

Abschlussbericht IcedBlades

Datei: 100480_Abschlussbericht_IcedBlades_sendout

Fraunhofer IWES
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
Am Seedeich 45
27572 Bremerhaven, Germany

Autoren:
Dr. Xin Gu, Zouhair Khadiri-Yazami, Florian Sayer, Thomas Säger

Technische Informationsbibliothek Hannover
Projektträger Jülich

Projektleiter: Gu, Xin <i>Bachhög B</i>	
Unterschrift: <i>i.k. Khadiri</i>	Ort, Datum: 12.4.2017
Geprüft durch/ Freigabe: Sayer, F.	
Unterschrift: <i>F. Sayer</i>	Ort, Datum: 12.4.2017

Vertraulichkeitsklausel:

„Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325494A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

Projektpartner:

VTT Technical Research
Centre of Finland (VTT)



TechnoCentreÉolienGaspésie,
Kanada (TCE)



Senvion SE (eh. REpower)



Germanischer Lloyd Industrial
Services GmbH (GL)



Fraunhofer IWES



Inhalt

1	Kurze Darstellung	10
1.1	Aufgabenstellung	10
1.2	Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens	11
1.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Eingehende Darstellung	14
2.1	IcedBlades 1 – Standortbedingungen und Zertifizierungsrichtlinien.....	14
2.1.1	IcedBlades 1.1 – Untersuchung von Standortbedingungen in klimatisch kalten Regionen	14
2.1.2	IcedBlades 1.2 – Auswertungen verschiedener Zertifizierungsrichtlinien für Rotorblattvereisungen	14
2.1.3	IcedBlades 1.3 – Untersuchung von Teststandorten.....	15
2.2	IcedBlades 2 – Softwareentwicklung, Modellbildung und Simulation	15
2.2.1	IcedBlades 2.1 – Referenzanlagenmodell erstellen	16
2.2.2	IcedBlades 2.3 – Entwicklung einer Schnittstelle für die OneWind Simulationssoftware	16
2.2.3	IcedBlades 2.4 – Gesamtanlagensimulationen mit vereisten Rotorblättern	17
2.2.3.1	Auswirkungen der Vereisung an Rotorblättern	17
2.2.3.2	Auswirkungen von Eismassen an Rotorblättern	18
2.2.3.2.1	Auswirkungen von Eismasse (IEC 61400-1, International Standard “Wind turbines – Part 1: Design requirements”, Edition 4, 2016)	18
2.2.3.2.2	Eismasse Formulierung (GL, 2010).....	19
2.2.3.2.3	Vergleich der Eismasse (IEC 61400-1, International Standard “Wind turbines- Part 1: Design requirements”, Edition 4, 2016) und Eismasse (GL, 2010).....	21
2.2.3.2.4	Aerