislast angegeben werden, beispielsweise kann bei einem 42 m Rotorblatt (Gewicht ca. 10 t) eine Eismasse von vier Kilogramm detektiert werden (dies entspricht einer Eisdicke von ca. 1,5 mm über eine Breite von 20 cm entlang der Blattnase). BladeControl® hat sich in der Praxis bewährt und wird neben der Vereisungsdetektion auch aufgrund der Möglichkeit zur frühzeitigen Schadenserkenkung in viele Anlagen eingebaut. Als Nachteil kann die zu hohe Sensibilität dieser Methode gewertet werden, die die Anlage häufig abstellt obwohl sich nur geringste Eismengen angesammelt haben (=Ertragsverlust) (vgl. Trauttmansdorff, 2011b, IGUS, 2012a, sowie IGUS, 2012b).

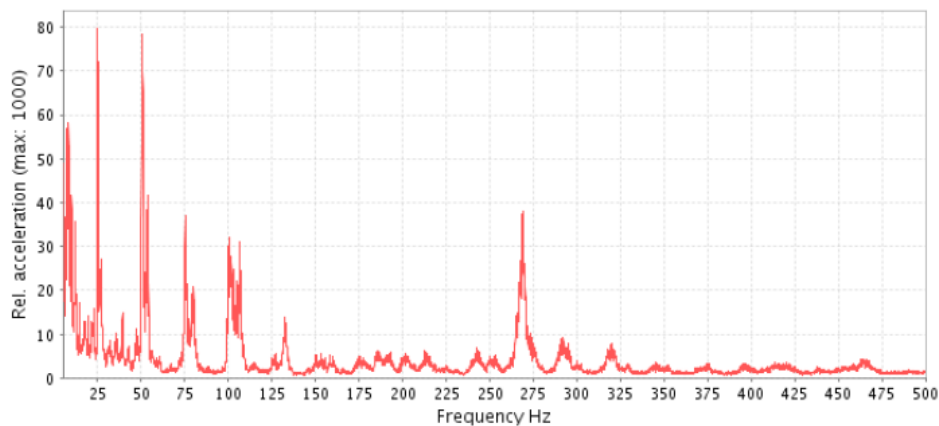


Abbildung 13: Ausschnitt aus dem Benutzerinterface des IGUS BladeControl®: Aufgetragen ist die gemessene Beschleunigung über den entsprechenden Frequenzen (IGUS, 2008)

### 2.5.2.3 Andere integrierte Messprinzipien

Weitere Ansätze zur Eisüberwachung an WKA nutzen beispielsweise die visuelle Überprüfung der Rotorblätter durch eine Kamera, welche ein Live-Bild mit vorher hinterlegten, eisfreien Bildern vergleicht und so Abweichungen erkennen soll (siehe Abbildung 14). Dieses Messprinzip befindet sich erst im Prototypstadium und ist noch nicht am Markt erhältlich (vgl. Cattin, 2008).

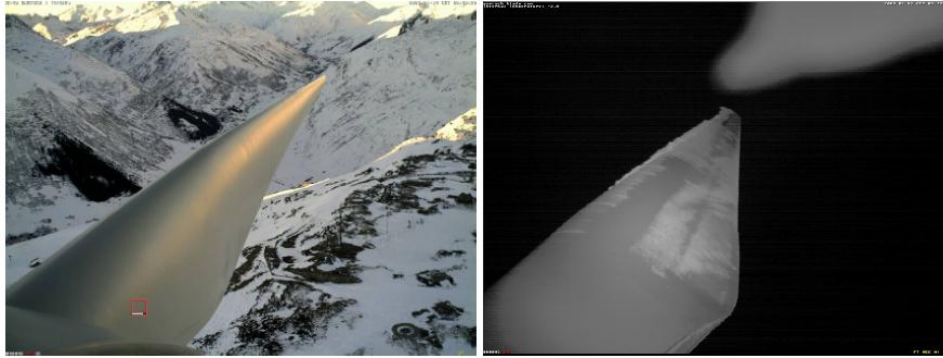


Abbildung 14: Links: Aufnahme eines Rotorblatts der WKA auf dem GÜtsch (Schweiz) im eisfreien Zustand. Rechts: Vereiste Aufnahme eines Rotorblatts bei Nacht. (Cattin, 2008)

Ebenso ändert sich durch Eis auf den Rotorblättern das entstehende Geräusch der Anlage: Das Geräuschspektrum verschiebt sich hin zu höheren Lasten, außerdem wird die Anlage insgesamt „lauter“ (siehe Abbildung 15). Man könnte somit durch Mikrofone über diese akustische Veränderung Vereisung detektieren, es konnte jedoch kein Anbieter eines solchen Systems gefunden werden.

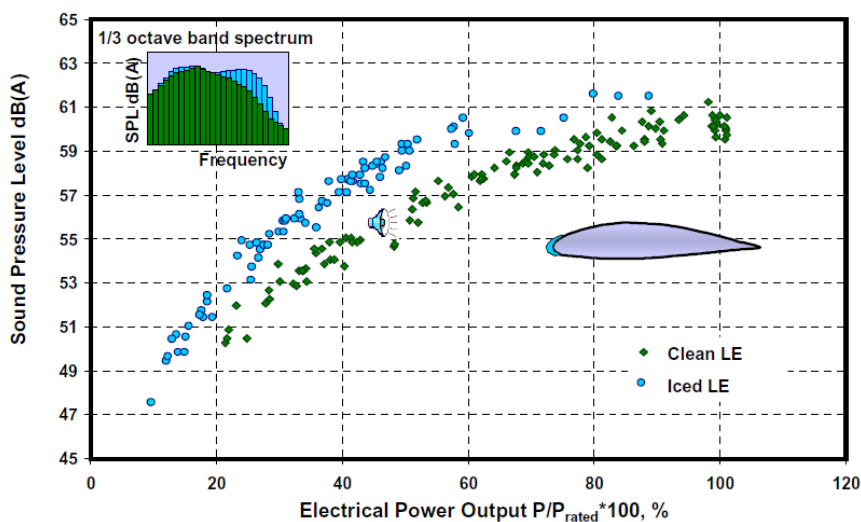


Abbildung 15: Zunahme des Pegels und Verschiebung des Geräuschspektrums bei leichter Vereisung (blau) im Vergleich zum eisfreien Rotorblatt (grün), (Seifert, 2003)

## 2.6 Anti-Icing und De-Icing

Anlagenhersteller versuchen mit verschiedenen Maßnahmen die Stillstandszeit aufgrund von Vereisung zu verkürzen (Verlängern der Incubation-Time bzw. Verkürzen der Recovery Time). Neben der technischen Gestaltung ist hier auch die sinnvolle und energiesparende Steuerung dieser Einrichtungen ein interessantes Forschungsgebiet, auf dem noch einiges erwartet werden darf.



## 2.6.1 Anti-Icing

Unter Anti-Icing versteht man das möglichst lange Hinauszögern des Instrumental Icing unter Vereisungsbedingungen. Dazu gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, wie beispielsweise die Oberfläche schwarz zu lackieren und somit die Temperatur der Rotorblätter bei Sonneneinstrahlung schneller zu erhöhen, was Vereisung erschwert und schnelleres Abtauen fördert. Ein anderer Ansatz ist das Aufbringen einer Nanobeschichtung, die das Anhaften von Flüssigkeitsmolekülen verhindert (vgl. Siegmann et al., 2006, sowie Sell, 2011).

Alle diese Ansätze, die sich auf die Oberflächenbeschaffenheit der Rotorblätter beziehen, haben jedoch den Nachteil dass sich die Beschichtungen durch Feinstaub und andere harte Schmutzpartikel der Luft abschleifen, ihre Wirkung somit permanent abnimmt und sie innerhalb weniger Jahre wieder erneuert werden müssen. Hier sollen vor allem neuentwickelte Lacke zur Verbesserung und zum langfristigen Schutz beitragen (vgl. Deutsches Lackinstitut, [www.lacke-und-farben.de](http://www.lacke-und-farben.de), 06. 11. 2012).

## 2.6.2 De-Icing

De-Icing bedeutet, dass Maßnahmen getroffen werden, die die Eisschicht auf den Rotorblättern nach dem Ende des Meteorological Icings so schnell wie möglich entfernen. Dazu gibt es am Markt derzeit nur eine über mehrere Jahre getestete und funktionierende Lösung, nämlich das Konzept eines Heizlüfters im Inneren des Rotorblattes (Fa. Enercon). Andere Hersteller, wie beispielsweise Siemens oder Leitwind stehen kurz vor der Serienreife ihrer Heizungssysteme (vgl. Lotter, 2011 sowie Holgerson, 2012).

Betrachtet man jedoch den Aufwand an Energie, die notwendig ist um die (im Vergleich zur Gesamtfläche des Rotorblatts) kleine Fläche der Blattnase zu beheizen, so kann eine elektrisch betriebene Warmluftheizung, die den gesamten Flügel von innen nach außen zur Eisschicht erwärmen muss, niemals eine ideale Lösung sein: Das Epoxidharz des Rotorblatts schirmt wie eine Isolierung das Eis außen von der warmen Luft innen ab. Aus diesem Grund müssen Heizleistungen von ca. 80 kW/Anlage installiert werden. Ebenso funktioniert dieser Heizlüfter derzeit nur bei Stillstand der Anlage, somit entgeht weiterer Ertrag (vgl. Trauttmandorff, 2011b). Aus diesem Grund wird daran gearbeitet, über Heizfolien und –lacke die Wärme auf der Oberfläche des Rotorblatts, also direkt beim Eisansatz, einzubringen, was energetisch wesentlich sinnvoller ist da der Flügel nicht mehr komplett erwärmt werden muss. Allerdings vermindern Heizdecken mit feinen Widerstandsdrähten wegen deren hoher elektrischer Leitfähigkeit die Wirksamkeit des Blitzschutzsystems der Windkraftanlage, und Heizlacke werden derzeit, wie unter 2.6.1 erwähnt, im Betrieb wegerodiert. Werden die Heizdrähte jedoch von Schutzschichten überzogen, so nähert man sich wieder der Lösung des Heizlüfters an: Die Distanz zwischen Wärmequelle und der Stelle, die erwärmt werden soll, wird vergrößert, somit steigt der Energieverbrauch an.



### **3 Aktuelle Methoden zur Abschätzung der Vereisungsdauer und relevante Größen**

Dieses Kapitel beschreibt, mit welchen Möglichkeiten (abseits von Eissensoren) derzeit die Vereisungshäufigkeit bzw. –dauer eines Standortes abgeschätzt werden kann, und welche Stadien während eines Vereisungsereignisses auftreten. Die dadurch aufgezeigten Unzulänglichkeiten bisheriger Abläufe lassen zusammen mit den in den Kapiteln 1 und 2 gezeigten Beziehungen eine exaktere Formulierung der Aufgaben einer zu entwickelnden Messstation zu.

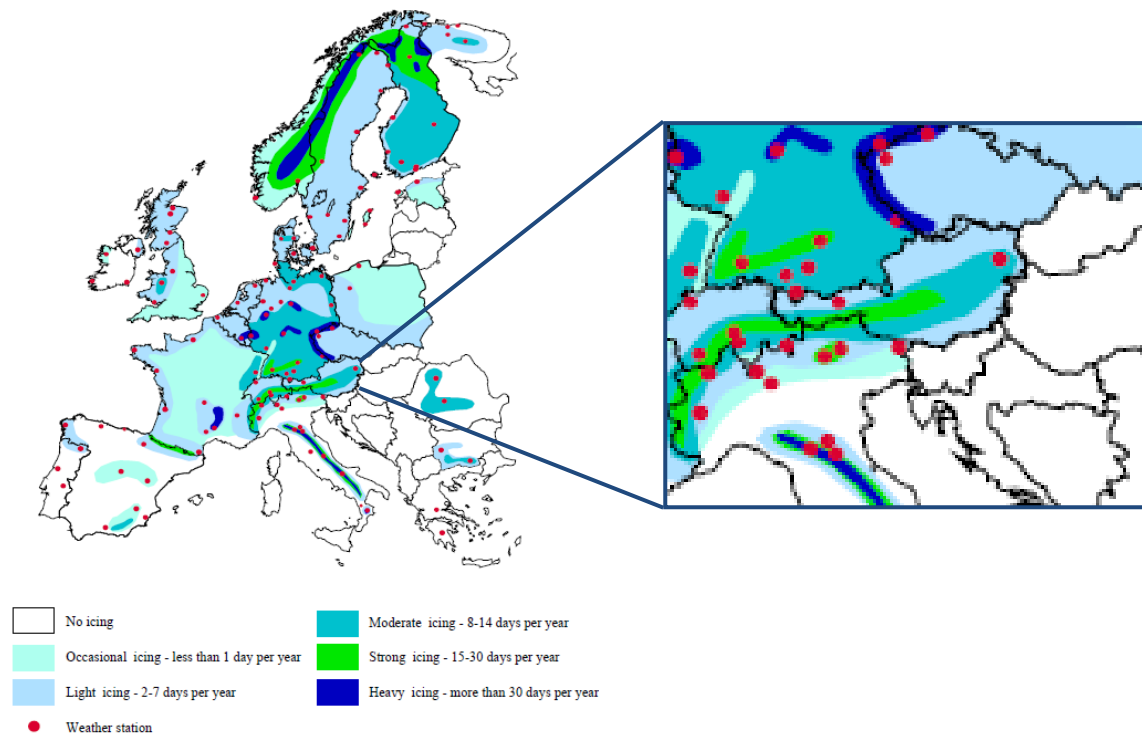
Ausgehend von synoptischen Detektionsmethoden („synoptisch = zusammengestellt, nebeneinander gereiht“ ([www.duden.de](http://www.duden.de), 06. 10. 2012) - darunter versteht man in diesem Zusammenhang das Herleiten einer Information über den Vereisungszustand anhand voneinander unabhängiger Messwerte) werden weiters die für Vereisung maßgeblichen meteorologischen Größen aufgezeigt und ihre messtechnische Erfassung erklärt. Ebenso werden neuartige Eissensoren beschrieben, die die Detektion von Eis zuverlässiger als bisher ermöglichen sollen.

#### **3.1 Möglichkeiten zur groben Abschätzung**

Benötigt man für einen bestimmten Standort eine zuverlässige Aussage über die Anzahl der Stunden, während denen eine WKA vereisungsgefährdet ist, so erhält man weder Garantien von Firmen, die diese Messungen durchführen, noch Rückmeldungen von Parkbetreibern, die eine zuverlässige Korrelation zwischen vorheriger Messung und anschließender Ausfallzeit der Anlagen bestätigen könnten. Dies liegt einerseits an der nicht zufriedenstellenden Performance des Messprinzips mittels beheiztem und unbeheiztem Anemometer, andererseits auch daran, dass Messungen dieser Art meist am Boden durchgeführt werden, während in Nabenhöhe (derzeitiger Standard in der 2 MW Klasse zwischen 80 und 120 m) andere Witterungsbedingungen (beispielsweise höhere Windgeschwindigkeiten und tiefere Temperaturen) herrschen. Aus diesem Grund wurden im Zuge der Forschung über Vereisung an WKA allgemein zugängliche Vereisungskarten entwickelt, die zumindest eine grobe Abschätzung zulassen sollten.

##### **3.1.1 WECO-Vereisungskarte**

Das EU-Projekt „Wind Energy Production in Cold Climates“ (WECO), verfolgte den Ansatz möglichst vielfältige Informationen über Vereisung von WKA zusammenzutragen, um diese anschließend an Hersteller, Betreiber, Forschungsinstitutionen etc. weiterzugeben. Unter anderem wurde dazu auch eine Landkarte Europas erarbeitet, die Risikozonen für Vereisung ausweisen und somit eine bessere Entscheidungsgrundlage für Parkbetreiber darstellen sollte.



**Abbildung 16: WECO-Eiskarte von Europa und Österreich im Speziellen, (Tammelin et al., 2000)**

Für diese Karte wurden an unterschiedlichen im Projekt untersuchten Standorten (größtenteils mit errichteten WKA), sowie 90 verschiedenen Wettermessstationen Daten zu Feuchtigkeit, Temperatur und Wolkenhöhe zusammengetragen und versucht, daraus die Anzahl an Tagen mit Vereisungsbedingungen, den rechnerischen Eisansatz in unterschiedlichen Höhen sowie den daraus resultierenden Energieertragsentgang abzuschätzen (vgl. Seifert, 1999).

So vorteilhaft diese Eiskarte für eine erste Information über den betreffenden Standort sein kann, so offenbart sie bei genauerem Hinsehen Unzulänglichkeiten, wie das Beispiel Windsfeld zeigt:

Trägt man den Standort des Windsfelds in der Eiskarte ein, fällt es bereits schwer eine exakte Klassenzugehörigkeit zu treffen. Es dürfte an der Grenze zwischen „strong icing“ (entspricht 15 - 30 Tagen Vereisung/Jahr) und „moderate icing“ (zwischen acht und 14 Tagen Vereisung/Jahr) liegen. Mit einer wesentlich höheren Auflösung der Karte könnte man hier sicher eine bessere Einteilung finden. Betrachtet man jedoch die Standorte der für die Berechnung verwendeten Wetterstationen, so fällt auf, dass sich keine in unmittelbarer Nähe zum Windsfeld befindet: Die für das Windsfeld in Frage kommenden, nächstgelegenen Wetterstationen sind in Kranjska Gora, östlich von Innsbruck, in München und in Wien. Diese Distanzen sind sicherlich zu groß, um eine exakte Aussage über das Windsfeld tätigen zu können. Die großen Unterschiede in den Gipfel- und Talformen sowie den sich dadurch ausbildenden Windströmungen der Alpentäler führen bereits bei wenigen Kilometern Abstand zwischen zwei Standorten zu teils sehr unterschiedlichem Vereisungsverhalten. Gerade an Übergängen zwischen Nord- und Südseite der Alpen, wie die Radstädter Tauern einer sind, beeinflusst die kleinräumige Topographie vor Ort die Feuchtigkeit und Temperatur der Luftmassen extrem, was sich direkt im Vereisungsverhalten niederschlägt (vgl. Mayr, 2011). Weiters bezieht die WECO-Eiskarte unterschiedliche Seehöhen nicht in die Berechnung mit ein. Dies führt dazu, dass für Tal-, Hang- und Gipfellagen laut Karte dieselben Vereisungstunden prognostiziert werden, was erfahrungsgemäß nicht der Realität entspricht.

Somit lässt sich aus der WECO-Eiskarte nur das bereits vorhandene Wissen um das hohe Vereisungsrisiko des Standortes Windsfeld bestätigen, eine gesicherte Aussage über die Vereisungsdauer oder den Ertragsentgang lässt sich jedoch bei weitem nicht tätigen.

### 3.1.2 Zusammenhang Seehöhe und Vereisung

Das Manko der Nichtberücksichtigung der Seehöhe versucht eine Untersuchung des Finnischen Meteorologischen Instituts auszugleichen. Dabei wurden die Vereisungsdauer unterschiedlicher Schweizer Windkraftanlagen abhängig von ihrer Seehöhe untersucht, klassifiziert und anschließend in einen Graphen mit linearer Ausgleichskurve eingetragen (Tabelle 2 und Abbildung 17):

Tabelle 2: Zu erwartende Vereisungsdauer unterschiedlicher Seehöhen in den Alpen, (Laakso et al., 2010)

Seehöhe [m]	Vereisungsdauer einer WKA in den Nordalpen [Tage]	Vereisungsdauer einer WKA in den Südalpen [Tage]
< 700	< 20	< 15
700 – 1.000	20 – 40	15 – 20
1.000 – 1.600	40 – 60	20 – 30
1.600 – 2.300	60 – 90	30 – 40
> 2.300	> 90	> 40

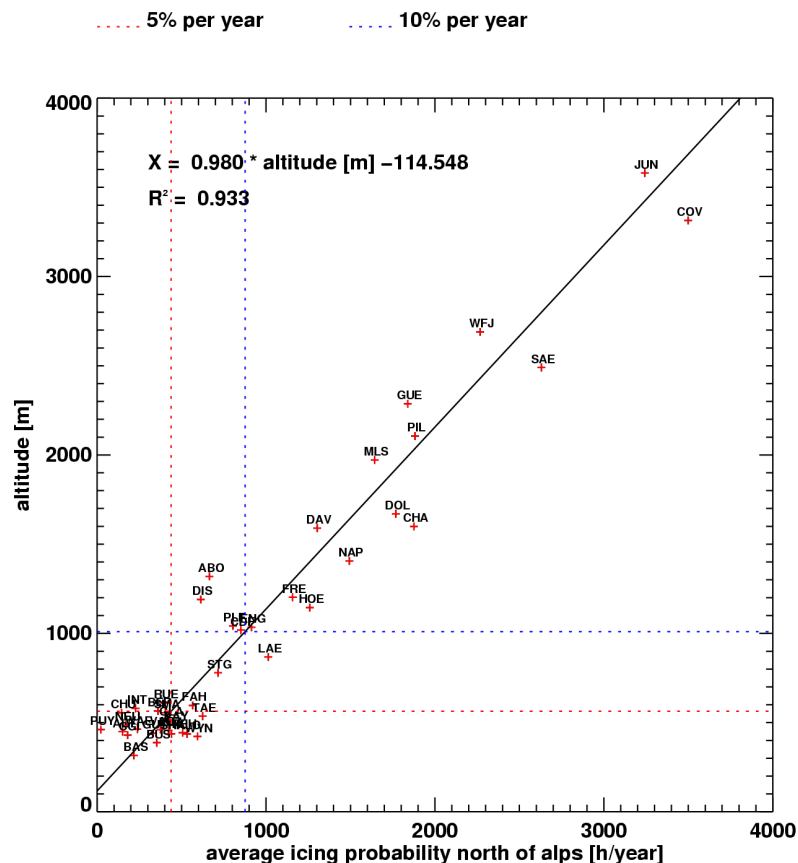


Abbildung 17: Vereisungswahrscheinlichkeit abhängig von der Seehöhe inkl. Ausgleichskurve, (Laakso et al., 2010)

In Abbildung 17 stellt die rot punktierte Linie eine Vereisungsdauer von 5 % der Jahresstunden dar, die blau punktierte jene von 10 %. Setzt man in die daraus ermittelte Ausgleichsgerade

$$X = 0,98 * \text{Seehöhe}[m] - 114,548 \quad \text{Gl. 1}$$

die Seehöhe des Windfelds von 2.100 m ein, so ergibt sich ein Wert von 1.943 Vereisungsstunden/Jahr. Diese Stundenanzahl ist größer als die bei vorhergehenden Windmessungen ermittelte *Volllaststundenzahl* des Standortes.

Grundsätzlich kann jedoch auch diese Ermittlung der Vereisungsdauer aus denselben Gründen wie bei der WECO-Eiskarte nur für eine grobe Abschätzung genutzt werden. Erfahrungsgemäß stimmt die tatsächliche Vereisungsdauer aufgrund topografischer Eigenheiten nur selten mit derart grobmaschigen und auf Daten benachbarter Standorte aufbauenden Prognosen zusammen. Ein Beispiel hierzu ist etwa der Tauernwindpark in Oberzeiring: Für diesen Standort wurde aufgrund benachbarter Windparks mit sehr häufiger Vereisung gerechnet, tatsächlich treten wenige Eisereignisse auf. Grund dafür dürfte die lokale Topographie sein (vgl. Trauttmansdorff, 2011b).

### 3.2 Anforderungen an die Messanordnung

Aus den oben genannten Gründen entstand die Notwendigkeit eine Messanordnung zu finden, die im Rahmen einer Vereisungsmessstation direkt am Standort Windfeld errichtet werden kann, die tatsächlich vorherrschenden Witterungsbedingungen aufzeichnet und somit eine gesicherte Aussage zulässt, an wie vielen Stunden im Messzeitraum eine vor Ort errichtete Windkraftanlage abgestellt hätte werden müssen. Durch das bereits vorhandene Wissen um die Vereisungsproblematik am Standort kann davon ausgegangen werden, dass eine eventuelle WKA auf jeden Fall mit einer Rotorblattheizung ausgestattet werden muss, um die Vereisung bereits im Vorfeld so gut wie möglich zu verhindern. Ein Verzicht darauf würde zu häufigerem Abstellen und (aufgrund der im vorigen Kapitel angeführten Rechtslage in Kombination mit der schwierigen Erreichbarkeit des Standorts während der Wintermonate) zu langen Stillstandszeiten führen.

Mit der in Kapitel 2 eingeführten Terminologie lässt sich somit die Anforderung an die Messanordnung präziser formulieren:

*Es müssen exakt jene Zeiträume benannt werden können, während welcher sich aufgrund der Umgebungsbedingungen an einer WKA Vereisung ausbilden oder halten würde.*

Eine installierte Rotorblattheizung könnte somit bei detektiertem Meteorological Icing in Betrieb genommen werden, sodass es im Idealfall (bei entsprechender Heizleistung) gar nicht zum Instrumental Icing kommt. Mit dieser Steuerung kann das Problem der Stillstände aufgrund von Vereisung und damit einhergehender langer Stillstandszeiten aufgrund der Abwesenheit des Mühlenwarts ausgeschlossen werden.

Grundsätzlich sollte die Vereisungsmessstation als bodennahe Station ausgeführt werden, da mit hohen Messmasten bei hohen Windgeschwindigkeiten/Böen und starker Vereisung bereits häufig schlechte Erfahrungen gemacht wurden: Die hohen Zusatzlasten an den Abspannungsseilen führten zum Einknicken des Mastes, meist war dadurch jede weitere Messung während des betreffenden Winters hinfällig, da an eine Neuerrichtung während der kalten Jahreszeit nicht zu denken ist (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18: Links: Zylinderförmiger Eisansatz an Abspannungen eines Messmasts. Rechts: Wegen Vereisung eingestürzter Messmast (beides Schwyberg, Schweiz), (Cattin, 2008)**

Einflüsse von Geländerauigkeiten (Bäume, Büsche, Felsbrocken etc.) verfälschen eine direkt am Boden durchgeführte Messung, die repräsentativ für die Windverhältnisse in Nabenhöhe sein sollte: Die meisten der zu untersuchenden physikalischen Größen weisen einen Gradienten abhängig vom Bodenabstand auf und somit sind Differenzen zwischen den gemessenen Werten der Station und den Werten auf drehenden Teilen in Nabenhöhe zu erwarten. Auf die Berücksichtigung dieser Gradienten wird bei der Beschreibung der einzelnen Größen (Absatz 3.5) eingegangen. Am Windsfeld bietet sich der Vorteil, dass die Vereisungsmessstation auf einen bestehenden, jedoch nicht mehr genutzten 10 m Stahlurm einer ehemaligen 30-kV-Leitung aufgesetzt werden kann. Somit werden die angesprochenen Abweichungen verglichen mit einer Messung direkt am Boden minimiert, was eine bessere Korrelation ermöglicht. Unabhängig davon wäre eine Messung in Nabenhöhe einer Messung in Bodennähe vorzuziehen, was aus den oben erwähnten Gründen jedoch nicht möglich ist.

Eine weitere Anforderung an die Vereisungsmessstation ist eine möglichst simple Anordnung. Durch das Operieren unter unwirtlichen Umgebungsbedingungen und meist schwieriger Erreichbarkeit stellt jede nicht zwingend erforderliche Anschlussstelle und jedes nebensächliche Messgerät einen unnötigen potentiellen Störfall dar, den es zu vermeiden gilt. Aus diesem Grund wurde auch die Möglichkeit verworfen, eine Kleinwindkraftanlage (Größenordnung ca. 5 kW) zu errichten, auf der die notwendigen Messungen durchgeführt werden sollten: Die drehenden Teile verursachen bei unbekanntem/erwartet schwierigen Vereisungsbedingungen in Kombination mit einer nicht vorhandenen Rotorblattheizung ein zu großes Ausfallrisiko.

Dieselbe Anforderung einer möglichst geringen Komplexität entsteht durch die meist fehlende elektrische Versorgung im abgelegenen Gelände. Jedes Messgerät ist ein Stromverbraucher, durch die notwendige Beheizung der Sensoren während der Wintermonate steigt der Leistungsbedarf zusätzlich um ein Vielfaches: Werden mehrere beheizte Sensoren eingesetzt, können bis zu 5 kW erreicht werden. Auch wenn es Konzepte zur Inselversorgung mittels Brennstoffzelle oder Diesellaggregat gibt, so sind die meisten aller Messstationen noch immer mit einem Photovoltaikmodul und/oder einer Kleinwindkraftanlage in Kombination mit einer Batterie als Pufferspeicher zur Versorgung in Zeiten ohne ausreichender Sonneneinstrahlung oder Wind ausgeführt. Ein direkter Netzanschluss (wie bei den in dieser Masterarbeit zur Auswertung herangezogenen Messstationen) stellt die absolute Ausnahme dar. Diese Tatsache könnte auch dazu führen, dass eine intelligente Messanlagensteuerung aus den selbst gemessenen Werten gleich die Umgebungsbedingungen ermittelt und diesen folgend die Sensorheizungen aktiviert oder ausschaltet – eine weitere potentielle Anwendungsmöglichkeit für die zu entwickelnde Messanordnung.

### 3.3 Ablauf eines Vereisungsereignisses

Im einfachsten Fall besteht ein Vereisungsereignis, also der Prozess zwischen zwei eisfreien Zuständen, aus mindestens zwei, normalerweise jedoch drei mehr oder weniger klar abgrenzbaren Zeitbereichen, die in Abbildung 19 dargestellt werden:

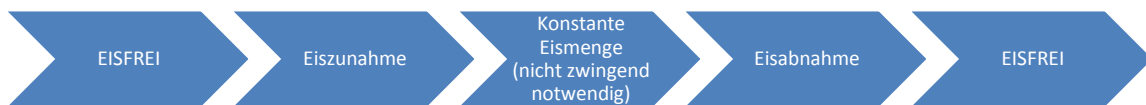


Abbildung 19: Ablauf eines Vereisungsereignisses

Bei länger andauernden Vereisungsereignissen können sich die Bereiche Eiszunahme, konstante Eismenge und Eisabnahme immer wieder abwechseln, bevor es tatsächlich wieder zu einer eisfreien Oberfläche kommt.

#### 3.3.1 Eiszunahme

Die meteorologischen Umgebungsbedingungen bewirken einen Eisansatz auf der bis dahin eisfreien Oberfläche. Die Temperatur sinkt unter einen kritischen Wert, gleichzeitig muss die Luftfeuchtigkeit eine ausschlaggebende Schwelle überschreiten, sodass sich ein gefrorenes Eiskorn aus den Tröpfchen der Luftfeuchtigkeit ausbildet.



### 3.3.2 Zustand der konstanten Eismenge

Dieser Zeitabschnitt muss nicht zwingend vorkommen, es stellte sich bei der Auswertung der Messdaten jedoch heraus, dass er bei nahezu allen Vereisungsereignissen zumindest kurzzeitig auftrat. Dabei kommt der Prozess der Eisbildung aufgrund abnehmender Luftfeuchtigkeit zu erliegen. Gleichzeitig ist die Umgebungstemperatur noch immer tief genug, sodass das Eis nicht zu schmelzen beginnt. Auch ein Sublimationsprozess tritt aufgrund mangelnder Luftumströmung bzw. zu hoher Luftfeuchtigkeit nicht auf. Somit bleibt die Eismenge auf der betroffenen Oberfläche konstant.

### 3.3.3 Eisabnahme: Tauprozess/Sublimation

Eine - die einfachste - Möglichkeit der Eisabnahme entsteht bei einem Anstieg der Lufttemperatur über 0 °C, während sich die Luftfeuchtigkeit gleichzeitig noch immer auf mittlerem oder niedrigem Niveau befindet. Somit schmilzt das Eis und kann als Wasser abfließen.

Ebenso kann es vor allem bei vereisten Rotorblättern und hohen Windgeschwindigkeiten sein, dass das Eis sublimiert: Bei niedriger Luftfeuchtigkeit und sehr tiefen Temperaturen geht das Eis direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über (Erhöhung der Luftfeuchtigkeit) und die Rotorblätter können trotz Temperaturen unter 0 °C ohne Rotorblattheizung und Eiswurf eisfrei werden (vgl. Gobel, 2012).

Setzt man diese Abschnitte des Vereisungsablaufs in den Kontext der Aufgabenstellung, so wird klar erkennbar, dass für den Zweck der Messanlage vor allem die Dauer der Eiszunahme zu berücksichtigen ist. Vorgriff: Bei der Auswertung des Bildmaterials der Messstationen stellte sich heraus, dass es in vielen Fällen sehr schwierig ist die Übergänge zwischen den einzelnen Phasen genau zu definieren. Es ist oftmals Interpretationssache ob die Eismenge noch geringfügig zunimmt oder konstant bleibt. Bei Grenzfällen ist teilweise sogar zu beobachten, dass die Eismenge an manchen Stellen der Vereisungsmessstation leicht zunimmt, während sie an anderen Stellen ein wenig abnimmt. *Aufgrund dieser Schwierigkeiten sollte für eine zuverlässige und fundierte Entscheidungsgrundlage auch der Zeitraum der konstanten Eismenge als für die Vereisungsdauer einer WKA relevant erachtet werden. Diese Zeitspanne des Meteorological Icings + der Zeit der konstanten Eismenge wird in dieser Arbeit als „Relevant Icing Time – RIT“ benannt.* Denkt man an die Praxis, so ist diese Entscheidung sicherlich vorteilhaft: Beispielsweise könnten die Temperatur und die Feuchte niedrig sein („konstante Eismenge“), aufgrund eines vorhergegangenen Abtauprozesses mit der Rotorblattheizung befindet sich jedoch noch flüssiges Wasser auf der Oberfläche. Dieses würde trotz konstanter Umgebungsbedingungen bei einem Ausschalten der Heizung wieder gefrieren. Die Zeitspanne während der die Eismenge aufgrund der Umgebungsbedingungen abnimmt, kann unter der Annahme einer installierten Rotorblattheizung vernachlässigt werden, da wegen der in Absatz 2.1.3 angeführten Gründe die Anlage im schwer erreichbaren Gelände unbedingt eisfrei gehalten werden sollte.

Die gesuchte Messanordnung muss somit zwischen den drei in Abbildung 19 genannten Zeitbereichen unterscheiden bzw. zumindest Eiszunahme und konstante Eismenge detektieren können. Sensoren, die Vereisung zuverlässig erkennen, jedoch bei größeren Eismengen auch noch während der Abtauphase vereist sind (*Instrumental Icing/Recovery time*) würden hier falsche Ergebnisse liefern.

### 3.4 Vorgehen bei synoptischer Vereisungsdetektion

Unter einer synoptischen Vereisungsdetektion versteht man das Ermitteln vereisungsrelevanter Umgebungsbedingungen aus der Kombination unterschiedlicher meteorologischer Zustandsgrößen. Meist werden dabei die Werte Lufttemperatur und Luftfeuchte verwendet, für die jeweils ein Schwellwert definiert wird, dessen Unter- oder Überschreitung „Vereisung“ bedeutet. Historisch gesehen war der Zweck der Vereisungsmessung selten die Abschätzung der Zeitdauer, sondern vielmehr die Untersuchung der Eismassen, die sich an Gebäuden etc. ausbilden.

#### 3.4.1 Makkonen-Algorithmus

In seinem im Jahr 2000 publizierten Bericht „Models for the Growth of Rime, Glaze, Icicles and Wet Snow on Structures“ präsentiert Lasse Makkonen (Finnisches Meteorologisches Institut VTT) einen Algorithmus zur Abschätzung der Zuwachsrate von Eisansammlungen:

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w v A, \text{ (Makkonen, 2000)} \quad \text{Gl. 2}$$

$\frac{dM}{dt}$	(Eis-)Zuwachsrate in kg/s
$\alpha_1$	Korrektionsfaktor der Kollisionseffizienz
$\alpha_2$	Korrektionsfaktor der Anhaftungseffizienz
$\alpha_3$	Korrektionsfaktor der Effizienz des Zuwachses
$w$	Massenkonzentration der Feuchtepartikel in der Luft in $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{feuchte Luft}}$
$v$	Strömungsgeschwindigkeit in m/s
$A$	Querschnitt der angeströmten Fläche in $\text{m}^2$

Gemäß diesem Algorithmus ist die Zuwachsrate  $\frac{dM}{dt}$  abhängig von drei Korrektionsfaktoren  $\alpha_1 - \alpha_3$ , sowie der Massenkonzentration der Feuchtepartikel in der Luft  $w$ , deren Geschwindigkeit  $v$  und des Querschnitts des angeströmten Objekts  $A$ . Das Produkt aus  $w$  und  $v$  wird als *Flussdichte*  $F$  bezeichnet (vgl. Makkonen, 2000).

Die Korrektionsfaktoren  $\alpha_1 - \alpha_3$  können Werte zwischen 0 und 1 annehmen und beschreiben unterschiedliche Vorgänge, aufgrund derer die Zuwachsrate von ihrem Maximum abweichen kann:

$\alpha_1$  bezieht sich auf die Kollisionseffizienz (Verhältnis der Flussdichte der Partikel, die am Objekt auf-treffen zur maximalen Flussdichte).  $\alpha_1$  nimmt Werte  $< 1$  an, sobald kleine Feuchtepartikel mit geringer Masse der Luftströmung um das Objekt folgen und somit nicht zur Vereisung beitragen (siehe Abbildung 20).

$\alpha_2$  bezeichnet die Effizienz der Anhaftung am Objekt und errechnet sich aus dem Verhältnis der Flussdichte jener Partikel die am Objekt anhaften, zur Flussdichte der Partikel die das Objekt treffen. Grund für Werte von  $\alpha_2 < 1$  sind Feuchtepartikel, die wieder vom Objekt abprallen.

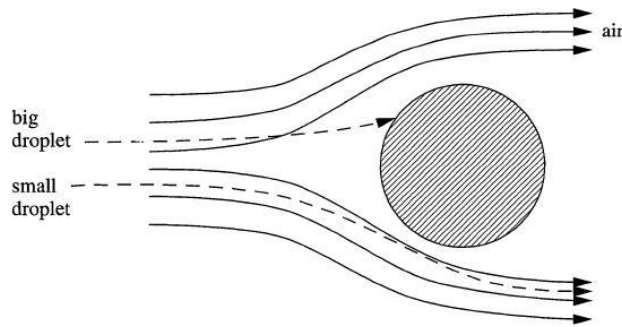


Abbildung 20: Strömungslinien feuchter Luft und Trajektorien von Feuchtepartikeln um ein Objekt, (Makkonen, 2000)

$\alpha_3$  beschreibt die Effizienz des Eiszuwachses und nimmt Werte  $< 1$  an, wenn der Wärmestrom durch die Eisansammlung zu gering ist, um alle flüssigen Feuchtepartikel als Eis zu binden und sich durch sogenannten „run-off“ nicht die maximale Eismenge am Objekt bildet. Dies geschieht bei der Bildung von Klareis („wet-growth“), im Gegensatz zur Bildung von Raureif („dry-growth“). (Vgl. Makkonen, 2000)

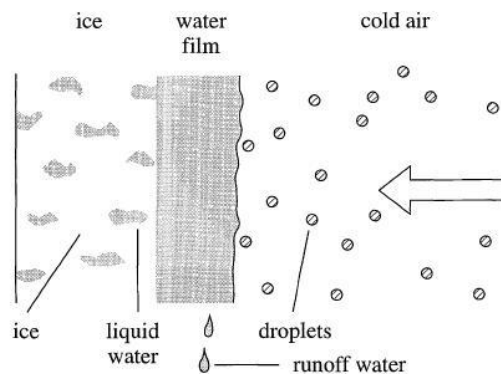


Abbildung 21: "Wet-growth" bei der Bildung von Klareis, (Makkonen, 2000)

Alle Korrekturfaktoren hängen grundsätzlich von der Größe der Feuchtepartikel (deren Gewicht), sowie von deren Temperatur und Verteilung ab (vgl. Makkonen, 2000).

Weiters nimmt Makkonen die in Tabelle 3 gezeigte Einteilung von Vereisungsereignissen anhand der Umgebungsbedingungen vor:

Tabelle 3: Vereisungsarten lt. Makkonen, (Makkonen, 2000)

Vereisungsart:	Temperatur:	Sonstige Bedingungen:
Gefrierender Niederschlag	FKT $< 0\text{ }^\circ\text{C}$	Flüssiger Niederschlag
Reif	LT $< 0\text{ }^\circ\text{C}$	Nebel oder Wolkenbehang
Nassschnee	FKT $> 0\text{ }^\circ\text{C}$	Starker Schneefall

Es ist zu beachten, dass bei Eis, das aufgrund Niederschlags entsteht, die Feuchtkugeltemperatur (FKT) ausschlaggebend ist, während bei Eisbildung aufgrund hoher Luftfeuchtigkeit die Lufttemperatur (LT) herangezogen wird. Es zeigt sich also, dass - abhängig von der Luftfeuchtigkeit - auch bei einer Lufttemperatur  $> 0\text{ }^\circ\text{C}$  gefrierender Niederschlag auftreten kann.

Die hier für Vereisung als wichtig erkannten Umgebungsbedingungen sind somit:

- ✧ Temperatur
- ✧ Luftfeuchte (durch Luft-/Feuchtkugeltemperaturzusammenhang sowie Nebel)
- ✧ Liquid Water Content (Niederschlags-/Nebelbestimmung)
- ✧ Wolkenhöhe

Der Makkonen-Algorithmus gibt Einblicke in die vielfältigen Abhängigkeiten, die bei der Entstehung von Vereisung existieren und kann als Standardwerk für diesen Themenkomplex genannt werden. Da sein Hauptziel jedoch die Bestimmung des Eismengenzuwachses ist, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

### 3.4.2 ISO 12 494 – Atmospheric icing of structures

Die ISO 12 494 – Atmospheric icing of structures, beschreibt aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht, welche Zusatzlasten durch Vereisung an Messmasten, Türmen und anderen Gebäuden abhängig von deren Konstruktion entstehen können und auch, wie sich diese in Kombination mit anderen Umgebungsbedingungen (wie etwa Wind) auf die Stabilität des Bauwerkes auswirken. Generell werden dabei Vereisungsereignisse in Eisklassen eingeteilt, die unterschiedlich starke Auswirkungen mit sich bringen. Ebenso beschreibt sie das einzig normierte Verfahren zu Eismessung, das mittels eines definierten, frei rotierbaren Stahlzylinders und der Messung der sich an diesem Zylinder ansammelnden Eismenge per Wägezelle erfolgt (vgl. ISO 12 494, 2001). Dieses Messprinzip wird auch von einem Sensorhersteller (Combitech Eismonitor) verfolgt, dieser Sensor konnte jedoch auf Grund seiner mechanischen Fehleranfälligkeit bei Vergleichstests nicht bestehen (vgl. Cattin, 2008).

Die in der ISO genannten Eisklassen (Tabelle 4) sind für Aussagen über die Vereisungshäufigkeit eines Standortes nicht primär relevant. Jedoch wird in Kapitel 6 („fundamentals of atmospheric icing“) ein Überblick über das Zustandekommen von Vereisung gegeben, anhand dessen Ansätze für einen Auswertalgorithmus abhängig von Umgebungsbedingungen abgeleitet werden können. Nochmals ist festzuhalten, dass die theoretisch akkumulierte Eismenge an einer Oberfläche unter dem Aspekt einer späteren Rotorblattheizung nicht ausschlaggebend ist, sondern ausschließlich die Zeitdauer, während der sich Vereisung bilden oder konstant bleiben würde.

Tabelle 4: Meteorologische Parameter der Vereisungsarten, (ISO 12 494, 2001)

Eistyp	Lufttemperatur °C	Wind- geschwindigkeit	Tropfen- größe	Wassergehalt der Luft	Typische Dauer
<b>Precipitation Icing</b>					
Glaze Precipitation (gefrierender Regen, Nieselregen)	$-10 < t_a < 0$	jede	groß	mittel	Stunden
Wet snow	$0 < t_a < +3$	jede	Flocken	sehr hoch	Stunden
<b>In-cloud icing</b>					
Glaze	s. Abbildung 22	s. Abbildung 22	mittel	hoch	Stunden
Hard Rime	s. Abbildung 22	s. Abbildung 22	mittel	mittel	Tage
Soft Rime	s. Abbildung 22	s. Abbildung 22	klein	niedrig	Tage

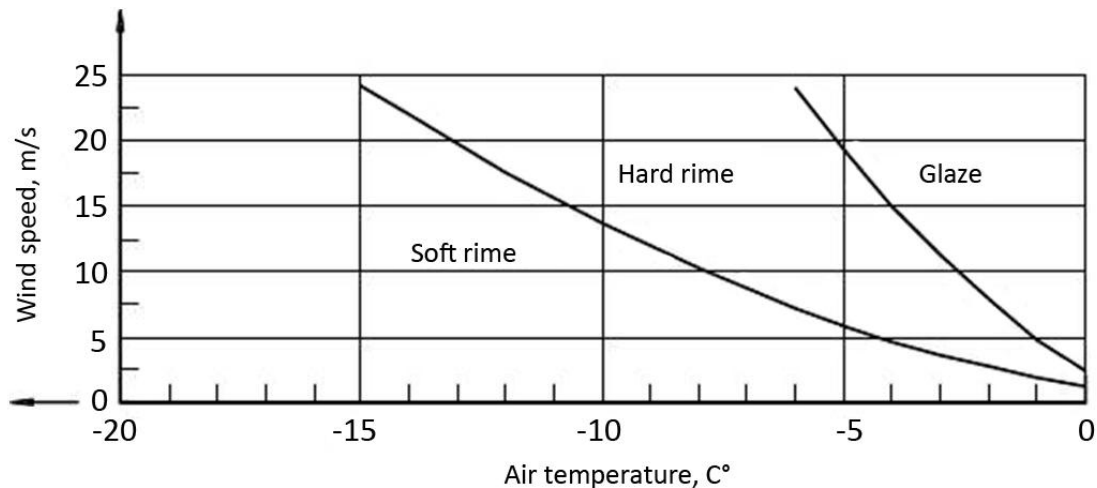


Abbildung 22: Eistyp abhängig von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur, (ISO 12 494, 2001)

Die Einteilung der möglichen Eisarten entsprechend der bei der Entstehung herrschenden Umgebungsbedingungen zeigt bereits die dafür relevanten Parameter:

- \* Lufttemperatur
- \* Windgeschwindigkeit
- \* Tröpfchengröße
- \* Wassergehalt der Luft – LWC (Liquid Water Content, siehe Absatz 3.5.3)

Somit sollte es möglich sein, durch das Messen der vor Ort herrschenden Umgebungsbedingungen auf die Zeitdauer des Meteorological Icings rückschließen zu können.

### 3.4.3 Weitere synoptische Detektionsmethoden

Im Bereich der synoptischen Detektionsmethoden können in der Literatur viele weitere Klassifizierungsansätze gefunden werden. Sie alle eint ein vorher festgelegter Schwellwert für bestimmte meteorologische Größen, meist handelt es sich dabei um die relative Feuchte (rF) und die Temperatur. Die Größe dieser Schwellenwerte hängt vom Verfasser der jeweiligen Studie ab.

Als Beispiel soll hier auf Andreas Krenn vom Verein energiewerkstatt in Heiligenstatt (Oberösterreich) verwiesen werden, da der Verein energiewerkstatt häufig Standortevaluierungen für Windparks im österreichischen Alpenraum durchführt und somit Erfahrung auf diesem Gebiet vorweisen kann. Dabei werden folgende Schwellenwerte (SW) verwendet (Krenn, 2012a):

$$SW_{Temp} \leq 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$SW_{rF} \geq 90 \%$$

Es ist anzunehmen, dass die jeweiligen Autoren die Schwellenwerte aufgrund unterschiedlicher Messerfahrungen festlegten. Dabei spielen die geografische Lage dieser Messstation sowie unterschiedliche topografische Einflüsse ohne Frage eine große Rolle. Eine Einteilung in „richtig“ oder „falsch“ bzw. „besser“ oder „schlechter“ ist somit ohne der zugrunde liegenden Daten nicht möglich.

## 3.5 Maßgebliche meteorologische Größen bei Vereisung und deren Messung

### 3.5.1 Temperatur

Unbestritten ist, dass die Umgebungstemperatur maßgeblich ausschlaggebend ist, ob ein Vereisungsprozess in Gang gesetzt wird oder nicht. Wie aus ISO 12 494 ersichtlich kann jedoch nicht nur unter 0 °C Vereisung entstehen, auch bei Temperaturen von bis zu +3 °C kann sich beispielsweise durch Nassschnee Eis ausbilden, was sich mit den Erfahrungen befragter Parkbetreiber deckt.

Eine exakte Temperaturmessung ist heutzutage Stand der Technik, bei einem Einsatz im freien Gelände und unter winterlichen Bedingungen ist jedoch darauf zu achten dass das Messgerät nicht eingeschneit wird und immer Kontakt mit der Umgebungsluft besteht.

Da sich die zu entwickelnde Messstation in Bodennähe befinden wird, jedoch die Vereisungswahrscheinlichkeit in Nabenhöhe interessiert, ist auch eine Aussage über den Gradienten der Temperatur erforderlich: Alexander Ohms, Meteorologe der ZAMG Wetterdienststelle Salzburg, gibt dazu eine zu erwartende Temperaturabnahme zwischen 0,5 und 1 °C von Bodennähe zur höchsten Stelle (Nabenhöhe + halber Rotordurchmesser: 75 m + 35 m = 110 m) an (vgl. Ohms, 2011). Dies deckt sich mit Aussagen von Georg Mayr, Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Innsbruck, der zwar einen leichten, keinesfalls jedoch einen gravierenden Temperaturgradienten über die Distanz von 100 m erwartet (vgl. Mayr, 2011). Auch Manfred Dorninger vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien bestätigt einen Temperaturunterschied von etwa 0,5 °C über 90 m. Ausgenommen davon sind spezielle Wetterphänomene wie beispielsweise Inversionswetterlagen (vgl. Dorninger, 2011).

### 3.5.2 Relative Luftfeuchte

Wie oben beschrieben ist auch das Wissen um die Luftfeuchte unabdingbar, um eine Aussage über die Vereisungswahrscheinlichkeit treffen zu können. Eine Feuchtigkeitsmessung stellt technisch keinerlei Problem dar, es ist viel mehr (wie bei der Temperatur) konstruktiv darauf zu achten, dass das Hygroskop nicht vereist oder eingeschneit wird.

Ein Gradient sollte sich nach (Mayr, 2011 und Dorninger, 2011) bei der Luftfeuchte nicht einstellen, abgesehen von zwei Ausnahmen:

1. Die Wolkengrenze liegt genau zwischen der Messstation am Boden und der angenommenen kritischen Höhe von ca. 100 m. Dies würde dazu führen, dass die Feuchtigkeit im Bereich der Rotorblätter wesentlich höher ist als am Boden gemessen. Mehr zu dieser Thematik in Absatz 3.5.5.
2. Der Feuchtigkeitsvolumenstrom nimmt in größerer Höhe durch die entsprechend höhere Windgeschwindigkeit zu. Dies erhöht wiederum die sich ansammelnde Eismenge. Da die Eismenge jedoch nicht die gesuchte Größe der zu entwickelnden Messanordnung ist, kann dieser Punkt vernachlässigt werden. Überdies wäre die gesuchte Größe durch den linearen Einfluss des bekannten Gradienten der Windgeschwindigkeit einfach zu berechnen.

Somit kann bei einer Wolkenhöhe, die über der Windanlage liegt, von gleichbleibender Luftfeuchtigkeit der Luftmassen darunter ausgegangen werden.

### 3.5.3 Flüssigwasseranteil/Liquid Water Content (LWC)

Der Flüssigwasseranteil gibt die Masse des flüssigen Wassers in  $\text{g/m}^3$  trockener Luft an und stellt in der Meteorologie eine notwendige Größe zur Klassifizierung unterschiedlicher Wolkenarten dar (siehe Abbildung 23). Durch die Angabe der tatsächlich in der Luft enthaltenen Feuchtigkeitsmenge ist der LWC auch bei modernen Berechnungsmethoden von Eiszuwachsraten unverzichtbar. Inwiefern er für das Starten oder die Dauer eines Vereisungsprozesses verantwortlich ist, konnte nicht eruiert werden.

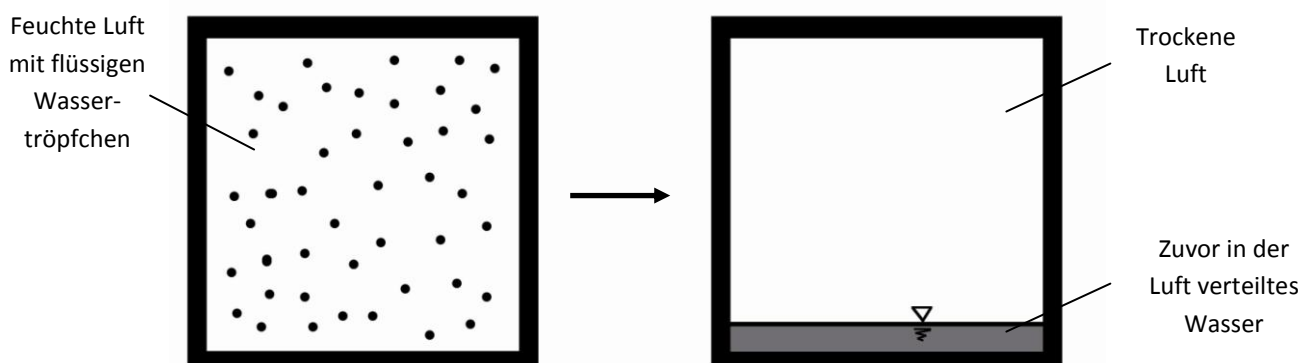


Abbildung 23: Definition LWC: Feuchte Luft (links), gedankliche Trennung in flüssiges Wasser und trockene Luft (rechts)

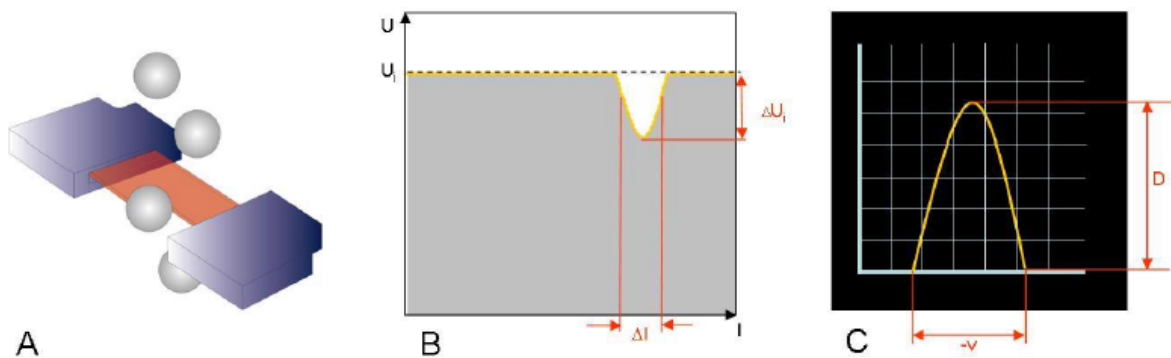
Das Problem bei der Messung des LWC sind teure, komplexe und große Messgeräte, die meist stationär installiert und selten mobil verwendet werden. Genutzt werden diese häufig bei Flughäfen, da Flughafenbetreiber aufziehenden Bodennebel so früh wie möglich detektieren müssen. Der Preis für Geräte dieser Art beträgt derzeit (2012) etwa 30.000 EUR, sie sind sensibel und daher für eine Anwendung im Hochgebirge nicht geeignet. Es gibt wissenschaftliche Untersuchungen und Möglichkeiten, den LWC über Wettermodelle zu berechnen/zu simulieren (vgl. Nygaard, 2011).

### 3.5.4 Mittlerer Volumsdurchmesser/MVD

Der MVD gibt den mittleren Volumsdurchmesser der flüssigen Wasserpartikel in der Luft in  $\mu\text{m}$  an. Auch diese Größe ist eher für die Eiszuwachsrates als für die Zeitdauer eines Vereisungsereignisses aussagekräftig.

Ebenso sind auch für die Messung des MVD hoch sensible Messgeräte verfügbar, die jedoch wie jene des LWC nicht robust genug und zu kostenintensiv für eine mobile Station im alpinen Gelände sind. Grundsätzlich gilt auch hier, wie bei allen anderen Messgeräten, dass mit steigender Genauigkeit (also dem geringsten noch detektierten Partikeldurchmesser) die Anschaffungskosten steigen. Als „vernünftiger“ Kompromiss für die Anwendung am Windsfeld wurde der Sensor Parsivel<sup>2</sup> des deut-

schen Herstellers OTT GmbH erachtet: Dieses eigentlich als Distrometer konzipierte Messgerät baut zwischen zwei Sensorköpfen (Sender und Empfänger) ein flaches, breites Laserband auf. Fallen Regentropfen durch dieses Lichtband, so kann aufgrund der dadurch entstehenden Abschattung am Empfänger auf die Größe und die Fallgeschwindigkeit der Tropfen geschlossen werden. Aus diesen beiden Größen lässt sich anschließend die Niederschlagsmenge berechnen.



**Abbildung 24: Funktionsprinzip des Laserdistrometers: (A) Tröpfchen schatten einen Teil des Laserstrahles ab (B) Die Abschattung ändert das Signal am Empfänger (C) Die Intensität lässt auf den Durchmesser schließen, die Zeitdauer auf die Fallgeschwindigkeit, (OTT-Hydromet GmbH, 2012)**

Obwohl die kleinstmögliche Auflösung „nur“ 0,2 mm beträgt, lassen die Ergebnisse des Distrometers weitere Schlüsse bei der Auswertung des Niederschlags zu: So kann durch eine automatische Einteilung in 32 Klassen (jeweils abhängig von Fallgeschwindigkeit und durchschnittlichem Partikeldurchmesser) eine Aussage über die Art des Niederschlags getroffen werden. Beispielsweise könnte eine bestimmte Größen-Geschwindigkeits-Kombination Eisbildung verstärken, während eventuell bei anderen Gruppen eine Eisbildung ausgeschlossen werden kann. Die kompakte Bauweise und der niedrige Energiebedarf lassen einen Einsatz im abgelegenen, alpinen Gelände über einen längeren Zeitraum zu.



**Abbildung 25: OTT Parsivel<sup>2</sup> Laserdistrometer, (Ott Hydromet GmbH, 2012)**

Weiters gibt es auch beim MVD Versuche, diesen mittels komplizierter Wettermodelle zu simulieren. Der Zusammenhang mit der Realität ist derzeit jedoch noch nicht gegeben, oftmals stellte sich die Annahme konstanter Werte als zielführender heraus (vgl. Nygaard, 2011).



### 3.5.5 Wolkenhöhe/Cloud base height (CBH)

Befindet sich eine WKA bzw. deren Rotorblätter innerhalb einer Wolke und herrschen dabei Temperaturen unter 0 °C, so kann mit hoher Wahrscheinlichkeit von Vereisung ausgegangen werden – insofern ist die Bestimmung der Höhe der Untergrenze der Wolkendecke wünschenswert. Dies kann mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes durch die Messung der einfallenden langwelligen Strahlung und anschließender Rückrechnung auf die sogenannte „Himmelstemperatur“ erfolgen:

$$T_{\text{Himmel}} = \sqrt[4]{\frac{L}{\sigma}} - 273,15 \quad (\text{Cattin, 2008}) \quad \text{Gl. 3}$$

$T_{\text{Himmel}}$ ...	Himmelstemperatur in °C
$L$ ...	Einfallende langwellige Strahlung in W/m <sup>2</sup>
$\sigma$ ...	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

Bei einer Himmelstemperatur, die wesentlich tiefer als die der Lufttemperatur am Standort ist, kann von einer hohen Wolkendecke oder von einem wolkenfreien Himmel ausgegangen werden. Ist die Differenz zwischen Luft- und Himmelstemperatur jedoch sehr klein (< 1 °C), liegt der Messstandort mit großer Wahrscheinlichkeit in den Wolken (vgl. Cattin, 2008).

Vor allem für das Windsfeld kann erwartet werden, dass sich dieses häufig im Nebel/in den Wolken befindet. Dabei ist dies kein klassischer Bodennebel, sondern sogenannter Bergnebel oder tiefhängende Bewölkung: Der meist vorherrschende Nordwestwind steigt von unten aus dem Tal auf. Erst bei niedrigeren Temperaturen und niedrigeren Luftdrücken, wie sie auf 2.100 m Höhe schon herrschen, wird die Sättigungstemperatur der Luft erreicht und Wolken bilden sich aus (vgl. Ohms, 2011). Dies erklärt auch, wie sich der Nebel trotz starken Windes über einen langen Zeitraum halten kann – er bildet sich immer wieder neu.

Handelsübliche Pyrgometer können die einfallende langwellige Strahlung gut messen, da jedoch zur Auswertung der Vereisungssituation eine Webcam installiert wird, wurde auf dieses Messgerät verzichtet - durch die Bildauswertung sollte eine Nebelsituation sehr gut erkennbar sein.

Weiters stellte Elisabeth Grunditz in ihrer Publikation „*Statistische Untersuchung der Prognoseverfahren für Stratus nach Schneefall*“ folgende empirische Formel zur Abschätzung der Wolkenhöhe auf:

$$CBH [m] = 125 * (T - T_d) \quad (\text{Grunditz, 2002}) \quad \text{Gl. 4}$$

$CBH$ ...	Cloud-base-height in m
$T$ ...	Lufttemperatur in °C
$T_d$ ...	Taupunkttemperatur in °C

### 3.5.6 Windgeschwindigkeit

Wie aus der ISO 12 494 erkennbar, ist die Windgeschwindigkeit weniger für das Zustandekommen einer Vereisungssituation, als vielmehr für die Art und Menge der Vereisung interessant. Wird die Vereisungsmessung mit einer generellen Standortevaluierung kombiniert, liegt auf der Windmessung das Hauptaugenmerk: Erst anhand der ermittelten Jahresvolllaststunden bei durchschnittlicher Windgeschwindigkeit kann entschieden werden, ob die Energieerträge eines Windparks eine Investition überhaupt zulassen.

Eine Windmessung, die Windrichtung und –geschwindigkeit sowie Maximal- und Minimalwerte aufzeichnet, ist unter normalen (vereisungsfreien) Umständen technisch keine Herausforderung. In diesen Fällen wird eine Windmessung nach wie vor hauptsächlich mit Schalensternanemometern durchgeführt. Diese sind jedoch bei Vereisung sehr anfällig für Materialbruch oder Falschergebnisse (siehe Abbildung 26). Aus diesem Grund werden bei vereisungsgefährdeten Standorten mittlerweile häufig beheizte Ultraschallanemometer installiert, da diese aufgrund fehlender rotierender Teile auch bei widrigen Verhältnissen zuverlässige Messergebnisse liefern.

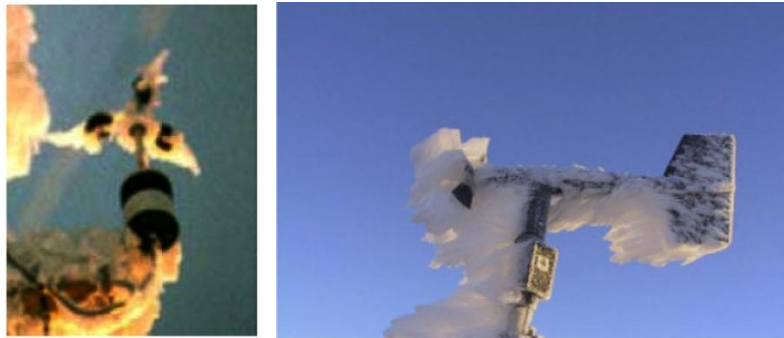


Abbildung 26: Links: Vereistes Schalensternanemometer am Sternstein (Österreich), rechts: vereistes Propelleranemometer, (Cattin, 2008)

## 3.6 Zusätzliche Sensorik zur Eiserfassung

Nachdem gemäß (Cattin, 2008) mit den am Markt erhältlichen Vereisungssensoren keine zuverlässigen Ergebnisse erzielt werden konnten, gibt es unterschiedliche neuartige Ansätze mit denen Vereisung detektiert werden sollte.

### 3.6.1 Labkotec LID-3300 IP

Das Unternehmen Labkotec Oy aus Pirkkala (Finnland) stellt mit dem Modell LID-3210C den international am weitesten verbreiteten Vereisungssensor her. Seit 2010 ist das Nachfolgemodell LID-3300 IP erhältlich, von dem erste Langzeittests jedoch noch nicht verfügbar sind. Dennoch können die Sensoren der Fa. Labkotec als Benchmark bei der Vereisungsdetektion bezeichnet werden.



Abbildung 27:  
Labko LID-3300 IP

Das Messprinzip des LID-3300 IP deckt sich mit jenem des LID-3210C: Die Schwingungen eines Hohlrahtes werden gemessen, wobei die Amplitude bei Eisansatz abnimmt. Durch die Auswertung dieser Abweichung wird auf die Eisstärke rückgeschlossen. Der Sensor ist standardmäßig mit einer Heizung ausgestattet, um nach erfolgter Vereisung abtauen zu können – somit detektiert der LID-3300 IP Meteorological Icing.

Das Ausgabesignal liegt dimensionslos zwischen 100 und 0, wobei ein Wert von 100 „Kein Eis“ bedeutet, 0 dementsprechend „Maximale Vereisung“. Ein Wert von 50 entspricht lt. Hersteller einer Eisdicke von 1,8 cm, über die Qualität des Eises kann dabei keine Aussage getätigt werden. Die Sensorheizung wird standardmäßig bei einem Wert von 80 aktiviert (vgl. Antikainen, 2011 sowie Krenn, 2012b).

### 3.6.2 Sensoren der Fa. Sommer Messtechnik

Die Sommer GmbH & Co KG ist eine Vorarlberger Messtechnikfirma, die sich unter anderem auf die Messung relevanter Größen von Schnee und Eis spezialisiert hat (beispielsweise Schneeprofile). Neben unterschiedlichen Sensoren zur Schneehöhenmessung und Schneesanalyse wird derzeit ein Prototyp getestet, der die Zusammensetzung von Eis anhand einer frequenzabhängigen Messung der komplexen Impedanz feststellen soll. Somit kann der Anteil von Eis und Flüssigwasser der Eisschicht in Volumsprozent angegeben werden.

Das Messprinzip beruht auf einer Kunststoffunterlage, auf der zwei Leiter appliziert sind. Die Leiter erfüllen dabei zwei Zwecke gleichzeitig: Einerseits wird zwischen ihnen die Kapazität gemessen und ausgewertet, andererseits können sie als Heizung verwendet werden. Somit ist es bei intelligenter Steuerung möglich, eine Heizschwelle zu definieren und den Sensor somit entweder als Sensor für Meteorological Icing oder für Instrumental Icing zu verwenden. Die Heizung der Sensoren wurde jedoch im Auswertzeitraum nicht aktiviert, da hauptsächlich die prinzipielle Funktionalität der Eisdetektion im Fokus stand. Die Sensorik wird dabei in unterschiedliche geometrische Formen eingebaut:

- ✱ Sensortyp 1: Ein zylinderförmiger Kunststoffstab mit 3 cm Durchmesser und 15 cm Länge, auf dem die Leiter einmal in einem kleinerem und einmal in einem größerem Abstand voneinander gewickelt sind – somit ergibt sich eine Unterteilung des Sensor 1 in zwei weitere: **Sommer Stabsensor 1 schmal** und **Sommer Stabsensor 1 breit**. Durch die unterschiedlichen Wicklungsabstände ändert sich die Eindringtiefe des Eises an der Sensoroberfläche – damit sollen weitere Erkenntnisse für das endgültige Design und auch über die Genauigkeit des Sensors gewonnen werden.
- ✱ Sensortyp 2: Ebenfalls ein zylinderförmiger Sensor, jedoch mit einem Durchmesser von 2 cm bei einer Länge von 15 cm. Durch die kleineren Abmessungen soll die Eindringtiefe des Eises in die Oberfläche minimiert werden. Bezeichnung: **Sommer Stabsensor 2**.

- ✳ Sensortyp 3: Für diesen Typ wurde ein Sensorband auf ein rechteckiges Holzbrett mit 6 cm Breite und 200 cm Länge aufgebracht, eine Heizung ist in der derzeitigen Entwicklungsstufe nicht vorgesehen. Diese Sensorform wurde schon vorausblickend auf den Einsatz auf Rotorblättern entwickelt: Die Idee besteht darin, den Sensor zukünftig bei der Rotorblattherstellung in das Epoxidharz einzugießen. Somit wäre es direkt an der Stelle appliziert, an der die Vereisungsdetektion interessiert, aber dennoch unter der Oberfläche und somit vor Verwitterung geschützt. Bezeichnung: **Sommer Flächensensor** (vgl. Sommer, 2012a).

### 3.6.3 Kapazitiver Eissensor der TU Graz

Am Institut für elektrische Messtechnik der TU Graz wird im Rahmen der Forschung zur Detektion und Klassifizierung von Eis an Oberflächen ein Laborprototyp eines kapazitiven Eissensors entwickelt, der Vereisung nach dem Prinzip der elektrischen Kapazitätstomographie (ECT) detektieren soll. Dies ist eine Methode zur Rekonstruktion von Information über die räumliche Verteilung der durchschnittlichen Dielektrizitätszahl. Dieses Messprinzip macht sich zu Nutze, dass sich die relevanten vorkommenden Medien in ihrer relativen Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  (Permittivität) deutlich voneinander unterscheiden: Wasser ( $\epsilon_r \sim 80$ ), Eis ( $\epsilon_r \sim 3-5$ ) und Luft ( $\epsilon_r \sim 1$ ).

Die Elektrodenstrukturen innerhalb des Sensors stellen dabei mehrere planare Kondensatoren dar. Deren Dielektrikum und dessen Schichtdicke sind dabei variabel und stellen die zu bestimmende Größe (z.B. den Eisbelag) dar.

Die ermittelten Werte mehrerer Messkapazitäten werden einer Rekonstruktion im Sinne der Lösung eines inversen Problems zugeführt und die daraus resultierende Dielektrizitätsverteilung lässt Rückschlüsse auf die Materialverteilung zu. Zur Detektion von Eisansatz werden bei den verwendeten Prototypen positive Werte („Äquivalente massive Eisdicke“) ausgegeben. Negative Werte zeigen Feuchtigkeit (Regen, Tauwasser) an; bei Wasser sind die genauen Werte aufgrund der Aufgabenstellung „Eisdetektion“ nicht von Relevanz. Der Sensor ist ein Laborprototyp, in der vorliegenden Version noch nicht beheizbar und misst die Eisverteilung derzeit nur an der nach oben weisenden Fläche (Instrumental Icing). Dies kann insofern ein Nachteil sein, als sich Schnee auf der horizontalen Fläche sehr lange halten und eine Vereisung auf der windzugewandten Seite nicht detektiert werden kann.

### 3.6.4 Kamera

Der Einsatz einer Kamera empfiehlt sich, um ein Bezugssystem zu schaffen, mit dessen Hilfe die anderen Sensoren auf ihre Genauigkeit überprüft werden können. Die Kamera hält die tatsächlichen Bedingungen vor Ort fest, dabei muss auf eine möglichst hohe Auflösung, den passenden Blickwinkel und wenn möglich auch auf eine abgeschattete Position geachtet werden, damit sie nicht selbst vereist/vom Schnee bedeckt wird und somit die Aufnahmen unbrauchbar werden.

### 3.7 Zusammenfassung der relevanten Größen und Zusammenhänge

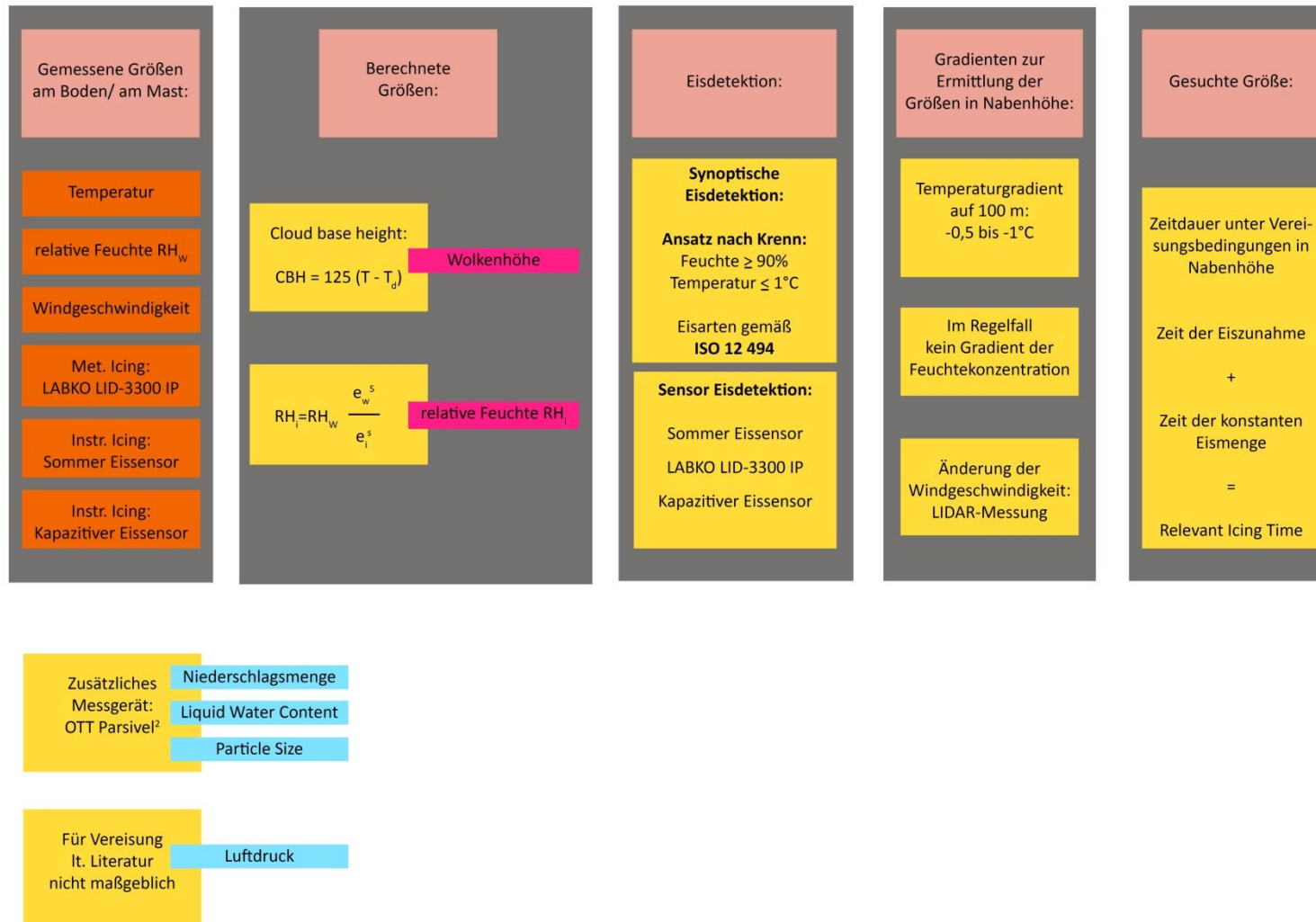


Abbildung 28: Maßgebliche Größen und deren Zusammenhänge



## 4 Zur Auswertung verwendete Messstationen

Das Kapitel gibt einen Überblick über die Standorte und die jeweilige Ausstattung der zur Entwicklung einer zuverlässigen Detektionsmethode herangezogenen Messstationen, eine exakte Auflistung aller gemessenen Größen, Erklärungen zu den verwendeten Messzeiträumen sowie eine Beschreibung der unterschiedlichen Umgebungseinflüsse.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Vereisungsmessstation Faschina, da die hier aufgezeichneten Daten des Winters 2011/12 die Grundlagen für die Entwicklung einer Vereisungsmessstation am Windsfeld lieferten. Die Daten der Messstation am Großglockner (Frühjahr 2011) wurden erst im Nachhinein zur Überprüfung der allgemeinen Gültigkeit der auf der Faschina gewonnenen Erkenntnisse hinzugezogen.

### 4.1 Messanlage Faschina

#### 4.1.1 Standort

Die Messanlage Faschina (Vorarlberg) besteht aus zwei voneinander unabhängigen Stationen: der Vereisungsmessstation und der Wetterstation. Beide wurden im Skigebiet Faschina, auf dem sogenannten Hahnekopf errichtet. Die Vereisungsmessstation befindet sich auf etwa 1.700 m Seehöhe, in Sichtweite zu einer Bergstation der Faschina Bergbahnen und ist somit bei gewöhnlichen Witterungsbedingungen gut erreichbar. Die Wetterstation liegt ca. 120 m östlich auf einer Seehöhe von 1.660 m und wurde zur Auswertung hinzugezogen, da auf der Vereisungsmessstation keine Sensorik zur Windmessung installiert war.

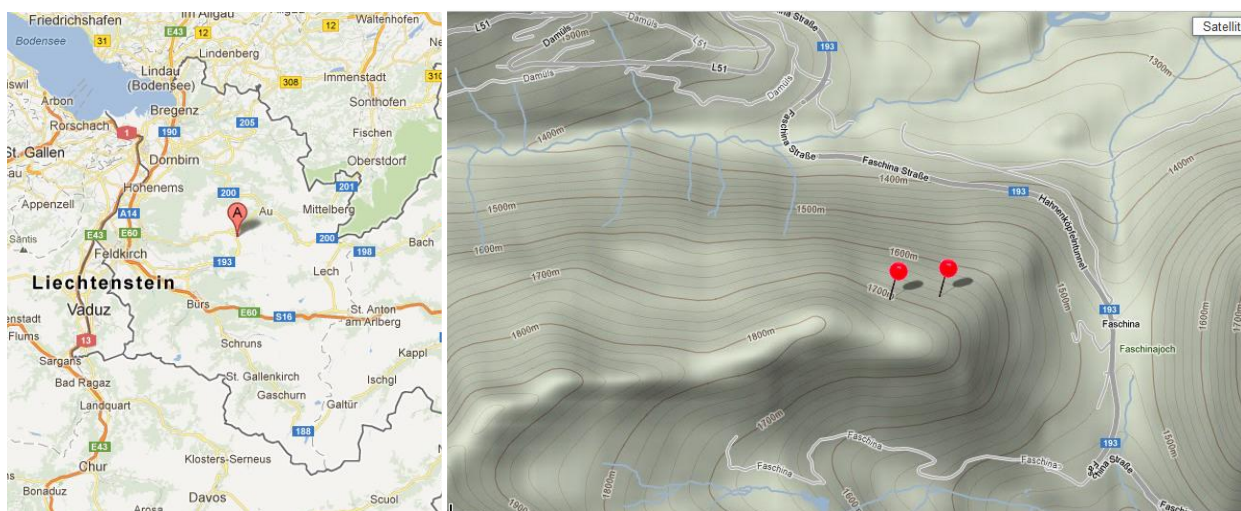


Abbildung 29: Linkes Bild: Standort Messanlage Faschina.

Rechtes Bild: Lage von Vereisungsmessstation (links) und Wetterstation (rechts), ([www.maps.google.com](http://www.maps.google.com), 30. Juli 2012)

Beide Stationen wurden von der Firma Sommer Messtechnik GmbH & Co KG mit Sitz in Koblach (Vorarlberg) errichtet und bereits vor dem Vereisungsversuch betrieben. Die Vereisungsmessstation wurde jedoch nach Projektstart umgestaltet, um Platz für die neuen, zu untersuchenden Eissensoren zu schaffen.

### 4.1.2 Ausstattung der Vereisungsmessstation Faschina

Die Vereisungsmessstation Faschina war im Winter 2011/12 mit folgenden Sensoren bestückt:

- ✧ Luftfeuchte- und Temperatursensor Rotronic Hygroclip2 HC2-S3
- ✧ Labko LID-3300 IP
- ✧ Sommer Stabsensor 1
- ✧ Sommer Stabsensor 2
- ✧ Sommer Flächensensor
- ✧ Kapazitiver Eissensor der TU Graz (in zweifacher Ausführung)
- ✧ Kamera Mobotix DualNight M12D

Abbildung 30 zeigt die Positionierung der Eissensoren auf der Eisstation:

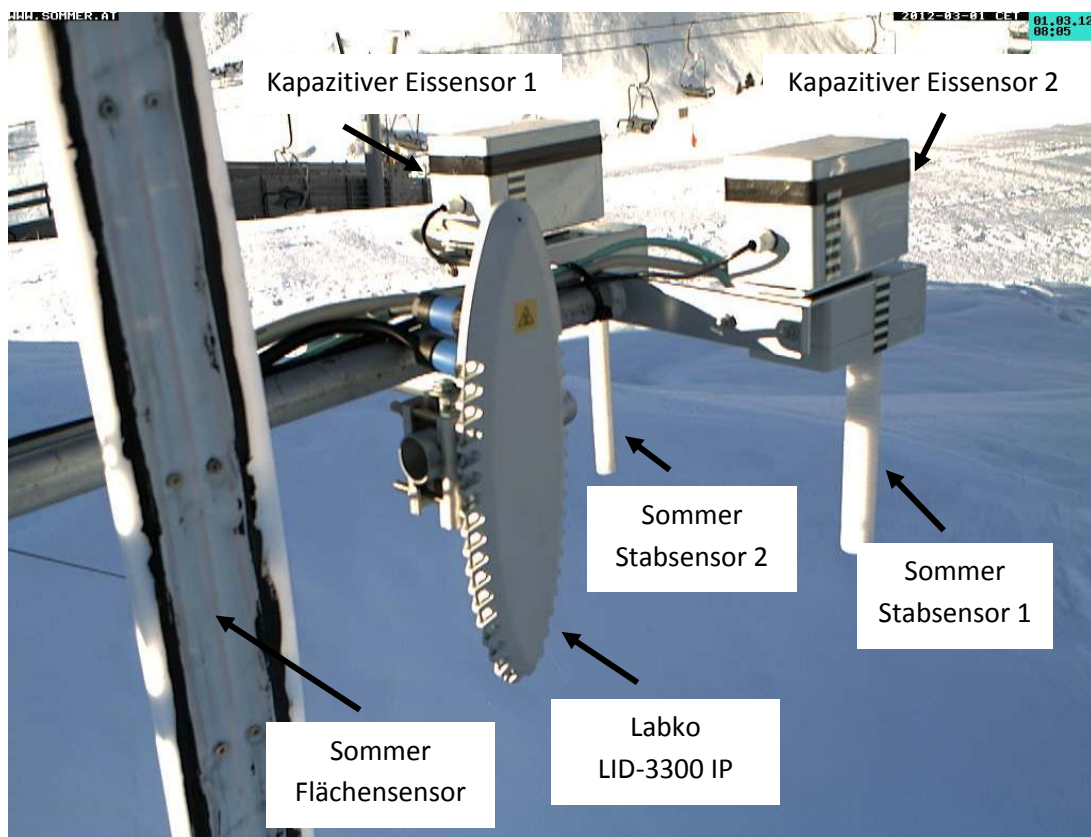


Abbildung 30: Aufnahme vom 01. 03. 2012, 08:05 Uhr: Darstellung der Eissensoren der Eisstation Faschina.

### 4.1.3 Ausstattung Wetterstation Faschina

Die Wetterstation Faschina war während des Messzeitraums mit folgenden Sensoren ausgestattet:

- ✧ Luftfeuchte- und Temperatursensor Rotronic Hygroclip2 HC2-S3
- ✧ Windmesser (Geschwindigkeit, Richtung, Böe) Young 5103
- ✧ Schneehöhensensor, Fa. Sommer



#### 4.1.4 Aufgezeichnete Größen der Messanlage Faschina

Folgende Einzelwerte wurden von den unterschiedlichen Sensoren aufgezeichnet:

Tabelle 5: Aufgezeichnete Größen der Messstation Faschina

Station:	Sensor:	Gemessene Größe:	Einheit:
Vereisungsmessstation Faschina	Luftfeuchte- und Temperatursensor Rotronic Hygroclip2 HC2-S3	Lufttemperatur	[°C]
		Luftfeuchte	[%rF]
	Sommer Stabsensor 1	Temperatur Eissensor 1	[°C]
		Sensor 1 schmal Eis	[%]
		Sensor 1 schmal Wasser	[%]
		Sensor 1 breit Eis	[%]
		Sensor 1 breit Wasser	[%]
		Sensor 1 schmal c1	[pf]
		Sensor 1 schmal c2	[pf]
		Sensor 1 schmal Phase 1	[-]
		Sensor 1 schmal Phase 2	[-]
		Sensor 1 breit c1	[pf]
		Sensor 1 breit c2	[pf]
		Sensor 1 breit Phase 1	[-]
		Sensor 1 breit Phase 2	[-]
	Sommer Stabsensor 2	Temperatur Eissensor 2	[°C]
		Sensor 2 Eis	[%]
		Sensor 2 Wasser	[%]
		Sensor 2 c1	[pf]
		Sensor 2 c2	[pf]
		Sensor 2 Phase 1	[-]
	Sommer Flächensensor	Sensor Fläche Eis	[%]
		Sensor Fläche Wasser	[%]
	Labko LID-3300 IP	Temperatur LID 3300-IP	[°C]
		Umgebungstemperatur LID 3300-IP	[°C]
		Vereisung LID 3300-IP	[-]
	Kapazitiver Eissensor	Äquivalente Schichtdicke Klareis	[mm]
Qualität der Auswertung		[%]	
Aktivität		[ja/nein]	
Mobotix Kamera	Bilder		
Wetterstation Faschina	Luftfeuchte- und Temperatursensor Rotronic Hygroclip2 HC2-S3	Lufttemperatur	[°C]
		Luftfeuchte	[%rF]
	Windmessgerät Young 5103	Windgeschwindigkeit	[m/s]
		Windrichtung	[Grad]
		Windböe	[m/s]
	Schneehöhensensor	Schneehöhe	[cm]

### 4.1.5 Messzeitraum und Datenverfügbarkeit Messanlage Faschina

Zur Evaluierung der Messergebnisse der Messanlage Faschina wurde der Zeitraum

**07.03.2012, 08:00 Uhr – 17.05.2012, 23:00 Uhr**

herangezogen.

Eine Auswertung der Daten vor dem 07.03. 2012 war nicht zielführend, da zusätzliche Einstellungen am Infrarotscheinwerfer für die Nachtaufnahmen vorgenommen werden mussten. Vor dem 07.03. wurden zwar stündliche Aufnahmen zwischen 7 und 17 Uhr getätigt, erst ab dem 07.03. ist jedoch eine durchgehende Bildreihe verfügbar. Nach dem 17.05. wurde die Zeitreihe nicht weiter ausgedehnt, da aufgrund der steigenden Temperaturen keine Vereisungsereignisse mehr auftraten bzw. zu erwarten waren.

Während des Messzeitraums zeichneten die Sensoren sekundlich Werte auf, die über 10 Minuten zum endgültigen Wert gemittelt wurden. Somit erhält man pro Stunde sechs Messwerte/Sensor. Ausgenommen davon ist die Kamera, die pro Stunde eine Aufnahme speichert.

Im ausgewerteten Zeitraum betrug die Datenverfügbarkeit über 98 %. Die Ausfälle entstanden aufgrund zweimaliger kurzer Wartungsarbeiten an der Station, während derer die Spannungsversorgung unterbrochen wurde (jeweils 1 Stunde), sowie zwischen dem 22.04.2012, 7:00 Uhr und dem 23.04.2012 um 8:00 Uhr. Der Grund dieses Ausfalls konnte nicht geklärt werden.

Ausnahme ist dabei der kapazitive Eissensor: Zur Auswertung wurde nur der Zeitraum zwischen dem **10.03.2012, 14:00 Uhr** und dem **20.04.2012, 07:00 Uhr** verwendet. Während der restlichen Zeit konnte aufgrund von Übertragungsproblemen kein zuverlässiges Signal ausgewertet werden.

## 4.2 Messstation Großglockner

Um zu überprüfen, ob die auf der Faschina gewonnenen Erkenntnisse nur an diesem Standort oder auch allgemein gültig sind, wurden im Nachhinein verfügbare Daten einer weiteren Messstation für einen Vergleich gesucht. Die Wahl fiel dabei auf einen Standort am Großglockner (Kärnten). An diesem Standort wurde vom Verein energiewerkstatt im Zeitraum Herbst 2009 bis Sommer 2011 einerseits eine Windmessung durchgeführt, andererseits ein Anemometervergleichstest unter Vereisungsbedingungen. Da diese Messungen vor dem Projektstart der Vereisungsdetektion durchgeführt wurden, war auf der Messstation Großglockner nur der kapazitive Eissensor installiert. Aus diesem Grund liegt der Fokus hauptsächlich auf der Auswertung der Kamerabilder und dem Vergleich mit den aufgezeichneten Temperatur- und Feuchtwerten.

### 4.2.1 Lage

Die Messstation Großglockner befindet sich auf über 2.600 m Seehöhe, also mehr als 900 m höher als jene der Faschina. Eine detaillierte Information über den Standort kann aufgrund von Verpflichtungen gegenüber den Auftraggebern der Windmessung nicht gegeben werden.



Abbildung 31: Messstation Großglockner mit installierter Sensorik (Lachinger, 2011)

## 4.2.2 Ausstattung der Messstation Großglockner

Folgende Sensorik war bei der Messstation Großglockner im Einsatz:

- ✧ Ammonit Hygro-Thermosensor P 6311
- ✧ Thies classic Anemometer, unbeheizt
- ✧ NRG IceFree3 Anemometer, beheizt
- ✧ Thies Ultrasonic 2D compact Ultraschall Anemometer, beheizt
- ✧ Kapazitiver Eissensor der TU Graz
- ✧ Kamera Mobotix DualNight M12

Abbildung 32 zeigt eine Aufnahme der Kamera der Messstation Großglockner mit beheiztem und unbeheiztem Anemometer sowie kapazitivem Eissensor:

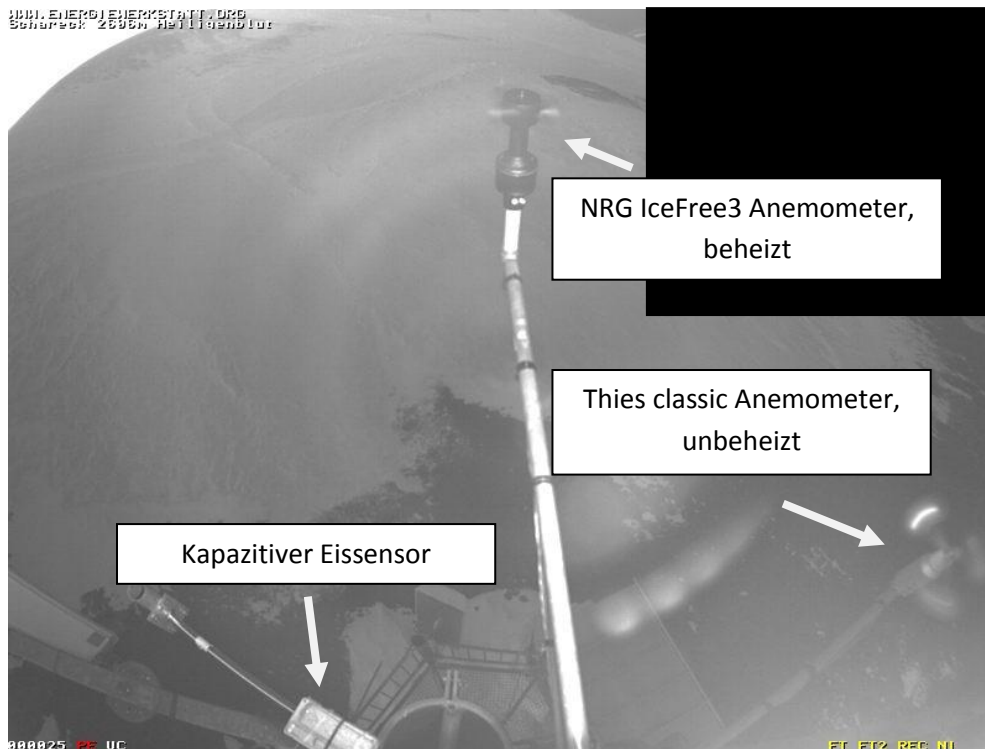


Abbildung 32: Aufnahme der Messstation Großglockner, 16. April 2011, 05:42 Uhr

### 4.2.3 Aufgezeichnete Messgrößen der Messstation Großglockner

Folgende Messgrößen wurden von den auf der Messstation Großglockner installierten Sensoren aufgezeichnet:

Tabelle 6: Sensoren und Messgrößen der Messstation Großglockner

Sensor:	Gemessene Größe:	Einheit:
Ammonit Hygro-Thermosensor P6311	Temperatur	[°C]
	Luftfeuchte	[%rF]
Thies classic (unbeheizt)	Windgeschwindigkeit	[m/s]
NRG (beheizt) IceFree3	Windgeschwindigkeit	[m/s]
Thies Ultrasonic 2D compact (beheizt)	Windgeschwindigkeit	[m/s]
	Windrichtung	[Grad]
Thies classic (unbeheizt)	Windrichtung	[Grad]
Kapazitiver Eissensor	Äquivalente Schichtdicke Klareis	[mm]
	Qualität der Aufnahme	[%]
	Aktivität	[ja/nein]
Mobotix DualNight M12	Bilder	

#### **4.2.4 Messzeitraum und Datenverfügbarkeit Station Großglockner**

Die Messstation Großglockner wurde vom Verein energiewerkstatt über einen Zeitraum von zwei Jahren betrieben. Zur Auswertung wurden folgende Abschnitte herangezogen:

**14.04.2011, 19:00 Uhr bis 20.04.2011, 09:00 Uhr**

**23.04.2011, 12:20 Uhr bis 05.05.2011, 08:40 Uhr**

**08.05.2011, 12:00 Uhr bis 18.05.2011, 09:40 Uhr**

**26.05.2011, 12:00 Uhr bis 27.05.2011, 15:40 Uhr**

**20.06.2011, 04:00 Uhr bis 20.06.2011, 08:00 Uhr**

**24.07.2011, 00:00 Uhr bis 25.07.2011, 13:40 Uhr**

Die Auswerteziträume wurden durch die Verfügbarkeit aller Messwerte (inkl. Kamerabilder) festgelegt. Die Daten wurden, wie auf der Faschina, sekundlich aufgezeichnet und zu 10-Minuten Mittelwerten weiterverarbeitet. Ein Kamerabild wurde alle 20 min aufgenommen.

Während der oben angegebenen Zeiten betrug die Datenverfügbarkeit 100 %.

#### **4.3 Unterschiede zwischen den Messstationen/Standorten**

Neben der unterschiedlichen technischen Ausrüstung der Messstationen, ist vor allem die unterschiedliche Seehöhe der Standorte festzuhalten: Die Messstation Großglockner liegt mit über 2.600 m Seehöhe etwas mehr als 900 m höher als die Eisstation Faschina. Dies äußert sich in geänderten klimatischen Bedingungen: Während die Faschina im Sommer Temperaturen über 20 °C aufweisen kann, sind am Großglockner Vereisungsereignisse im August keine Seltenheit. Aber auch während des Winters sind die Temperaturen am Großglockner wesentlich tiefer – es ist daher zu erwarten, dass weniger Klareis- und mehr Reifereignisse auftreten.

Ebenso spielt die Bewaldung bei der Windmessung eine nicht unwesentliche Rolle: Während die Stationen der Messanlage Faschina in bewaldetem Gebiet liegen, befindet sich die Messstation Großglockner auf einem Grat weit über der Baumgrenze: Höhere Windgeschwindigkeiten und stärkere Böen sind die Folge.



## 5 Auswertung Messanlage Faschina und Entwicklung T&krF-Methodik

Das Kapitel zeigt die Auswertung der Messdaten der Vereisungsmessstation sowie der Wetterstation Faschina: Dabei werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Detektionsmethoden mit den Kamerabildern verglichen. Es wird dargestellt, warum einige Datensätze nicht für die Auswertung verwendet wurden, wie die Messwerte gemittelt wurden und wie die Bildauswertung durchgeführt wurde. Weiters werden Gewichtungskurven für *Temperatur* und *korrigierte relative Feuchte* und damit eine neue synoptische Methodik zur Detektion der *Relevant Icing Time* entwickelt – die T&krF-Methodik.

### 5.1 Aufbereitung der Auswertung

#### 5.1.1 Einschränkung der verwendeten Daten

Nicht alle der aufgezeichneten Messdaten wurden für die Auswertung der Vereisungshäufigkeit herangezogen. Warum und auf welche Größen bei der Auswertung verzichtet wurde, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

##### 5.1.1.1 Sommer-Eissensoren

Die meisten der von den Sommer-Eissensoren aufgezeichneten Größen werden für den sensor-internen Impedanzauswertealgorithmus benötigt. Als Ergebnis erhält man, wie in Absatz 3.6.2 erläutert, die Angabe der Volumsprozent von Eis und Wasser an der Oberfläche.

Wasser auf der Sensoroberfläche tritt hauptsächlich am Ende des Abtauprozesses auf, wenn Eis schmilzt und als Wasser zurückbleibt. Für eine Aussage, ob die Umgebungsbedingungen zum Start eines Vereisungsereignisses führen, ist der Wasseranteil über der Sensoroberfläche nicht ausschlaggebend. Ebenso kann die zur Heizungssteuerung vorgesehene, parallele Temperaturaufzeichnung der Sensoren vernachlässigt werden, da ein eigener Hygro-Thermosensor installiert wurde.

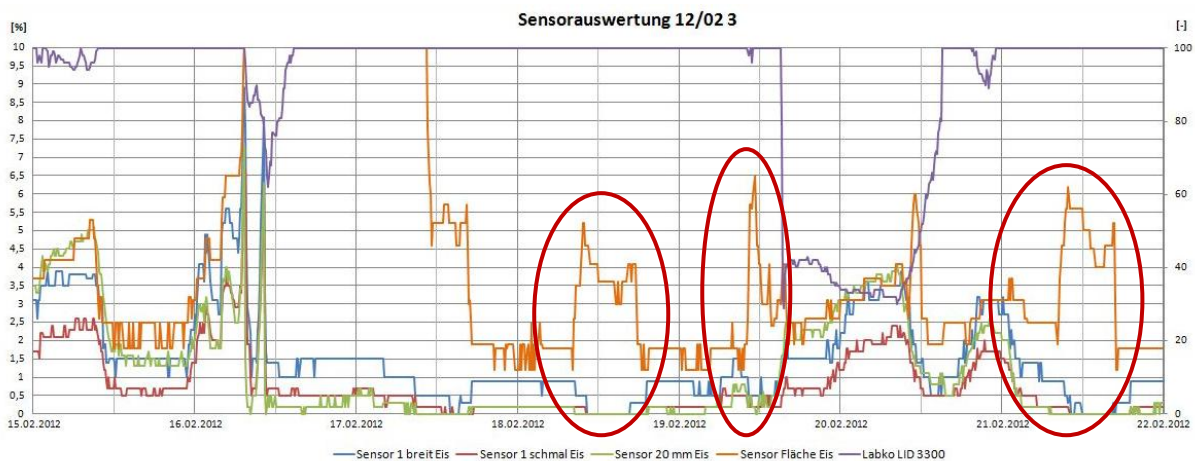
Dies führt dazu, dass von den aufgezeichneten Daten der Sommer Eissensoren (siehe Tabelle 5) zur Abschätzung der *Relevant Icing Time* (Zeit der Eiszunahme sowie Zeit konstanter Eismenge) nur folgende Größen relevant sind:

- ✱ Sommer Stabsensor 1: Sensor 1 breit Eis
- ✱ Sommer Stabsensor 1: Sensor 1 schmal Eis
- ✱ Sommer Stabsensor 2: Sensor 2 Eis
- ✱ Sommer Flächensensor: Sensor Fläche Eis

Zweck der unterschiedlichen Abmessungen der Stabsensoren bei ähnlicher geometrischer Form war es, den optimalen Durchmesser sowie den idealen Wicklungsabstand zur Detektion von Vereisung zu finden. Aus diesem Grund wurden die Sommer Eissensoren unabhängig vom Vergleich mit den Eissensoren anderer Hersteller einer Evaluierung untereinander zugeführt. Dabei wurden die einzelnen Messwerte der Stabsensoren mit den Kamerabildern verglichen, um zu erkennen, welcher Stabsensor/welcher Wicklungsabstand Vereisung am zuverlässigsten detektiert. Diese Auswertung wurde sowohl von der Salzburg AG, als auch von der Fa. Sommer intern durchgeführt, wobei beide Untersuchungen zur selben Erkenntnis gelangten: Die breite Wicklung des Sommer Stabsensors 1 zeigte die

häufigsten Übereinstimmungen mit den auf den Bildern erkennbaren Vereisungsereignissen (vgl. Sommer, 2012).

Der Sommer Flächensensor zeigte bei dieser Evaluierung der Sommer Eissensoren häufig Messwerte, die qualitativ von jenen der anderen Sensoren abwichen. Vor allem war oftmals ein starkes Schwanken der Werte zu erkennen, während die anderen Sommer Eissensoren fast konstante Signale zeigten (siehe Abbildung 33). Ebenfalls konnte keine klar auszunehmende Schwelle zwischen den Zuständen „vereist“ und „eisfrei“ festgestellt werden, mehrmals schwankte der Messwert ohne erkennbaren Grund. Gegen Ende des Messzeitraums wurde festgestellt, dass das in Bodennähe befestigte Brett mit dem applizierten Sensor zumindest einmal eingeschneit war, was auf den Kamerabilddern nicht zu sehen ist. Somit liegt die Vermutung nahe, dass dies während des Winters häufiger passierte. Auf eine exakte Auswertung der Größen des Flächensensors musste aus diesem Grund ebenfalls verzichtet werden. Somit wird von den Messwerten der vier Sommer Eissensoren lediglich der Messwert *Sensor 1 breit Eis* zur Vereisungsauswertung herangezogen und in dieser Arbeit als *Sommer Eissensor* bezeichnet.



**Abbildung 33: Messgrößen der Sommer Eissensoren und des LID-3300 IP vom 15.02. bis zum 22.02.2012. In den roten Ellipsen ist das untypische Verhalten des Sommer Flächensensors klar zu erkennen.**

### 5.1.1.2 Sensor Labko LID 3300-IP

Wie in Tabelle 5 ersichtlich, misst der LID 3300-IP neben dem Vereisungsgrad auch noch zwei Temperaturen: die Temperatur direkt am Sensor sowie die Umgebungstemperatur. Diese Werte werden zur Heizungssteuerung benötigt. Da für die Auswertung der Vereisung jedoch eine eigene Temperaturmessung vorhanden ist, können die aufgezeichneten Temperaturwerte des Labko LID-3300 IP vernachlässigt und nur der Messwert *Vereisung LID-3300 IP* verwendet werden.



### 5.1.1.3 Kapazitive Eissensoren der TU Graz

Da am Kapazitiven Eissensor 2 der TU Graz nach einem Wassereintritt Hardwareprobleme auftraten, wurden zur Auswertung nur die aufgezeichneten Größen des *Kapazitiven Eissensor 1* verwendet.

### 5.1.1.4 Datensätze der Wetterstation Faschina

Beim Vergleich zwischen den Werten für Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Vereisungsmessstation Faschina und jenen der Wetterstation Faschina stellten sich sehr große Unterschiede in den Messwerten heraus. Dies ist wahrscheinlich auf die Distanz von ca. 120 m und den Höhenunterschied von 40 m, sowie lokale Einflüsse (Bäume, Felsen etc.) zurückzuführen (siehe Skizze in Abbildung 34). So wurde beispielsweise am 04. April um 11:50 Uhr ein Temperaturunterschied der beiden Stationen von 3,6 °C gemessen, bei der Luftfeuchtemessung betrug der maximale Unterschied 42,7 %rF (17. Mai, 15:50 Uhr). Die durchschnittliche Abweichung der Temperatur betrug 1,21 °C ( $\sigma=0,15$  °C), jene der relativen Feuchte 2,87 %rF ( $\sigma=19,05$  %rF (!)).

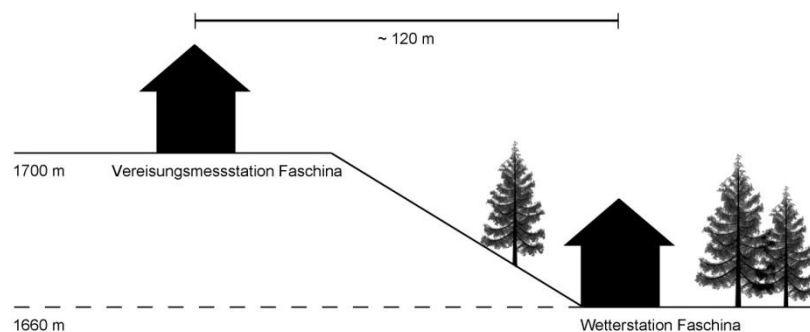


Abbildung 34: Lage von Faschina Wetter- und Eisstation

Das Auftreten von Wind ist bekanntermaßen in den Bergen eine wesentlich lokaler eingegrenzte Größe als Feuchte und Temperatur, welche in der Luftmasse auf kleinem Raum eigentlich als konstant angenommen werden können. Bei Windgeschwindigkeit und -richtung spielen unmittelbare Umgebungsbedingungen wie Bäume, Geländekanten etc. eine erheblich größere Rolle (vgl. Cattin, 2008). Es ist somit aufgrund der großen Unterschiede bei der Feuchte- und Temperaturmessung unwahrscheinlich, dass ein Zusammenhang zwischen den bei der Wetterstation aufgezeichneten Windwerten und den tatsächlichen Windverhältnissen bei der Vereisungsmessstation besteht.

Dies bedeutet, dass die aufgezeichneten Größen der Wetterstation für eine exakte Algorithmusauswertung bei der Vereisungsmessstation nicht verwendet werden konnten. Um die Anwendbarkeit der ISO 12 494 überprüfen zu können, wurden die Messwerte *Windgeschwindigkeit* und *Windrichtung* jedoch nicht verworfen, sondern mit dem Wissen um die große Ungenauigkeit verwendet. Dies ist insofern gerechtfertigt, als der Wind nicht für eine Aussage über das Vorhandensein von Eis notwendig ist, sondern ausschließlich für die Eisklassifizierung benötigt wird.

### 5.1.2 Zeitliche Gewichtung

Da jeweils die über zehn Minuten gemittelten Werte der Messgrößen abgespeichert wurden, während die Kamera aufgrund der eingeschränkten Übertragungskapazität nur zu jeder vollen Stunde ein Bild übermittelte, mussten die sechs Messwerte einer Stunde zu einem Wert verdichtet werden.

Vereisung ist ein zeitabhängiger Prozess, somit wäre es falsch fünf Werte einer Stunde zu verwerfen und nur jenen, der am nächsten zum Zeitpunkt der Bildaufnahme liegt, zu verwenden. Das arithmetische Mittel erschien jedoch auch nicht als geeignet, da sich die Umgebungsbedingungen knapp vor der Aufnahme stärker auswirken als jene, die schon 50 Minuten zurückliegen. Ein Beispiel dafür wäre etwa der Sonnenaufgang am Morgen: Durch die direkte Sonneneinstrahlung werden Bedingungen, die Meteorological Icing begünstigen, abrupt beendet. Bei einem Sonnenaufgang beispielsweise um 06:40 Uhr würden in der selben Stunde jedoch noch vier Werte mit vereisungsbegünstigenden Bedingungen verwendet und für den Wert um 07:00 Uhr somit Meteorological Icing ausgegeben.

Aus diesem Grund wurde eine lineare Gewichtung der Messwerte abhängig vom Zeitabstand zur Bildaufnahme vorgenommen, wobei die Summe der Gewichtungsfaktoren 1 ergeben muss („Standardgewichtung“):

Tabelle 7: Zeitliche Gewichtung der Messwerte

<b>Zeitpunkt:</b>	<b>„Standardgewichtung“:</b>
XX:10 Uhr	0,048
XX:20 Uhr	0,095
XX:30 Uhr	0,143
XX:40 Uhr	0,190
XX:50 Uhr	0,238
Volle Stunde	0,286

Dieses Verfahren wird in der digitalen Signalverarbeitung als Finite Impulse Response (FIR)-Tiefpassfilter bezeichnet. Damit können Signale mit einer Frequenz höher einer sogenannten Grenzfrequenz „herausgefiltert“ werden, während jene mit Frequenzen darunter nahezu nicht gefiltert werden und so mehr Gewicht in der Auswertung erhalten. Die Grenzfrequenz wird durch die Wahl der Parameter (= Gewichtungsfaktoren) definiert. Abbildung 35 zeigt die Abschwächung der Messwerte abhängig von der Signalfrequenz.

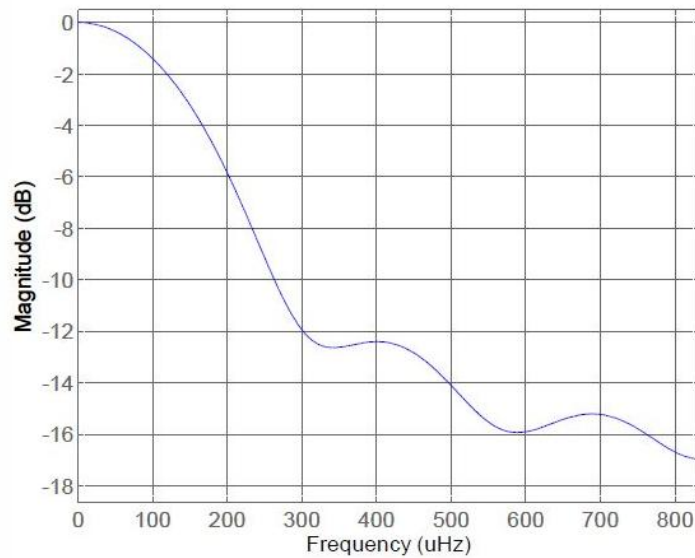


Abbildung 35: FIR-Filter zur zeitlichen Gewichtung der Messwerte

Die Gewichtung wurde als Variable in den Auswertemechanismus eingebaut, somit waren Änderungen möglich. Die Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungsvarianten auf die Dauer der detektierten RIT waren gering und werden in Absatz 5.3.1 dargestellt.

### 5.1.3 Umrechnung der Temperatur

Da bei der Auswertung positive und negative Temperaturwerte in °C auftraten, wurden zur einfacheren automatischen Bearbeitung sämtliche Temperaturen in Kelvin umgerechnet:

$$T \text{ in } K = T \text{ in } ^\circ C + 273,15 \quad \text{Gl. 4}$$

### 5.1.4 Korrektur der relativen Feuchtigkeit

Bei bisherigen Vereisungsmessungen wurde in Abschlussberichten häufig darauf hingewiesen, dass die Messung der relativen Feuchte gemäß den Richtlinien der World Meteorological Organization (WMO) immer vom Sättigungsdampfdruck in Bezug auf Wasser ausgehen muss (vgl. WMO, 2008 sowie Cattin, 2008). Bei Messungen, die bei Temperaturen deutlich unter 0 °C durchgeführt wurden, bewirkt dies jedoch Fehler in der Auswertung, da der Sättigungsdampfdruck über Eis geringer ist als jener über Wasser und relative Luftfeuchten von 100 % somit nicht mehr erreicht werden können. Abbildung 36 stellt dazu die Werte von relativer Feuchte über der Temperatur an einem Standort in der Schweiz für verschiedene Messpunkte dar. In der roten Markierung ist ersichtlich, dass für niedrige Temperaturen hohe Feuchtwerte mit dem Bezug auf den Sättigungsdampfdruck über Wasser nicht mehr erreicht werden (vgl. Cattin, 2011). Werte über der erkennbaren Geraden können als Messfehler angenommen werden.

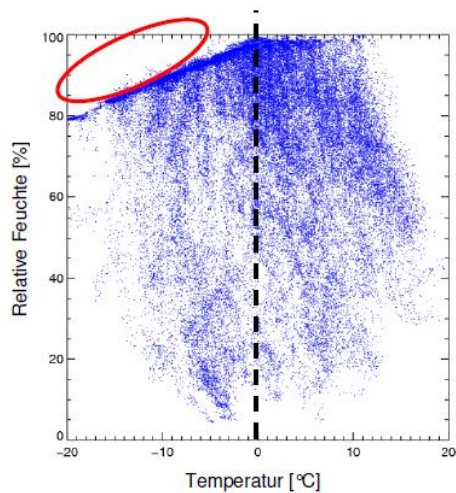


Abbildung 36: Messfehler durch falschen Bezugsdampfdruck (Cattin, 2008)

Um diesen systemimmanenten Messfehler auszugleichen, kann aus der Umgebungstemperatur durch einsetzen in die sogenannte Magnus-Formel näherungsweise der Sättigungsdampfdruck über Wasser berechnet werden. Zusammen mit der gemessenen relativen Feuchte lässt sich somit aus der Definitionsgleichung der Dampfdruck bestimmen. Setzt man diesen und den Sättigungsdampfdruck über Eis anschließend wieder in die Definitionsgleichung der relativen Feuchte ein, so erhält man eine relative Feuchte, die sich auf den Sättigungsdampfdruck über Eis bezieht und auch bei Temperaturen unter 0 °C einen Wert von 100 % erreichen kann (vgl. Cattin, 2008):

**Definitionsgleichung:**  $RF = \frac{e}{E} * 100 \text{ [%]} \text{ (Cattin, 2008)}$  Gl. 5

*RF*... Relative Feuchte in Prozent  
*e*... Dampfdruck in hPa  
*E*... Sättigungsdampfdruck in hPa

**Magnus Formel:**  $E = 6,1078 * 10^{\frac{T*a}{T+b}} \text{ (Cattin, 2008)}$  Gl. 6

*T*... Temperatur in °C  
*a*... Konstante:  
 Bei Sättigung über Wasser:  $a_w = 7,5 \text{ [-]}$   
 Bei Sättigung über Eis:  $a_E = 9,5 \text{ [-]}$   
*b*... Konstante:  
 Bei Sättigung über Wasser:  $b_w = 235 \text{ [°C]}$   
 Bei Sättigung über Eis:  $b_E = 265,5 \text{ [°C]}$

Bei der Auswertung der Messwerte der relativen Luftfeuchte wurde anschließend ein spezielles Vorgehen gewählt: Für Temperaturen  $\geq 0\text{ °C}$  bezog sich die Messung automatisch auf den Sättigungsdruck über Wasser, während bei Temperaturen  $< 0\text{ °C}$  eine Korrektur erfolgte und der Sättigungsdruck über Eis zur Berechnung herangezogen wurde. Die gewonnenen Werte wurden als *korrigierte relative Feuchte (krF)* bezeichnet. Somit können Schwellwerte der korrigierten relativen Feuchtigkeit bei der synoptischen Auswertung für Temperaturbereiche über und unter dem Gefrierpunkt einheitlich verwendet werden.

### 5.1.5 Abschätzung der Wolkenuntergrenze/Cloud-Base-Height (CBH)

Um die Wolkenuntergrenze anhand Gleichung 3 berechnen zu können, musste zuerst die Taupunkttemperatur ermittelt werden. Diese kann ebenfalls aus der Magnusformel abgeleitet werden. Somit sind CBH und korrigierte Feuchte gekoppelt.

$$T_d = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{R_V}{L_{V,S}} \ln\left(\frac{e_{W,e}^S RF_{W,e}}{100e_0}\right)} \quad \text{Gl. 7}$$

(IRI/LDEO Climate library, <http://iridl.ldeo.columbia.edu/>, 12.09.2012)

$T_{d...}$	Taupunkttemperatur in °C	
$T_{0...}$	Nullpunkttemperatur	273,16 [°C]
$R_{V...}$	Gaskonstante für Wasserdampf	461,51 [J/kg K]
$L_{V,S...}$	Latente Wärme (Mittelwert für Verdampfung und Sublimation)	2.665,5 [kJ/kg]
$e_{W,e}^S...$	Sättigungsdampfdruck für Wasser/Eis	
$RF_{W,e}...$	Relative Feuchte für Wasser/Eis	
$e_{0...}$	Wasserdampfdruck am Gefrierpunkt	6,1078 [hPa]

Auch wenn die Berechnungsformel der CBH offensichtlich nur eine Näherung ist, so war ein Zusammenhang mit der Wolkenhöhe vor Ort großteils gegeben (siehe Abbildung 37). Eine Anwendung zur Abschätzung der CBH ist vor allem für zukünftige Standorte von Messstationen, an denen eine aufwändige Ausstattung inkl. Kamera nicht möglich ist, denkbar.

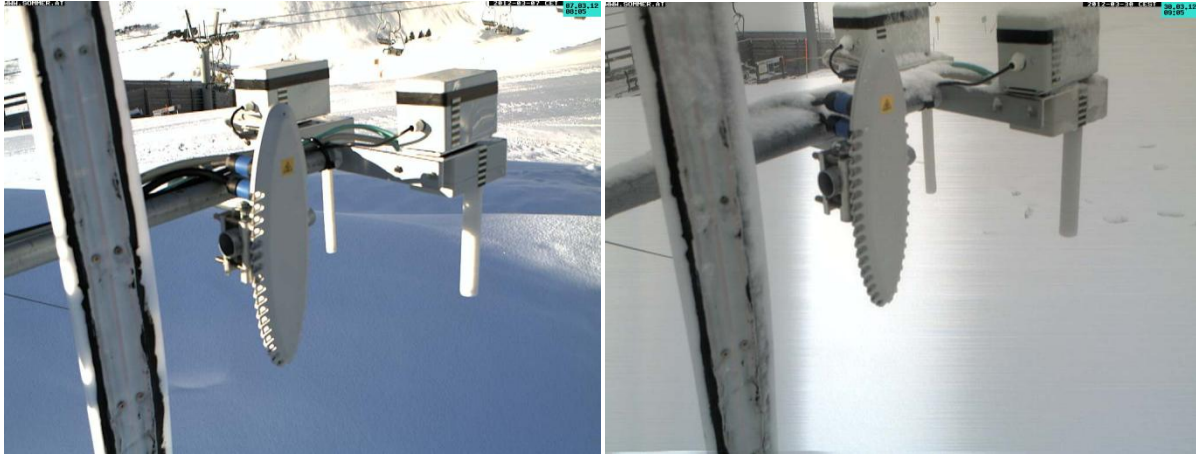


Abbildung 37: Beispiele zur errechneten CBH, links 07. 03. 2011 08:00 Uhr: CBH =951 m;  
rechts 30.03.2011 09:00 Uhr:CBH = 21 m

### 5.1.6 Manuelle Bildauswertung

Da keiner der vorhandenen Sensoren und keine der angewandten synoptischen Detektionsmethoden gesicherte Werte der RIT garantieren konnte, stellten die Kamerabilder die Benchmark bei der Bewertung dar: Anhand der folgenden manuellen Bildauswertung wurde entschieden, ob vor Ort tatsächlich Vereisungsbedingungen herrschten. Somit musste sich jeder Sensor/jede Auswertemethode mit den Bildern messen: Jene mit der kleinsten Abweichung stellte die „beste“ Methode/Sensor dar. Dies machte die Bildbewertung zu einem sehr wichtigen Punkt der Auswertung.

Folgende Informationen konnten aus dem Bildmaterial abgelesen werden:

- ✧ Umgebungsbedingungen (Nebel, Wolkenhöhe, Niederschlag)
- ✧ Eismenge (auf den Sensoren und am Ausleger)
- ✧ Eiszuwachs/-bestand/-abnahme (durch Vergleich der Bilder einer Zeitreihe)

Die Bildauswertung musste somit einerseits die absoluten Größen zum Zeitpunkt X, andererseits auch die Entwicklung im Vergleich zum Wert vor einer Stunde wiedergeben. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld eine Einteilung der Eismenge in vier Gruppen durchgeführt.

Punkte, an denen Eisansammlungen auf den Fotos besonders beobachtet wurden, waren (siehe Abbildung 38):

- ✳ Die Ausnehmungen des LID-3300 IP (grün)
- ✳ Die Oberfläche des Sommer Eissensors (rot)
- ✳ Die Seiten- und Deckfläche des kapazitiven Eissensors (violett)
- ✳ Der Ausleger, auf dem die Sensoren montiert sind (gelb)

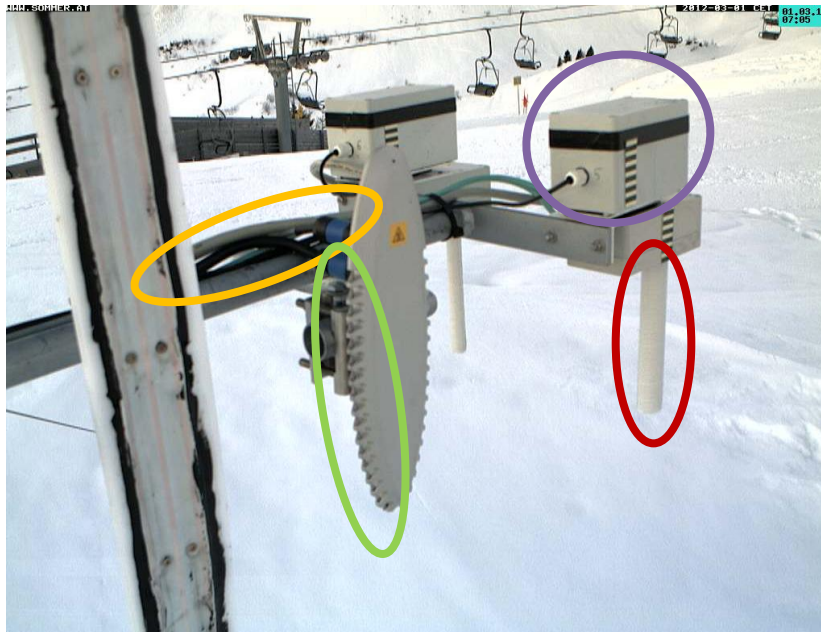


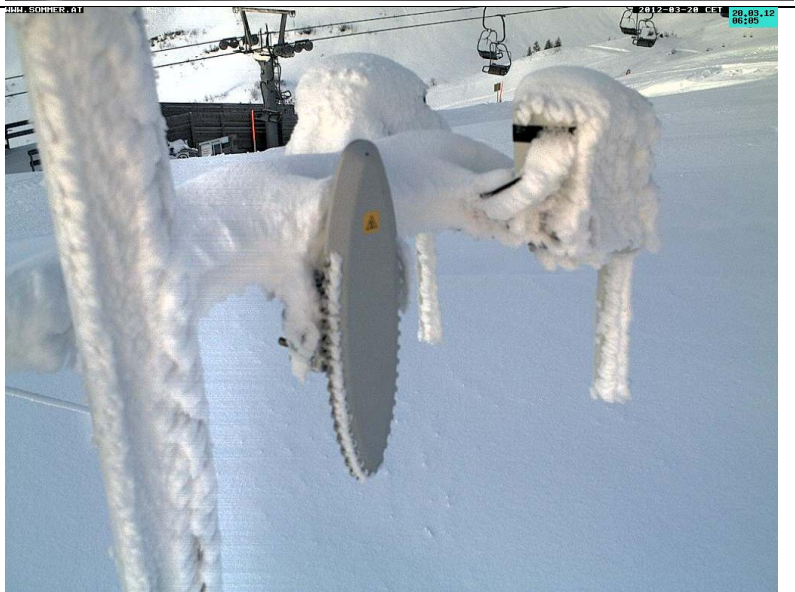


Abbildung 38: Wesentliche Stellen bei der Untersuchung auf Vereisung

Folgende Einteilung wurde für die absolute Bewertung der Vereisungsstärke gewählt:

Tabelle 8: Bewertungskriterien für die Vereisung

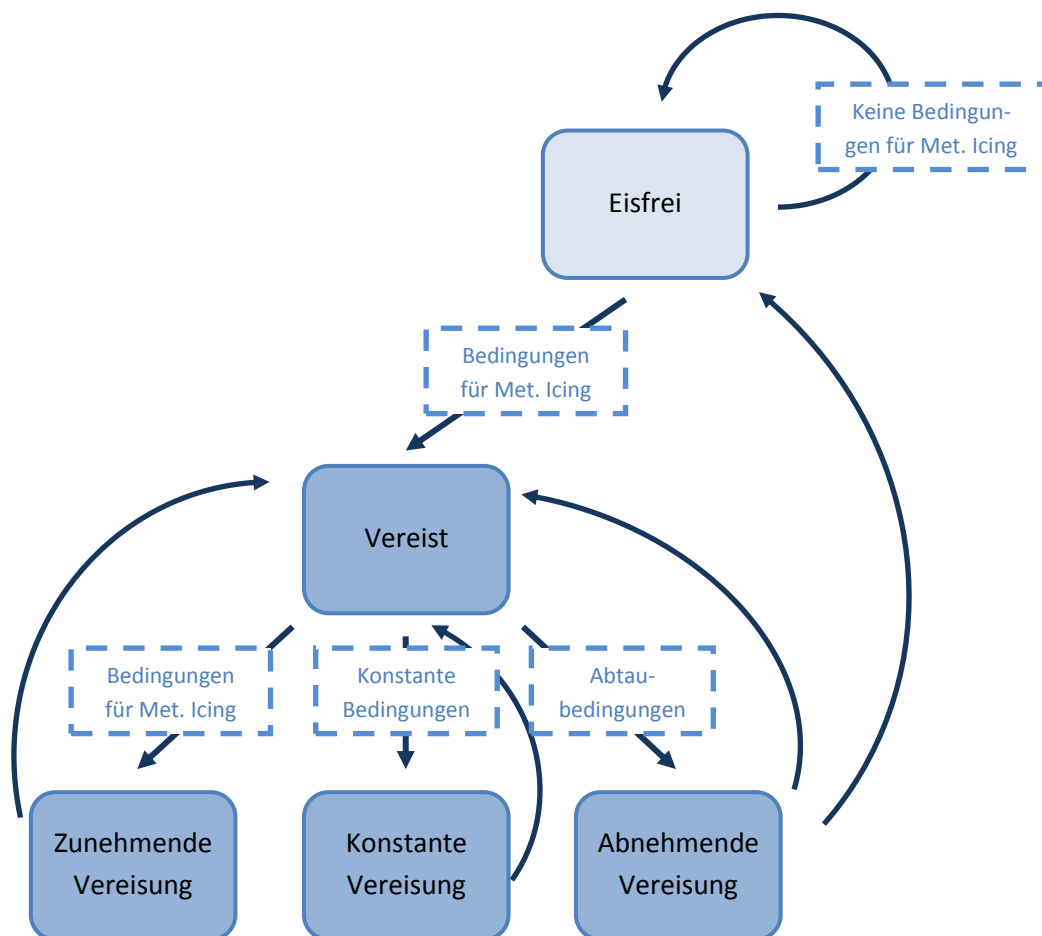
Punkte:	Beschreibung:	Bild:
0	<p>Keine dichten Nebelschwaden, Wolken sichtbar.</p> <p>Klare, unvereiste Oberflächen im gesamten Bildbereich.</p>	

<p>100</p>	<p>Dichte Wolken oder Nebel erkennbar.</p> <p>Einzelne Vereisungs-/Schneestellen auf der Messstation vorhanden.</p>	
<p>200</p>	<p>Mehrere Vereisungs-/Schneestellen</p> <p>und/oder</p> <p>leichte großflächige Vereisung ersichtlich.</p>	
<p>300</p>	<p>Vereisung/Schnee stark und großflächig auf der Messstation vorhanden.</p>	



Die gewählten Vereisungsklassen stellten sich bei der anschließenden Bewertung aller Bilder des Auswertzeitraum als zu grob heraus, weshalb jeweils noch Unterklassen mit 50, 150 und 250 Punkten zugelassen wurden. Diese sind von der Vereisungsintensität her zwischen den jeweiligen Übergruppen einzuordnen. Somit erhielt man sieben mögliche Eisklassen.

Bei einer Einteilung in sieben Kategorien würden teilweise Informationen der Bilder verlorengehen, da die Eismenge zwar häufig in der selben Kategorie verblieb, beim Vergleich mit dem Bild davor jedoch eine leichte Ab- oder Zunahme festgestellt werden konnte. Um die zeitliche Entwicklung der Vereisung bestmöglich zu dokumentieren, muss nochmals der Prozess eines Vereisungsereignisses gemäß Abbildung 39 bedacht werden:



**Abbildung 39: Mögliche Vereisungsvorgänge sowie die dafür notwendigen Umgebungsbedingungen**

Es ergeben sich also sowohl für die Entwicklung des Eises, als auch für die Umgebungsbedingungen die drei Möglichkeiten *Zunahme*, *konstante Vereisung* und *Abnahme*, wobei geringfügige Eismengenzu- und -abnahme auch innerhalb einer Vereisungsklasse erfolgen können.

Um diese Entwicklung auch in der Auswertung zu berücksichtigen, wurden zur absoluten Bewertung der Eismenge auch drei Spalten zur Information über die Entwicklung im Vergleich zum vorangegangenen Zeitpunkt hinzugefügt. Somit war in der Auswertung - trotz eventuell gleicher Eisklasse - ersichtlich, ob es kleine Änderungen der Eismenge gab (siehe Tabelle 9). Blau hinterlegt sind dabei jene Messpunkte, die aufgrund zunehmender oder konstanter Eismengen als Relevant Icing Time gezählt werden.

**Tabelle 9: Darstellung der optischen Vereisungsbewertung**

Datum_Zeit	Vereisung absolut	Eis [+]	Eis const.	Eis [-]
07.03.2012 23:00	0	0		
08.03.2012 00:00	0	0		
08.03.2012 01:00	0	0		
08.03.2012 02:00	50	50		
08.03.2012 03:00	50	50		
08.03.2012 04:00	100	100		
08.03.2012 05:00	150	150		
08.03.2012 06:00	200	200		
08.03.2012 07:00	150			150
08.03.2012 08:00	150		150	
08.03.2012 09:00	100			100
08.03.2012 10:00	100			100
08.03.2012 11:00	100			100
08.03.2012 12:00	100			100
08.03.2012 13:00	50			50
08.03.2012 14:00	50			50
08.03.2012 15:00	50			50
08.03.2012 16:00	200	200		
08.03.2012 17:00	200	200		
08.03.2012 18:00	200		200	
08.03.2012 19:00	200		200	
08.03.2012 20:00	250	250		

Trotz dieser relativ genauen Einteilung war eine zuverlässige Bildauswertung in vielen Fällen ein schwieriges Unterfangen und teilweise Interpretationssache:

- ✳ **Nachtaufnahmen:** Der für die Nachtaufnahmen notwendige Infrarotschweinerwerfer war zu stark eingestellt. Somit war das Bild häufig überbelichtet, was eine exakte Auswertung erschwerte.
- ✳ **Tagaufnahmen:** Feine Klareisschichten, die bei Nachtaufnahmen heller reflektierten als eisfreie Oberflächen und sich bei Infrarotaufnahmen gut abhoben, konnten mit der Tagkamera oftmals nicht erkannt werden. So fiel das Ende eines erkennbaren Vereisungsereignisses häufig mit dem Umschalten von Infrarot- auf normale Kameraaufnahme zusammen, obwohl wahrscheinlich dennoch eine leichte Eisschicht vorhanden war.
- ✳ **Nebel:** Bei starkem Nebel oder Wolken war die Sichtweite teilweise so gering, dass die Sensoren nicht mehr erkennbar waren. Eine Aussage über die Vereisung war somit nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurden Wolken/Nebel auch in die Punktekategorie der Vereisung aufgenommen.

- ❄ **Vereiste Kamera:** Bei extremen Bedingungen vereiste die Kameralinse oder war zumindest stark beschlagen. Somit war eine Auswertung der Bilder zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Dies spricht zwar für hohe Vereisung, jedoch konnte der Übergang zwischen Meteorological und Instrumental Icing nicht mehr erkannt werden.
- ❄ **Ambivalente Entwicklung:** Teilweise nahm die Vereisung an einer Stelle der Station zu, während sie an einer anderen Stelle abnahm. In diesem Fall wurde die Vereisung als konstant gewertet, obwohl dieses Vorgehen nicht einwandfrei ist.

Aus diesem Grund wurde zusätzlich für jedes Bild festgehalten, mit welcher Zuverlässigkeit die Auswertung vorgenommen bzw. wie gut die Vereisung erkannt werden konnte. Dies führte zur Einteilung in sogenannte „Zuverlässigkeitsklassen“ (siehe Tabelle 10 und Abbildung 40):

**Tabelle 10: Zuverlässigkeitsklassen der Bildauswertung**

Klasse:	Beschreibung:
1	Aufnahmequalität sehr gut: Vereisungszustand klar und eindeutig erkennbar
2	Aufnahmequalität nicht optimal: Vereisungsmerkmale mit Unsicherheit zu bestimmen
3	Aufnahmequalität schlecht: Vereisung muss anhand vorhergehender oder folgender Bilder geschätzt werden



**Abbildung 40: Beispiele der einzelnen Zuverlässigkeitsklassen für die Bildauswertung (von links nach rechts):  
Klasse 1: 20.03. 12 Uhr; Klasse 2: 01.04. 05 Uhr; Klasse 3: 01.05. 05 Uhr**

Tabelle 11 zeigt die Anzahl an Bildern pro Zuverlässigkeitsklasse während des Auswertzeitraums, der Großteil der Aufnahmen konnte also mit geringer Unsicherheit ausgewertet werden.

**Tabelle 11: Anzahl der Aufnahmen je Zuverlässigkeitsklasse**

Klasse 1:	1202 Bilder
Klasse 2:	344 Bilder
Klasse 3:	150 Bilder

Die Zeiträume mit verringerter Zuverlässigkeit fielen mit jenen von Vereisungsereignissen zusammen. Dies ist verständlich, da jene Witterungsbedingungen, die zu Vereisung führten, auch auf die Kamera einwirkten und somit die Bildqualität verringerten.

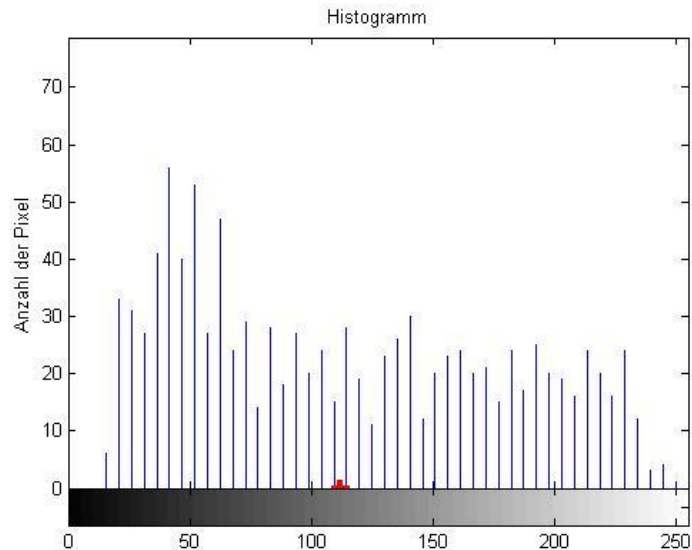
Allgemein ist festzuhalten, dass zur Erfüllung der Aufgabenstellung eine Aussage über die zeitliche Entwicklung der Vereisung wichtiger war, als die tatsächliche angesammelte Eismenge, da diese aufgrund einer installierten Rotorblattheizung entweder verhindert oder abgetaut würde. Dies erleichterte die Bildauswertung, da es einfacher war eine korrekte Aussage über die Entwicklung zu treffen als eine exakte Klassenzuteilung durchzuführen.

### **5.1.7 Automatisierte Bildauswertung**

Um die Bildauswertung schneller und vor allem unabhängig von der auswertenden Person durchführen zu können, wurde in Zusammenarbeit mit Thomas Höll (EMT Institut der TU Graz) eine automatisierte Bewertung programmiert. Diese soll mittels vorher definierter Stellen am Bild die Vereisung erkennen und auch bewerten. Für eine hohe Zuverlässigkeit muss die betrachtete Stelle klare Konturen sowie einen möglichst großen Kontrast (ideal: schwarz-weiß) aufweisen - daher wurden am kapazitiven Sensor und oberhalb des Sommer Eissensors bereits im Vorfeld sogenannte Marker angebracht (siehe Abbildung 38).

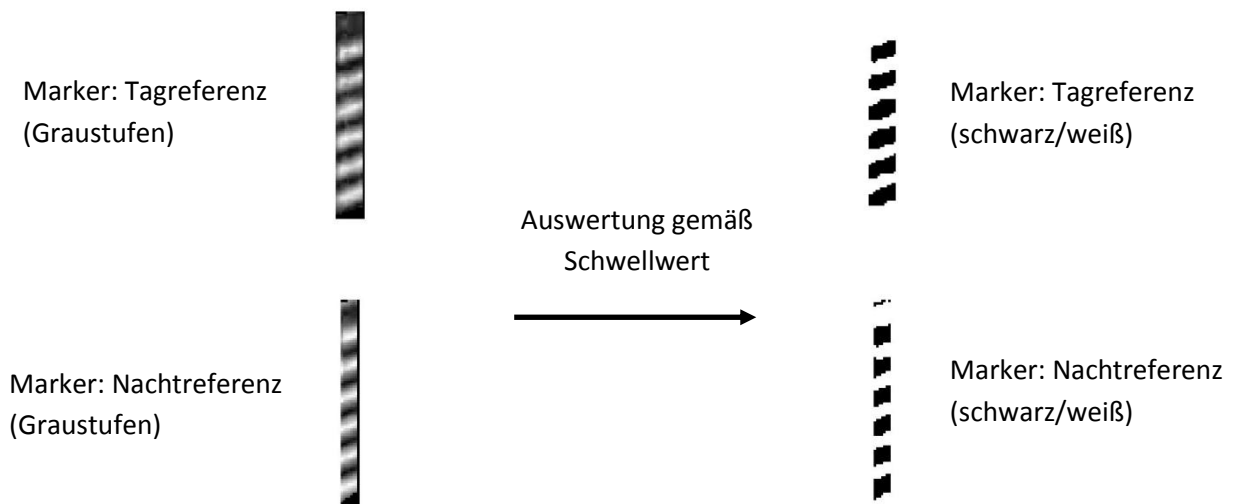
Das Prinzip der automatisierten Bildauswertung besteht darin, den Marker der auszuwertende Aufnahme mit jenem eines (eisfreien) Referenzbildes zu vergleichen und so mögliche Unterschiede zu detektieren. Da die Kamera aufgrund der Linsenpositionierung unterschiedliche Blickwinkel zwischen Tag- und Nachtbild aufweist, mussten für Tag und Nacht auch unterschiedliche Referenzaufnahmen verwendet werden: Als Tag-Referenz wurde die eisfreie Aufnahme des Markers am kapazitiven Sensor vom 24. 03. 2012 um 10:00 Uhr wendet, als Nacht-Referenz jene vom 25. 03. 2012, 20:00 Uhr.

Zur Eisdetektion wurden die farbigen Aufnahmen in Graustufen zwischen 0 und 255 umgewandelt (0 = schwarz, 255 = weiß). Anschließend wurde der Sektor des Markers ausgeschnitten und ein Histogramm der enthaltenen Graustufen entwickelt. So enthält das Muster des Referenzmarkers die in Abbildung 41 dargestellte Verteilung: Die Balken repräsentieren dabei die Anzahl der Pixel der jeweiligen Graustufe. Bei der Idealaufnahme eines Schachbrettmusters gibt es theoretisch also nur zwei Peaks: 0 und 255. Anschließend wurde mittels eines Algorithmus', der zwei klar voneinander unterscheidbare Bereiche (hell und dunkel) annimmt, für jede Markeraufnahme ein von diesem Spektrum abhängiger Schwellwert ermittelt, der die Grenze zwischen „dunkel“ und „hell“ quantifiziert (rote Markierung). (Vgl. Sonka et al., 1999)



**Abbildung 41: Histogramm des Referenzmarkers mit Schwellwert (rot)**

Dieser Schwellwert wurde verwendet, um das Bild in helle und dunkle Bereiche zu segmentieren. Die Segmentation lieferte für die dunklen Bereiche eine logische „1“ und für die hellen Bereiche eine logische „0“ - dies entspricht der Antwort auf die Frage: „Ist dieser Bildpunkt dunkel?“ (siehe Abbildung 42). Dieses Vorgehen minimiert die äußeren Einflüsse wie Überbelichtung, direkte Sonneneinstrahlung oder auch Schatten.

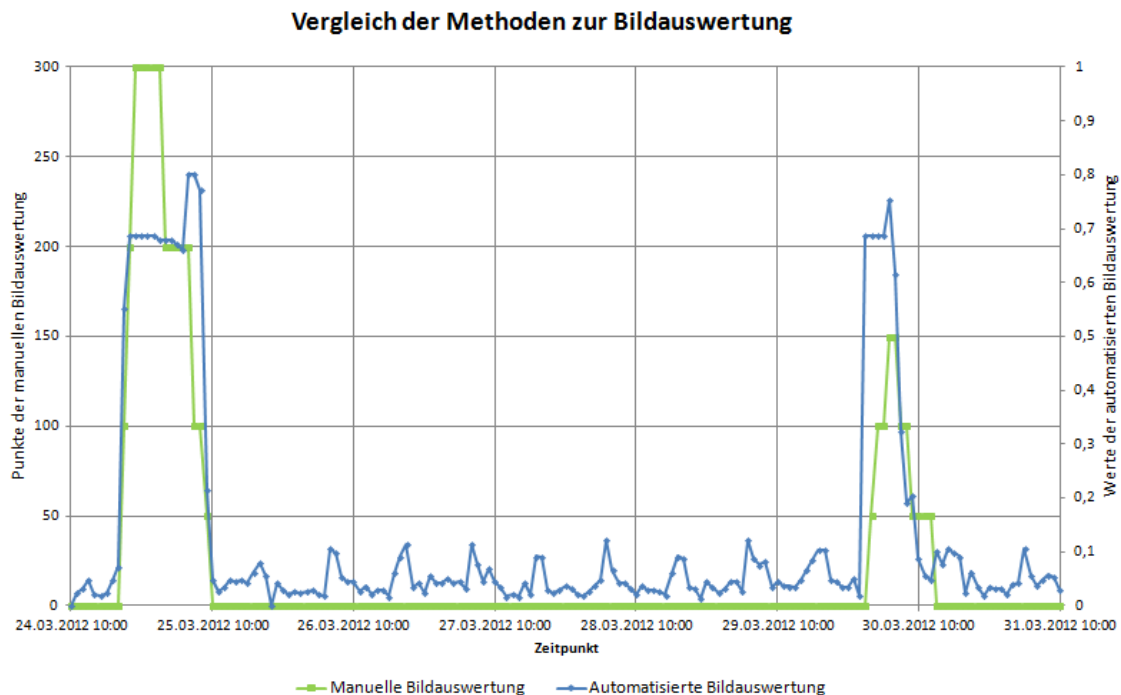


**Abbildung 42: Umwandlung der betrachteten Marker aus Graustufen in eine Schwarz/weiß-Darstellung. Oben: Tagreferenz, unten: Nachtreferenz**

Anschließend konnte ein Vergleich zwischen dem Schwarz-Weiß Bild des Markers und jenem des auszuwertenden Zeitpunktes durchgeführt und die Vereisung in Zahlen ausgedrückt werden: Bei einem eisfreien Bild wurde ein Wert von „0“ wiedergegeben – hier war jeder schwarze Pixel des Re-

ferenzmarkers auch im auszuwertenden Bild vorhanden. Waren jedoch sämtliche schwarzen Stellen vereist oder mit Schnee bedeckt, waren keine schwarzen Bildpunkte mehr erkennbar und das Programm gab den Maximalwert „1“ zurück.

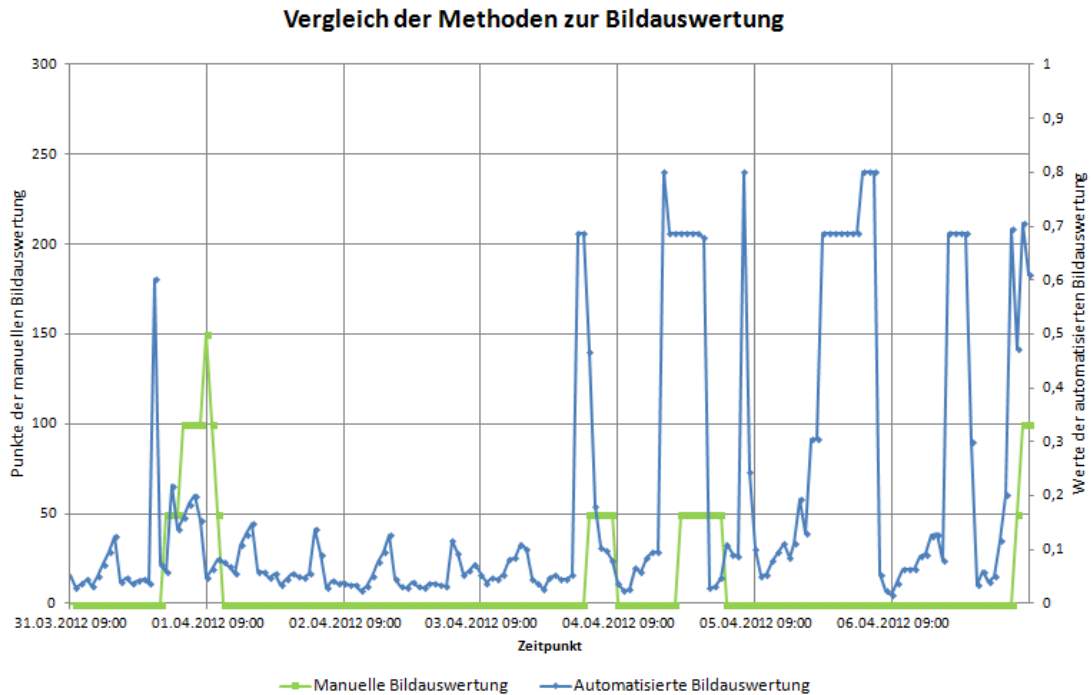
Für den Zeitraum einer Woche ab dem 24. 03. 2012 um 10:00 Uhr wurde exemplarisch ein Vergleich zwischen der automatischen und der manuellen Auswertung durchgeführt:



**Abbildung 43: Vergleich der Methoden der Bildauswertung, 24. 03. 2012 - 31. 03. 2012**

Wie in Abbildung 43 ersichtlich, wurden beide Vereisungsereignisse durch die automatisierte Bildauswertung erkannt. Die unterschiedliche Intensität der Vereisung konnte jedoch nicht zuverlässig detektiert werden. Klar erkenntlich sind auch die periodisch schwankenden Werte der automatisierten Auswertung aufgrund der wechselnden Belichtung (Sonnenaufgang, -untergang), sowie möglicherweise aufgrund der Umstellung von Tag- auf Nachtaufnahmen.

Bei der Auswertung der darauf folgenden Woche wurden jedoch weniger Übereinstimmungen erzielt (siehe Abbildung 44): Die automatisierte Bildauswertung detektiert häufiger Eis als die manuelle. Dies ist auf die hohe Luftfeuchtigkeit während dieses Zeitraums zurückzuführen, aufgrund derer die Kamera beschlug. So detektierte die automatisierte Auswertung bei einsetzendem Beschlagen bereits Eis, während auf den Bildern noch kein Eis ersichtlich ist – daher auch der Offset zwischen den Auswerteverfahren. Ebenso war teilweise der Sensor vereist, der Marker jedoch eisfrei (und umgekehrt). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei den vom automatisierten Auswerteverfahren detektierten Vereisungsereignissen am 06. und 07. 04. die Bildqualität 3 vergeben wurde und somit auch hier starke Unsicherheit herrscht.



**Abbildung 44: Vergleich der Methoden der Bildauswertung, 31. 03. 2012 - 07.04. 2012**

Folgende Punkte können zur automatisierten Bildauswertung festgehalten werden:

- ✧ Die Auswertemethode besitzt großes Potential zur schnelleren Bildbewertung bei garantiert gleichbleibenden Bewertungskriterien.
- ✧ Für eine ideale Auswertung sollte auf jeder Sensoroberfläche ein Marker appliziert werden – optimal wäre eine orthogonale Positionierung des Markers zur Kamera.
- ✧ Als Marker sind Kreise besser geeignet als Rechtecke, da bei diesen Eisansätze an den Rändern durch die „optische“ Verschiebung des Schwerpunktes besser erkennbar sind.
- ✧ Die Marker sollten einen größeren Teil des Bildes ausfüllen: Bei der Eisstation Faschina wurde durch die „kleinen“ Marker in Kombination mit einer niedrigen Auflösung der Kamera zusätzliche Unsicherheiten eingebracht.
- ✧ Trotz Schwellwertalgorithmus ist der Tagesgang der Sonne gut in der Auswertung sichtbar – dies zeigt die Beeinflussbarkeit der automatisierten Methodik.
- ✧ Bei beschlagener oder vereister Kamera, sowie starkem Regen stellt der automatisierte Algorithmus keine Verbesserung im Vergleich zur manuellen Auswertung dar. Hier müsste wiederum eine gesonderte Bewertung stattfinden.

Bei der Auswertung der Messergebnisse wurde die manuelle Bildauswertung als Referenz herangezogen, da diese die Vereisung der gesamten Station beurteilte und nicht nur jene der Seitenfläche des kapazitiven Sensors. Für eine zuverlässige automatisierte Bildauswertung müsste der Algorithmus weiter verbessert und getestet werden, sowie mehrere und größere Marker im gesamten Bildbereich angebracht werden.

## 5.2 Auswertung der Daten

Im Anschluss an die Aufbereitung der Messdaten und deren Darstellung in einer übersichtlichen Form wurde der gesamte Beobachtungszeitraum entsprechend der manuellen Bildauswertung auf Vereisungsereignisse untersucht und mit den Messwerten der einzelnen Sensoren verglichen. Obwohl die Eissensoren aufgrund ihres Konstruktionsprinzips entweder *Meteorological Icing* (LID-3300 IP) oder *Instrumental Icing* (Sommer/Kapazitiver Eissensor) detektieren, wurde die Auswertung gemäß den Anforderungen unter dem Fokus einer möglichst exakten Detektion der *Relevant Icing Time* durchgeführt. Bei den Eissensoren mussten Grenzwerte für „RIT“ oder „keine RIT“ festgelegt werden, bei den synoptischen Ansätzen waren diese bereits vorgegeben.

### 5.2.1 Sommer Eissensor

Der Sommer Eissensor reagierte sensibler als andere Sensoren auf geänderte Umgebungsbedingungen, er zeigte auch in vielen lt. Bildauswertung eisfreien Zeiträumen ein schwankendes Messsignal knapp oberhalb des Nullwertes. Da der Sommer Eissensor ohne aktivierter Heizfunktion im Idealfall *Instrumental Icing* exakt detektiert, wurde als Schwellwert  $SW_{\text{Sommer}} = 1,04$  gewählt, da bei Überschreiten dieses Wert exakt so viele Stunden als *Instrumental Icing* gezählt wurden, wie auch bei der Bildauswertung als *Instrumental Icing* detektiert wurden (488 Stunden). Die Sensitivitätsanalyse in Tabelle 12 zeigt, wie sich eine Änderung des Schwellwertes auf die Anzahl der ermittelten Stunden auswirkte:

Tabelle 12: Sensitivitätsanalyse  $SW_{\text{Sommer}}$

$SW_{\text{Sommer}}$ [%]	Stunden Instrumental Icing [h]
1	552
1,02	495
1,04	488
1,06	486
1,08	482
1,1	480

Der Vergleich der vom Sommer Eissensor detektierten Dauer des *Instrumental Icings* mit der von der Bildauswertung ermittelten und zur Abschätzung der Vereisungsdauer einer WKA notwendigen *Relevant Icing Time* (Zeit während der die Vereisung zunimmt + Zeit konstanter Eismenge) ist nicht ideal, da sie per Definition zu Abweichungen führt. Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche Auswertung durchgeführt, die nicht nur die gemessenen Absolutwerte des Sensors beurteilt, sondern auch deren Entwicklung: Ähnlich wie bei der Bildauswertung wurde auch beim Sommer Eissensor die Differenz zum vorigen Messwert betrachtet. Diese Methode stellte sich aufgrund des oben beschriebenen Schwankens der Werte als nicht geeignet für eine rechnerunterstützte Evaluierung/ein zuverlässiges Ergebnis heraus. Dies wird in Tabelle 13 dargestellt, wo zwar anhand der Absolutwerte das *Instrumental Icing* gut detektiert wurde (Spalte: Sommer\_m, hellblau hinterlegt), die zeitlich konstante Entwicklung der Vereisung durch das Schwanken des Signals jedoch teilweise als Abnahme (Spalte: Sommer Differenzen: Zunahme dunkelblau hinterlegt, Abnahme grün hinterlegt) ausgegeben wurde.



Versuche, das schwankende Signal durch eine Mittelung der Messwerte über einen größeren Zeitraum zu vermindern führten nicht zu besseren Ergebnissen. Aus diesem Grund wurden beim Sommer Eissensor jene Messwerte, die den gewählten Schwellwert  $SW_{\text{Sommer}}$  überschritten zur Beurteilung der *Relevant Icing Time* herangezogen.

Tabelle 13 zeigt (Spalten von links nach rechts): Den Zeitpunkt des Messwertes (Spalte „Datum\_Zeit“), die absolute Eismenge („Vereisung absolut“), wie sich die optisch festgestellte Eismenge im Vergleich zum vorigen Messpunkt veränderte („+“, „const“ bzw. „-“), die Bildqualität („BQ“), die Temperatur in K („Temp\_m“), die korrigierte relative Feuchte in %rF („kRF\_m“), die vom Sommer Eissensor gemessenen Volumsprozent Eis („Sommer\_m“) sowie deren Differenz zum vorangegangenen Messpunkt („Sommer Differenzen“). Es sei jedoch hinzugefügt, dass sich die Eismenge möglicherweise tatsächlich so wie vom Sensor ausgegeben veränderte, dies aber bei der Bildauswertung nicht ausreichend gut erkennbar war.

**Tabelle 13: Auswertung Sommer Eissensor**

Datum_Zeit	Vereisung absolut	Eis [+]	Eis const.	Eis [-]	BQ	Temp_m K	kRF_m %rF	Sommer_m %	Sommer Differenzen
21.04.2012 19:00	0	0			1	278,0	41,9	0,00	0,00
21.04.2012 20:00	0	0			1	277,3	50,6	0,14	0,00
21.04.2012 21:00	0	0			2	275,1	81,9	1,09	0,94
21.04.2012 22:00	50	50			1	274,0	97,4	1,88	0,80
21.04.2012 23:00	50		50		3	273,4	98,9	1,98	0,10
22.04.2012 00:00	50		50		2	272,3	99,7	2,88	0,90
22.04.2012 01:00	100	100			2	271,5	100,4	1,60	-1,28
22.04.2012 02:00	100		100		2	271,3	100,6	1,40	-0,20
22.04.2012 03:00	100		100		2	271,2	100,7	1,26	-0,14
22.04.2012 04:00	100		100		2	271,2	100,7	1,50	0,24
22.04.2012 05:00	100		100		1	271,0	100,8	1,35	-0,15
22.04.2012 06:00	100		100		3	271,0	100,8	1,82	0,47
22.04.2012 07:00	50			50	3	271,0	98,9	1,14	-0,69
23.04.2012 08:00	0			0	1	272,1	79,6	0,58	0,00

## 5.2.2 Labko LID-3300 IP

Der Labko Sensor detektiert durch seinen Abtaumechanismus *Meteorological Icing*, jeder Wert kleiner 100 bedeutet Vereisung. Eine Analyse der Differenzen zu den vorangegangenen Messwerten ist wegen des Abtauens nicht zielführend. Zur Auswertung wurde daher ein Unterschreiten des Schwellwerts  $SW_{\text{LID}} = 100$  herangezogen und mit der *RIT* gemäß Bildauswertung verglichen.

## 5.2.3 Synoptische Auswertung nach Krenn

Zur Auswertung der synoptischen Methode nach Krenn wurden die Grenzwerte für Temperatur ( $\leq 1^\circ\text{C}$ ) und Feuchte ( $\geq 90\%$ ) gemäß Absatz 3.4.3 übernommen. Sobald diese Grenzwerte gleichzeitig unter- bzw. überschritten wurden, wurde *RIT* („1“) ausgegeben, ansonsten *keine RIT* („0“).

## 5.2.4 Auswertung nach ISO 12 494

Die Auswertung wurde gemäß der Norm durchgeführt, abgesehen vom Verzicht auf die Unterscheidung zwischen hard und soft rime aufgrund der in Absatz 5.1.1.4 angeführten Problematik der Windmessung. Dennoch wird die Methodik als *Auswertung nach ISO 12 494* bezeichnet.

Es ergab sich somit eine Einteilung in fünf Klassen (siehe Tabelle 14), jede Eisklasse ausgenommen „E“ wurde in der Auswertung als *RIT* gezählt.

Tabelle 14: Eisklassen der ISO 12 494 - Auswertung

Vereisung:	Kürzel:
Rime	A
Glaze	B
Glaze precipitation	C
Wet snow	D
Kein Eis	E

## 5.2.5 Entwicklung T/krF-Methodik (Temperatur/korr. relative Feuchte)

Bei der ersten Gegenüberstellung der Ergebnisse der einzelnen Detektionsmechanismen mit den bewerteten Bildern stellte sich heraus, dass die Ergebnisse der Eissensoren nur teilweise zufriedenstellend waren und die synoptischen Auswerteverfahren die Vereisungshäufigkeit überschätzten (siehe Abbildung 53). Weiters war ersichtlich, dass für das Auftreten eines Vereisungsereignisses hauptsächlich spezielle Wertebereiche für Temperatur und Feuchte in Frage kommen - zur Eisbildung sind bekanntermaßen niedrige Temperaturen *und* eine hohe Luftfeuchtigkeit notwendig.

Allerdings wurde erkannt, dass vor allem Temperaturen zwischen + 2 und -4 °C Vereisung begünstigten - wobei Werte darüber Vereisung nahezu unmöglich, Werte darunter diese nur unwahrscheinlicher machten. Ebenso wurde klar, dass die *RIT* nicht vom Überschreiten einer bestimmten Schwelle der Feuchtigkeit abhängig ist, sondern vielmehr mit höheren Werten stark zunimmt. Auf die Verwendung von Wind- und CBH-Werten wurde verzichtet, da diese wie in Absatz 5.1.4 und 5.1.5 erklärt, mit großen Unsicherheiten behaftet waren.

Aus diesem Grund wurde eine neue Möglichkeit zur Detektion der *Relevant Icing Time* gesucht: Dabei wurden für Temperatur und korrigierte relative Feuchte Kurven entwickelt, die quantifizieren ob bzw. wo sich die betreffende Größe in einem Spektrum befindet, das als Bedingung B für *RIT* vorauszusetzen ist. Dabei stellt 1 den Maximal- und 0 den Minimalwert dar. Multipliziert man anschließend die den Messgrößen zugehörigen Werte der Kurven  $B_{RIT,T}$  und  $B_{RIT,krF}$  miteinander, so erhält man wiederum einen Wert zwischen 0 und 1: Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit  $P_{RIT}(T,krF)$  der *Relevant Icing Time* für die betrachtete Zeitspanne zurück (siehe Abbildung 45).

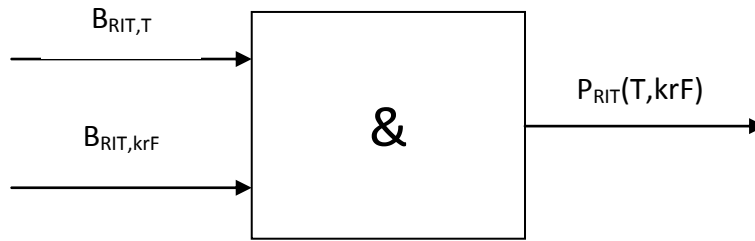


Abbildung 45: Methodik zur Ermittlung von  $P_{RIT}(T, krF)$

Es wurde untersucht, bei welchen Wertepaaren von Temperatur und korrigierter relativer Feuchte am häufigsten *RIT* auftrat: Abbildung 46 zeigt, dass sich *RIT* nahezu ausschließlich bei Werten korrigierter relativer Feuchtigkeit  $> 95$  %rF sowie in einem Temperaturbereich zwischen  $+ 1$  °C und  $-4$  °C einstellte. Vereinzelt Auftreten von *RIT* bei außerhalb dieses Bereichs ist auf die Unsicherheiten der optischen Bildauswertung zurückzuführen.

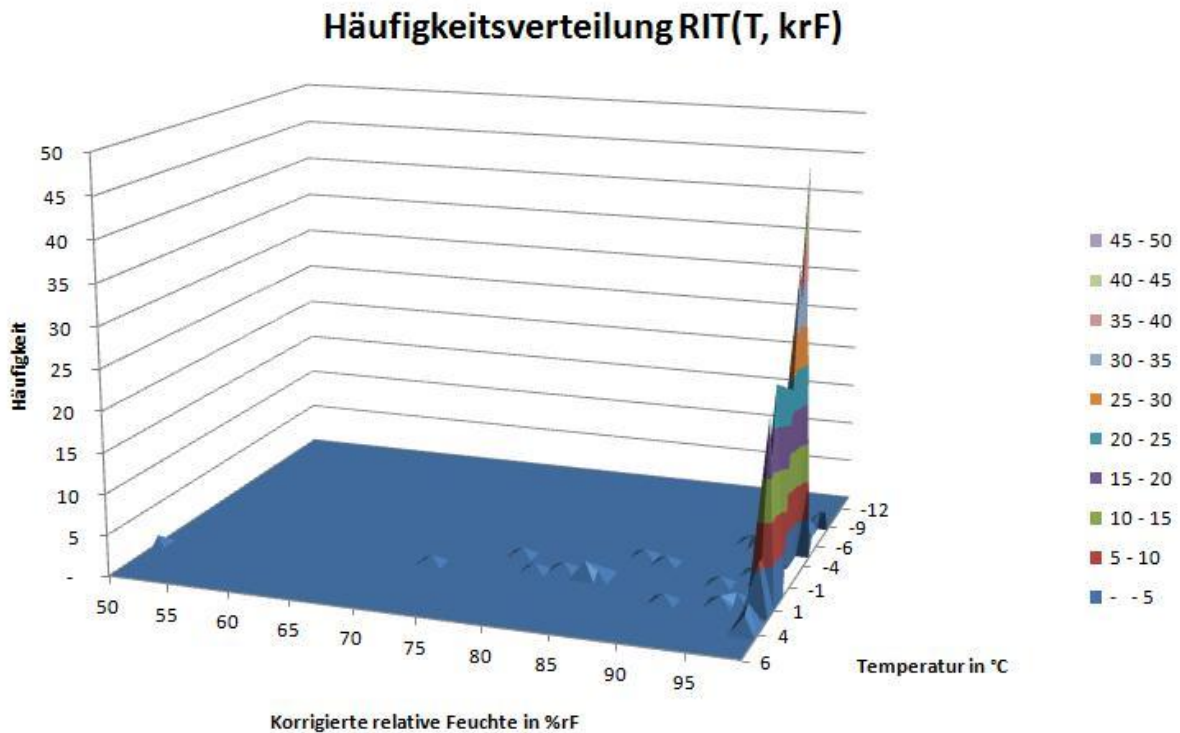


Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung  $RIT(T, krF)$

Zusätzlich wurde die relative Wahrscheinlichkeit  $P_{RIT}(T, krF)$  untersucht: Dabei wurde die Häufigkeit der optisch ermittelten Stunden unter *RIT* je Wertepaar  $(T, krF)$  durch die jeweilige Anzahl der vorhandenen Messpunkte dividiert. Das Ergebnis zeigte, dass im Bereich hoher *RIT*-Häufigkeit auch die relative *RIT*-Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist. Generell traten in diesem (im Vergleich zum Gesamt-raum) kleinen Parameterbereich wesentlich mehr Messpunkte auf für beliebige andere Wertepaare, ein längerer Messzeitraum ist für eine zuverlässige Aussage aus dieser Untersuchung unerlässlich.

### 5.2.5.1 $B_{RIT,T}$ Faschina

Als Basis für die Entwicklung der RIT-Wahrscheinlichkeit abhängig von der Temperatur ( $B_{RIT,T}$ ) dienten die Erfahrungsberichte der Zuständigen des Windparks Moschkogel sowie des Tauernwindparks Oberzeiring. Albert et al. (2012) zeigen eine Möglichkeit, unterschiedliche Expertenmeinungen durch ein mathematisches Modell zu gewichten und statistisch auszuwerten („Bayesscher Wahrscheinlichkeitsbegriff“). Da jedoch nur zwei Expertenmeinungen verfügbar waren, die sich überdies in ihrer Aussage deckten, war eine Modellbildung nicht zielführend.

Gemäß Aussagen von (Trauttmansdorff, 2012) und (Lotter, 2011) bildet sich Vereisung hauptsächlich zwischen  $-3\text{ °C}$  und  $+2\text{ °C}$ . Somit wurde in  $B_{RIT,T-A_1}$  für diesen Temperaturbereich ein Wert  $B_{RIT,T}$  von 1 angesetzt, bei jeder anderen Temperatur ein Wert von 0 (siehe Abbildung 47).

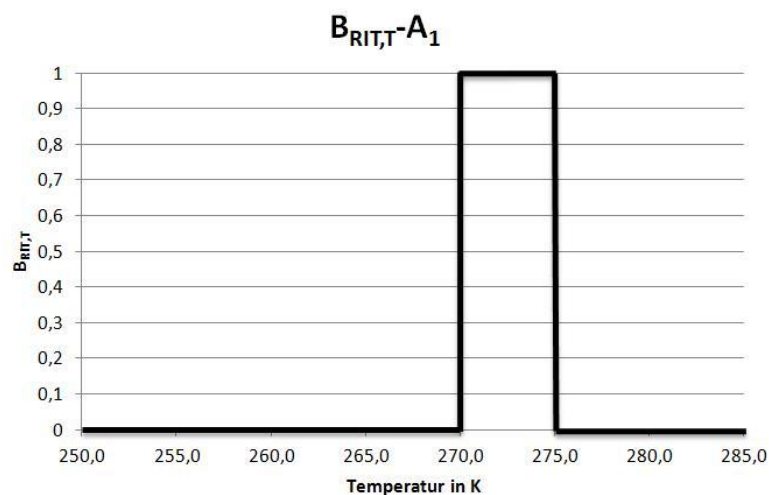


Abbildung 47:  $B_{RIT,T-A_1}$

Die in Abbildung 47 dargestellte, „binäre“ Abhängigkeit der RIT von der Umgebungstemperatur ist jedoch sehr stark vereinfacht und entspricht nicht den physikalischen Erfahrungen des Alltags. Weiters stellt sie im Vergleich zu den herkömmlichen synoptischen Detektionsmethoden, mit ihren fixen Grenzwerten, nur eine bedingte Weiterentwicklung dar, da außerhalb des Temperaturbereichs zwischen  $-3$  und  $+2\text{ °C}$  RIT ausgeschlossen wird.

Aus diesem Grund wurde die Abstraktion schrittweise überarbeitet: Für die erste Adaption ( $B_{RIT,T-A_2}$ ) wurde bei Temperaturen über 275 K zwar weiterhin ein  $B_{RIT,T}$  von 0 beibehalten, allerdings wurde der Übergang zwischen den Werten 0 und 1 abgeflacht. Ebenso wurde das Maximum auch bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes verkürzt: Der Maximalwert von 1 wurde somit nur mehr zwischen 272 und 274 K angenommen. Eine Zunahme der Eismenge bzw. konstante Eismenge wurde erst unterhalb von 265 K ausgeschlossen, dazwischen steigt der Erfüllungsgrad der Bedingung bis zu einem Wert von 0,8 bei 270 K linear an (siehe Abbildung 48).

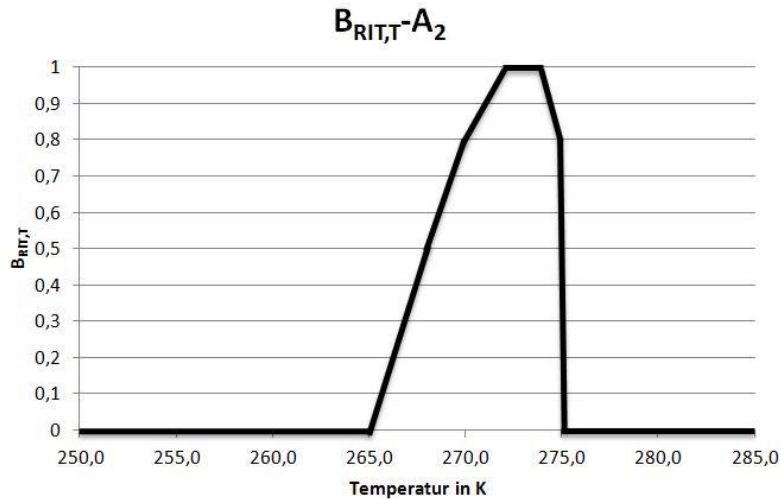


Abbildung 48:  $P_{RIT}(T)-A_2$

Dieses Methodik wurde iterativ fortgesetzt und  $B_{RIT,T}$  mehrmals angepasst, bis eine akzeptable Kurve  $B_{RIT,T}$  Faschina ermittelt werden konnte. Dazu wurden den Temperaturen in einer Schrittweite von 0,5 K Werte zugewiesen, um sprunghafte Änderungen abhängig von der Temperatur möglichst klein zu halten. Zwischen 267 K und 274,5 K wurden Werte  $B_{RIT,T} \geq 0,8$  vergeben, wobei sich die Höchstwerte auf den Temperaturbereich knapp oberhalb und knapp unterhalb des Gefrierpunktes konzentrieren ( $\pm 1$  K). Zu höheren Temperaturen hin fällt die Kurve ab, ab einem Wert von 280,5 K wird eine Zunahme der Vereisung/konstante Eismenge ausgeschlossen. Bei Temperaturen  $< 274,5$  fällt  $B_{RIT,T}$  Faschina ebenfalls steil ab, bei 264 K wurde ein Wert von 0,1 angenommen. Eine Zunahme der Vereisung/konstante Eismenge wurde bei Temperaturen  $< 259$  K gänzlich ausgeschlossen. In diesem Bereich ist der Ansatz hypothetisch, da im ausgewerteten Zeitraum nie Temperaturen unter  $-9$  °C gemessen wurden. Die exakten Wertepaare können dem Anhang A entnommen werden.

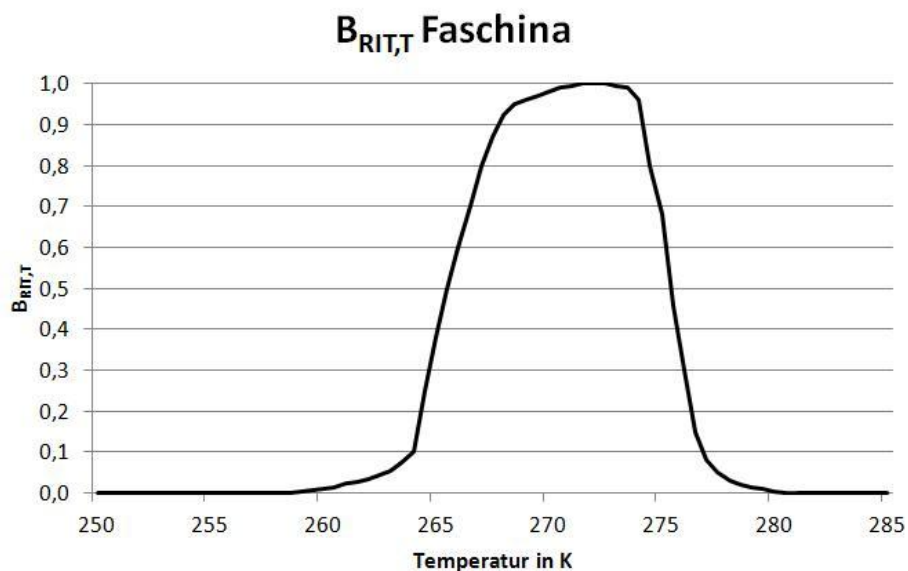


Abbildung 49:  $P_{RIT}(T)$  Faschina

### 5.2.5.2 $B_{RIT,krF}$ Faschina

Zur Ermittlung der Abhängigkeit von  $P_{RIT}$  von der korrigierten relativen Feuchte, wurde  $B_{RIT,krF}$  anhand folgender Überlegungen entwickelt:

Es war bekannt, dass das Auftreten von Vereisung von hoher Luftfeuchtigkeit abhängig ist, die Wahrscheinlichkeit dafür mit höherer Luftfeuchtigkeit überproportional zunimmt und Vorgänge der Natur (wie beispielsweise Wachstumsprozesse) häufig durch e-Funktionen abgebildet werden können. Aus diesem Grund wurde auch für  $B_{RIT,krF}$  eine e-Funktion als Basis verwendet. Anschließend wurde die Funktion (siehe Gl. 8) so abgeändert, dass bei einer korrigierten relativen Feuchte von 100 % der Wert 1 erreicht wird (Variable  $b = 100$ ). Durch eine Multiplikation des Exponenten mit einer Variablen  $a$  kann die Steigung beeinflusst und so die Gewichtung auf hohe Werte der korrigierten relativen Feuchte gelegt werden (Abbildung 50):

$$B_{RIT,krF} = e^{a*(krF-b)} \quad \text{Gl. 8}$$

- $B_{RIT,krF}$ ... Erfüllung der Bedingung für Eiszunahme/konstante Eismenge
- $krF$ ... Korrigierte relative Feuchte (%rF)
- $a$ ... Konstante: 0,12 (siehe 5.3)
- $b$ ... Konstante: 100 (siehe 5.2.5.2)

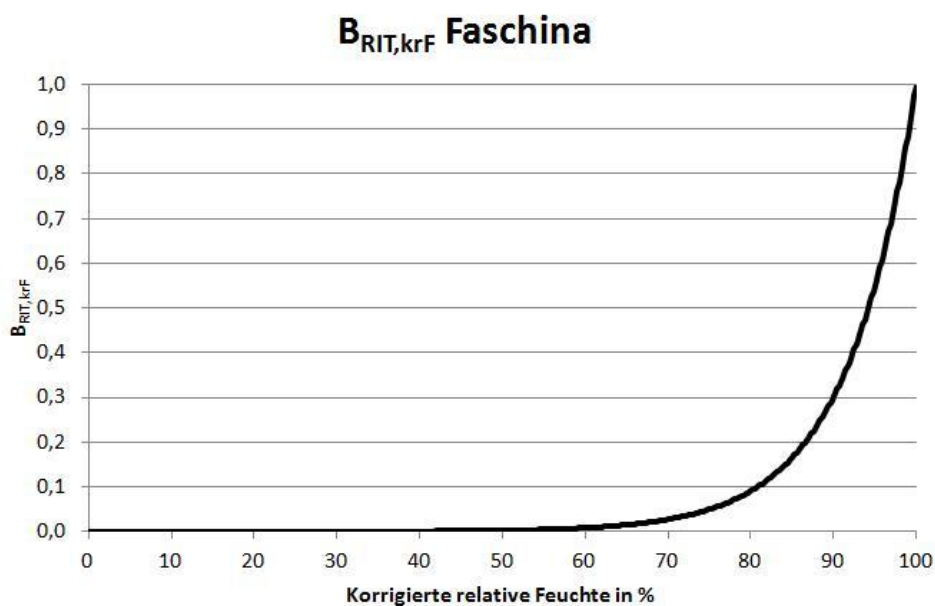


Abbildung 50:  $B_{RIT,krF}$  Faschina

### 5.2.5.3 Schwellwert T&krF-Methodik

Nach Multiplikation der beiden Faktoren  $B_{RIT,T}$  und  $B_{RIT,krF}$  muss für das Produkt (das ja die Wahrscheinlichkeit von RIT zum betreffenden Zeitpunkt darstellt), ebenfalls ein Schwellwert  $SW_{TkrF}$  definiert werden, ab dessen Überschreitung der Messpunkt als RIT gezählt wird. Die Bestimmung des optimalen  $SW_{TkrF}$  wird in Absatz 5.3.2 erläutert. Somit wird versucht, die in Abbildung 46 dargestellte Häufigkeitsverteilung der RIT nachzubilden und eine optimale Annäherung zu finden.

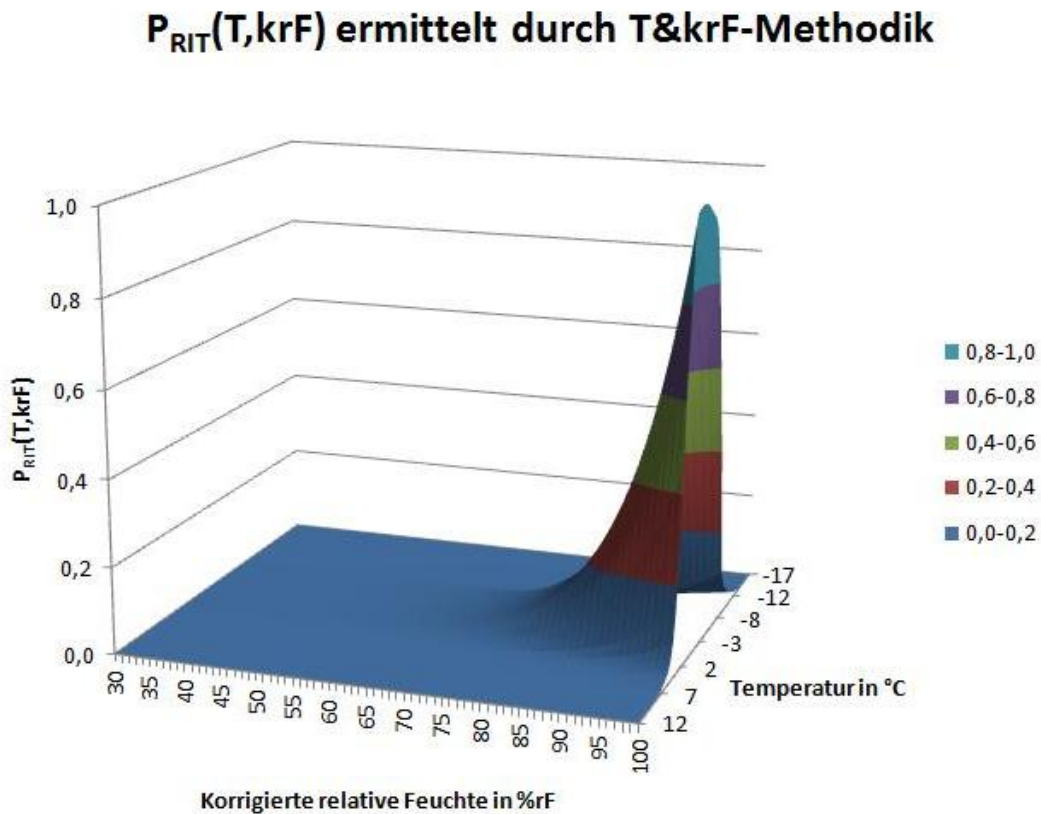


Abbildung 51:  $P_{RIT}(T,krF)$  ermittelt durch T&krF-Methodik

## 5.3 Ergebnisse

### 5.3.1 Zeitliche Gewichtung

Eine Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Gewichtungsalternativen und ihrer Auswirkungen auf die Ergebnisse der einzelnen Detektionsmethoden im Vergleich zu den optisch ausgewerteten Stunden der RIT wurde durchgeführt (siehe Tabelle 15 und Abbildung 52): Die Abweichungen in Stunden waren, abgesehen von jenen des LID-3300 IP sehr gering, in den Größenordnungen oder der Reihung der genauesten Detektion stellte sich kein Unterschied ein. Die große Abweichung des LID-3300 IP könnte durch den Heizungssteuerung erklärt werden: Da sich die Heizung immer wieder aktiviert und deaktiviert, bringt die Konzentration auf nur einen Messwert pro Stunde (wie in den Alternativen 1 und 2) das Risiko mit sich, einen eisfreien Zustand trotz vereisungsbegünstigenden Umgebungsbedingungen zu wählen. Aus diesem Grund ist die Mittelung entsprechend der Standardgewichtung zu bevorzugen und wurde für die weitere Auswertung verwendet.

Tabelle 15: Sensitivitätsanalyse zur zeitlichen Gewichtung der Messwerte

Zeitpunkt:	Standardgewichtung:	Gewichtung Alternative 1:	Gewichtung Alternative 2:
XX:10 Uhr	0,048	1	0
XX:20 Uhr	0,095	0	0
XX:30 Uhr	0,143	0	0
XX:40 Uhr	0,190	0	0
XX:50 Uhr	0,238	0	0
Volle Stunde	0,286	0	1

Relevant Icing Time [h] bei unterschiedlicher zeitlicher Gewichtung

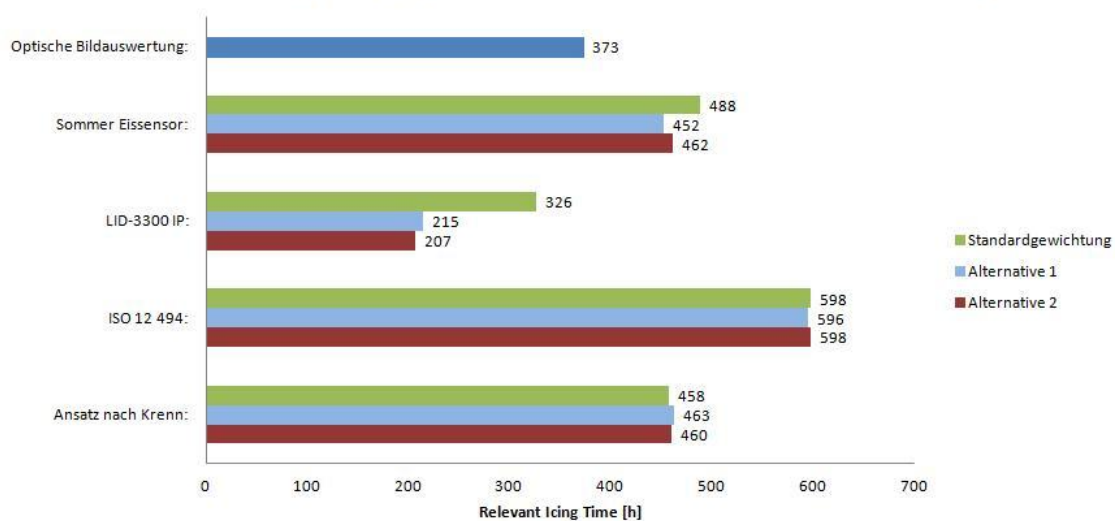


Abbildung 52: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse der Relevant Icing Time bei unterschiedlicher zeitlicher Gewichtung (Standort Faschina)



### 5.3.2 Sensitivitätsanalyse T&krF-Methodik

Da sowohl  $B_{RIT,T}$  Faschina als auch  $B_{RIT,krF}$  Faschina willkürlich festgelegt und noch kein  $SW_{TkrF}$  zur Beurteilung „RIT“ oder „keine RIT“ bestimmt wurde, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurden für die Temperatur die drei Evolutionsstufen  $B_{RIT,T-A_1}$ ,  $B_{RIT,T-A_2}$  und  $B_{RIT,T}$  Faschina und für  $B_{RIT,krF}$  Faschina drei Werte der Variablen  $a$ , sowie drei unterschiedliche Schwellwerte  $SW_{TkrF}$  verwendet. Als Vergleichsgröße diente jeweils die Summe der Übereinstimmungen zwischen *Bildauswertung* und *T&krF-Methodik*. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 -Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 16: Sensitivitätsanalyse für den  $SW_{TkrF} = 0,56$

$SW_{TkrF} = 0,56$	$B_{RIT,krF}: a = 0,08$	$B_{RIT,krF}: a = 0,12$	$B_{RIT,krF}: a = 0,16$
$B_{RIT,T-A_1}$ :	1.452	1.457	1.461
$B_{RIT,T-A_2}$ :	1.446	1.450	1.453
$B_{RIT,T}$ Faschina:	1.500	1.514	1.521

Tabelle 17: Sensitivitätsanalyse für  $SW_{TkrF} = 0,74$

$SW_{TkrF} = 0,74$	$B_{RIT,krF}: a = 0,08$	$B_{RIT,krF}: a = 0,12$	$B_{RIT,krF}: a = 0,16$
$B_{RIT,T-A_1}$ :	1.462	1.465	1.464
$B_{RIT,T-A_2}$ :	1.452	1.454	1.451
$B_{RIT,T}$ Faschina:	1.577	1.580	1.575

Tabelle 18: Sensitivitätsanalyse für  $SW_{TkrF} = 0,93$

$SW_{TkrF} = 0,93$	$B_{RIT,krF}: a = 0,08$	$B_{RIT,krF}: a = 0,12$	$B_{RIT,krF}: a = 0,16$
$B_{RIT,T-A_1}$ :	1.459	1.454	1.450
$B_{RIT,T-A_2}$ :	1.399	1.399	1.426
$B_{RIT,T}$ Faschina:	1.558	1.556	1.550

Die höchste Anzahl an Übereinstimmungen wurde bei folgender Variablenkombination erreicht:  $B_{RIT,T}$  Faschina,  $B_{RIT,krF}: a = 0,12$  sowie  $SW_{TkrF} = 0,74$  (Farbige Markierungen in Tabelle 17).

Die unterschiedlichen Evolutionsstufen von  $B_{RIT,T}$  zeigen großen Einfluss auf das Ergebnis, vor allem fällt auf, dass  $B_{RIT,T-A_1}$  bei allen Kombinationen mehr Übereinstimmungen als  $B_{RIT,T-A_2}$  aufweist (vor allem bei einem Schwellwert von 0,93, siehe Tabelle 18). Die liegt an der Abflachung des Maximalwerts bei  $B_{RIT,T-A_2}$ , bei den iterativen Schritten  $B_{RIT,T}$  Faschina wurde diese jedoch wieder zurückgenommen (vergleiche Abbildung 48 und Abbildung 49).

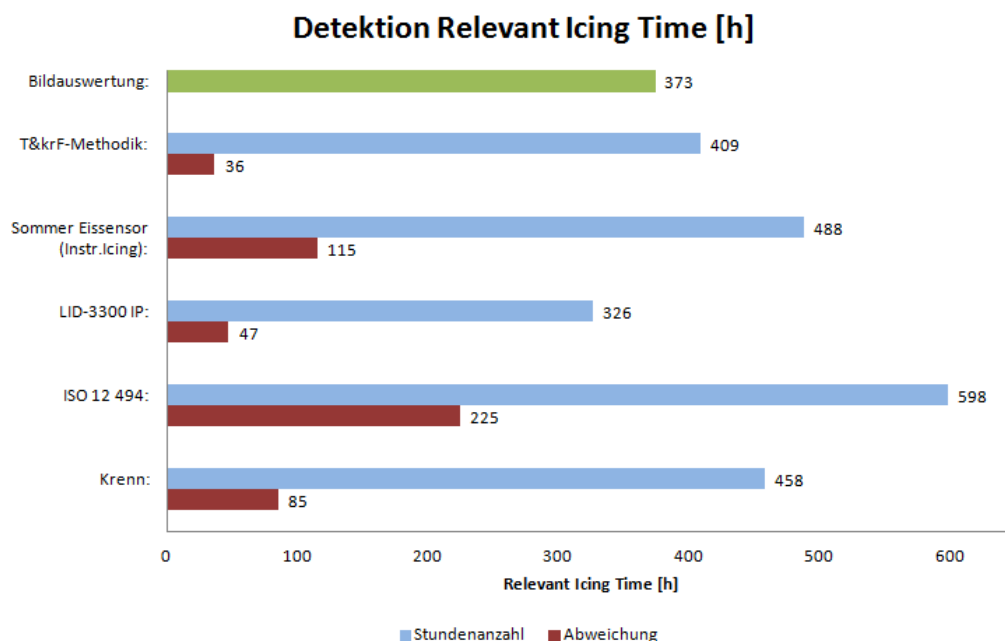
Veränderungen des  $B_{RIT,krF}$  Faktors  $a$  bewirken nur geringfügige Auswirkungen auf die Anzahl an Übereinstimmungen. Bemerkenswert ist jedoch, dass bei  $SW_{TkrF} = 0,56$  mit steigenden Werten für  $a$  eine höhere Anzahl von Übereinstimmungen erzielt wird (Tabelle 16), während bei  $SW_{TkrF} = 0,93$  mit

steigenden Werten von  $\alpha$  weniger Übereinstimmungen erfolgen (Tabelle 18). Dieses Phänomen ist unabhängig von der gewählten  $B_{RIT,T}$ -Kurve. Die Erklärung dafür könnten Werte der korrigierten relativen Feuchte sein, die aufgrund von Messfehlern oder der Toleranz des Hygrosensors knapp über 100 % liegen. Ab dieser Schwelle sind Werte von  $B_{RIT,krf}$  mit  $\alpha = 0,16$  kleiner als jene von  $B_{RIT,krf}$  mit  $\alpha = 0,08$ . Die meisten Übereinstimmungen bei  $SW_{Tkrf} = 0,74$  und  $\alpha = 0,12$  zeigt dass bei diesem Wertepaar ein Optimum gefunden wurde (Tabelle 17). Diese Kombination wurde zur Auswertung der Daten der Vereisungsmessstation Faschina verwendet.

Die Variation von  $SW_{Tkrf}$  zeigt unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Ergebnisse der  $B_{RIT,T}$ -Kurven: Während die Anzahl der Übereinstimmungen von  $B_{RIT,T-A_1}$  durch das binäre Verhalten nahezu unabhängig von  $SW_{Tkrf}$  ist, werden die Ergebnisse von  $B_{RIT,T-A_2}$  und  $B_{RIT,T}$  Faschina durchaus beeinflusst.

### 5.3.3 Vergleich der Detektionsmethoden

Der Vergleich der unterschiedlichen Eissensoren sowie synoptischen Verfahren zeigt, dass die T&krF-Methodik die Dauer *der Relevant Icing Time* besser als andere Detektionsmethoden/Sensoren abzuschätzen vermag (siehe Abbildung 53).



**Abbildung 53: Ermittelte Stunden RIT**

Man kann erkennen, dass beide bisherigen synoptischen Verfahren (ISO 12 494 und Krenn) die RIT überschätzen. Dies liegt vor allem daran, dass am Beginn und am Ende von Vereisungsereignissen häufig zu früh bzw. zu lange detektiert wird.

Der LID-3300 IP erzielt sehr gute Übereinstimmung, mit nur 47 Abweichungsstunden liegt er nahe an der Referenz-Stundenanzahl. Der Sommer Eissensor überschätzt wie die synoptischen Verfahren die RIT, dies ist einerseits auf das Schwanken des Signals, hauptsächlich jedoch auf die Messung des In-

strumental Icing zurückzuführen (siehe Absatz 5.2.1). Allerdings wurde nicht immer zum korrekten Zeitpunkt Eis detektiert, wie Tabelle 19 zeigt.

Betrachtet man nicht nur das richtige Erkennen der Stunden der *RIT*, sondern die in Absatz 5.3.2 bereits beschriebene Zahl der Übereinstimmungen („*RIT*“ detektiert wenn *RIT* lt. Bildauswertung und „*keine RIT*“ detektiert wenn tatsächlich keine *RIT*), erhält man folgende Statistik:

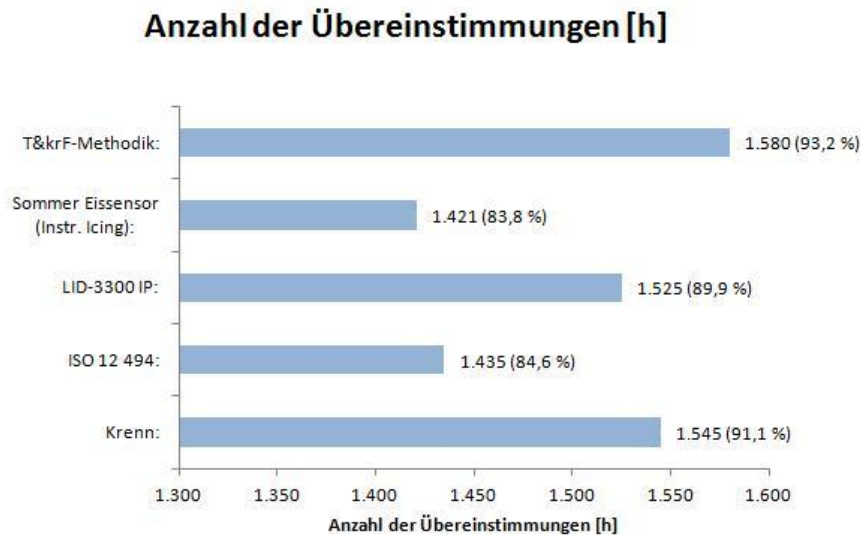


Abbildung 54: Anzahl der korrekten „*RIT*“ und „*eisfrei*“ Detektionen

In dieser Reihung fällt der LID-3300 IP im Vergleich zur korrekten Detektion der *RIT* (Abbildung 53) hinter die Auswertemethode nach Krenn zurück. Grund dafür ist, dass der LID-3300 IP häufig noch kein Eis detektiert, obwohl schon geringfügige Eisansammlungen auf der Messstation vorhanden sind. Dieses Verhalten wird deutlich, wenn man jene Stunden aufsummiert, die laut Bildauswertung zur *RIT* zählen, die Auswerteverfahren jedoch nicht im Stande sind dies zu erkennen. Diese Ereignisse würden sich bei der Planung eines Standortes besonders negativ auswirken, da in der Wirtschaftlichkeitsrechnung von einer geringeren Vereisungshäufigkeit ausgegangen würde, als sie tatsächlich anzutreffen ist. Aus diesem Grund wurde die Häufigkeit der möglichen Zustände ermittelt und für jeden Sensor/Auswertemethode in Tabelle 19 dargestellt. Links des Doppelpunktes ist jeweils das Ergebnis der Bildauswertung, rechts davon jenes der betreffenden Detektionsmethode.

Tabelle 19: Mögliche Zustände und ihre Häufigkeit (Bildauswertung : Detektionsmethode)

	RIT: RIT	keine RIT : keine RIT	RIT : keine RIT	keine RIT : RIT
T&krF-Methodik:	333	1.247	40	76
Sommer Eissensor:	293	1.128	80	195
LID-3300 IP:	264	1.261	109	62
ISO 12 494:	355	1.080	18	243
Krenn:	340	1.205	33	118

Es wird ersichtlich, dass der LID-3300 IP viele Stunden der RIT nicht oder zu spät detektiert. Würde ein Standort also nur aufgrund einer Auswertung dieses Sensors evaluiert, würden 109 Stunden als Betriebsstunden gerechnet, während derer in Wirklichkeit Vereisungsbedingungen herrschten. Grund dafür ist die schwierige Wahl eines Schwellwertes für diesen Sensor, der vom Hersteller angegebene Wert erschien als nicht ideal.

Die Auswertung nach ISO 12 494 stellt das exakte Gegenteil dar: Da die Schwellwerte in der Norm sehr großzügig gefasst wurden, werden bei dieser Auswertemethode die meisten tatsächlichen Stunden der RIT auch als solche detektiert (355). Dies jedoch mit dem Nachteil von 243 als „RIT“ detektierten Stunden, während derer die Eismenge nicht zunimmt oder konstant bleibt. Auch dieser Fall ist im Sinne der Wirtschaftlichkeitsrechnung ungünstig, da ein Standort schlechter bewertet würde, als er tatsächlich ist.

Als Mittelweg bieten sich derzeit die T&krF-Methodik sowie die Auswertung nach Krenn an, die vor allem bei der ursprünglichen Aufgabe, der korrekten Erkennung der Relevant Icing Time, besser abschneiden sowie allgemein bei der Anzahl der Übereinstimmungen (Abbildung 54).

### 5.3.4 Kapazitiver Eissensor

Da der kapazitive Sensor aufgrund von Übertragungsproblemen nur zwischen dem 10. 03. 2012, 14:00 Uhr, und dem 20. 04. 2012, 07:00 Uhr, regelmäßig Daten übermittelte, wurden seine Messwerte einer eigenen Auswertung, die nur diesen Zeitraum untersucht, zugeführt. Der Sensor gibt ausgehend vom eisfreien Wert 0 positive Werte entsprechend der äquivalenten Schichtdicke von Klareis in mm an, sowie negative Werte für Wasser oder den Übergang zwischen Eis und Wasser. Zusätzlich können Informationen über die Qualität (Zuverlässigkeit) der Messung, sowie die Aktivität über der Sensoroberfläche (Eiszuwachs, -abnahme) gewonnen werden. Die Auswertung dieser beiden Informationen ist jedoch noch in Entwicklung. Auch für den kapazitiven Sensor wurden die Differenzen zwischen den stündlichen Werten ausgewertet, um nicht nur Aussagen über das Instrumental-, sondern auch über das Meteorological Icing zu erhalten.

In einem ersten Schritt wurde überprüft, bei welchem Schwellwert  $SW_{kap}$  für den kapazitiven Eissensor die meisten Übereinstimmungen mit der Bildauswertung erreicht wurden. Entsprechend der Theorie war dies bei  $SW_{kap}$  von 0 der Fall, siehe auch Tabelle 20.

**Tabelle 20: Sensitivitätsanalyse für den kapazitiver Eissensor**

$SW_{kap}$	Übereinstimmungen
0,0	81,1 %
0,1	80,8 %
0,2	78,5 %
0,3	77,4 %

Aus diesem Grund wurden in der Auswertung Messpunkte mit Werten > 0 als „RIT“ gezählt. Für den betreffenden Zeitraum wurde sowohl die detektierte Dauer der RIT als auch die Anzahl der Übereinstimmungen („RIT“ lt. Detektionsmethode wenn „RIT“ lt. Bildauswertung, sowie „keine RIT“ lt. Detektionsmethode wenn „keine RIT“ lt. Bildauswertung) berechnet und mit den anderen Detektionsmethoden verglichen (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56)

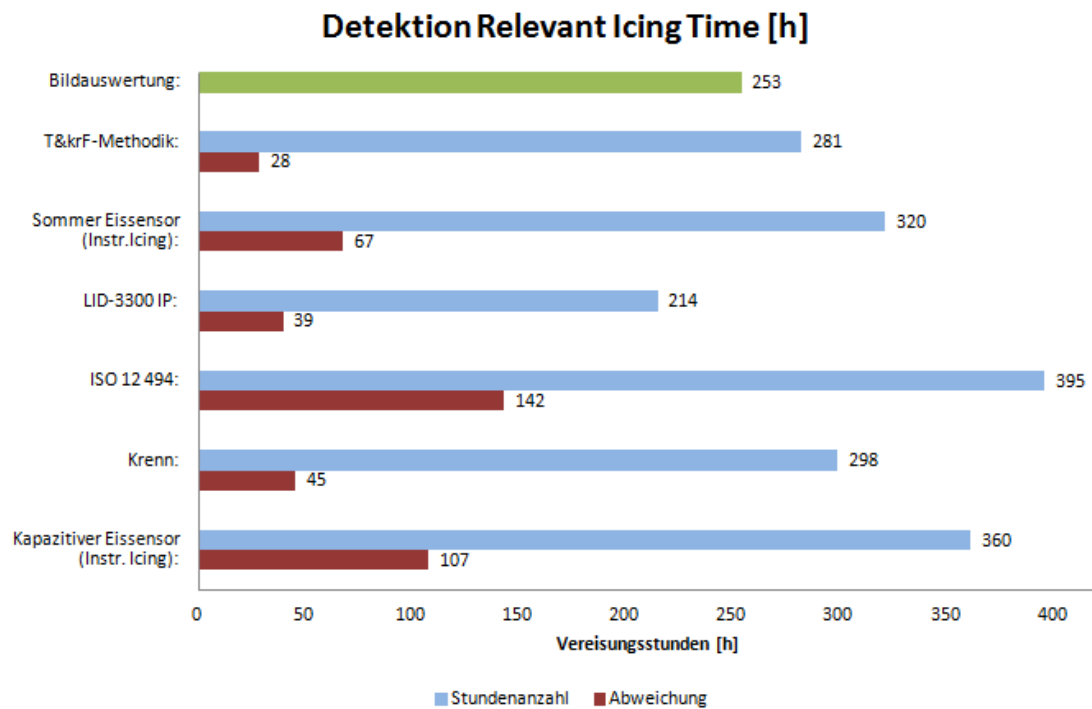


Abbildung 55: Detektion RIT inkl. kapazitivem Sensor

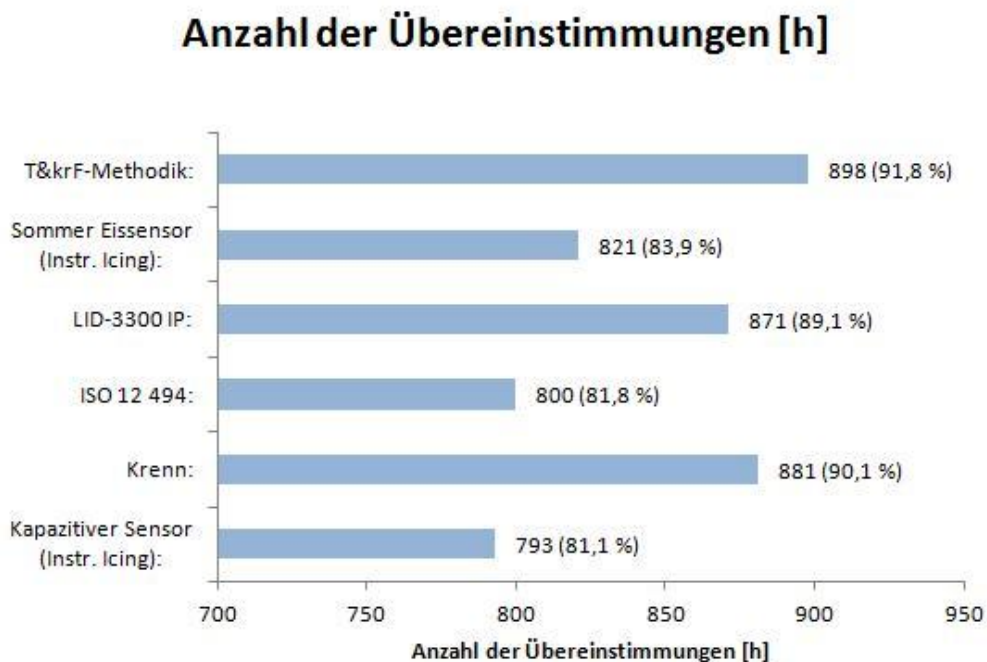


Abbildung 56: Anzahl der Übereinstimmungen inkl. kapazitivem Sensor

Folgende Faktoren beeinflussen das Abschneiden des kapazitiven Eissensors mitunter stark:

1. Wie der Sommer Eissensor misst auch der (aktuell unbeheizte) kapazitive Eissensor Instrumental Icing, somit wird im Verhältnis zur RIT ein zu hoher Wert ermittelt. Wird die Zeit, während der die Eismenge abnimmt), mit in die Berechnung aufgenommen (=Instrumental Icing), erreicht der kapazitive Sensor eine Übereinstimmung von 92 %.
2. Die ungünstige Kamerapositionierung führte dazu, dass auf den Nachtaufnahmen die Oberfläche des kapazitiven Sensors nicht mehr sichtbar ist (siehe Abbildung 57). Eine exakte Überprüfung der Funktionalität des Sensors bei kritischen Fällen kann während dieser Zeiträume somit nicht durchgeführt werden.
3. Intensive Vereisungsereignisse wurden vom Sensor sehr gut detektiert, jedoch reagiert die Kapazitätsmessung äußerst sensitiv auf Verhältnisse, die genau an der Schwelle zur Eisbildung liegen. Es liegt die Vermutung nahe, dass bei manchen Detektionen tatsächlich minimale Vereisung auf der Sensoroberfläche vorhanden war, diese jedoch bei der Bildauswertung noch nicht erkannt werden konnte und somit keine Punkte vergeben wurden. Diese Annahme wird auch durch den hohen Wert von 15 % (146 Stunden von 978 im Auswertzeitraum) dieser Abweichungsart bestätigt, nur die Auswertung nach ISO 12 494 weist einen noch höheren Wert auf (16,3 %). Durch die hohe Sensitivität führte auch eine Auswertung der Differenzen zum Wert der vorigen Stunde nicht zum Erfolg.

Aufgrund der oben angeführten Faktoren ist die Vereisungsdetektion mittels kapazitiver Sensorik trotz der derzeit im Verhältnis zu den anderen Sensoren geringen Übereinstimmungsquote viel versprechend. Vor allem beim Erkennen geringer Eismengen könnte diese Methode von Vorteil sein.

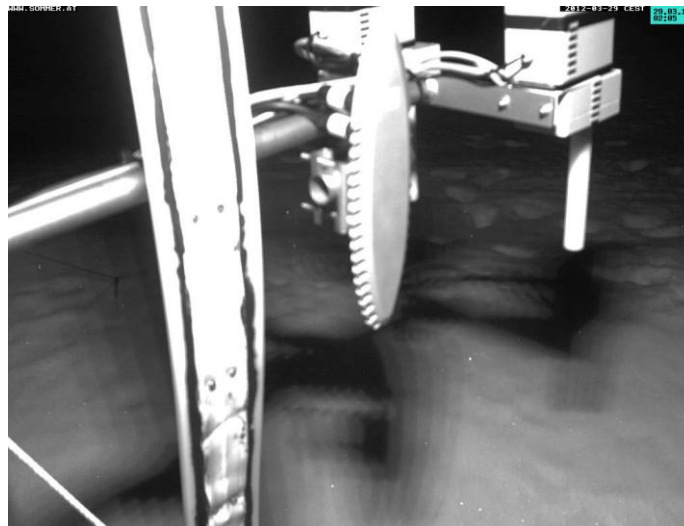


Abbildung 57: Kamerabild vom 29. 03. 2012, 02:00 Uhr

### 5.3.5 Interpretationen/aufgetretene Probleme

Folgend werden ausgewählte Vereisungsereignisse inkl. aufgezeichneter Messwerte angeführt, mit deren Hilfe sich Zusammenhänge gut erklären und Probleme bei der Auswertung anschaulich darstellen lassen.

## Vereisungsereignis 1: 24./25. März 2012, Bilder siehe Anhang B

Tabelle 21: Vereisungsereignis 1, 24./25. März 2012

Datum_Zeit	Vereisung	Eis	Eis	Eis	BQ	Temp_m	kRF_m	T&krF	Sommer_m	LID 3300_m	Kapaz. S.	ISO 12 494	Krenn
	absolut	[+]	const.	[-]			%rF		%	"-"	mm		
24.03.2012 17:00	0	0			1	279,4	47,5	0,00	0,0	100,0	0,00	E	0
24.03.2012 18:00	0	0			1	276,6	76,0	0,01	0,0	100,0	0,00	E	0
24.03.2012 19:00	100	100			2	274,9	91,6	0,29	0,3	100,0	0,20	D	0
24.03.2012 20:00	200	200			3	274,2	99,0	0,85	3,2	51,1	0,38	A	1
24.03.2012 21:00	300	300			3	274,1	98,9	0,84	4,5	67,1	0,27	A	1
24.03.2012 22:00	300		300		2	274,1	98,9	0,84	4,7	100,0	0,58	A	1
24.03.2012 23:00	300		300		2	274,3	98,9	0,84	4,1	100,0	0,62	A	0
25.03.2012 00:00	300			300	2	274,6	98,8	0,69	3,6	100,0	0,90	A	0
25.03.2012 01:00	300			300	2	274,8	98,0	0,63	3,1	100,0	0,94	A	0
25.03.2012 02:00	200			200	2	275,2	91,4	0,24	2,6	100,0	0,84	D	0
25.03.2012 03:00	200			200	2	275,2	88,0	0,16	2,1	100,0	0,73	E	0
25.03.2012 04:00	200			200	2	274,7	92,5	0,32	3,1	100,0	0,74	D	0
25.03.2012 05:00	200			200	2	274,6	93,7	0,37	3,6	100,0	1,12	A	0
25.03.2012 06:00	200			200	1	274,7	92,3	0,32	3,4	100,0	1,09	D	0
25.03.2012 07:00	100			100	1	274,8	87,8	0,19	3,3	100,0	0,99	E	0
25.03.2012 08:00	100			100	1	276,7	75,7	0,01	2,1	100,0	0,82	E	0
25.03.2012 09:00	50			50	1	277,0	71,1	0,00	1,3	100,0	0,35	E	0
25.03.2012 10:00	0			0	1	277,1	69,9	0,00	1,0	100,0	0,06	E	0
25.03.2012 11:00	0	0			1	277,6	65,4	0,00	0,4	100,0	0,00	E	0
25.03.2012 12:00	0	0			1	277,8	61,7	0,00	0,0	100,0	0,00	E	0

Tabelle 21 zeigt den Verlauf eines kurzen und intensiven Vereisungsereignisses. Blau hinterlegte Werte markieren RIT lt. Bildauswertung bzw. ein Überschreiten des Schwellwerts der jeweiligen Detektionsmethode.

Innerhalb von nur drei Stunden sammelt sich eine große Eismenge an den Eissensoren an, nach einer kurzen konstanten Phase nimmt die Eismenge ab Mitternacht wieder langsam aber stetig ab. Die **T&krF-Methodik** sowie die **Auswertung nach Krenn** erkennen dies gut, bei der T&krF-Methode ist auch der sprunghaften Anstieg von 0,29 auf 0,85 gut ersichtlich. Hier zeigt sich das Manko der statischen Grenzwerte bei der konventionellen synoptischen Auswertemethode: Durch eine Änderung der Temperatur um nur 0,2 °C ändert sich die Eisklassifizierung sprunghaft (Spalte „Krenn“, 23:00 Uhr). Der **LID-3300 IP** detektiert das Ereignis zu spät und zu kurz – dies deutet auf zu geringe Sensibilität beim Beginn und am Ende des Vereisungsprozesses hin. Der **Sommer Eissensor** sowie der **kapazitive Eissensor** detektieren die Stunden des Instrumental Icing zuverlässig, wenngleich die ermittelten Werte nicht mit der Eismenge korrelieren. Die Ergebnisse der **Auswertung gemäß ISO 12 494** sind unklar, es wird hier weder Instrumental- oder Meteorological Icing, noch die RIT zuverlässig erkannt.





## Vereisungsereignis 2: 04./05. April 2012, Bilder siehe Anhang C

Tabelle 22: Vereisungsereignis 2, 04./05. April 2012

Datum_Zeit	Vereisung absolut	Eis [+]	Eis const.	Eis [-]	BQ	Temp_m	kRF_m %rF	T&krF	Sommer_m %	LID 3300_m "-"	Kapaz. S. mm	ISO 12 494	Krenn
04.04.2012 18:00	0	0			2	277,0	99,0	0,13	0,6	100,0	0,00	E	0
04.04.2012 19:00	0	0			3	276,8	99,0	0,13	1,3	100,0	0,08	E	0
04.04.2012 20:00	50	50			3	276,6	99,0	0,13	2,1	100,0	0,46	E	0
04.04.2012 21:00	50	50			3	276,8	99,0	0,13	2,4	100,0	0,90	E	0
04.04.2012 22:00	50	50			3	276,8	99,0	0,13	3,1	100,0	1,11	E	0
04.04.2012 23:00	50	50			3	276,7	99,0	0,13	3,3	100,0	1,07	E	0
05.04.2012 00:00	50	50			3	276,5	99,0	0,27	3,0	100,0	1,11	E	0
05.04.2012 01:00	50			50	3	276,4	99,0	0,27	2,9	100,0	1,07	E	0
05.04.2012 02:00	50			50	2	276,5	99,0	0,27	2,8	100,0	0,94	E	0
05.04.2012 03:00	50			50	2	276,6	99,0	0,13	2,7	100,0	0,93	E	0
05.04.2012 04:00	0	0			2	276,9	99,0	0,13	2,7	100,0	0,88	E	0
05.04.2012 05:00	0	0			2	277,1	99,0	0,07	2,4	100,0	0,15	E	0
05.04.2012 06:00	0	0			2	276,2	99,0	0,27	2,4	100,0	0,21	E	0
05.04.2012 07:00	0	0			2	276,1	99,0	0,27	2,5	100,0	0,20	A	0
05.04.2012 08:00	0	0			2	276,0	99,0	0,27	2,5	100,0	0,30	A	0
05.04.2012 09:00	0	0			3	275,7	99,0	0,41	3,3	100,0	0,14	A	0
05.04.2012 10:00	0	0			3	276,0	99,0	0,41	4,0	100,0	0,53	A	0
05.04.2012 11:00	0	0			2	276,9	99,0	0,13	3,0	100,0	0,06	E	0
05.04.2012 12:00	0	0			2	277,0	99,0	0,07	1,6	100,0	0,00	E	0
05.04.2012 13:00	0	0			2	277,5	99,0	0,04	0,9	100,0	0,00	E	0

Tabelle 22 zeigt ein Ereignis, bei dem sich laut Bildauswertung über fünf Stunden Eis bildet und anschließend noch während der Nacht wieder abtaut. Dieses Beispiel offenbart einige der bei der Auswertung aufgetretenen Schwierigkeiten: Wie auf den Bildern in Anhang C ersichtlich, war die Bildauswertung stark von der hohen Luftfeuchtigkeit beeinträchtigt, darum wurde eine Bildqualität von 2 bzw. 3 vergeben.

Aufgrund der hohen Temperaturen weist keine der **synoptischen Methoden** RIT aus, das sehr ähnliche Detektieren von RIT durch den **kapazitiven und den Sommer Eissensor** stellt die korrekte Bildauswertung in Frage. Da Vereisung bei 277 K jedoch äußerst unwahrscheinlich ist, und auch in den Tagen zuvor keine Temperaturen < 0°C herrschten (notwendig für freezing rain), ist es für diese beiden Sensoren bei entsprechenden Umgebungsbedingungen ev. schwierig, zwischen Regen und Eis zu unterscheiden. Der **LID-3300 IP** detektiert keine RIT: Entweder weil tatsächlich keine Eis vorhanden war, oder weil die Sensitivität nicht fein genug ist. Unabhängig davon erscheint es ungewöhnlich, dass Vereisung um am 04. 04. um 21:00 Uhr auftritt (276,6 K, 99 % krF), am 05. 04. um 09:00 Uhr (275,7 K, 99 %krF) jedoch nicht. Möglicherweise beeinflussen meteorologische Größen die Vereisung, welche von der Messstation nicht erfasst wurden.



## Vereisungsereignis 3: 18. April 2012, Bilder siehe Anhang D

Tabelle 23: Vereisungsereignis 3, 18. April 2012

Datum_Zeit	Vereisung	Eis	Eis	Eis	BQ	Temp_m	kRF_m	T&krF	Sommer_m	LID 3300_m	Kapaz. S.	ISO 12 494	Krenn
	absolut	[+]	const.	[-]			%rF		%	"_"	mm		
18.04.2012 11:00	0	0			2	273,7	94,2	0,49	0,5	100,0	0,00	B	1
18.04.2012 12:00	0	0			1	274,1	88,0	0,23	0,1	100,0	0,00	E	0
18.04.2012 13:00	0	0			1	272,5	99,5	0,94	0,0	100,0	0,00	B	1
18.04.2012 14:00	0	0			2	272,3	99,7	0,97	0,0	98,1	0,00	A	1
18.04.2012 15:00	50	50			2	272,3	99,7	0,97	0,5	97,0	0,19	B	1
18.04.2012 16:00	50	50			2	271,9	100,1	1,01	1,1	94,6	0,41	A	1
18.04.2012 17:00	100	100			2	271,3	100,6	1,07	2,0	97,4	0,44	A	1
18.04.2012 18:00	100	100			1	270,9	100,9	1,10	2,1	92,9	0,36	A	1
18.04.2012 19:00	150	150			2	270,7	101,1	1,13	1,3	91,6	0,30	A	1
18.04.2012 20:00	150		150		2	271,0	100,8	1,10	1,5	100,0	0,34	A	1
18.04.2012 21:00	150		150		2	271,1	100,7	1,08	1,5	100,0	0,37	A	1
18.04.2012 22:00	150		150		2	270,9	100,9	1,10	1,2	100,0	0,36	A	1
18.04.2012 23:00	100			100	2	271,2	100,3	1,04	1,0	100,0	0,37	A	1
19.04.2012 00:00	100			100	2	271,7	90,0	0,30	1,0	100,0	0,37	C	1
19.04.2012 01:00	100			100	2	271,8	83,8	0,14	0,5	100,0	0,36	E	0

Das in Tabelle 23 dargestellte Ereignis illustriert, wie die **T&krF-Methodik** idealerweise arbeitet:

Die hohe Wahrscheinlichkeit für RIT wird durch einen Sprung des berechneten Wertes von 0,22 auf 0,94 (18. 04. 2012, 12:00 Uhr) ausgewiesen, *bevor* sich Vereisung gebildet hat. Dieser **zeitlicher Versatz** ist für unterschiedliche Steuerungsaufgaben interessant (zB.: Heizungssteuerung von wichtigen Sensoren). Nach Abklingen der „vereisungsfördernden“ Umgebungsbedingungen (=RIT) fällt auch der ermittelte Wert wieder rasch ab (von 1,04 auf 0,3). Werte größer 1 können sich durch ungenaues Messen der relativen Luftfeuchtigkeit und anschließender Umrechnung in die korrigierte relative Luftfeuchtigkeit ergeben (Absatz 5.1.4 und 5.3.2).

Weiters ist ersichtlich, dass der **LID-3300 IP** das *Meteorological Icing* bei diesem Ereignis sehr gut detektieren kann, während der **kapazitive Eissensor** das *Instrumental Icing* gut erfasst. Die Ergebnisse der **Auswertungen nach ISO 12 494 sowie Krenn** gleichen jenem der T&krF-Methodik, jedoch mit den unter 5.3 beschriebenen Abweichungen.



## 6 Auswertung Messstation Großglockner

Das Kapitel beschreibt das Abschätzen der *Relevant Icing Time* des Standortes Großglockner unter Anwendung der manuellen Bildauswertung und der synoptischen Ansätze (ISO 12 494 und Auswertung nach Krenn), sowie einer Anpassung der T&krF-Methodik an die geänderte Seehöhe. Da zum Zeitpunkt der Auswertung noch keine belastbaren Werte des kapazitiven Eissensors vorliegen, wird weiters die Differenz zwischen den gemessenen Windgeschwindigkeiten eines beheizten und eines unbeheizten Anemometers mit in die Auswertung aufgenommen. Neben der Interpretation der Ergebnisse wird auf die Schwierigkeiten der Messstation Großglockner (insbesondere die korrekte Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit) eingegangen.

### 6.1 Aufbereitung der Messdaten

#### 6.1.1 Einschränkung der verwendeten Sensoren, zeitliche Mittelung

##### Thies Ultrasonic 2D compact

Das 2D-Ultraschallanemometer fiel laut Aufzeichnungen der energiewerkstatt am 29.09.2010 aus, somit wurden im relevanten Zeitraum keine Daten gemessen.

##### Kapazitiver Eissensor

Vom Prototypen des kapazitiven Eissensors waren zum Zeitpunkt der Auswertung keine belastbaren Messdaten vorhanden.

##### Zeitliche Mittelung

Da die Kamera der Messstation Großglockner im Abstand von 20 Minuten je eine Aufnahme abspeicherte, während die Messwerte der Sensoren 10-minütlich aufgezeichnet wurden, wurden immer der zeitgleich mit der Kameraaufnahme gemessene Wert sowie jener 10 Minuten davor arithmetisch gemittelt und zur Auswertung herangezogen.

#### 6.1.2 Umrechnung der Temperatur und Korrektur der relativen Feuchtigkeit

Die Umrechnung der Temperatur von °C in Kelvin, sowie die Korrektur der Werte der relativen Feuchtigkeit bei Temperaturen  $< 0$  °C wurden wie bei der Eisstation Faschina durchgeführt, siehe Absätze 5.1.3 und 5.1.4.

### 6.1.3 Wolkenuntergrenze/Cloud-Base-Height

Da die errechneten Werte der Wolkenuntergrenze, wie in Absatz 5.1.5 beschrieben, als nicht exakt genug erachtet wurden, wurden sie bei jener der Messstation Großglockner nicht mehr ermittelt.

### 6.1.4 Bildauswertung

Die Auswertung des Bildmaterials erfolgte nach der auf der Faschina angewandten manuellen Methode (Absatz 5.1.6). Es wurden wieder sieben Kategorien zur Bewertung des Eisstärke gewählt: Beginnend bei 0 (keine Vereisung), anschließend mit einer Schrittweite von 50 Punkten bis zum Wert 300 (komplette Vereisung).

Folgende Stellen standen bei der Bewertung im Fokus (siehe Abbildung 58):

- ✳ Die beheizten Rotorblätter des NRG Ice Free 3 Anemometers (lila),
- ✳ die unbeheizten Schalen des Thies Classic Anemometers (orange),
- ✳ die Oberfläche des kapazitiven Eissensors (gelb) - dieser ist bei Nachtaufnahmen aufgrund des abweichenden Winkels der Infrarotkamera wesentlich besser zu erkennen als bei Tagaufnahmen (siehe auch Abbildung 64),
- ✳ sämtliche Ausleger der Station (blau),
- ✳ Ausschnitte der Umgebung der Messstation (rot), da hier teilweise Schneezuwachs erkannt werden kann, der bei den anderen Stellen nicht ersichtlich ist.

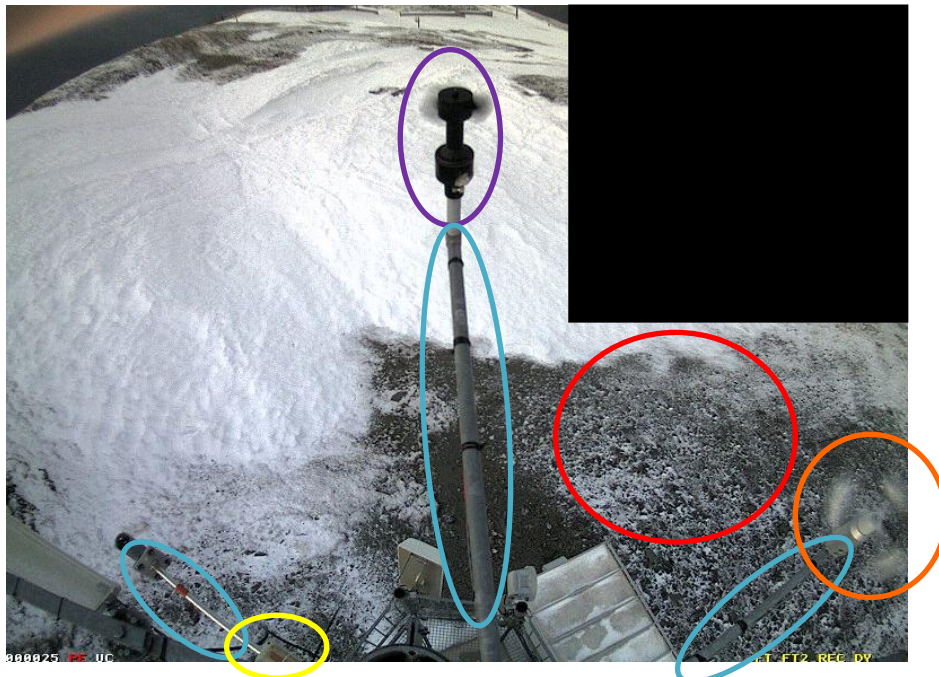


Abbildung 58: Aufnahme der Kamera des Standortes Großglockner, 26. 04. 2011, 05:42 Uhr

Wie auf der Faschina wurde auch bei der Messstation Großglockner das aktuell betrachtete Bild mit jenem des vorigen Abschnitts verglichen, um so neben der Eismenge auch eine Aussage über die Entwicklung der Vereisung (Zunahme, konstante Eismenge, Abnahme) zu erhalten. Auch die Einteilung der Bildqualität in drei Zuverlässigkeitsklassen wurde angewandt.

## **6.2 Auswertung**

### **6.2.1 Anemometervergleich**

Andreas Krenn vom Verein energiewerkstatt nannte auf Nachfrage eine Differenz von  $\pm 0,5 \text{ m/s}$  zwischen beheiztem und unbeheiztem Anemometer als starken Indikator für Vereisung. Kleinere Werte können aufgrund der Messfehler unterschiedlicher Anemometer entstehen und deuten nicht zwingend auf vereiste Schalensterne/Rotorblätter hin. Jedoch ist diese Festlegung zumindest teilweise standortabhängig: Bei der Evaluierung des Vereisungspotenzials eines weiteren Standortes im Großraum Salzburg wurde vom Verein energiewerkstatt eine Differenz von  $\pm 2 \text{ m/s}$  als Vereisungskriterium herangezogen. (Krenn, 2012c)

Für die hier durchgeführte Auswertung wurde jedoch der Empfehlung von  $\pm 0,5 \text{ m/s}$  Differenz zwischen den gemessenen Windgeschwindigkeiten der beiden Anemometer entsprochen.

### **6.2.2 Auswertung nach ISO 12 494 und nach Krenn**

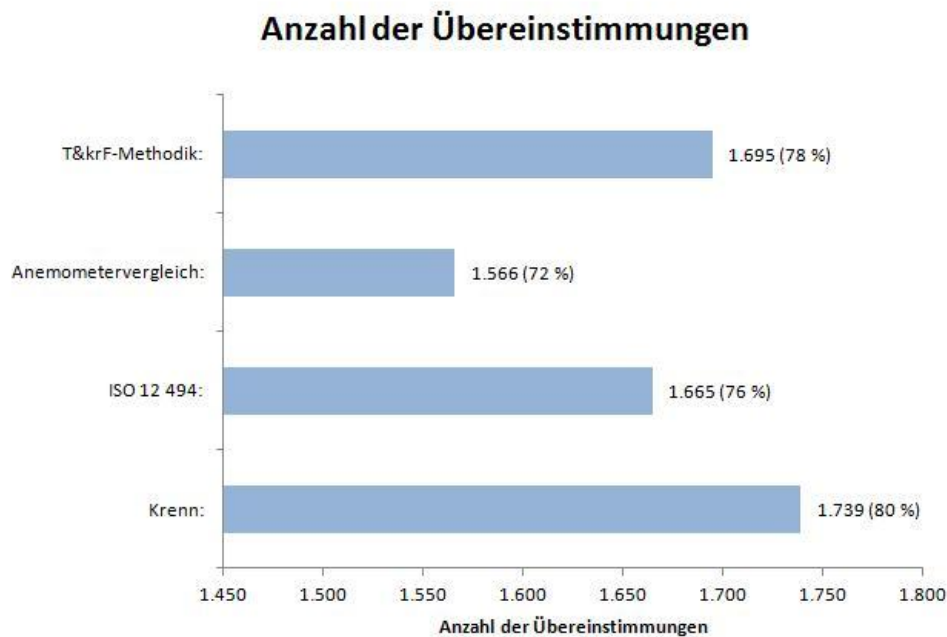
Die Methodik und die Schwellwerte zur Ermittlung der RIT gemäß ISO 12 494 und synoptischen Ansatzes nach Andreas Krenn wurden von der Auswertung der Eisstation Faschina übernommen (siehe Absätze 5.2.3 und 5.2.4).

### **6.2.3 T&krF-Methodik**

Die Abschätzung der RIT mit der T&krF-Methodik erfolgte ebenfalls entsprechend der Auswertung auf der Faschina (Absatz 5.2.5).

### **6.2.4 Ergebnisse inkl. nicht adaptierter T&krF-Methodik**

Eine erste Auswertung ergab folgende Anzahl an Übereinstimmungen zwischen Bildauswertung und jeweiliger Detektionsmethode (siehe Abbildung 59). Die Anzahl bezieht sich dabei auf die Anzahl der Messpunkte, ein Messpunkt repräsentiert, wie in 6.1.1 erwähnt, 20 Minuten.



**Abbildung 59: Anzahl der Übereinstimmungen, Standort Großglockner. 1 Übereinstimmung = 20 min Messzeitraum**

Die T&krF-Methodik erreicht in dieser Auswertung 78 % Übereinstimmung mit der Bildauswertung. Dies bedeutet eine zuverlässigere Detektion der RIT als es der Anemometervergleich oder die Detektion mittels ISO 12 494 zulassen. Einzig die synoptische Methode nach Krenn erreicht mit 80 % Übereinstimmung einen höheren Wert. Eine detaillierte Interpretation der Ergebnisse der endgültigen Auswertung ist in Absatz 6.3 ersichtlich.

Bei der Auswertung der Bilder sowie der aufgezeichneten Werte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit stellte sich heraus, dass im Auswertezeitraum auch bei Temperaturen < 267 K noch häufig Vereisung auftrat. Als Gründe dafür wurden ermittelt:

- ✧ Abweichende klimatische Einflüsse und Bedingungen (Vorarlberg/Kärnten)
- ✧ Unterschiedliche lokale Topographie (Geländeform, Bewuchs etc.)
- ✧ Große Höhendifferenz (900 m)
- ✧ Höhere Windgeschwindigkeiten

Eine exakte Eingrenzung der Ursachen ist schwierig, zur eindeutigen Identifikation würde es vor allem mehrerer Standorte in unterschiedlichen Gebieten und auf unterschiedlichen Seehöhen bedürfen.

Um diesen geänderten Umgebungsbedingungen Rechnung zu tragen, wurde eine Anpassung der T&krF-Methodik an den Standort Großglockner versucht.



## 6.2.5 Anpassung der T&krF-Methodik an den Standort Großglockner

### 6.2.5.1 $B_{RIT,T}$ Großglockner

Folgende Anpassung von  $B_{RIT,T}$  an die geänderten Umgebungsbedingungen wurde durchgeführt (siehe Abbildung 60):

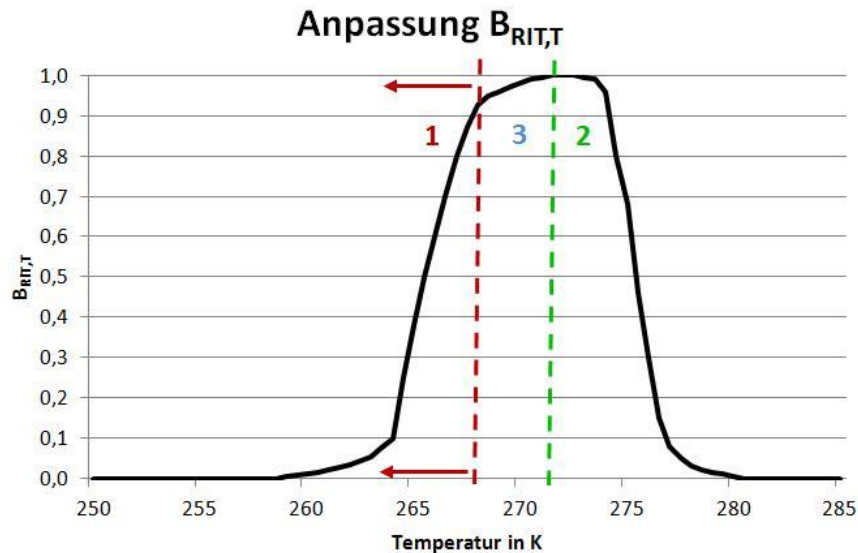


Abbildung 60: Anpassung von  $B_{RIT,T}$  Faschina an die geänderte Seehöhe

1. Da wie erwähnt auch bei Temperaturen  $< 267$  K noch häufig Vereisung auf den Bildern erkennbar war, wurde - ausgehend von  $B_{RIT,T}$  Faschina - jener Temperaturbereich, dem hohe Vereisungswahrscheinlichkeit zugeordnet ist, zu tieferen Temperaturen hin erweitert. Dabei wurde die Gestalt der Kurve unterhalb von  $267,5$  K (Wahrscheinlichkeit  $P_{RIT}(267,5) = 0,87$ ) um einen linear von der Höhendifferenz der Standorte abhängigen Wert  $X$  nach links verschoben (rote Markierung).
2. Bei Temperaturen  $> 271,5$  K (grüne Markierung) blieb die Kurve unverändert, da kein abweichendes Vereisungsverhalten in diesem Temperaturbereich festgestellt werden konnte.
3. Für den Bereich zwischen den oben beschriebenen Kurventeilen (Teil 3, blau) wurden die Wahrscheinlichkeitswerte anschließend durch eine lineare Funktion errechnet.

### 6.2.5.2 $B_{RIT,krF}$ Großglockner

Bei der Durchsicht der aufgezeichneten Daten stellten sich Unregelmäßigkeiten in Zusammenhang mit der Messung der relativen Feuchtigkeit heraus: Sehr häufig wurden Werte  $> 100$  % relative Feuchtigkeit aufgezeichnet. Das Maximum stellte dabei der Wert  $108$  % rF dar, welcher bei insgesamt 1.612 Datensätzen zwischen 1. April und 25. Juli 2011 gemessen wurde. Dies entspricht bei 10-minütiger Aufzeichnung einer Dauer von knapp 270 Stunden, also mehr als elf Tagen. Das Datenblatt des Sensors (siehe Anhang E) gibt folgende Messgenauigkeit und Zusatzfehler bei der Feuchtemessung an:

**Tabelle 24: Messgenauigkeit und Zusatzfehler Hygro/Thermosensor P 6312**

Messgenauigkeit :	5...95 % rF bei 10...40°C, +/- 2 % rF
Zusatzfehler:	< 0,1 %/K (< 10 °C, > 40 °C)

Somit sollte bei Umgebungstemperaturen > -10 °C keine Abweichung > 4 % rF möglich sein.

Aus diesem Grund wurden die gemessenen Werte der relativen Feuchtigkeit nochmals gesondert auf deren Plausibilität überprüft, wobei mehrmals Unstimmigkeiten auftraten. Beispielsweise wurden am 16. April 2011 um 18:20 Uhr eine Temperatur von 266,5 K und eine relative Feuchtigkeit von 100 % gemessen (dies ergibt nach Anpassung auf den Sättigungsdampfdruck über Eis eine korrigierte relative Feuchte von 106 %). Das Kamerabild belegt jedoch, dass zu diesem Zeitpunkt die Sonne schien und gute Sicht herrschte, also ein derart hoher Wert der relativen Feuchtigkeit ausgeschlossen werden kann. Ebenso verhielt es sich auch am 27. April 2011 um 16:00 Uhr (siehe Abbildung 61 und Abbildung 62):



**Abbildung 61: Aufnahme vom 16. April 2011, 18:20 Uhr. Gemessene Werte: T = 266,5 K, kRF = 106 %**



**Abbildung 62: Aufnahme vom 27. April 2011, 16:00 Uhr. Gemessene Werte: T = 270,5 K, kRF = 104 %**

Als mögliche Ursache für die offensichtlich unzuverlässige Messung der relativen Feuchtigkeit (und somit wahrscheinlich auch der Temperatur) wurde die Montagesituation erkannt: Da der Hygro/Thermosensor in ca. 2 m Höhe am Mast montiert wurde, war er mindestens einmal von Schnee und Eis eingehüllt (siehe Abbildung 63). Somit wurden die Messdaten stark von der Messanordnung beeinflusst, **die Zuverlässigkeit der aufgezeichneten Werte ist unzureichend.**



Abbildung 63: Hygro/Thermosensor der Messstation Großglockner (rote Markierung), (Lachinger, 2011)

### 6.2.5.3 Sensitivitätsanalyse zur Abhängigkeit von der Seehöhe

$B_{RIT,T}$  Großglockner sowie der Schwellwert  $SW_{TkrF}$  zur Unterscheidung der Zustände „RIT ja“ und „RIT nein“ wurden einer höhenabhängigen Sensitivitätsanalyse unterzogen:  $X$  wurde wie 6.2.5.1 erläutert zur Berechnung von  $B_{RIT,T}$  Großglockner angewendet,  $B_{RIT,krF}$  entsprechend der Auswertung auf der Faschina (Absatz 5.2.5.2).  $Y$  entspricht einer Erhöhung/Senkung von  $SW_{TkrF}$  um den angegebenen Wert/100 m Höhendifferenz zwischen den Standorten der Messungen. Die Ergebnisse in Tabelle 25 repräsentieren die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen Bildauswertung und T&krF-Methodik, sowie deren prozentuellen Anteil. Eine Übereinstimmung entspricht einer Zeitdauer von 20 min.

Tabelle 25: Sensitivitätsanalyse T&krF-Methodik – Anzahl der Übereinstimmungen, Messstation Großglockner

	$X = 0$	$X = - 0,5 \text{ K}/100 \text{ m}$	$X = - 1 \text{ K}/100 \text{ m}$
$Y = + 0,02 / 100 \text{ m}$	1.672 / 76 %	1.726 / 79 %	1.764 / 81 %
$Y = + 0,01 / 100 \text{ m}$	1.693 / 77 %	1.784 / 82 %	1.802 / 82 %
$Y = 0$	1.695 / 78 %	1.778 / 81 %	1.781 / 81 %
$Y = - 0,01 / 100 \text{ m}$	1.707 / 78 %	1.760 / 81 %	1.757 / 80 %
$Y = - 0,02 / 100 \text{ m}$	1.714 / 78 %	1.750 / 80 %	1.748 / 80 %
$Y = - 0,03 / 100 \text{ m}$	1.692 / 77 %	1.732 / 79 %	1.732 / 79 %

Tabelle 25 zeigt, dass die höchste Übereinstimmung bei einer Adaptierung von  $B_{RIT,T}$  um  $X = -1$  K/100 m Höhendifferenz, sowie einer Erhöhung von  $SW_{TkrF}$  um 0,01/100 m Höhendifferenz erreicht wurde. Es ist ersichtlich, dass die Anzahl der erzielten Übereinstimmungen zwischen  $X = 0$  und  $X = -0,5$  stärker abweicht als zwischen  $X = -0,5$  und  $X = -1$ , für die beiden letzteren Werte werden nahezu die selben Ergebnisse erzielt. Dies liegt an der korrekten Detektion der Vereisungsstunden bei tiefen Temperaturen. Der Einfluss von  $Y$  ist vom gewählten  $X$  abhängig: Während für  $X = 0$  die meisten Übereinstimmungen bei  $Y = -0,03$  erzielt werden, führt bei  $X = -0,5$  und  $X = -1$  ein Wert von  $Y = +0,01$  zum besten Resultat. Prozentuell betrachtet ist der Einfluss von  $Y$  jedoch gering.

Da  $SW_{TkrF}$  in der betrachteten Analyse zwischen 0,47 ( $Y = -0,03$ ) und 0,92 ( $Y = +0,02$ ) schwankt (- 36 % bzw. + 24 % ausgehend vom Schwellwert der Faschina 0,74), die Ergebnisse jedoch um nur um max.  $\pm 2$  %, kann die Methodik als stabil bezeichnet werden: Es treten wenige Grenzfälle auf, deren Einteilung als „RIT ja“ bzw. „RIT nein“ sich abhängig von  $SW_{TkrF}$  ändern (siehe Tabelle 25). Die exakten Wertepaare für die so bestimmte Kurve  $B_{RIT,T}$  Großglockner können dem Anhang F entnommen werden.

## 6.2.6 Unsicherheiten

Bei der Auswertung der Daten und Bilder der Messstation Großglockner wurden, unabhängig vom Problem des vereisten Hygro/Thermosensors, die selben Schwierigkeiten wie bei jener der Eisstation Faschina festgestellt (siehe Absatz 5.3.5). Vor allem ein Phänomen erhöhte die Unsicherheit der Auswertung jedoch erheblich:

Bei der Messstation am Großglockner traten häufig (vor allem bei Temperaturen  $< 270$  K) sehr leichte Vereisungsereignisse (50 Punkte) auf. Diese konnte bei Nachtaufnahmen verhältnismäßig gut erkannt werden, da sich bereits bei geringer Eisbildung eine stärkere Reflexion des Infrarotscheinwerfers auf den Auslegern der Messstation feststellen ließ. Es stellte sich jedoch heraus, dass das Verschwinden dieses dünnen Eisfilms sehr häufig gleichzeitig mit der Umstellung von der Infrarot- auf die normale Kamera auftrat, obwohl sich die Wetterbedingungen nicht auffällig veränderten (siehe Abbildung 64). Dies legt die Vermutung nahe, dass sehr geringe Eismengen auf den Auslegern mit den Tagaufnahmen nicht festgestellt werden können und somit ein nicht unerheblicher Teil der Bilder möglicherweise falsch bewertet wurde. Dies würde zu falschen Schlüssen bei der Auswertung führen.



**Abbildung 64:** Aufnahmen des 05.05.2011 um 05:02 Uhr (links) und 05:22 Uhr (rechts): Während die starke Reflexion am mittleren Ausleger des linken Bildes ein Indiz für Vereisung ist, kann aufgrund des geänderten Aufnahmemodus rechts kein Eis festgestellt werden.

### 6.3 Ergebnisse

Wie in Abbildung 65 ersichtlich, erreicht die (adaptierte) T&krF-Methodik mit 381 berechneten Stunden der *Relevant Icing Time* trotz einer Abweichung von 52 Stunden im Vergleich zur Bildauswertung das beste Ergebnis. Die Auswertung mittels Anemometervergleich zeigt eine Abweichung der selben Größenordnung (57 Stunden), jedoch *unterschätzt* diese Methode die *RIT* – was, wie in Absatz 5.3.5 beschrieben, bei einer Standortevaluierung im schlimmsten Fall zu einer falschen Investitionsentscheidung führen kann. Wie schon bei der Auswertung der Ergebnisse der Vereisungsmessstation Faschina gesehen, überschätzen die Methoden nach ISO 12 494 und Krenn die *RIT*.

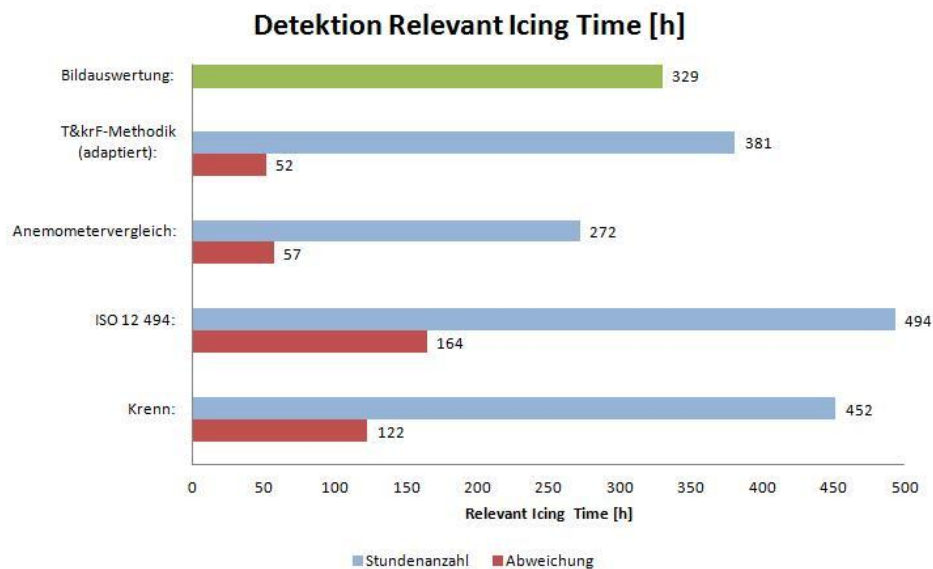


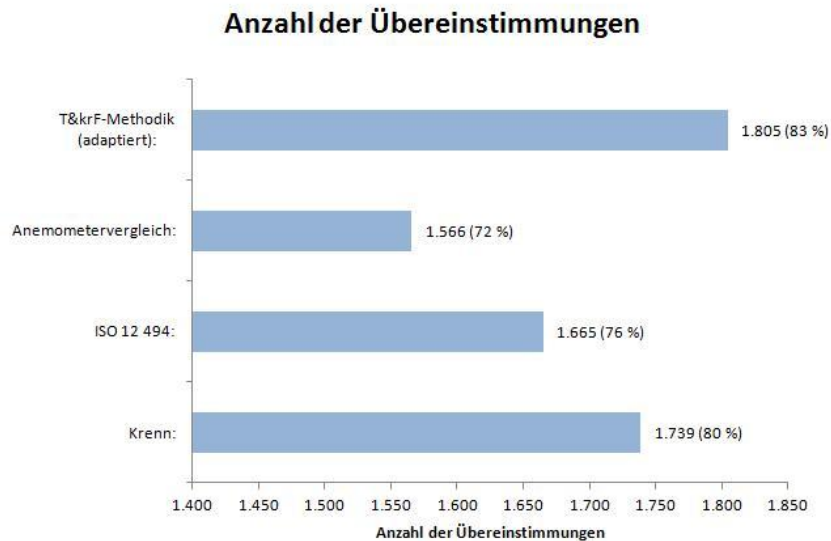
Abbildung 65: Detektion *RIT* Großglockner

Betrachtet man die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen Bildauswertung und jeweiliger Detektionsmethode in Abbildung 66 (*RIT* als *RIT* erkannt, sowie „keine *RIT*“ als „keine *RIT*“ erkannt), so fällt der Anemometervergleich hinter die synoptischen Methoden zurück. Grund dafür ist, wie in Tabelle 26 ersichtlich, dass der Anemometervergleich sowohl oftmals *RIT* detektiert, wenn bei der Bildauswertung keine zu erkennen ist als auch vice versa.

Die anderen Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse der Faschina-Auswertung: Die synoptischen Methoden nach ISO 12 494 und Krenn detektieren generell zu häufig *RIT*, da sie schon vor dem Beginn eines Vereisungsereignisses und auch noch bei abnehmender Eismenge *RIT* detektieren.

Tabelle 26: Mögliche Zustände und ihre Häufigkeit (Bildauswertung : Detektionsmethode)

	<i>RIT</i> : <i>RIT</i>	keine <i>RIT</i> : keine <i>RIT</i>	<i>RIT</i> : keine <i>RIT</i>	keine <i>RIT</i> : <i>RIT</i>
T&krF-Methodik:	875	930	113	268
Anemometervergleich:	592	974	396	224
ISO 12 494:	974	691	14	507
Krenn:	948	691	40	407



**Abbildung 66: Anzahl der Übereinstimmungen zwischen Bildauswertung und Detektionsmethode, 1 Übereinstimmung entspricht 20 min**

## 6.4 Erkenntnisse

Die ausgewerteten Daten zeigen, dass die Adaption der T&krF-Methodik eine bessere Abschätzung über die Dauer der *Relevant Icing Time* erreicht, als dies durch einen Anemometervergleich oder herkömmliche synoptische Ansätze bisher möglich war: Wählte man  $X$  und  $Y$  jeweils mit 0, so wäre mit 1.695 korrekten Übereinstimmungen zwischen Methodik und Bildauswertung noch immer ein besserer Wert als bei der Auswertung mittels Anemometervergleich oder nach ISO 12 494 erzielt worden. Eine Adaption der T&krF-Methodik für unterschiedlich hoch gelegene Standorte scheint möglich, dazu sind jedoch zuverlässige Messungen an mehreren Standorten und deren Auswertung unerlässlich.

Aufgrund der aufgetretenen Unregelmäßigkeiten bei der Messung der relativen Feuchte und der hohen Wahrscheinlichkeit einer damit einhergehenden verfälschten Messung der Temperatur, sowie der Schwierigkeiten bei der Bildauswertung ist die Beurteilung der einzelnen Detektionsmethoden mit großer Unsicherheit behaftet. Eine Weiterentwicklung der T&krF-Methodik mit den vorliegenden Daten ist möglich, eine belastbare Aussage über die tatsächliche Vereisungsdauer vor Ort kann jedoch nicht getätigt werden.

## 7 Vereisungsmessstation Windsfeld

Das Kapitel behandelt die Vereisungsmessstation Windsfeld, welche im Herbst 2012 installiert wurde: Es beschreibt die verwendeten Sensoren, erklärt welche Methoden zur Speicherung und Datenübertragung angewandt wurden und zeigt erste Kameraaufnahmen vom Standort. Den Abschluss bildet die Beschreibung eines exemplarischen Vereisungsereignisses im November 2012 sowie ein Resümee über die in dieser Arbeit entwickelte Auswertemethodik zur Abschätzung der *Relevant Icing Time*.

### 7.1 Beschreibung

Wie unter Absatz 1.4 beschrieben, befindet sich das Windsfeld im Gemeindegebiet Flachau (Salzburg) auf 2.100 m Seehöhe. Hier wurde am 28. August 2012 die Vereisungsmessstation Windsfeld errichtet, die die Erkenntnisse der vorangegangenen Auswertungen (Standorte Faschina und Großglockner) berücksichtigt. Die Messanordnung konnte auf der Spitze eines 10 m hohen Stahlmasts einer ehemaligen Stromleitung montiert werden, die Spannungsversorgung wurde durch die bestehende Leitung ermöglicht (siehe Abbildung 67).



Abbildung 67: Vereisungsmessstation Windsfeld

## 7.1.1 Verwendete Sensoren und gemessene Größen

Folgende Sensoren wurden installiert um die entsprechenden Größen zu messen. Sämtliche Daten, ausgenommen kapazitiver Eissensor und OTT Parsivel<sup>2</sup>, werden auf einem Datalogger der Fa. Sommer gespeichert.

**Tabelle 27: Sensoren und Messgrößen, Vereisungsmessstation Windsfeld**

Bezeichnung:	Gemessene Größe:	Einheit:
Luftfeuchte- und Temperatursensor Rotronic Hygroclip2 HC2-S3	Lufttemperatur	[°C]
	Luftfeuchte	[%rF]
Sommer Stabsensor 1	Temperatur Eissensor 1	[°C]
	Heizung Eissensor 1	[0/1]
	Sensor 1 schmal Eis	[%]
	Sensor 1 schmal Wasser	[%]
	Sensor 1 breit Eis	[%]
	Sensor 1 breit Wasser	[%]
	Sensor 1 schmal c1	[pf]
	Sensor 1 schmal c2	[pf]
	Sensor 1 schmal Phase 1	[-]
	Sensor 1 schmal Phase 2	[-]
	Sensor 1 breit c1	[pf]
	Sensor 1 breit c2	[pf]
	Sensor 1 breit Phase 1	[-]
	Sensor 1 breit Phase 2	[-]
Sommer Flächensensor	Sensor Fläche Eis	[%]
	Sensor Fläche Wasser	[%]
	Sensor Fläche c1	[pf]
	Sensor Fläche c2	[pf]
	Sensor Fläche Phase 1	[-]
	Sensor Fläche Phase 2	[-]
Labko LID-3300 IP	Temperatur LID 3300-IP	[°C]
	Umgebungstemperatur LID 3300-IP	[°C]
	Vereisung LID 3300-IP	[-]
Kapazitiver Eissensor	Äquiv. Schichtdicke Klareis	[cm]
	Qualität der Messung	[%]
	Aktivität	[ja/nein]
Young Anemometer (unbeheizt)	Windgeschwindigkeit_MW	[m/s]
	Windrichtung_MW	[Grad]
	Windgeschwindigkeit_MAX	[m/s]
	Windrichtung_MAX	[Grad]
Thies Ultrasonic 2D Anemometer (beheizt)	Windgeschwindigkeit_MW	[m/s]
	Windrichtung_MW	[Grad]
Mobotix Kamera	Bilder	
Ott Parsivel <sup>2</sup>	Niederschlagsqualität	[-]
	Niederschlagsmenge	[mm]



## 7.1.2 Datenübertragung und –sicherung

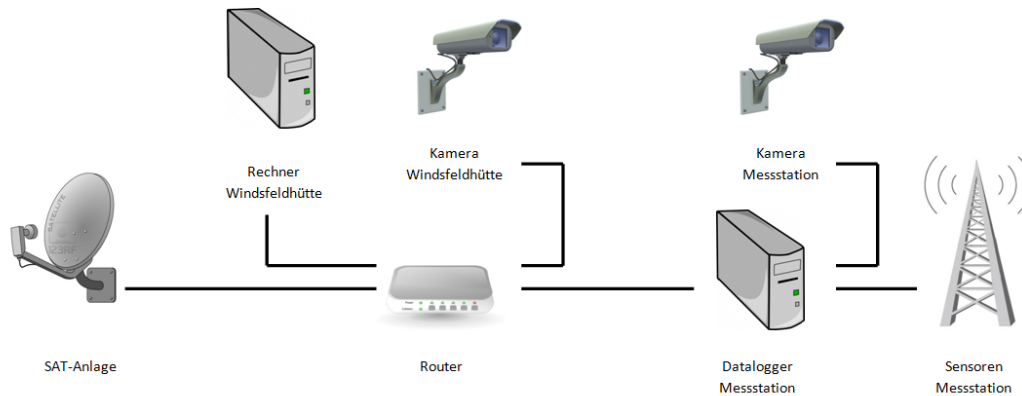
Von den Windmessungen der Jahre 2006-2008 war bekannt, dass am Windsfeld nur schlechte GSM-Netzabdeckung zur Verfügung steht. Dennoch wurde versucht, über Richtantennen eine ausreichende Signalstärke zu gewährleisten, was bei ersten Prüfungen auch gelang. Nach der Installation der Vereisungsmessstation stellte sich das Signal jedoch als zu schwach heraus, um einerseits die Übertragung größerer Datenmengen (Bilder) zu gewährleisten und andererseits auch eine zuverlässige Verbindung bei schlechten Witterungsverhältnissen zu garantieren. Versuche, mit anderen Antennentypen besseren Empfang zu erreichen, waren nicht erfolgreich.

Aus diesem Grund wurde am 25. Oktober 2012 eine bidirektionale SAT-Verbindung auf der Hütte neben der Messstation installiert, die unabhängig vom GSM-Netz und auch bei schlechten Witterungsverhältnissen eine zuverlässige Datenübertragung ermöglichen soll (siehe Abbildung 68).



Abbildung 68: SAT-Anlage auf der Windsfeldhütte

In der Hütte wurde ein Rechner installiert, der neben der Überwachung der SAT-Anlage gleichzeitig als Back-up für die Messdaten dient. Zusätzlich wurde auf der windgeschützten Wand der Hütte eine weitere Kamera montiert, die Bilder der Messstation aus ca. 30 m Entfernung aufnimmt. Somit bedeutet die neue Anlage nicht nur einen Fortschritt bezüglich der Datenübertragung, sondern bietet auch eine redundante Speicherung der aufgezeichneten Daten (Datalogger UND Rechner) und zusätzliche Informationen über die Lage vor Ort.



**Abbildung 69: Systemaufbau Messstation Windsfeld**

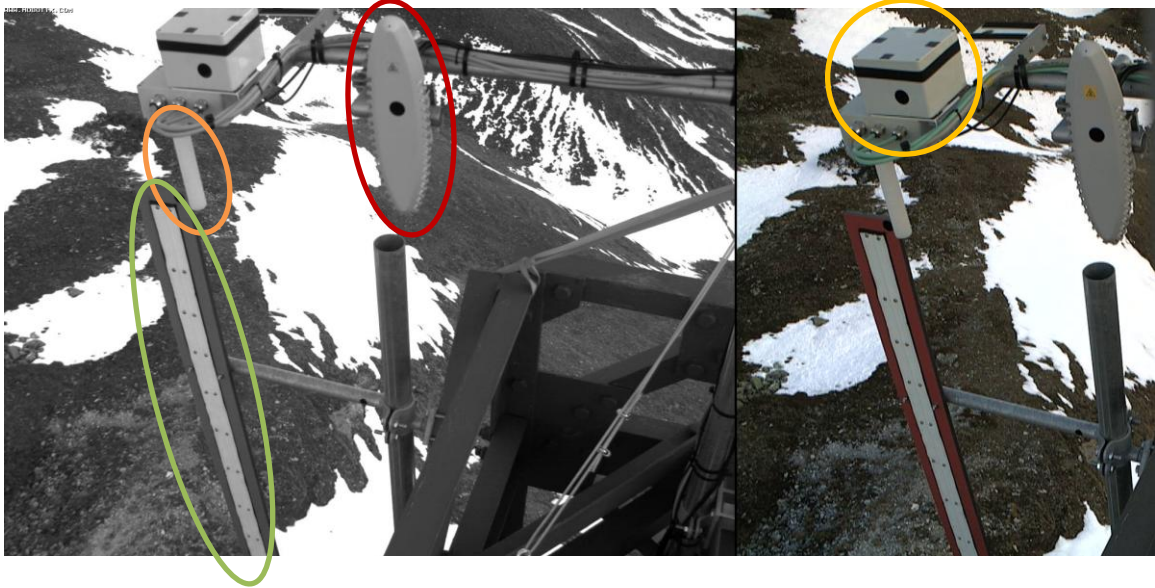
Der in Abbildung 69 dargestellte Systemaufbau zeigt den Datenfluss sämtlicher Messgeräte, ausgenommen den kapazitiven Eissensor und das OTT Parsivel<sup>2</sup> Distrometer: Während der kapazitive Eissensor ohne Datalogger direkt von der Vereisungsmessstation drahtlos zum Rechner in der Windsfeldhütte überträgt, werden die Werte des OTT Parsivel<sup>2</sup> Distrometers auf einen eigenen Datalogger gespeichert, da am Haupt- Datalogger kein Eingang mehr verfügbar war. Die Werte des Distrometers können aus diesem Grund erst am Ende des Winters ausgewertet werden, wenn die Station wieder leicht zugänglich ist.

## 7.2 Kameraaufnahmen

Bei der Ausrichtung der Kamera wurde darauf geachtet, dass sowohl die Tag-, als auch die Nachtaufnahmen alle wichtigen Sensoroberflächen abbilden. Auf der Deckfläche des kapazitiven Eissensors sowie an anderen Sensoren wurden Markierungen zur Erleichterung der automatisierten Bildauswertung aufgebracht. Folgende Sensoren sind am Kamerabild ersichtlich (Abbildung 70):

- ✧ Kapazitiver Eissensor (gelbe Markierung)
- ✧ Sommer Stabsensor (orange Markierung)
- ✧ Sommer Flächensensor (grüne Markierung)
- ✧ Labkotec LID-3300 IP (rote Markierung)

Aufgrund der sensiblen Einstellung des Infrarotscheinwerfers (Überbelichtung) sind die Nachtaufnahmen bis zum 15. November 2012 zwar verfügbar, jedoch nicht für eine Auswertung geeignet. Weiters wurde die Halterung der Kamera am Masten am 31. 10. 2012 durch starken Wind verdreht und zeigte anschließend nicht mehr den gewünschten Bildausschnitt. Beide Mängel wurden am 15. November 2012 behoben.



**Abbildung 70: Aufnahme der Vereisungsmesstation Windsfeld vom 26. 11.2012, 15:00 Uhr, links: Bild der Infrarotkamera, rechts: Tagaufnahme**

Abbildung 71 zeigt eine Aufnahme der auf der Wand der Windsfeldhütte montierten Kamera bei Schönwetter: Links im Bild ist die Vereisungsmesstation ersichtlich, oben mittig der (vereiste) TRIA der SAT-Anlage, der die Signale umwandelt und so die Datenübertragung vom und zum Satelliten ermöglicht.



**Abbildung 71: Aufnahme der auf der Windsfeldhütte montierten Kamera, 03.11.2012, 07:30 Uhr**

## 7.3 Gewählte Parameter der Methoden zur RIT-Detektion

Für die Auswertung des Vereisungsereignisses vom 20. November 2012, 22:00 Uhr bis zum 21. November 2012, 17:00 Uhr wurden für die einzelnen Sensoren/Detektionsmethoden folgende Parameter gewählt:

### 7.3.1 T&krF-Methodik

Die Parameter der T&krF-Methodik wurden entsprechend der in Absatz 6.2.5 ermittelten Abhängigkeit von der Seehöhe angepasst. Für eine Höhendifferenz von 400 m ergeben sich bei  $X = -1 \text{ K}/100 \text{ m}$  die in Anhang G angeführten Werte der Kurve  $B_{RIT,T} \text{ Windsfeld}$ .  $B_{RIT,krF}$  wurde wie am Großglockner als von der Seehöhe unabhängig angenommen, der Schwellwert  $SW_{TkrF}$  zur Detektion der RIT wurde jedoch wiederum entsprechend Absatz 6.2.5 angepasst ( $+0,01 \text{ K}/100 \text{ m}$  Höhendifferenz): Dies ergibt  $SW_{TkrF} = 0,78$ .

### 7.3.2 Sommer-Eissensor

Es wurde wiederum der Stabsensor 1 mit der breiten Wicklung für die Auswertung verwendet, da von den Verbesserungen der anderen Sommer-Eissensoren noch keine Erfahrungswerte vorliegen. Der Schwellwert zur RIT-Detektion  $SW_{Sommer}$  wurde wie bei der Messstation Faschina mit 1,04 gewählt.

### 7.3.3 LID-3300 IP

Vom LID-3300 IP lagen im betrachteten Zeitraum keine Messwerte vor. Der Grund dafür ist nicht bekannt, bei der Inbetriebnahme der Vereisungsmessstation war das Gerät funktionsfähig.

### 7.3.4 Kapazitiver Eissensor

Für den Kapazitiven Eissensor wurde wie in Absatz 5.3.4 erwähnt ein Schwellwert  $SW_{kap}$  zur Detektion der RIT gewählt.

### 7.3.5 Anemometervergleich

Zur Detektion der RIT aus dem Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeiten des unbeheizten Propelleranemometers (Young) und des beheizten 2-D Ultraschallanemometers (Thies) wurde wieder eine Differenz von  $\pm 0,5 \text{ m/s}$  als Schwellwert  $SW_{Anemometer}$  verwendet.

### 7.3.6 Auswertung nach Krenn und nach ISO 12 494

Die synoptischen Auswertemethoden nach Krenn und nach ISO 12 494 erfolgten wie in Absatz 5.2.3 und Absatz 5.2.4 beschrieben. Zur Anwendung der ISO 12 494 wurde die Windgeschwindigkeit des 2-D Ultraschallanemometers verwendet.

## 7.4 Vereisungsereignis: 20./21. November 2012, Bilder siehe Anhang H

Tabelle 28: Beginn Vereisungsereignis, 20./21. November 2012

Datum/Uhrzeit	Vereisung Gesamt	Vereisung Zunahme	Vereisung konstant	Vereisung Abnahme	BQ	Temp K	Temp_b -	krF %rF	krF_b -	T&krF	Sommer Eissensor	Kapazitiver Eissensor	DIFF 1_2 m/s	Einteilung Krenn	Eiseinteilung ISO 12494
20.11.2012 22:00	0	0			1	271,3	1,00	0,83	0,14	0,14	1,7	0,3	0,04	0	E
20.11.2012 22:20	0	0			1	271,0	0,99	0,87	0,20	0,20	1,7	0,3	-0,39	0	E
20.11.2012 22:40	0	0			1	271,8	1,00	0,84	0,14	0,14	1,7	0,1	-0,33	0	E
20.11.2012 23:00	0	0			1	269,9	0,98	0,95	0,58	0,57	1,7	0,1	-0,3	1	A
20.11.2012 23:20	50	50			1	269,8	0,98	0,98	0,77	0,75	1,7	0,2	-0,89	1	A
20.11.2012 23:40	50	50			1	268,1	0,96	1,03	1,00	0,96	2,1	0,5	-0,29	1	A
21.11.2012 00:00	100	100			1	268,1	0,96	1,03	1,00	0,96	2,4	0,5	-0,34	1	A
21.11.2012 00:20	50			50	1	268,2	0,96	1,03	1,00	0,96	2,7	0,7	-0,39	1	A
21.11.2012 00:40	100	100			1	268,4	0,96	1,03	1,00	0,96	3,1	4,4	-1,59	1	A
21.11.2012 01:00	150	150			2	268,6	0,96	1,03	1,00	0,96	3,8	7,4	-0,47	1	A
21.11.2012 01:20	150	150			2	268,5	0,96	1,03	1,00	0,96	4,2	10,3	-0,86	1	A
21.11.2012 01:40	150	150			2	268,5	0,96	1,02	1,00	0,96	4,2	9,4	-0,5	1	A
21.11.2012 02:00	150		150		3	268,7	0,96	1,02	1,00	0,96	4,5	9,5	-0,62	1	A
21.11.2012 02:20	150		150		3	268,7	0,96	1,02	1,00	0,96	4,8	10	-0,8	1	A
21.11.2012 02:40	150		150		3	268,8	0,96	1,01	1,00	0,96	4,7	10,5	-1,01	1	A
21.11.2012 03:00	150		150		3	268,8	0,96	1,01	1,00	0,96	4,7	2,3	-0,5	1	A
21.11.2012 03:20	150		150		3	268,7	0,96	1,01	1,00	0,96	4,7	1,2	-0,75	1	A

Tabelle 28 zeigt den Beginn des Vereisungsereignisses, sämtliche färbig hinterlegten Zellen markieren detektierte *RIT*. Die Bildqualität am Beginn und am Ende des Vereisungsereignisses ist sehr gut (Klasse 1), dazwischen ist die Linse der Kamera teilweise stark beschlagen. Somit kann zwischen 02:00 Uhr und 04:40 Uhr keine absolut zuverlässige Aussage über die Eismenge getätigt werden, das Vorhandensein von Eis ist durch die Aussage „*RIT*“ aller Detektionsmethoden jedoch sehr wahrscheinlich.

Man kann erkennen, dass die **T&krF-Methodik** den Beginn der Vereisung sehr genau anzeigt, während der **Sommer-Eissensor** zu früh *RIT* detektiert. Jedoch ist ersichtlich, dass der Messwert mit zunehmender Eismenge ebenfalls steigt, somit ist  $SW_{\text{Sommer}}$  möglicherweise zu niedrig gewählt. Eine Analyse zur Anpassung von  $SW_{\text{Sommer}}$  kann jedoch erst mit einer größeren Anzahl an Datensätzen durchgeführt werden. Für den **kapazitiven Eissensor** gelten die selben Erkenntnisse bezüglich gemessener Eismenge und Einstellung von  $SW_{\text{kap}}$  wie für den Sommer Eissensor. Der **Anemometervergleich** weist große Schwankungen auf und reagiert tendenziell zu spät. Die synoptischen **Methoden nach Krenn bzw. ISO 12 494** detektieren die *RIT* sehr gut (kurz vor dem Erkennen einer Eisansammlung auf den Bildern) - dies entspricht dem bereits von Faschina und Großglockner bekannten Verhalten.



Tabelle 29: Ende Vereisungsereignis, 20./21. November 2012

Datum/Uhrzeit	Vereisung Gesamt	Vereisung Zunahme	Vereisung konstant	Vereisung Abnahme	BQ	Temp K	Temp_b -	krF %rF	krF_b -	T&krF	Sommer Eissensor	Kapazitiver Eissensor	DIFF 1_2 m/s	Einteilung Krenn	Eiseinteilung ISO 12494
21.11.2012 08:00	150		150		1	271,0	0,99	1,00	1,00	0,99	4,9	1,4	-1,02	1	A
21.11.2012 08:20	150		150		1	271,1	1,00	1,00	0,95	0,94	4,9	1,6	-1,1	1	A
21.11.2012 08:40	150		150		1	270,9	0,99	0,99	0,91	0,90	5,0	1,7	-0,84	1	A
21.11.2012 09:00	150		150		1	271,4	1,00	0,99	0,86	0,86	5,0	1,2	-0,95	1	A
21.11.2012 09:20	100			100	1	271,8	1,00	0,98	0,82	0,82	4,7	1,2	-0,7	1	A
21.11.2012 09:40	100			100	1	271,7	1,00	0,98	0,75	0,75	4,2	0,9	-0,83	1	A
21.11.2012 10:00	100			100	1	271,5	1,00	0,97	0,74	0,73	3,8	1	-0,86	1	A
21.11.2012 10:20	100			100	1	271,5	1,00	0,97	0,68	0,67	3,8	0,9	-0,1	1	A
21.11.2012 10:40	100			100	1	271,4	1,00	0,96	0,60	0,60	3,1	1	-0,89	1	A
21.11.2012 11:00	50			50	1	271,3	1,00	0,96	0,61	0,61	3,1	1	-0,79	1	A
21.11.2012 11:20	50			50	1	271,4	1,00	0,97	0,71	0,71	2,8	1,1	-0,85	1	A
21.11.2012 11:40	50			50	1	271,6	1,00	0,97	0,67	0,67	2,8	1,2	-0,67	1	A
21.11.2012 12:00	50			50	1	271,9	1,00	0,97	0,66	0,66	2,8	1,3	-0,53	1	A
21.11.2012 12:20	50			50	1	272,1	1,00	0,96	0,61	0,61	3,0	1,4	-0,42	1	A
21.11.2012 12:40	50			50	1	272,6	1,00	0,95	0,54	0,54	2,4	1,4	-0,34	1	A
21.11.2012 13:00	50			50	1	272,6	1,00	0,92	0,39	0,39	2,0	1,5	-0,37	1	C
21.11.2012 13:20	50			50	1	272,6	1,00	0,93	0,43	0,43	2,0	1,5	-0,37	1	A
21.11.2012 13:40	0			0	1	272,6	1,00	0,92	0,40	0,40	1,6	1,4	-0,26	1	C
21.11.2012 14:00	0	0			1	272,5	1,00	0,92	0,40	0,40	2,0	1,4	-0,61	1	C
21.11.2012 14:20	0	0			1	272,6	1,00	0,93	0,45	0,45	2,0	1,3	-0,25	1	A

Tabelle 29 zeigt das Ende des Vereisungsereignisses: In der Spalte „Vereisung Abnahme“ kann man erkennen, dass die Eismenge ab 09:20 Uhr langsam abnimmt. Die **T&krF-Methodik** detektiert noch bis 09:40 Uhr *RIT*, danach fällt der ermittelte Wert aufgrund der langsam sinkenden Luftfeuchte unter  $SW_{TkrF}$ . Der **Sommer-Eissensor** misst während der gesamten Zeit Werte  $> SW_{Sommer}$ , ab 13:00 Uhr pendelt er sich wieder in der Ausgangslage  $\sim 2\%$  ein. Bei einem Schwellwert von etwa 2 würde sich der **Sommer-Eissensor** somit sehr gut zum Messen der Zeitspanne des Instrumental Icings eignen. Die Werte des **kapazitiven Eissensors** lassen durch den offensichtlich zu klein gewählten  $SW_{kap}$  keine gesicherte Aussage zu, der Wert schwankt zwischen 1,7 und 0,9. Sonderbar erscheint die Ausgabe kleiner Wertes bei vorhandenem Eis (z.B.: 10:20 Uhr) und größerer Werte obwohl kein Eis vorhanden ist (z.B.: 13:40 Uhr). Zur genaueren Analyse müssen jedoch mehr Vereisungsereignisse ausgewertet werden. Der **Anemometervergleich** zeigt das Ende des Vereisungsereignisses an, jedoch weder exakt *RIT*, noch exakt *Instrumental Icing*. Die **Methoden nach Krenn und ISO 12 494** detektieren noch bis 16:20 Uhr *RIT*, was bei der Auswertung des gesamten Messzeitraumes im Frühjahr zu einer Überschätzung der *RIT* führen wird. Kameraaufnahmen des Vereisungsereignisses sind in Anhang H dargestellt.

## 7.5 Abschließende Bemerkungen zur RIT-Auswertung

Obwohl aufgrund des eingeschränkten Messzeitraums nur ein Vereisungsereignis der Vereisungsmessstation Windsfeld betrachtet wurde, zeigen sämtliche untersuchten Sensoren/Detektionsmethoden das bereits von den vorangegangenen Auswertungen bekannte Verhalten. Eine exakte Auswertung nach Stunden oder Übereinstimmungen wurde nicht durchgeführt, sie wäre aufgrund des kurzen betrachteten Zeitraums nicht repräsentativ.

Der in dieser Masterarbeit entwickelten Auswertemethodik haftet die Unsicherheit der manuellen Bildauswertung als Referenzwert an, diese könnte durch eine zuverlässige automatisierte Bildauswertung wie in Absatz 5.1.7 beschrieben wesentlich verringert werden. Da für den Zweck der Abschätzung der Ausfallszeit einer Windkraftanlage aufgrund von Rotorblattvereisung (unter der Annahme einer installierten Rotorblattheizung) jedoch nicht die angesammelte Eismenge, sondern die Umgebungsbedingungen ausschlaggebend sind und in Ermangelung einer gesicherten automatisierten Auswertung erscheint die manuelle jedoch als *zuverlässig genug*.

Ebenso wäre Kritik möglich, dass die verglichenen Sensoren/Methoden unterschiedliche Zeiträume messen: **LID-3300 IP** sowie die **synoptischen Methoden Meteorological Icing, Sommer-Eissensor und kapazitiver Eissensor ohne Heizung** sowie die **Anemometermethode** jeweils *Instrumental Icing*, während die **T&krF-Methodik** speziell zum Messen der *Relevant Icing Time* entwickelt wurde (jedoch nur eine Evolution der synoptischen Methoden darstellt). Diese Kritik mag berechtigt sein, jedoch ist ihr entgegenzuhalten, dass die einzelnen Sensoren/Methoden unter der Absicht getestet und verglichen wurden, jene Detektionsmethode zu ermitteln, die die *Relevant Icing Time* am besten benennen kann. Eine Aussage über die Funktionsfähigkeit der einzelnen Sensoren soll nicht getätigt werden, lediglich deren Zuverlässigkeit für die gewünschte Anwendung.

Die T&krF-Methodik hat sich bei allen untersuchten Standorten als die zuverlässigste der verwendeten Methoden/Sensoren zur Detektion der *RIT* herausgestellt. Somit kann der eigentliche Zweck, also die Bestimmung der *Relevant Icing Time* in Nabenhöhe, durch eine Berücksichtigung des Temperaturgradienten (Absatz 3.5.1) und anschließende Neuberechnung einfach durchgeführt werden:

### Beispiel:

$$T_{\text{Boden}} = 274,7 \text{ K}, \text{krF} = 98 \% \rightarrow P_{\text{RIT}}(\text{T}) \text{ Windsfeld} = 0,8, P_{\text{RIT}}(\text{krF}) = 0,82$$

$$P_{\text{RIT}} = P_{\text{RIT}}(\text{T}) * P_{\text{RIT}}(\text{krF}) = \mathbf{0,66} < \text{Schwellwert, keine RIT}$$

$$\text{Nabenhöhe 100 m: } T_{\text{Nabe}} = T_{\text{Boden}} - 0,5 \text{ K} \quad (\text{Dorninger, 2011})$$

$$T_{\text{Nabe}} = 274,2, \text{krF} = 98 \% \rightarrow P_{\text{RIT}}(\text{T}) \text{ Windsfeld} = 0,96, P_{\text{RIT}}(\text{krF}) = 0,77$$

$$P_{\text{RIT}} = P_{\text{Nabe}}(\text{T}) * P_{\text{RIT}}(\text{krF}) = \mathbf{0,74} < \text{Schwellwert, keine RIT}$$

Zur Verifizierung der angewandten Überlegungen und Modelle ist es unbedingt notwendig, Messstationen (also zumindest eine gesichert verfügbare Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit) neben bereits errichteten Windkraftanlagen mit Rotorblattheizung im alpinen Raum während des Winters zu betreiben. So könnte die errechnete Dauer der *RIT* mit der Zeitspanne der detektierten *RIT* an der Anlage verglichen werden und Verfeinerungen an der Methodik und an der Höhenabhängigkeit des Modells vorgenommen werden.



## 8 Exkurs: Konzept einer beheizten Schutzhülle für Hygro-Thermosensoren

Dieses Kapitel dokumentiert die Entwicklung einer beheizten Schutzhülle für einen Hygro-Thermosensor, wie er bei der Messstation Großglockner verwendet wurde. Dabei wird auf die grundlegenden Überlegungen und durchgeführten CFD-Simulationen eingegangen, sowie die Realisierung eines Laborprototypen gezeigt und eine erste Messung beschrieben.

### 8.1 Problemstellung und Idee

Wie in Kapitel 6 beschrieben, sind die aufgezeichneten Werte des Hygro-Thermosensors der Messstation Großglockner aufgrund der mehrmaligen Vereisung des Sensors mit großer Unsicherheit behaftet, so dass sie für eine zuverlässige Auswertung nicht verwendet werden konnten. Da der in Kapitel 5 entwickelte T&krF-Algorithmus jedoch vielversprechende Ergebnisse zeigte, soll eine höhere Verfügbarkeit des Hygro-Thermosensors auch bei sehr winterlichen Umgebungsbedingungen erreicht werden.

In Abbildung 63 ist ersichtlich, dass der Sensor zumindest einmal komplett von einer mehreren Zentimeter dicken Schnee- und Eisschicht umgeben war, die nahtlos an die Vereisung des benachbarten Messmasts anschloss: ein Luftaustausch und die korrekte Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit war somit nicht möglich. Es ist nicht nachweisbar, ob sich die Eismenge am Sensor selbst gesammelt hat, oder ob – was wahrscheinlicher ist – der Sensor im Lauf des Vereisungsereignisses von der Eisfahne des Masts „eingeschlossen“ wurde.

Beheizte Wind- oder Eissensoren sind am Markt erhältlich, somit lag die Idee nahe, auch eine Heizung bzw. eine beheizte Schutzhülle für den Hygro-Thermosensor zu entwickeln, um dieses Einschließen des Sensors zu verhindern. Eine Heizung des Sensors selbst wurde jedoch aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Erfahrungen mit direkt beheizten Anemometern verworfen. Die Schutzhülle sollte so konzipiert sein, dass sie ein Vereisen des Sensors verhindern, zumindest aber hinauszögern kann. Sollte er dennoch vereisen, so führt die Schutzhülle zumindest zu einer verkürzten Ausfallszeit.

Der Einfluss der Heizung auf Luftfeuchtigkeit und Temperatur sollte möglichst gering gehalten werden und muss durch eine Prüfung im Labor verifiziert werden, um bei aktivierter Heizung auf die tatsächlichen Werte der Umgebungsluft rückschließen zu können.

### 8.2 Design

Die Schutzhülle soll so gestaltet sein, dass eine Anströmung aus unterschiedlichen Windrichtungen keine unterschiedlichen Auswirkungen auf die Messwerte mit sich zieht. Somit bleiben entweder die Möglichkeit einer windnachgeführten Anordnung, oder eine möglichst rotationssymmetrische Gestalt. Die windnachgeführte Alternative wurde aus folgenden Gründen nicht weiter verfolgt:

1. Eine erhöhte Anzahl von Bauteilen stellt ein erhöhtes Ausfallsrisiko dar.
2. Die für die Drehbewegung notwendigen Teile enthalten zwangsläufig Dichtungen/Öffnungen, welche bei Vereisungsbedingungen/Schneelast besonders anfällig sind.
3. Die Heizung einer Windnachführung sowie die Lagerung erfordert zusätzliche Heizenergie, welche an den betroffenen Messstandorten oftmals schwer bereitzustellen ist.

Aus diesen Gründen wurde folgendes Design gewählt:

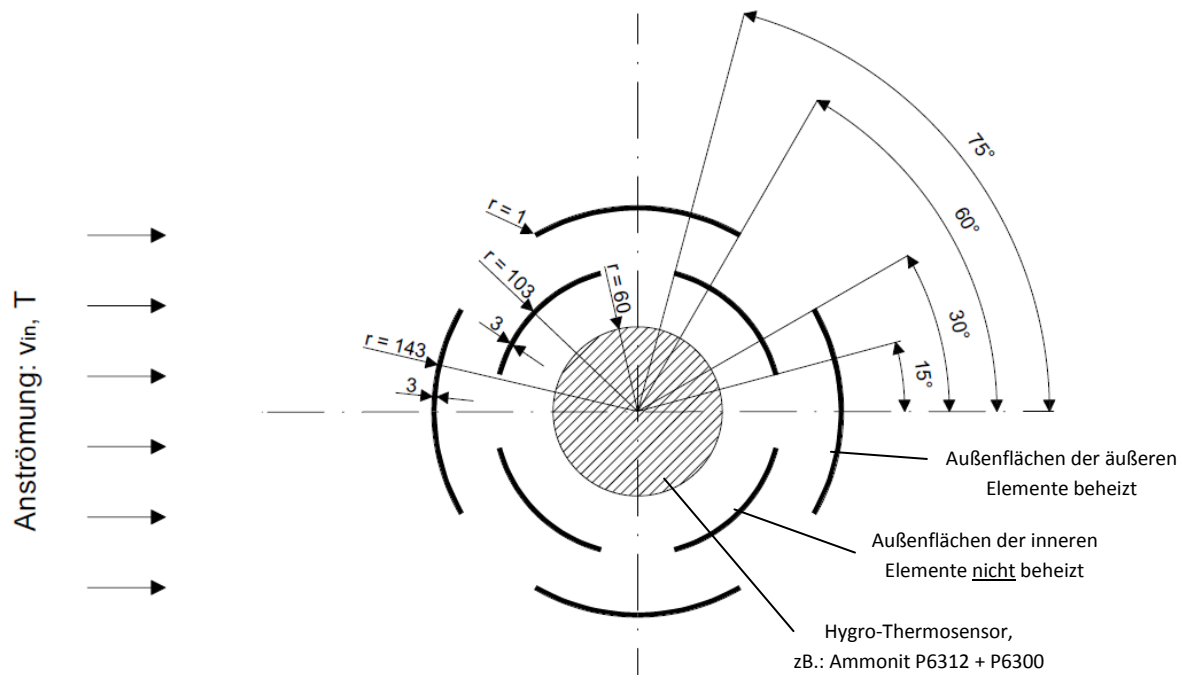


Abbildung 72: Design Schutzhülle inkl. Bemaßung

Abbildung 72 zeigt den Grundriss der Schutzhülle: Im Inneren des Aufbaus befindet sich ein Hygro-Thermosensor des Herstellers Ammonit (Nr. P6312), der von einem Wetter- und Strahlungsschutz (Nr. P6300) umgeben ist. Konzentrisch dazu wurden vier  $60^\circ$ -Kreissegmente eines Rohres (3 mm Wandstärke, 200 mm Innendurchmesser) unter einem Abstand von jeweils  $30^\circ$  zueinander platziert. In selber Art und Weise wurden vier Kreissegmente eines Rohres mit 280 mm Durchmesser und ebenfalls 3 mm Wandstärke angeordnet, jedoch zu den inneren Elementen um jeweils  $15^\circ$  verdreht. Sämtliche Kanten der Teile wurden mit einem Radius von 1 mm abgerundet. Die Außenflächen der Segmente mit 280 mm Durchmesser sollen durch aufgeklebte Heizfolien eine konstante Temperatur von  $5^\circ\text{C}$  aufweisen, um ein Aneisen zu verhindern.

#### Vorteile des gewählten Designs:

1. Wenige, einfache Teile ohne drehbare Lagerung.
2. Gleichmäßige Anordnung über den Umfang.
3. Umlenkung der Strömungsluft: Bei Richtungsänderungen und Wirbeln in der Luft können Tröpfchen/Schneeflocken der Strömung nicht folgen. Sie erreichen den Sensor nicht, bleiben an den beheizten Elementen kleben und tauen/rinnen ab.
4. Geringer Energiebedarf durch kleine beheizte Fläche (bei 10 cm Höhe ca.  $600\text{ cm}^2$  Oberfläche).

### Nachteile des Designs:

1. Ungleichmäßige Beeinflussung von Temperatur und Luftfeuchte abhängig vom Anströmwinkel aufgrund der relativ großen Teilung.
2. Möglicherweise Vereisung der inneren Elemente (unbeheizt) nach außen hin denkbar – wiederum Einschluss des Sensors.

## 8.3 CFD-Simulation in Ansys Fluent

Mittels einer 2-D CFD (Computational Fluid Dynamics)-Simulation wurde eine grobe Abschätzung durchgeführt, um zu überprüfen ob das gewählte Design den gestellten Anforderungen entspricht. Das Erstellen der Geometrie und des Netzes erfolgten im Programm Ansys Workbench (Version 12.1), die Simulation in Ansys Fluent. Die Berechnung wurde mit „double precision“ durchgeführt.

### 8.3.1 Geometrie

Die Geometrie des Sensors sowie jene der beheizten Schutzhülle wurden entsprechend der Skizze in Abbildung 72 erstellt, wobei die horizontale Mittellinie als Symmetrieebene gewählt wurde, um den Rechenaufwand zu minimieren. Die Grenze des Rechengebietes wurde aufgrund der angenommenen freien Anströmung ähnlich der bei 2-D-Strömungsversuchen an Tragflügeln verwendeten Randbedingungen gestaltet (siehe Abbildung 73), der Abstand zwischen Inlet/Outlet und dem Sensormittelpunkt beträgt etwa das Fünffache des Außendurchmessers der Schutzhülle.

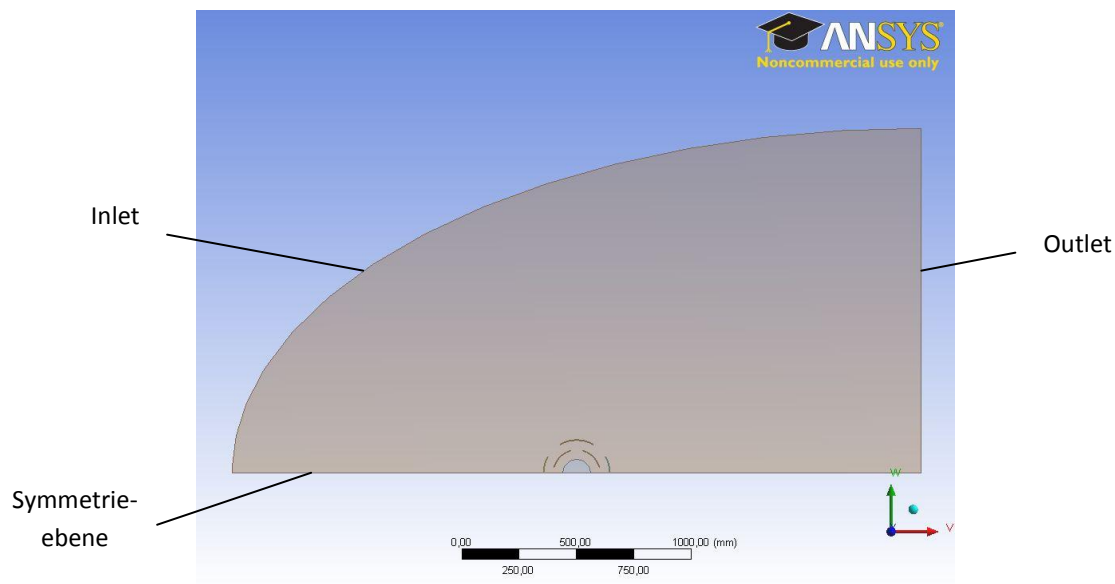


Abbildung 73: Gewähltes Rechengebiet

### 8.3.2 Netz

Da bei der Simulation hauptsächlich der Wärmeübergang von den beheizten Oberflächen auf das strömende Fluid interessierte, musste eine möglichst genaue Auflösung der Umgebung der äußeren Kreissegmente erreicht werden. Bei der Auswertung wurden zwei Netzvarianten untersucht.

#### Variante 1:

Verwendung von zweifachem „Face Sizing“, um die Auflösung rund um den Sensor zu definieren. Für Elemente mit einem Abstand zur Sensormitte von weniger als 200 mm wurde eine Elementgröße von max. 0,7 mm vorgegeben, im Umkreis von 400 mm eine maximale Elementgröße von 5 mm. (Abbildung 74, links)

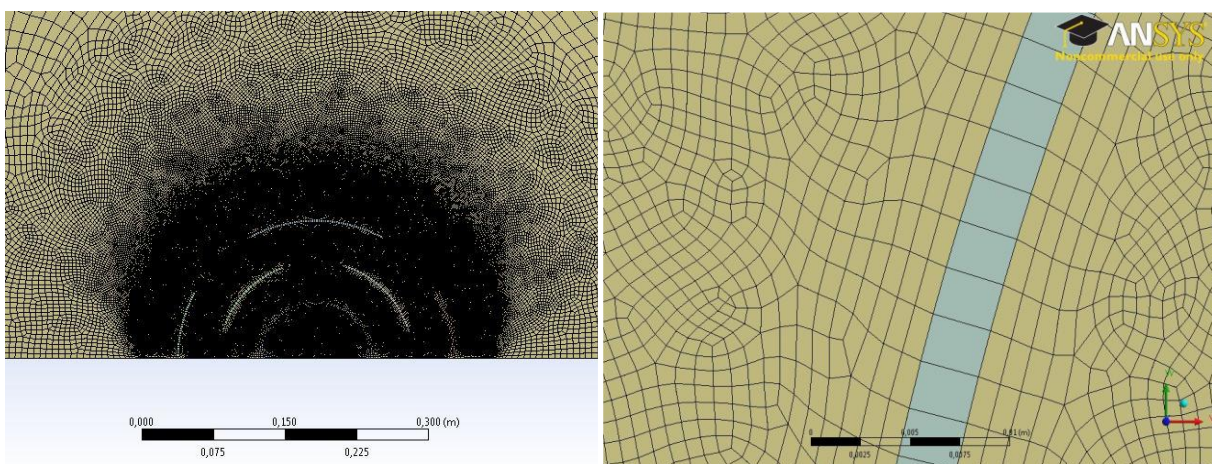


Abbildung 74: Mesh Variante 1: Umgebung des Sensors (links), Ausschnitt neben beheizter Wand (rechts)

#### Variante 2:

Für Variante 2 wurde die „Advanced Size Function: Proximity and Curvature“ aktiviert. Das Meshing Programm erkennt dabei die „interessanten“ Stellen der Geometrie und verwendet hier kleinere Elemente, um eine höheren Genauigkeit zu erreichen. Für Flächen, die weit von Kanten oder Wänden entfernt sind, werden jedoch größere Elemente generiert. So können viele Elemente (=Rechenaufwand) bei moderatem Genauigkeitsverlust eingespart werden. (Abbildung 75)

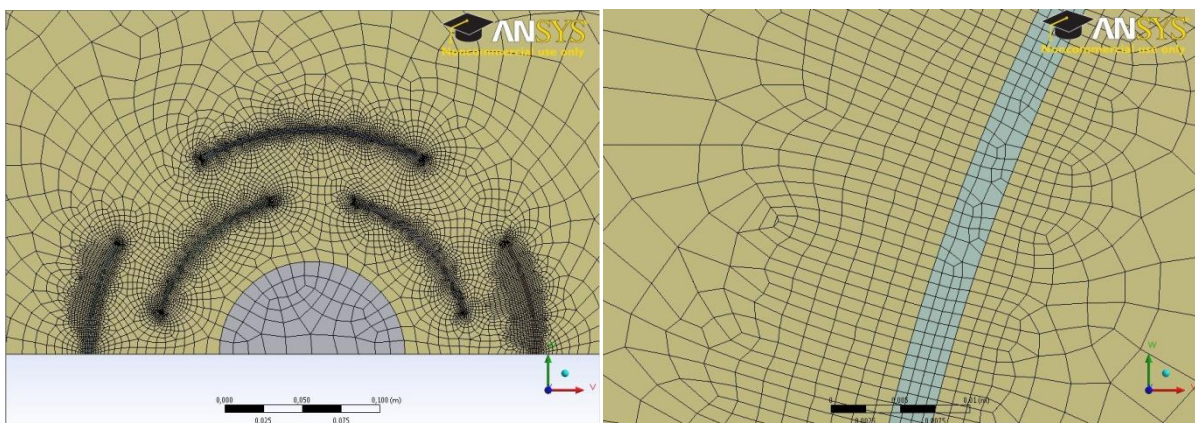


Abbildung 75: Mesh Variante 2: Umgebung des Sensors (links), Ausschnitt neben beheizter Wand (rechts)

Tabelle 30 zeigt die unterschiedliche Knoten- und Elementanzahl, sowie die Qualitätsmerkmale der einzelnen Netzvarianten.

Tabelle 30: Kennzahlen der verwendeten Netzvarianten

Netz:	Knoten:	Elemente:	Max. cell squish:	Max. cell skewness:	Max. aspect ratio:
Variante 1:	98.382	98.245	0,55672	0,80155	6,05841
Variante 2:	13.476	13.393	0,50727	0,79674	7,21304

**Cell squish:** Gibt die Abweichung der Elemente von der Orthogonalität an.  
(0 = minimal, 1 = maximal)

**Cell skewness:** Bewertet die Abweichung der Elemente von deren Idealgestalt.  
(0 = minimal, 1 = maximal)

**Aspect ratio:** Qualitätsangabe über die Verzerrung eines Elements – je kleiner, desto besser

### 8.3.3 Eigenschaften

Da die Simulation die Beeinflussung von Temperatur und Luftfeuchte durch die Oberflächenheizung nur grob abschätzen sollte, wurde als strömendes Medium *trockene Luft* angenommen - eine Berechnung mit unterschiedlichen Feuchtepartikeln erschien als unverhältnismäßig aufwändig. Für die Kreissegmente wurde ein gut isolierendes Material (Wärmeleitfähigkeit  $\alpha = 0,01 \text{ W/mK}$ ) verwendet.

### 8.3.4 Verwendetes Modell

Zur Abschätzung der Strömungseigenschaften wurde die Reynolds-Zahl berechnet:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\eta} \quad (\text{Brenn et al., 2010}) \quad \text{Gl. 12}$$

$Re$ ...	Reynolds-Zahl
$\rho$ ...	Dichte des strömenden Fluids in $\text{kg/m}^3$
$v$ ...	Anströmgeschwindigkeit der Strömung in $\text{m/s}$
$d$ ...	Charakteristische Länge ( <i>Außendurchmesser der Schutzhülle</i> ) in $\text{m}$
$\eta$ ...	Dynamische Viskosität des Fluids in $\text{m}^2/\text{s}$

Durch Einsetzen in Gleichung 12 erhält man bei  $0^\circ \text{C}$  und  $10 \text{ m/s}$  Strömungsgeschwindigkeit:

$$\frac{1,292 * 10 * 0,3}{17,1 * 10^{-6}} = \sim 2,3 * 10^5$$

Es ist somit von *turbulenter Strömung* auszugehen.

Zur Berechnung wurde der *pressure-based Solver* verwendet, die Verwendung der Energiegleichung wurde aktiviert. Als Turbulenzmodell wurde das Standard *k-ε Modell* gewählt: Dieses, auf der Boussinesq-Approximation basierende Modell, löst für die turbulente kinetische Energie *k* sowie die Energie-Dissipationsrate *ε* eigene Differenzialgleichungen und berechnet aus diesen Werten die turbulente Viskosität  $\nu_T$ . Das *k-ε-Modell* wurde für hohe Reynoldszahlen entwickelt, es ist sehr stabil und daher für diesen Fall gut geeignet. (Vgl. Andersson et al., 2011). Zur Berücksichtigung der (Wärmeübergangs-)Vorgänge in Wandnähe (viskose Unterschicht sowie Zwischenschicht) wurde „*Enhanced Wall Treatment*“ aktiviert, Wärmeübergang durch Strahlung wurde nicht berücksichtigt.

### 8.3.5 Boundary Conditions

Für das Inlet wurde „*velocity inlet*“, für das Outlet „*pressure outlet*“ gewählt. Temperatur ( $T_{in}$ ) und Geschwindigkeit ( $v_{in}$ ) der einströmenden Luft wurden variiert, für die beheizten Oberflächen der Kreissegmente wurde immer eine Temperatur von 278 K gefordert.

### 8.3.6 Solution Methods

Zur Berechnung wurde ein *pressure-based Solver* verwendet, als Diskretisierungsmethode das stabile und schnelle *First Order Upwind Scheme*.

## 8.4 Ergebnisse der Simulation

### 8.4.1 Allgemein

Die Simulationen waren stabil, Divergenz trat nur bei Abweichungen von den oben beschriebenen Einstellungen auf. Die Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren in Abbildung 76 zeigt, dass die Anordnung der Kreissegmente zur Ausbildung der beabsichtigten größeren Wirbelstrukturen im Strömungsfeld (Abscheidung von Tröpfchen und Schneeflocken) führt.

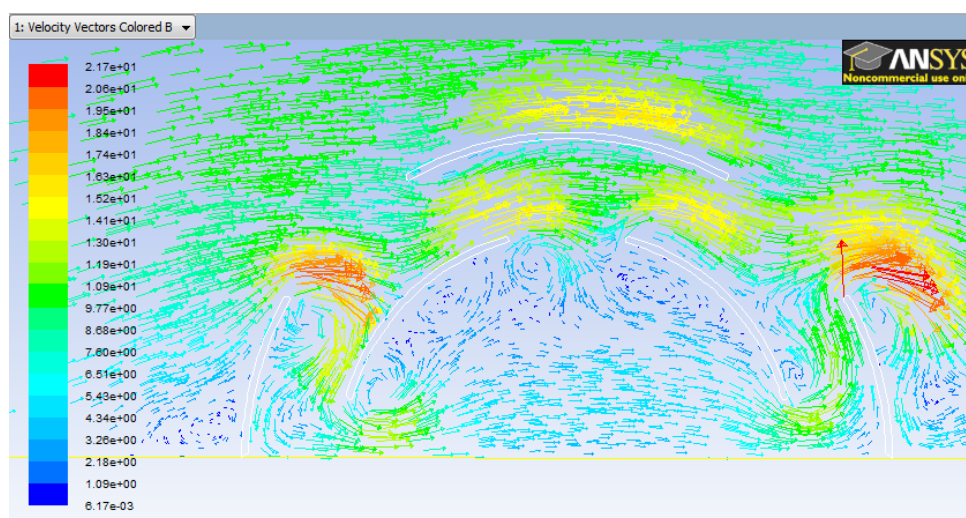


Abbildung 76: Geschwindigkeitsvektoren bei  $v_{in} = 5 \text{ m/s}$

## 8.4.2 Unterschiedliche Netze

Für eine Eintrittstemperatur  $T_{in}$  von 270 K sowie eine Anströmgeschwindigkeit  $v_{in}$  von 10 m/s wurden die Temperatur sowie die Geschwindigkeit im Strömungsfeld ausgewertet, wobei folgende Erkenntnisse gewonnen werden konnten:

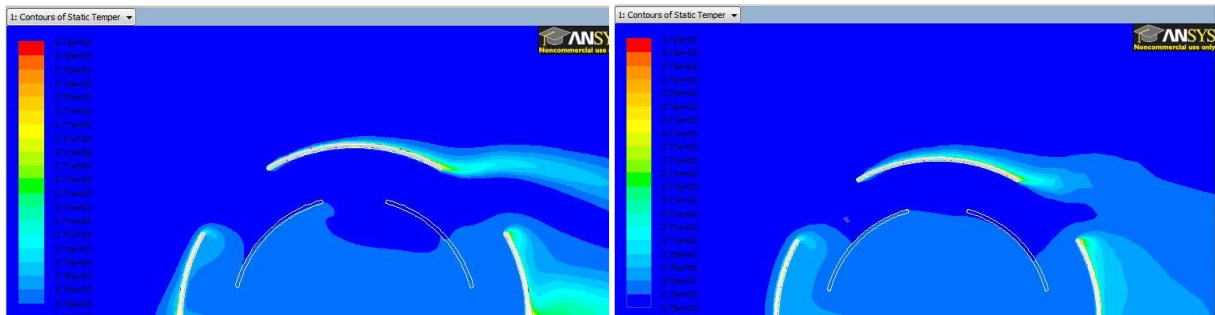


Abbildung 77: Temperaturverteilung für  $T_{in} = 270$  K,  $v_{in} = 10$  m/s. Links: Mesh Variante 1, rechts: Mesh Variante 2

Der Wärmeübergang an den beheizten Oberflächen ist bei beiden Mesh-Varianten von der selben Größenordnung (Variante 1: 403 W/m, Variante 2: 390 W/m). Dies ist durch etwa gleiche Wandauflösung an den Kreissegmenten begründet und äußert sich auch in ähnlichen Y-Plus-Werten zwischen 20 und 70. An der Position des Sensors (Mittelpunkt der Anordnung) ist die Temperaturabweichung mit 0,1 K für beide Mesh-Varianten ident. Durch die kleineren Elemente abseits der Wände bei Variante 1 ergeben sich jedoch geringfügige Unterschiede im Inneren der Schutzhülle sowie bei den Ablösungszonen stromabwärts des Sensors (siehe Abbildung 77). Aus diesem Grund wurde für die weiteren Analysen die Mesh-Variante 1 gewählt.

## 8.4.3 Unterschiedliche Anströmwinkel

Zur Untersuchung der unter 8.2 besprochenen Problematik einer Beeinflussung der Temperatur abhängig von unterschiedlichen Anströmwinkeln wurde die gesamte Schutzhülle um  $45^\circ$  zur Anströmrichtung gedreht. Bei  $T_{in} = 268$  K und  $v_{in} = 10$  m/s ergaben sich dabei qualitativ stark abweichende Temperaturverteilungen sowie eine Abweichungen der Temperatur am Sensor von 0,2 K (siehe Abbildung 78).

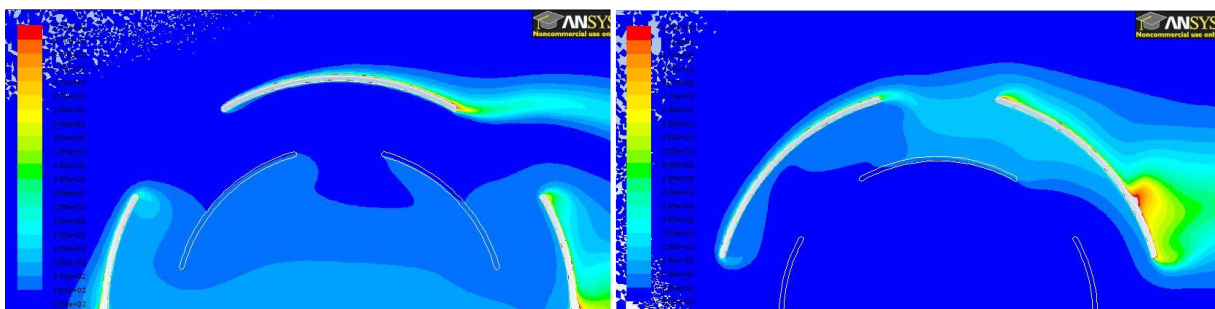
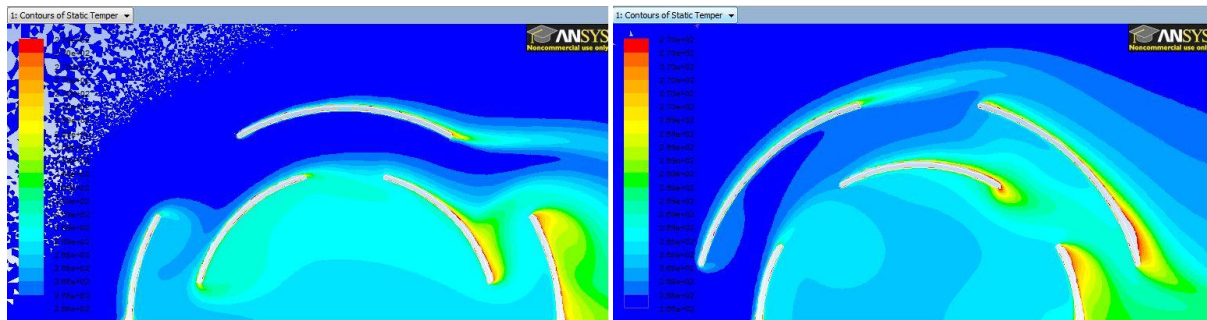


Abbildung 78: Temperaturverteilung bei  $T_{in} = 268$  K,  $v_{in} = 10$  m/s. Ausgangslage (links), Drehung um  $45^\circ$  zur Strömungsrichtung (rechts)

Da dieses Verhalten eine zuverlässige Rückrechnung von den gemessenen Temperaturwerten zur tatsächlichen Umgebungstemperatur bei drehenden Windverhältnissen nicht zulässt, wurde auch auf den inneren Kreissegmenten eine Oberflächenheizung mit konstant 278 K Temperatur simuliert.



**Abbildung 79: Temperaturverteilung bei  $T_{in} = 268$  K,  $v_{in} = 10$  m/s mit Oberflächenheizung auf inneren Elementen. Ausgangslage (links), Drehung um  $45^\circ$  zur Strömungsrichtung (rechts)**

Wie in Abbildung 79 ersichtlich, ist nach wie vor eine Temperaturdifferenz am Sensor vorhanden, diese ist jedoch etwas geringer (0,1 K). Obwohl sich auch bei diesem Design Unterschiede abhängig vom Anströmwinkel zeigen, wurde diese Variante weiterverfolgt und für den Prototyp verwendet.

#### 8.4.4 Variationen von $T_{in}$ und $v_{in}$

Es wurden weitere Fallunterscheidungen für geänderte Anströmtemperaturen und Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt und die dabei ermittelten Temperaturwerte am Sensor ausgewertet (siehe Tabelle 31).  $\Delta T_{\text{Sensor}}$  steigt mit sinkenden Anströmtemperaturen größer, da die Wandtemperatur konstant bei 278 K gehalten wurde. Der größte Wert wird mit  $\Delta T_{\text{Sensor}}$  bei einer Anströmung mit 268 K und 1 m/s erreicht, durch die langsame Strömung erwärmt sich die Luft am Sensor auf 268,8 K bei Variante a. Die Abweichung  $\Delta T_{\text{Variante}}$  abhängig vom Anströmwinkel ist für alle Varianten von vernachlässigbarer Größe.

$T_{in}$ : Anströmtemperatur der Luft

$v_{in}$ : Anströmgeschwindigkeit der Luft

$T_{\text{Sensor}}$ : Temperatur an der Position des Hygro/Thermosensors (*Ergebnis der Simulation*)

**Variante a:** Ausgangslage

**Variante b:** Schutzhülle um  $45^\circ$  zur Anströmrichtung gedreht

$\Delta T_{\text{Sensor}}$ : Mittlere Temperaturdifferenz zur Anströmtemperatur

$\Delta T_{\text{Variante}}$ : Temperaturdifferenz zwischen den Varianten a und b



Tabelle 31:  $T_{\text{Sensor}}$  abhängig von unterschiedlichen Anströmbedingungen

Nr.	$T_{\text{in}}$ in K:	$v_{\text{in}}$ in m/s	$T_{\text{Sensor}}$ in K, Variante a	$T_{\text{Sensor}}$ in K Variante b	$\Delta T_{\text{Sensor}}$ in K	$\Delta T_{\text{Variante}}$ in K
1	263	10	263,6	263,5	0,55	0,1
2	265	10	265,5	265,5	0,5	0
3	268	10	268,4	268,3	0,35	0,1
4	270	10	270,3	270,3	0,3	0
5	273	10	273,2	273,1	0,15	0,1
6	268	1	268,8	268,7	0,75	0,1
7	268	5	268,4	268,3	0,35	0,1
8	268	15	268,4	268,4	0,4	0

## 8.5 Prototyp der beheizten Schutzhülle

### 8.5.1 Fertigung

Es wurde ein Prototyp angefertigt, um die prinzipielle Funktionalität der beheizten Sensorhülle sowie die Qualität der CFD-Simulationen zu überprüfen. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

- ✳ Zur Temperatur- und Luftfeuchtemessung wurde ein Sensor Ammonit Hygro/Thermosensor P6312 inklusive Ammonit Strahlungsschutz P6300 verwendet.
- ✳ Für die beheizten Kreissegmente wurden Abwasserrohre mit den entsprechenden Durchmessern und einer Höhe von 15 cm verwendet. Als Boden- und Deckflächen dienten 0,5 cm dicke Pressholzplatten mit Ausnehmungen um die Elemente zu fixieren.
- ✳ Die Außenflächen der Kreissegmente wurden mit je zwei Heizfolien á 12 Watt Leistung beklebt, um die Wärme wie gewünscht ein das System einzubringen und die zuvor simulierten Wärmeströme zu gewährleisten.
- ✳ Als Steuerung für diese Heizfolien wurden einfache Temperaturschalter verwendet. Diese versorgen bei überschreiten der zuvor festgelegten Temperatur von 5 °C die Heizfolien mit Spannung. Die zwei Heizfolien jedes Kreissegments wurden zusammen geschaltet, die Temperaturmessung erfolgte in der Mitte der beheizten Oberfläche.

Abbildung 80 zeigt den Prototypen vor Montage der Deckfläche: Ersichtlich sind die Kreissegmente, sowie die Heizfolien auf den äußeren Oberflächen und der mittig positionierte Hygro/Thermosensor.

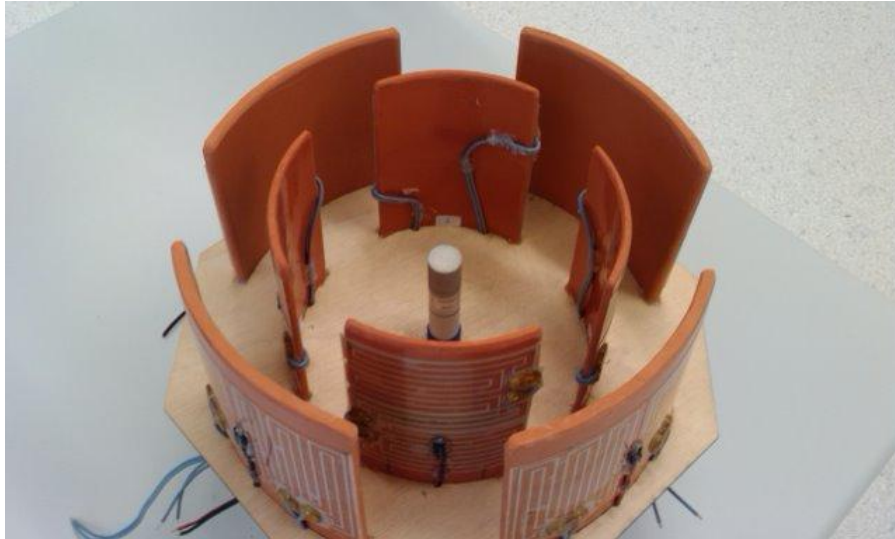


Abbildung 80: Prototyp der beheizten Schutzhülle für den Hygro/Thermosensor

## 8.5.2 Gründe für Abweichungen

Folgende Faktoren führen in der Praxis zu Abweichungen von den CFD-Simulationen:

- ✱ **Kreissegmente:** Es konnten keine Rohre mit den exakten Dimensionen der Simulationen verwendet werden. Die für den Prototyp verwendeten Elemente weisen bei den inneren Elementen einen Innendurchmesser von 190 mm (anstatt 200 mm) sowie eine Wandstärke von 5 mm (anstatt 3 mm) auf, bei den äußeren Elementen einen Innendurchmesser von 286 mm (statt 284 mm) sowie eine Wandstärke von 8 mm (statt 3 mm). Somit entsprechen auch die Abstände zwischen den einzelnen Elementen nicht jenen der Simulationen. Weiters wurde bei Testläufen festgestellt, dass sich auch die Innenflächen der Segmente bei aktivierten Heizfolien bereits nach kurzer Zeit erwärmen – in den Simulationen wurden die Kreissegmente jedoch als nahezu isolierend angenommen ( $\alpha = 0,01 \text{ W/mK}$ ).
- ✱ **Heizfolien:** Da die Fläche der Heizfolien vorgegeben war (110 x 70 mm), mussten bei den inneren Kreissegmenten eine geringe Überlappung in Kauf genommen werden. Somit wird sich in diesem Bereich eine möglicherweise höhere Temperatur einstellen als auf der übrigen Oberfläche. Auch ist es fraglich, wie genau durch permanentes Ein- und Ausschalten der Heizfolien tatsächlich eine konstante Oberflächentemperatur gehalten werden kann.
- ✱ **Temperaturschalter:** Das Potentiometer des Temperaturschalters besitzt eine beschränkt einstellbare Genauigkeit. Es wurde in einem Klimaschrank versucht, alle Potentiometer bei der selben Temperatur auszulösen, eine exakt gleiche Charakteristik aller Schalter kann jedoch nicht gewährleistet werden. Ebenso kann nicht mit Sicherheit festgestellt werden, ob bei Anströmung mit hoher Geschwindigkeit tatsächlich auf der gesamten Oberfläche des Kreissegments die selbe Temperatur herrscht – somit ist die Positionierung des Temperaturfühlers in der Mitte des Kreissegments möglicherweise nicht ideal. Der Klebstoff, mit dem die Temperaturfühler auf der Heizfolie befestigt sind, führt zudem zu erhöhter thermischer Trägheit des Temperaturschalters.

## 8.6 Versuch

Die erste Überprüfung des Prototyps wurde am 14. Dezember 2012 am Dach des Gebäudes Inffeldgasse 23, 8010 Graz durchgeführt.

### 8.6.1 Messanordnung

Die Messanordnung ist in Abbildung 81 und Abbildung 82 dargestellt: Als Hygro/Thermosensor wurde Fabrikat Typ 6312 des Herstellers Ammonit verwendet, welches auch bei der Messstation Großglockner Anwendung fand. Die Temperatur und die relative Feuchte wurden jeweils mit einem Multimeter als Spannung in V gemessen und anschließend gemäß Datenblatt (siehe Anhang E) in °C sowie %rF umgerechnet. An einem weiteren Multimeter wurde der Strom in A gemessen, der zum jeweiligen Zeitpunkt in den Heizfolien zum Erwärmen der Kreissegmente verbraucht wurde. Die Temperatur der Umgebungsluft wurde mittels eines weiteren Temperaturmessgeräts im Abstand von etwa 10 m zum Prototypen gemessen, die Anströmgeschwindigkeit wurde mit einem Gebläse eingestellt, es herrschte kein Wind vor. Die Geschwindigkeit wurde beim Eintritt in die beheizte Sensorschutzhülle mit einem Anemometer gemessen und vom Display abgelesen. Die Positionierung der Schutzhülle entsprach Variante b (45° zur Anströmung gedreht), siehe Absatz 8.4.4.



Abbildung 81: Messanordnung, Bild 1



Abbildung 82: Messanordnung, Bild 2

## 8.6.2 Messung

Zu Beginn der Messung wurde die beheizte Schutzhülle inklusive Hygro/Thermosensor für eine Stunde mit deaktivierter Heizung am Dach platziert, um die Umgebungstemperatur anzunehmen sowie zur Detektion eines möglichen Offsets zwischen den verwendeten Temperatursensoren.

Anschließend wurden mit dem Gebläse unterschiedliche Windgeschwindigkeiten eingestellt, die möglichst den Anströmgeschwindigkeiten der CFD-Simulationen entsprechen sollten. Dabei wurde eine weitere Ursache für Abweichungen zwischen Simulation und Versuch festgestellt: Das Gebläse ist durch seine Konstruktion nicht in der Lage, ein gleichmäßiges Strömungsprofil entlang des Radius zur Verfügung zu stellen. Die Geschwindigkeiten am Rand des Ausgangsstutzens sind im Normalbetrieb etwa viermal so hoch wie im Zentrum ( $\sim 30$  km/h außen,  $\sim 7$  km/h innen). Dies hätte durch eine Verlängerung mit einem Rohr ausgeglichen werden können, da jedoch bereits die Geschwindigkeit am Rand kleiner war als die in der CFD-Simulation verwendete und ein Verlängerungsrohr zu noch kleineren mittleren Geschwindigkeiten geführt hätte, wurde darauf verzichtet. Stattdessen wurde die Windgeschwindigkeit auf halber Höhe der Kreissegmente gemessen und um höhere Anströmgeschwindigkeiten zu erreichen der Prototyp dementsprechend höher positioniert.

Vor dem Ablesen der Werte wurde die Anströmung jeweils 25 Minuten lang konstant gehalten, um einen eingeschwungenen Zustand zu erreichen. Nach der Durchführung der Messung mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten wurden noch zwei weitere Messpunkte aufgenommen: Einmal wurde Wasser in den Luftstrom eingesprüht, einmal feinkörniger Schnee eingeworfen.

### 8.6.3 Messergebnisse

Beim Abgleich zwischen den Temperatursensoren wurde bei deaktivierter Heizung ein Offset von  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  zwischen Temperatur in der Schutzhülle und Umgebungstemperatur festgestellt.

Tabelle 32 zeigt folgende gemessenen und berechneten Werte:  $T_{\text{Sensor}_g}$  ist die in Volt abgelesene Temperatur in der Schutzhülle,  $T_{\text{Sensor}_b}$  die umgerechnete Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T$  beschreibt die Differenz zwischen Temperatur in der Schutzhülle und Umgebungstemperatur zuzüglich des Temperaturoffsets von  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{\text{max}}$  ist der maximal beobachtete Wert des zur Oberflächenheizung verbrauchten elektrischen Stroms. Der gemessene Strom änderte sich im Verlauf der Messung permanent in Schrittweiten von etwa  $1\text{ A}$ , da entsprechend der Steuerung Heizfolien ein- oder ausgeschaltet wurden. Multipliziert man den gemessenen Strom mit der Versorgungsspannung von  $24\text{ V}$ , so entspricht das Ergebnis der aufgewendeten Wärmeleistung in Watt.

Tabelle 32: Messergebnisse

Messpunkt:	Uhrzeit:	Medium:	$T_{\text{Umgebung}}$ :	$T_{\text{Sensor}_g}$ :	$T_{\text{Sensor}_b}$ :	$\Delta T$ :	$rF_{\text{Sensor}}$ :	$v_{\text{Anströmung}}$ :	$v_{\text{Anströmung}}$ :	$I_{\text{max}}$ :	Anmerkungen:
			$^{\circ}\text{C}$	V	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	%rF	km/h	m/s	A	
1	08:45	Luft	-4,6	0,279	-2,1	-2,5	0,567	0			keine Heizung
2	09:10	Luft	-4,5	0,279	-2,1	0,1	0,572	23,1	6,4	12,1	
3	09:35	Luft	-3,2	0,285	-1,5	0,8	0,575	14,9	4,1	10,3	
4	10:05	Luft	-2,9	0,288	-1,2	0,8	0,567	9,4	2,6	8,2	
5	10:30	Luft	-2,6	0,293	-0,7	0,6	0,549	0	0,0	6,3	
6	10:45	Feuchte Luft	-2,6	0,294	-0,6	0,5	0,65	18,2	5,1	8,4	Wasser eingesprützt
7	10:55	Schnee	-2,2	0,293	-0,7	1,0	0,713	17,6	4,9	10,5	Schnee eingeworfen

### 8.6.4 Interpretation

Der Offset zwischen  $T_{\text{Umgebung}}$  und  $T_{\text{Sensor}_b}$  erscheint bei der Qualität der verwendeten Sensorik ungewöhnlich groß – hier würde eine Messung im Labor unter gesicherten und konstanten Umgebungsbedingungen die Sicherheit der Messergebnisse erhöhen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die beheizten Oberflächen die Temperatur im Inneren der Schutzhülle durchaus beeinflussen. Vergleicht man die gemessenen Ergebnisse mit den berechneten Temperaturdifferenzen der Simulationen (siehe Tabelle 31), so ist ersichtlich dass die CFD-Simulationen die Temperaturerhöhung unterschätzen. Ebenso kann die Differenz auf die in Absatz 8.5.2 beschriebenen Gründe zurückgeführt werden. Ein exakter Vergleich ist jedoch sehr schwierig, da einerseits die Umgebungstemperatur im Tagesverlauf anstieg, andererseits die Anströmgeschwindigkeiten nur sehr ungenau eingestellt werden konnten.

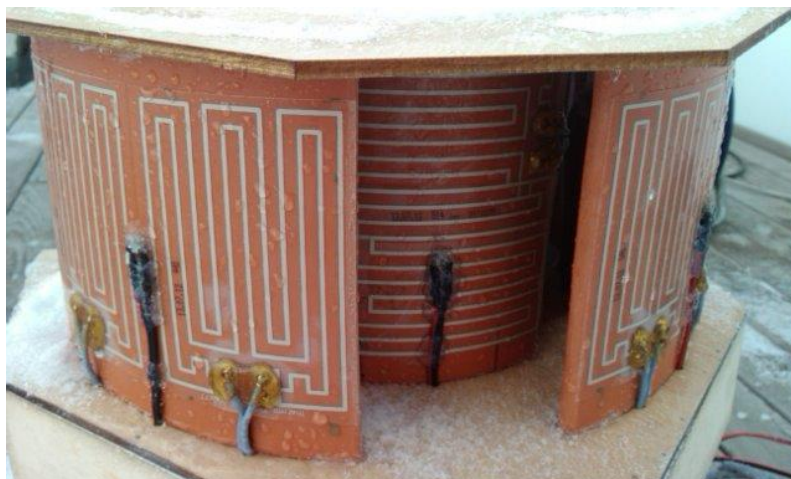
Weiters konnte man beobachten, dass mit steigender Temperatur die relative Luftfeuchtigkeit in der Schutzhülle abnahm (ausgenommen den Messpunkten mit extern zugeführtem Wasser/Schnee, sowie Messpunkt 3). Dies entspricht der Erwartung, da mit steigender Temperatur der Sättigungsdampfdruck der Luft fällt. Die Abweichung von Messpunkt 3 konnte nicht geklärt werden. Durch die Auswertung des Stromverbrauchs ist ersichtlich, dass bei höherem Luftmassenstrom die Kreissegmente stärker abgekühlt werden und somit mehr Heizflächen gleichzeitig aktiviert werden.

Das Einsprühen von flüssigem Wasser führte vor allem zu Verbesserungsansätzen für die Gestaltung der Sensorhülle: Es wurde beobachtet, dass sich an den abgerundeten Kanten der Kreissegmente (nicht mehr beheizt) Klareis bildete (siehe Abbildung 83). Um ein eventuelles Vereisen der Luftkanäle zu verhindern, sollten diese Stellen bei zukünftigen Versionen auch beheizt werden. Allgemein kann die Funktionalität der Heizflächen bestätigt werden: Auch bei Zufuhr von feinkörnigem Schnee mit der Anströmluft waren die beheizten Flächen innerhalb kurzer Zeit wieder eisfrei, während die Boden- und Deckfläche mit Schnee bedeckt blieben (siehe Abbildung 84).

Der Versuch bestätigte das Funktionsprinzip der beheizten Schutzhülle des Hygro/Thermosensors. Mit weiteren Messreihen unter exakt einstellbaren und konstanten Umgebungsbedingungen (wie etwa in einem Klimakanal) sollte es möglich sein, die Beeinflussung der Temperatur durch die Heizung exakt zu bestimmen. Somit kann der Sensor länger eisfrei gehalten und dennoch eine zuverlässige Temperaturmessung durchgeführt werden.



**Abbildung 83: Vereisung an den Kanten der Kreissegmente**



**Abbildung 84: Beheizte Sensorhülle nach simuliertem Schneefall**

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgabenstellung dieser Masterarbeit war es, notwendige Parameter und Sensoren, sowie eine Auswertemethodik zu ermitteln, anhand derer die Vereisungsdauer an potentiellen Standorten von Windkraftanlagen abgeschätzt werden kann. Damit soll für den Standort Windsfeld (Flachau/Salzburg) eine genauere Wirtschaftlichkeitsrechnung ermöglicht werden.

In Kapitel 1 wurde der Status quo der Windkraft erläutert, während Kapitel 2 ausführlich die Problematik vereister Rotorblätter, meteorologische Fachbegriffe und am Markt verfügbare Eissensoren beschrieb. Kapitel 3 listete derzeitige Methoden zur Abschätzung der Vereisungsdauer von Standorten auf: Da sich sowohl unterschiedliche „Vereisungskarten“, als auch der Vergleich zwischen den gemessenen Windgeschwindigkeiten eines beheizten und eines unbeheizten Anemometers als ungenau herausstellten, wurden die Einflussgrößen zur Bildung von Eis („*synoptische Vereisungsmessung*“) sowie deren messtechnische Erfassungsmöglichkeiten erarbeitet. Weiters wurden zwei neue Sensoren vorgestellt, die Vereisung mittels kapazitiver bzw. induktiver Messungen detektieren können. Die gewonnenen Informationen wurden zur Auswahl der Sensorik einer Vereisungsmessstation verwendet, die im Winter 2011/12 auf der Faschina (Vorarlberg) getestet wurde und im Winter 2012/13 die Vereisungsdauer am Windsfeld ermitteln soll (Kapitel 4 und Kapitel 8).

Anhand des auf der Faschina aufgezeichneten Datenmaterials wurde in Kapitel 5 ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Methoden zur Detektion der Zeit, während der die Eismenge zunimmt bzw. konstant bleibt („*Relevant Icing Time, RIT*“) durchgeführt, als Referenzwert wurde dabei eine manuelle Auswertung von Kamerabildern verwendet. Zusätzlich wurde ein synoptischer Algorithmus entwickelt, der die RIT durch eine Kombination der gemessenen Werte von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ermittelt („*T&krF-Methodik*“). Die Ergebnisse des Vergleichs zeigten, dass die T&krF-Methodik sowohl die RIT am besten detektierte, als auch allgemein die meisten Übereinstimmungen (93,2 %) zwischen Bildauswertung und Detektionsmethode erreichte.

Kapitel 6 zeigte den Versuch, mittels der oben beschriebenen Auswertemethodik die RIT an einer Messstation am Großglockner zu ermitteln. Dazu wurden Möglichkeiten beschrieben, die T&krF-Methodik an die geänderte Seehöhe anzupassen und die Vereisungsdetektion per Anemometervergleich mit in die Auswertung aufgenommen. Auch hier erreichte die (adaptierte) T&krF-Methodik die höchste Übereinstimmung mit der Bildauswertung. Aufgrund der offensichtlichen Beeinflussung der Messwerte durch Vereisung des Hygro/Thermosensors, sowie Schwierigkeiten bei der optischen Bildauswertung war dieser Vergleichstest jedoch mit großer Unsicherheit behaftet.

Kapitel 7 beschrieb das endgültige Design der Vereisungsmessstation Windsfeld, während Kapitel 8 die Potenziale einer beheizten Sensorhülle für den Hygro/Thermosensor mittels CFD-Simulationen und Prototypenbaus aufzeigte.

Begründet durch die Energiewende wird ein Erschließen weiterer Windkraftstandorte im Alpenraum eintreten - die in dieser Arbeit entwickelten Methoden können Unsicherheiten in der Wirtschaftlichkeitsrechnung vereisungsgefährdeter Standorte minimieren.

Notwendig sind dazu vor allem weitere Messstationen, idealerweise neben bereits errichteten Windkraftanlagen. Somit kann die allgemeine Gültigkeit des empirischen Modells der *T&krF-Methodik* und auch die Annahme bezüglich des Gradienten der Temperatur überprüft werden.

Die Auswertung der Messergebnisse der Vereisungsmessstation Windsfeld wird weitere Erkenntnisse bei der Verbesserung der *T&krF-Methodik*, sowie bei der Entwicklung der induktiven Sommer-Eissensoren und des kapazitiven Eissensors bringen. Die Salzburg AG wird durch diese Auswertung eine fundierte Aussage über die Vereisungsdauer vor Ort erhalten und kann diese in die Wirtschaftlichkeitsrechnung aufnehmen. Weiters kann mit der *T&krF-Methodik* im Zuge der Ermittlung des Windpotentials anderer Standorte durch Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Vereisungsdauer einfach und zuverlässiger als bisher berechnet werden. Dazu müssen keine zusätzlichen Messgeräte angeschafft werden.

Neben der Durchführung weiterer Messungen zur Vergrößerung des Datenpools birgt vor allem die automatisierten Bildauswertung Potential für Verbesserungen: Eine automatisierte Auswertung könnte konstante Kriterien garantieren und den Einfluss des Beurteilers minimieren. Ebenso würde ein optimiertes Auswerteprogramm den Zeitaufwand verringern.

Das Konzept der beheizten Schutzhülle für den Hygro/Thermosensor bietet ebenfalls viele Möglichkeiten zur Weiterentwicklung: Hier wäre es interessant die Auswirkungen unterschiedlicher Designs und Varianten zu ermitteln, die Steuerung der Heizung zu verbessern, einen professionelleren Prototypen anzufertigen und einen Versuch der Funktionstüchtigkeit im Freien durchzuführen.



## 10 Literaturverzeichnis

- Albert I., Donnet S., Guihenneuc-Jouyaux C., Low-Choy S., Mengersen K., Rousseau J.,** *Combining Expert Opinions in Prior Elicitation*, Bayesian Analysis (2012), 7, Number 3, pp. 503-532
- Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., van Wachem, B.,** *Computational Fluid Dynamics for Chemical Engineers*, Seventh edition, Gothenburg, Sweden, 2011
- Baring-Gould, I., Tallhaug, L., Ronsten, G., Horbaty, R., Cattin, R., Laakso, T., Durstewitz, M., Lacroix, A., Peltola, E., Wallenius, T.,** *Recommendations for wind energy projects in cold climates*, VTT working papers 151, Finnish Meteorological Institute, Finland, 2009
- Brenn, G., Meile, W.,** *Vorlesungsskriptum Strömungslehre und Wärmeübertragung I*, korrigierte Auflage 2009, Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung der TU Graz, 2009
- Cattin, R.,** *Alpine Test Site Guetsch – Schlussbericht*, Bundesamt für Energie, Schweiz, 2008
- Cattin, R., Koller, S.,** *Vereisung WEA St. Brais – Schlussbericht*, Bundesamt für Energie, Schweiz, 2011
- Carlsson, V.,** *Measurement routines of ice accretion for Wind Turbine applications*, Master Thesis, University of Umea, 2010
- Dorninger, M.,** *Persönliche Mitteilung*, Institut für Meteorologie und Geophysik, Uni Wien, August 2011
- ETA/SL/STJ,** *Messanlage Windsfeld Abschlussbericht*, SAFE, (unveröffentlicht), 1995
- Fliegenschnee-Jaksch, M.,** *Weltweite Windkraft wird sich bis 2016 verdoppeln*, IG Windkraft, Österreich, 2011
- Goebel, R.,** *Persönliches Gespräch*, Leitwind GmbH, 2372 Gießhübl, Oktober 2012
- Grimm, J. und W.,** *Deutsches Wörterbuch*, Bd. 27, Sp. 1525, <http://woerterbuchnetz.de/DWB/>, 15. 07. 2012
- Grosch, M.,** *Windenergie aus dem Wald*, Präsentation der Bayrischen Staatsforste, 10. Österreichisches Windenergiesymposium, 2011
- Grunditz, E.,** *Statistische Untersuchung der Prognoseverfahren für Stratus nach Schneefall (Statistisk undersökning av prognosmetod för stratus efter snöfall)*, Examensarbete vid Institutionen för geovetenskap, ISSN 1650-6553 Nr 81, Schweden, 2002
- Hehenberger, G.,** *Persönliches Gespräch*, SET GmbH, 9020 Klagenfurt, 07. 11. 2012
- Holgerson, Y.,** *The ice issue*, Winterwind 2012 - conference proceedings, 08. 02. 2012, [www.winterwind.se](http://www.winterwind.se), aufgerufen am 06. 11. 2012
- IGUS BladeControl®,** *System zur Überwachung des Zustands von Rotorblättern an Windkraftanlagen*, S. 18, IGUS IST GmbH, Else-Sander-Straße 6, 01099 Dresden, Deutschland, [www.igus-its.de](http://www.igus-its.de), 2008
- IGUS BladeControl®,** *Basisinformation zur Eisdetektion an Rotorblättern*, IGUS IST GmbH, Else-Sander-Straße 6, 01099 Dresden, Deutschland, [www.igus-its.de](http://www.igus-its.de), 2012a

**IGUS BladeControl®**, *Kontinuierliche Rotorblattüberwachung*, IGUS IST GmbH, Else-Sander-Straße 6, 01099 Dresden, Deutschland, [www.igus-its.de](http://www.igus-its.de), 2012b

**ISO 12 494**: *Atmospheric icing of structures*, 2001

**Jesenko, J.**, *Präsentation der alpswind GmbH*, 10. Österreichisches Windenergiesymposium, 2011

**Kaltenegger, F.**, *Persönliches Gespräch*, Windpark Salzstiegl, März 2012

**Krenn, A.**, *Intelligent load control for heated wind measurement sensors*, Präsentation Winterwind 2012, Verein energiewerkstatt, 2012a

**Krenn, A.**, *Eissensortest Faschina*, Verein energiewerkstatt, (unveröffentlicht), 2012b

**Krenn, A.**, *Persönliches Gespräch*, 10. Oktober 2012, 2012c

**Laakso, T., Baring-Gould, I., Durstewitz, M., Horbaty, T., Lacroux, A., Peltola, E., Ronsten, G., Tallhaug, L., Wallenius, T.**, *State-of-the-art of wind energy in cold climates*, VTT working papers 152, Finnish Meteorological Institute, Finnland, 2010

**Lachinger, F.**, *Entwicklung einer Hybrid-Stromversorgung für Windmessenrichtungen mit optimierter Betriebsführung*, Diplomarbeit, FH Oberösterreich, 2011

**Lotter, H.**, *Persönliches Gespräch*, Viktor Kaplan Akademie, Mürz, 21. Juli 2011

**Makkonen, L.**, *Models for the Growth of Rime, Glaze, Icicles and Wet Snow on Structures*, Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 358, No. 1776, Ice and Snow Accretion on Structures, pp. 2913-2939, 2000

**Mayr, G.**, *Persönliches Gespräch*, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, 01.08.2011

**Nygaard, B. E. K.**, *Simulation vs. measurement of supercooled clouds*, Präsentation Winterwind 2011, Norwegian Meteorological Institute, 2011

**Ohms, A.**, *Persönliches Gespräch*, ZAMG Salzburg, 22.07.2011

**OTT Hydromet GmbH**, *OTT\_Parsivel<sup>2</sup> Produktpräsentation*, Ludwigstraße 16, 87437 Kempten, Deutschland, Juli 2012

**Petteri Antikainen, T.W.**, *Pre-certification of Labkotec LID-3300IP ice detector for wind energy applications*, Kirjaamo: VTT, Finnland, 2011

**Proidl, H.**, *Präsentation der E-Control*, 10. Österreichisches Windenergiesymposium, 2011

**Schellhuber, H.J.**, *Die Diktatur des Jetzt*, S. 29, Der Spiegel, Ausgabe 12, 2011

**Seibt, C.**, *Seine Skepsis ist 1 Million Dollar wert*, Tages-Anzeiger, 29. Juni 2011

**Seifert, H.**, *Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen*, S. 4, DEWI, 26382 Wilhelmshaven, Deutschland, 1999

**Seifert, H.**, *Technische Ausrüstung von Windenergieanlagen an extremen Standorten*, S. 4, DEWI, 26382 Wilhelmshaven, Deutschland, 2003

**Sell, S.**, *Anti-Icing: Surfaces, technical approaches and status*, Fraunhofer IFAM, Germany, 2011

**Siegmann, K., Kaufmann, A., Hirayama, M.**, *Anti-freeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen - Schlussbericht*, Bundesamt für Energie, Schweiz, 2006

**Sommer, W.**, *Sommer Eissensor*, Sommer GmbH / Co KG, Straßenhäuser 27, 6842 Koblach, Österreich, 2012a

**Sommer, W.**, *Besprechung Eissensortest Faschina*, Interviewer: S. Haym, Interviewer, (persönliche Mitteilung), 12. April 2012b

**Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R.**, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, Second edition, Brooks/Cole Publishing Company, 1999

**Tammelin, B., Cavaliere, M., Holttinen, H., Morgan, C., Seifert, H., Säntti, K.**, *Wind energy production in cold climate*, Meteorological Publications No. 41, Finnish Meteorological Institute, Finland, 2000.

**Trauttmansdorff, J.**, *10 Jahre Tauernwindpark Oberzeiring*, Präsentation ImWind Group, 2011a

**Trauttmansdorff, J.**, *Persönliches Gespräch*, ImWind Group, 18. Juli 2011b

**WMO/CIMO**, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, WMO-No.8, 7th Edition, Chapter 4, Annex 4.A, 2008

**Zelinka, I.**, *Persönlicher Mitteilung*, IG Windkraft, 17.07.2012



## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ohne Worte (Grosch, 2011).....	1
Abbildung 2: Installierte Windleistung in Österreich, Stand Juli 2011 (Proidl, 2011).....	2
Abbildung 3: Tauernwindpark Oberzeiring (www.tauernwind.com, 17. 07. 2012).....	3
Abbildung 4: Windpark Moschkogel (www.magzin.at, 17.07.2012, © Michael Rothauer) .....	3
Abbildung 5: Lage des Windsfelds (www.maps.google.com, 17.07.2012) .....	4
Abbildung 6: Auswirkungen von Vereisung .....	7
Abbildung 7: Vereisung an Rotorblättern (Baring-Gould et al., 2009, © Kent Larsson) .....	9
Abbildung 8: Unterschiedlicher Eisansatz an einer pitchgeregelten WKA im Leerlauf-(links) und im Produktionsbetrieb (Mitte), sowie Eisansatz nach Leerlaufbetrieb (rechts), (Seifert, 1999) .....	12
Abbildung 9: Zeitdefinitionen bei Vereisung, (Cattin, 2008).....	13
Abbildung 10: Links: Vereiste unbeheizte Messgeräte (Matzendörfer Stierenberg, Schweiz). Rechts: Beheiztes und unbeheiztes Anemometer (Sternstein, Österreich), (Cattin, 2008) .....	15
Abbildung 11: Vereisungsmessung mittels beheizten und unbeheizten Anemometers. Gelb: beheizter Sensor, blau/türkis: unbeheizte Sensoren, (Cattin, 2008) .....	15
Abbildung 12: "Zäpfchenbildung" und somit Verfälschung der Messung eines beheizten Anemometers, (Lachinger, 2011).....	16
Abbildung 13: Ausschnitt aus dem Benutzerinterface des IGUS BladeControl®: Aufgetragen ist die gemessene Beschleunigung über den entsprechenden Frequenzen (IGUS, 2008) .....	17
Abbildung 14: Links: Aufnahme eines Rotorblatts der WKA auf dem Gütsch (Schweiz) im eisfreien Zustand. Rechts: Vereiste Aufnahme eines Rotorblatts bei Nacht. (Cattin, 2008) .....	18
Abbildung 15: Zunahme des Pegels und Verschiebung des Geräuschkpektrums bei leichter Vereisung (blau) im Vergleich zum eisfreien Rotorblatt (grün), (Seifert, 2003) .....	18
Abbildung 16: WECO-Eiskarte von Europa und Österreich im Speziellen, (Tammelin et al., 2000) .....	22
Abbildung 17: Vereisungswahrscheinlichkeit abhängig von der Seehöhe inkl. Ausgleichskurve, (Laakso et al., 2010).....	23
Abbildung 18: Links: Zylinderförmiger Eisansatz an Abspannungen eines Messmasts. Rechts: Wegen Vereisung eingestürzter Messmast (beides Schwyberg, Schweiz), (Cattin, 2008).....	25
Abbildung 19: Ablauf eines Vereisungsereignisses .....	26
Abbildung 20: Strömungslinien feuchter Luft und Trajektorien von Feuchtepartikeln um ein Objekt, (Makkonen, 2000) .....	29
Abbildung 21: "Wet-growth" bei der Bildung von Klareis, (Makkonen, 2000) .....	29
Abbildung 22: Eistyp abhängig von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur, (ISO 12 494, 2001) ...	31
Abbildung 23: Definition LWC: Feuchte Luft (links), gedankliche Trennung in flüssiges Wasser und trockene Luft (rechts) .....	33
Abbildung 24: Funktionsprinzip des Laserdistrometers: (A) Tröpfchen schatten einen Teil des Laserstrahles ab (B) Die Abschattung ändert das Signal am Empfänger (C) Die Intensität lässt auf den Durchmesser schließen, die Zeitdauer auf die Fallgeschwindigkeit, (OTT-Hydromet GmbH, 2012) ....	34
Abbildung 25: OTT Parsivel <sup>2</sup> Laserdistrometer, (Ott Hydromet GmbH, 2012) .....	34
Abbildung 26: Links: Vereistes Schalensternanemometer am Sternstein (Österreich), rechts: vereistes Propelleranemometer, (Cattin, 2008).....	36
Abbildung 27: Labko LID-3300 IP.....	36
Abbildung 28: Maßgebliche Größen und deren Zusammenhänge .....	39
Abbildung 29: Linkes Bild: Standort Messanlage Faschina. Rechtes Bild: Lage von Vereisungsmessstation (links) und Wetterstation (rechts), (www.maps.google.com, 30. Juli 2012) ..	41

Abbildung 30: Aufnahme vom 01. 03. 2012, 08:05 Uhr: Darstellung der Eissensoren der Eisstation Faschina.....	42
Abbildung 31: Messstation Großglockner mit installierter Sensorik (Lachinger, 2011) .....	45
Abbildung 32: Aufnahme der Messstation Großglockner, 16. April 2011, 05:42 Uhr .....	46
Abbildung 33: Messgrößen der Sommer Eissensoren und des LID-3300 IP vom 15.02. bis zum 22.02.2012. In den roten Ellipsen ist das untypische Verhalten des Sommer Flächensensors klar zu erkennen. ....	50
Abbildung 34: Lage von Faschina Wetter- und Eisstation.....	51
Abbildung 35: FIR-Filter zur zeitlichen Gewichtung der Messwerte .....	53
Abbildung 36: Messfehler durch falschen Bezugsdampfdruck (Cattin, 2008) .....	54
Abbildung 37: Beispiele zur errechneten CBH, links 07. 03. 2011 08:00 Uhr: CBH =951 m; rechts 30.03.2011 09:00 Uhr:CBH = 21 m .....	56
Abbildung 38: Wesentliche Stellen bei der Untersuchung auf Vereisung .....	57
Abbildung 39: Mögliche Vereisungsvorgänge sowie die dafür notwendigen Umgebungsbedingungen .....	59
Abbildung 40: Beispiele der einzelnen Zuverlässigkeitsklassen für die Bildauswertung (von links nach rechts): Klasse 1: 20.03. 12 Uhr; Klasse 2: 01.04. 05 Uhr; Klasse 3: 01.05. 05 Uhr .....	61
Abbildung 41: Histogramm des Referenzmarkers mit Schwellwert (rot) .....	63
Abbildung 42: Umwandlung der betrachteten Marker aus Graustufen in eine Schwarz/weiß-Darstellung. Oben: Tagreferenz, unten: Nachtreferenz.....	63
Abbildung 43: Vergleich der Methoden der Bildauswertung, 24. 03. 2012 - 31. 03. 2012.....	64
Abbildung 44: Vergleich der Methoden der Bildauswertung, 31. 03. 2012 - 07.04. 2012 .....	65
Abbildung 45: Methodik zur Ermittlung von $P_{RIT}(T, krF)$ .....	69
Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung $RIT(T, krF)$ .....	69
Abbildung 47: $B_{RIT,T}-A_1$ .....	70
Abbildung 48: $P_{RIT}(T)-A_2$ .....	71
Abbildung 49: $P_{RIT}(T)$ Faschina .....	71
Abbildung 50: $B_{RIT,krF}$ Faschina .....	72
Abbildung 51: $P_{RIT}(T,krF)$ ermittelt durch T&krF-Methodik.....	73
Abbildung 52: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse der Relevant Icing Time bei unterschiedlicher zeitlicher Gewichtung (Standort Faschina) .....	74
Abbildung 53: Ermittelte Stunden RIT.....	76
Abbildung 54: Anzahl der korrekten „RIT“ und „eisfrei“ Detektionen.....	77
Abbildung 55: Detektion RIT inkl. kapazitivem Sensor.....	79
Abbildung 56: Anzahl der Übereinstimmungen inkl. kapazitivem Sensor .....	79
Abbildung 57: Kamerabild vom 29. 03. 2012, 02:00 Uhr .....	80
Abbildung 58: Aufnahme der Kamera des Standortes Großglockner, 26. 04. 2011, 05:42 Uhr .....	88
Abbildung 59: Anzahl der Übereinstimmungen, Standort Großglockner. 1 Übereinstimmung = 20 min Messzeitraum .....	90
Abbildung 60: Anpassung von $B_{RIT,T}$ Faschina an die geänderte Seehöhe.....	91
Abbildung 61: Aufnahme vom 16. April 2011, 18:20 Uhr. Gemessene Werte: T = 266,5 K, krF = 106 % .....	92
Abbildung 62: Aufnahme vom 27. April 2011, 16:00 Uhr. Gemessene Werte: T = 270,5 K, krF = 104 % .....	92
Abbildung 63: Hygro/Thermosensor der Messstation Großglockner (rote Markierung), (Lachinger, 2011).....	93

Abbildung 64: Aufnahmen des 05.05.2011 um 05:02 Uhr (links) und 05:22 Uhr (rechts): Während die starke Reflexion am mittleren Ausleger des linken Bildes ein Indiz für Vereisung ist, kann aufgrund des geänderten Aufnahmemodus rechts kein Eis festgestellt werden.....	94
Abbildung 65: Detektion <i>RIT</i> Großglockner.....	95
Abbildung 66: Anzahl der Übereinstimmungen zwischen Bildauswertung und Detektionsmethode, 1 Übereinstimmung entspricht 20 min .....	96
Abbildung 67: Vereisungsmessstation Windsfeld .....	97
Abbildung 68: SAT-Anlage auf der Windsfeldhütte .....	99
Abbildung 69: Systemaufbau Messstation Windsfeld .....	100
Abbildung 70: Aufnahme der Vereisungsmessstation Windsfeld vom 26. 11.2012, 15:00 Uhr, links: Bild der Infrarotkamera, rechts: Tagaufnahme.....	101
Abbildung 71: Aufnahme der auf der Windsfeldhütte montierten Kamera, 03.11.2012, 07:30 Uhr .	101
Abbildung 72: Design Schutzhülle inkl. Bemaßung .....	108
Abbildung 73: Gewähltes Rechengebiet .....	109
Abbildung 74: Mesh Variante 1: Umgebung des Sensors (links), Ausschnitt neben beheizter Wand (rechts) .....	110
Abbildung 75: Mesh Variante 2: Umgebung des Sensors (links), Ausschnitt neben beheizter Wand (rechts) .....	110
Abbildung 76: Geschwindigkeitsvektoren bei $v_{in} = 5 \text{ m/s}$ .....	112
Abbildung 77: Temperaturverteilung für $T_{in} = 270 \text{ K}$ , $v_{in} = 10 \text{ m/s}$ . Links: Mesh Variante 1, rechts: Mesh Variante 2 .....	113
Abbildung 78: Temperaturverteilung bei $T_{in} = 268 \text{ K}$ , $v_{in} = 10 \text{ m/s}$ . Ausgangslage (links), Drehung um $45^\circ$ zur Strömungsrichtung (rechts) .....	113
Abbildung 79: Temperaturverteilung bei $T_{in} = 268 \text{ K}$ , $v_{in} = 10 \text{ m/s}$ mit Oberflächenheizung auf inneren Elementen. Ausgangslage (links), Drehung um $45^\circ$ zur Strömungsrichtung (rechts) .....	114
Abbildung 80: Prototyp der beheizten Schutzhülle für den Hygro/Thermosensor .....	116
Abbildung 81: Messanordnung, Bild 1 .....	117
Abbildung 82: Messanordnung, Bild 2 .....	118
Abbildung 83: Vereisung an den Kanten der Kreissegmente.....	120
Abbildung 84: Beheizte Sensorhülle nach simuliertem Schneefall .....	120
Abbildung 85: Vereisungsereignis 1, 24. März 2012, 18:00 Uhr (links), 19:00 Uhr (rechts) .....	B
Abbildung 86: Vereisungsereignis 1, 24.03. 2012, 23:00 Uhr (links), 25.03. 01:00 Uhr (rechts) .....	B
Abbildung 87: Vereisungsereignis 1, 25.03. 2012, 06:00 Uhr (links), 09:00 Uhr (rechts) .....	B
Abbildung 88: Vereisungsereignis 2, 04.04.2012, 18:00 Uhr (links), 19:00 Uhr (links).....	C
Abbildung 89: Vereisungsereignis 2, 04.04.2012, 23:00 Uhr (links), 05.04.2012, 03:00 Uhr (rechts) ....	C
Abbildung 90: Vereisungsereignis 2, 05.04.2012, 06:00 Uhr (links), 13:00 Uhr (rechts) .....	C
Abbildung 91: Vereisungsereignis 3, 18. 04. 2012, 13:00 Uhr (links), 15:00 (rechts) .....	D
Abbildung 92: Vereisungsereignis 3, 18. 04. 2012, 17:00 Uhr (links), 19:00 Uhr (rechts) .....	D
Abbildung 93: Vereisungsereignis 3, 18. 04. 2012, 21:00 Uhr (links), 19. 04. 2012, 01:00 Uhr (rechts) D	D
Abbildung 94: Vereisungsereignis, 20. 11. 2012, 22:20 Uhr (links), 21. 11. 2012, 01:00 Uhr (rechts) ...H	H
Abbildung 95: Vereisungsereignis, 21. 11. 2012, 04:00 Uhr (links), 21. 11. 2012, 08:00 Uhr (rechts) ...H	H
Abbildung 96: Vereisungsereignis, 21. 11. 2012, 11:00 Uhr (links), 21. 11. 2012, 14:00 Uhr (rechts) ...H	H





## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Externe Vereisungssensoren und das jeweilige Messprinzip, (vgl. Carlsson, 2010).....	14
Tabelle 2: Zu erwartende Vereisungsdauer unterschiedlicher Seehöhen in den Alpen, (Laakso et al., 2010).....	23
Tabelle 3: Vereisungsarten lt. Makkonen, (Makkonen, 2000) .....	29
Tabelle 4: Meteorologische Parameter der Vereisungsarten, (ISO 12 494, 2001) .....	30
Tabelle 5: Aufgezeichnete Größen der Messstation Faschina .....	43
Tabelle 6: Sensoren und Messgrößen der Messstation Großglockner .....	46
Tabelle 7: Zeitliche Gewichtung der Messwerte .....	52
Tabelle 8: Bewertungskriterien für die Vereisung.....	57
Tabelle 9: Darstellung der optischen Vereisungsbewertung .....	60
Tabelle 10: Zuverlässigkeitsklassen der Bildauswertung .....	61
Tabelle 11: Anzahl der Aufnahmen je Zuverlässigkeitsklasse .....	62
Tabelle 12: Sensitivitätsanalyse $SW_{\text{Sommer}}$ .....	66
Tabelle 13: Auswertung Sommer Eissensor .....	67
Tabelle 14: Eisklassen der ISO 12 494 - Auswertung.....	68
Tabelle 15: Sensitivitätsanalyse zur zeitlichen Gewichtung der Messwerte.....	74
Tabelle 16: Sensitivitätsanalyse für den $SW_{\text{TkrF}} = 0,56$ .....	75
Tabelle 17: Sensitivitätsanalyse für $SW_{\text{TkrF}} = 0,74$ .....	75
Tabelle 18: Sensitivitätsanalyse für $SW_{\text{TkrF}} = 0,93$ .....	75
Tabelle 19: Mögliche Zustände und ihre Häufigkeit (Bildauswertung : Detektionsmethode).....	77
Tabelle 20: Sensitivitätsanalyse für den kapazitiver Eissensor .....	78
Tabelle 21: Vereisungsereignis 1, 24./25. März 2012 .....	81
Tabelle 22: Vereisungsereignis 2, 04./05. April 2012.....	83
Tabelle 23: Vereisungsereignis 3, 18. April 2012 .....	85
Tabelle 24: Messgenauigkeit und Zusatzfehler Hygro/Thermosensor P 6312 .....	92
Tabelle 25: Sensitivitätsanalyse T&krF-Methodik – Anzahl der Übereinstimmungen, Messstation Großglockner .....	93
Tabelle 26: Mögliche Zustände und ihre Häufigkeit (Bildauswertung : Detektionsmethode).....	95
Tabelle 27: Sensoren und Messgrößen, Vereisungsmessstation Windsfeld.....	98
Tabelle 28: Beginn Vereisungsereignis, 20./21. November 2012 .....	103
Tabelle 29: Ende Vereisungsereignis, 20./21. November 2012 .....	105
Tabelle 30: Kennzahlen der verwendeten Netzvarianten.....	111
Tabelle 31: $T_{\text{Sensor}}$ abhängig von unterschiedlichen Anströmbedingungen .....	115
Tabelle 32: Messergebnisse .....	119
Tabelle 33: Wertepaare für $B_{\text{RIT,T}}$ Faschina .....	A
Tabelle 34: Wertepaare für $B_{\text{RIT,T}}$ Großglockner .....	F
Tabelle 35: Wertepaare für $B_{\text{RIT,R}}$ Windsfeld .....	G



## Anhang A

Wertepaare von  $B_{RIT,T}$  Faschina:

Tabelle 33: Wertepaare für  $B_{RIT,T}$  Faschina

Temperatur in K	$B_{RIT,T}$ Faschina
250,0	0,000
250,5	0,000
251,0	0,000
251,5	0,000
252,0	0,000
252,5	0,000
253,0	0,000
253,5	0,000
254,0	0,000
254,5	0,000
255,0	0,000
255,5	0,000
256,0	0,000
256,5	0,000
257,0	0,000
257,5	0,000
258,0	0,000
258,5	0,000
259,0	0,005
259,5	0,008
260,0	0,010
260,5	0,015
261,0	0,022
261,5	0,026
262,0	0,035
262,5	0,045
263,0	0,055
263,5	0,075
264,0	0,100
264,5	0,250
265,0	0,380
265,5	0,500
266,0	0,600
266,5	0,700
267,0	0,800

267,5	0,870
268,0	0,925
268,5	0,950
269,0	0,960
269,5	0,970
270,0	0,980
270,5	0,990
271,0	0,995
271,5	1,000
272,0	1,000
272,5	1,000
273,0	0,995
273,5	0,990
274,0	0,960
274,5	0,800
275,0	0,680
275,5	0,460
276,0	0,300
276,5	0,150
277,0	0,080
277,5	0,050
278,0	0,030
278,5	0,020
279,0	0,015
279,5	0,010
280,0	0,005
280,5	0,000
281,0	0,000
281,5	0,000
282,0	0,000
282,5	0,000
283,0	0,000
283,5	0,000
284,0	0,000
284,5	0,000
285,0	0,000

## Anhang B

Bilder zu Vereisungsereignis 1, 24. und 25. März 2012, Faschina

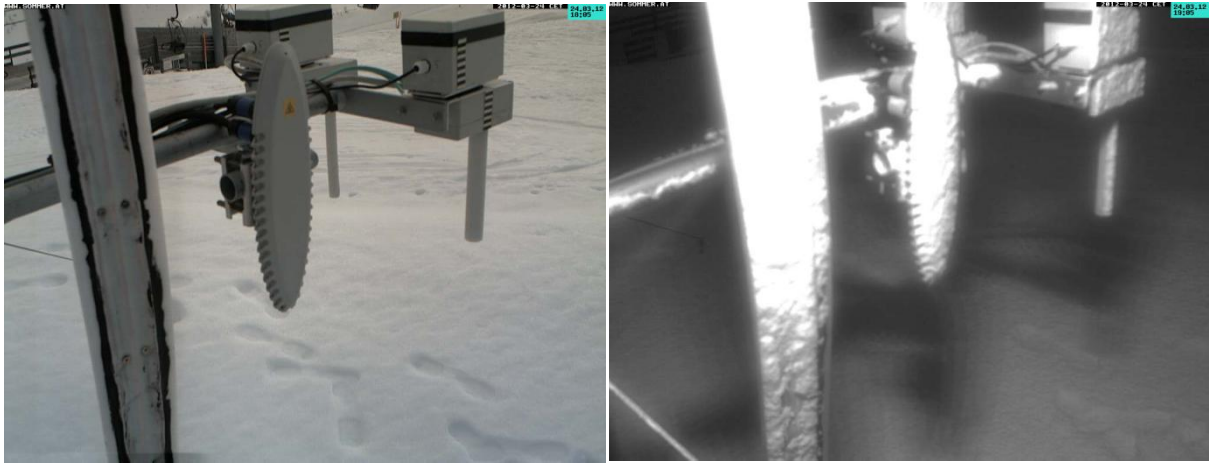


Abbildung 85: Vereisungsereignis 1, 24. März 2012, 18:00 Uhr (links), 19:00 Uhr (rechts)

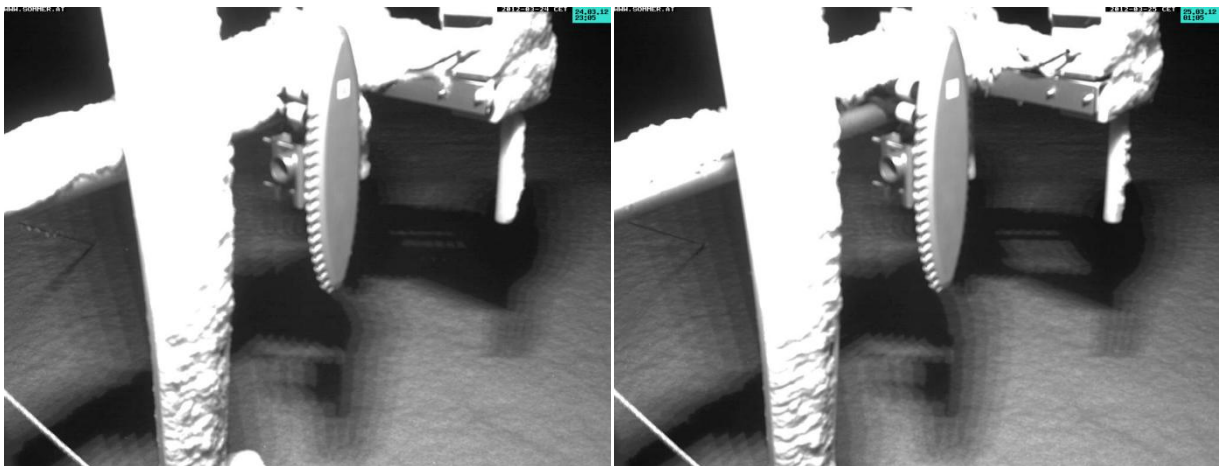


Abbildung 86: Vereisungsereignis 1, 24.03. 2012, 23:00 Uhr (links), 25.03. 01:00 Uhr (rechts)



Abbildung 87: Vereisungsereignis 1, 25.03. 2012, 06:00 Uhr (links), 09:00 Uhr (rechts)

## Anhang C

Bilder zu Vereisungsereignis 2, 04. und 05. April 2012, Faschina



Abbildung 88: Vereisungsereignis 2, 04.04.2012, 18:00 Uhr (links), 19:00 Uhr (links)



Abbildung 89: Vereisungsereignis 2, 04.04.2012, 23:00 Uhr (links), 05.04.2012, 03:00 Uhr (rechts)



Abbildung 90: Vereisungsereignis 2, 05.04.2012, 06:00 Uhr (links), 13:00 Uhr (rechts)

## Anhang D

Bilder zu Vereisungsereignis 3, 18. April 2012, Faschina



Abbildung 91: Vereisungsereignis 3, 18. 04. 2012, 13:00 Uhr (links), 15:00 (rechts)



Abbildung 92: Vereisungsereignis 3, 18. 04. 2012, 17:00 Uhr (links), 19:00 Uhr (rechts)

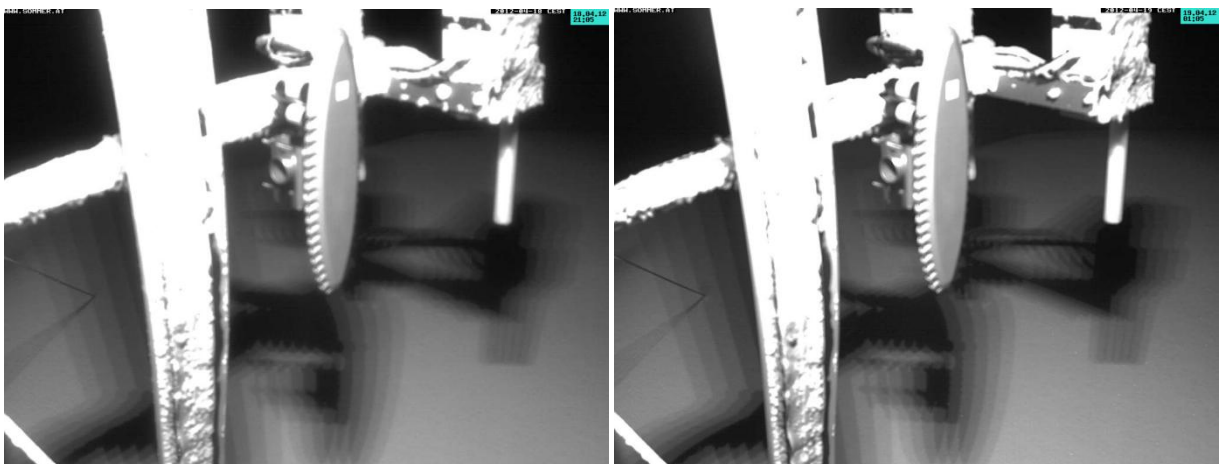


Abbildung 93: Vereisungsereignis 3, 18. 04. 2012, 21:00 Uhr (links), 19. 04. 2012, 01:00 Uhr (rechts)

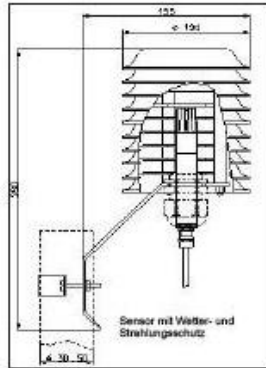
## Anhang E: Datenblatt Thermo-Hygrosensor Ammonit P6312



### Hygro-Thermosensoren

Bestell.-Nr: P 6311 - Temperatur TP  
 P 6312 - Temperatur & Feuchte KP  
 P 6300 - Wetter- und Strahlungsschutz

- Kompakte Meteorologische Sensoren
- Geringer Energieverbrauch mit hoher Genauigkeit
- Messbereich - 30.....+70°C und 0.....100 % RH
- Kombination Hygro-Thermosensor möglich



Alle gezeigten Masse in mm

#### Messprinzip

Die Feuchte- und Temperaturegeber der Serie „p“ sind kompakte Sensoren in Stabausführung mit fest angeschlossenem Kabel. Die relative Feuchte wird über ein kapazitives Messelement erfasst und als aktives Spannungssignal bereitgestellt. Die Temperaturmessung erfolgt über einen PT100-Messwiderstand (1/3 DIN). Das Signal ist ebenfalls als aktives Spannungssignal verfügbar. Der geringe Eigenstrombedarf (kein 20mA-Ausgang!) macht diese Sensoren ideal für den Einsatz in netzunabhängigen Systemen.

Die Sensoren sind erhältlich als alleinige Temperatur- oder in kombinierter Ausführung als Thermo/Hygrogeber.

Sie werden mit einem schützenden Edelstahlsinterfilter ausgeliefert, der einen zuverlässigen Einsatz auch bei großer Belastung (hohe Windschwindigkeit, Salznebel, Sand) gewährleistet.

#### Montage

Die Sensoren sind an einer für die Klimamessung repräsentativen Stelle mit guter Belüftung zu installieren. Zum Schutz gegen Regen und direkte Sonnenstrahlung wird ein geeigneter Wetterschutz angeboten, der mit einer Mastschelle einfach montiert werden kann.

#### Der Wetterschutz ist gesondert zu bestellen!

Ein Sensor sollte so installiert werden, dass das Eindringen von Wasser vermieden wird. Batauung und Spritzwasser schaden dem Sensor nicht, führen aber bis zur restlosen Abtrocknung des Filters zu Fehlmessungen.

#### Wartung

Die Temperaturmessung ist wartungsfrei und kann einfach mit einem zweiten, zuverlässigen Thermometer überprüft werden.

Zur einfachen und zuverlässigen Überprüfung der Feuchtemessung vor Ort oder im Labor ist ein Feuchtenormal erhältlich. Der Schutzfilter sollte nur zur Funktionsüberprüfung mit dem Feuchtenormal vorsichtig abgeschraubt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass das hoch empfindliche Sensorelement nicht berührt wird. Beim Wiederaufschrauben ist zu berücksichtigen, dass der Sensor erst nach völligem Abtrocknen wieder richtig misst.

### Technisches Datenblatt

Hygro- Thermosensor: P6300 / P6311 / P6312

Typ	Temperatur	Feuchte
Messbereich	-30...+70°C	0...100% r.F.
Messgenauigkeit	± 0,2 K	5...95% rF bei 10...40°C; ±/± 2% rF
Zusatzfehler	± 0,004%/K (<10°C, >40°C)	< 0,1%/K (<10°C, >40°C)
Auflösung	0,1 K	1% r.F.
Einstellzeit	5 min.	5 min.
Messprinzip	PT100 – 1/3 DIN	Kapazitiv
Ausgangssignal	DV ... 1V	DV ... 1V
Betriebsspannung	9 - 30 V DC (Eigenstrombedarf ca. 1 mA / 2mA)	
Umgebungstemperatur	-40 °C ... + 80 °C	
Schutzart Sensor/Elektronik	IP 30 / IP 65, Messelemente geschützt durch Edelstahlsinterfilter	
Gewichte	Sensor ohne Kabel: 0,350 kg, Wetterschutz: 1 kg	

### Bestellnummern

Sensoren:	nur Temperatur (TP)	Temperatur & Feuchte (KP)
Bestellnummer	P6311	P6312
Zubehör:		
Wetter- und Strahlungsschutz	P 6300	

### Kabeltypen und Adernfarben

	P6311	P6312
Anschluss	Adernfarben	
1 - Versorgung	grün	grün
2 - Masse	gelb *	gelb *
3 - Temperatur	weiß	weiß
4 - Feuchte	-	braun

Kabeltyp für P6311, P6312: LIYCY 4 x 0,25 mm<sup>2</sup>

\* LIYCY7 x 0,25 qmm, gelb, grau, pink, blau

## Anhang F

Wertepaare von  $B_{RIT,T}$  Großglockner:

Tabelle 34: Wertepaare für  $B_{RIT,T}$  Großglockner

Temperatur in K	$B_{RIT,T}$ Großglockner
250,0	0,005
250,5	0,008
251,0	0,010
251,5	0,015
252,0	0,022
252,5	0,026
253,0	0,035
253,5	0,045
254,0	0,055
254,5	0,075
255,0	0,100
255,5	0,250
256,0	0,380
256,5	0,500
257,0	0,600
257,5	0,700
258,0	0,800
258,5	0,870
259,0	0,875
259,5	0,880
260,0	0,884
260,5	0,889
261,0	0,894
261,5	0,899
262,0	0,904
262,5	0,908
263,0	0,913
263,5	0,918
264,0	0,923
264,5	0,928
265,0	0,933
265,5	0,937
266,0	0,942
266,5	0,947
267,0	0,952

267,5	0,957
268,0	0,961
268,5	0,966
269,0	0,971
269,5	0,976
270,0	0,981
270,5	0,985
271,0	0,995
271,5	1,000
272,0	1,000
272,5	1,000
273,0	0,995
273,5	0,990
274,0	0,960
274,5	0,800
275,0	0,680
275,5	0,460
276,0	0,300
276,5	0,150
277,0	0,080
277,5	0,050
278,0	0,030
278,5	0,020
279,0	0,015
279,5	0,010
280,0	0,005
280,5	0,000
281,0	0,000
281,5	0,000
282,0	0,000
282,5	0,000
283,0	0,000
283,5	0,000
284,0	0,000
284,5	0,000
285,0	0,000



## Anhang G

Wertepaare von  $B_{RIT,T}$  Windsfeld:

Tabelle 35: Wertepaare für  $B_{RIT,R}$  Windsfeld

Temperatur in K	$B_{RIT,T}$ Windsfeld
250,0	0,000
250,5	0,000
251,0	0,000
251,5	0,000
252,0	0,000
252,5	0,005
253,0	0,008
253,5	0,010
254,0	0,015
254,5	0,022
255,0	0,026
255,5	0,035
256,0	0,045
256,5	0,055
257,0	0,075
257,5	0,100
258,0	0,250
258,5	0,380
259,0	0,500
259,5	0,600
260,0	0,700
260,5	0,800
261,0	0,870
261,5	0,876
262,0	0,883
262,5	0,889
263,0	0,895
263,5	0,901
264,0	0,908
264,5	0,914
265,0	0,920
265,5	0,926
266,0	0,933
266,5	0,939
267,0	0,945

267,5	0,951
268,0	0,958
268,5	0,964
269,0	0,970
269,5	0,976
270,0	0,983
270,5	0,989
271,0	0,995
271,5	1,000
272,0	1,000
272,5	1,000
273,0	0,995
273,5	0,990
274,0	0,960
274,5	0,800
275,0	0,680
275,5	0,460
276,0	0,300
276,5	0,150
277,0	0,080
277,5	0,050
278,0	0,030
278,5	0,020
279,0	0,015
279,5	0,010
280,0	0,005
280,5	0,000
281,0	0,000
281,5	0,000
282,0	0,000
282,5	0,000
283,0	0,000
283,5	0,000
284,0	0,000
284,5	0,000
285,0	0,000

## Anhang H

Bilder zum Vereisungsereignis vom 20. 11. 2012, 22:00 bis zum 21. 11. 2012, 17:00 Uhr, Windsfeld

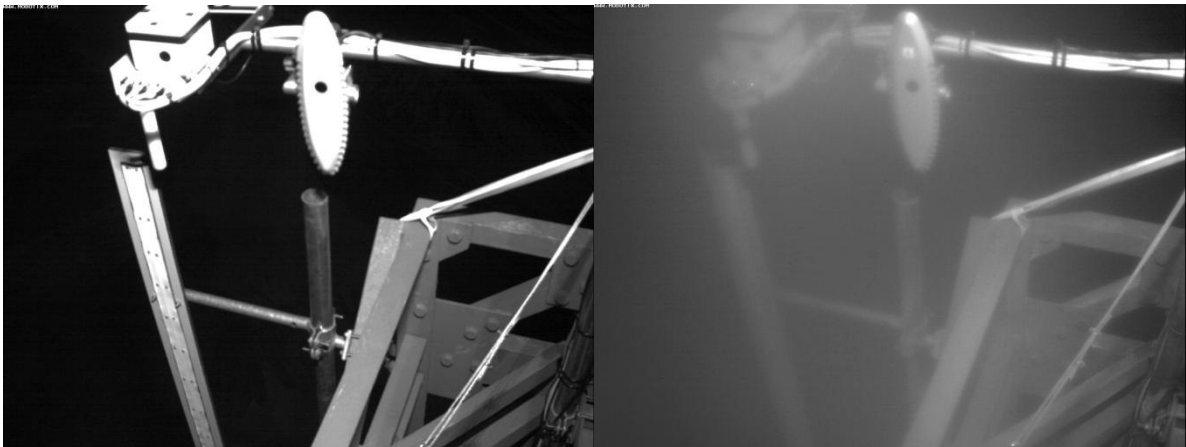


Abbildung 94: Vereisungsereignis, 20. 11. 2012, 22:20 Uhr (links), 21. 11. 2012, 01:00 Uhr (rechts)

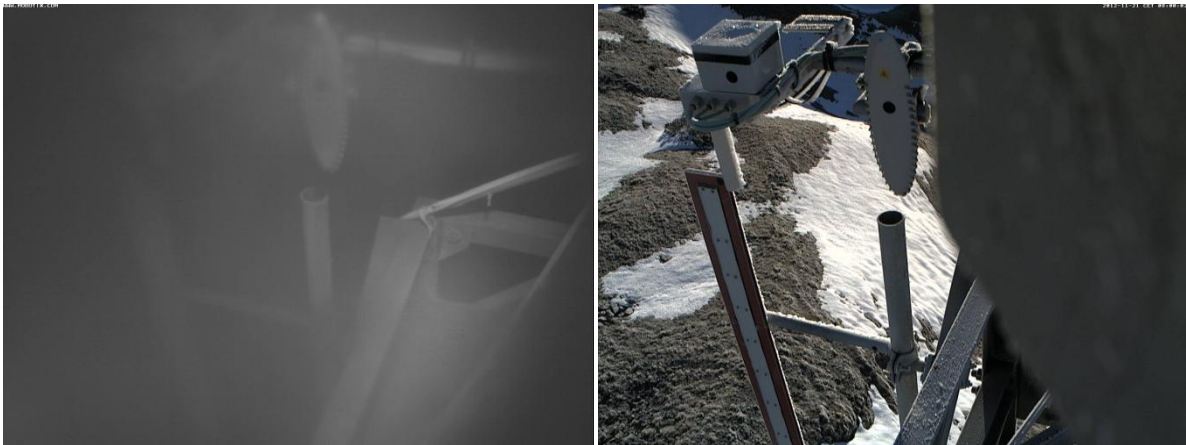


Abbildung 95: Vereisungsereignis, 21. 11. 2012, 04:00 Uhr (links), 21. 11. 2012, 08:00 Uhr (rechts)



Abbildung 96: Vereisungsereignis, 21. 11. 2012, 11:00 Uhr (links), 21. 11. 2012, 14:00 Uhr (rechts)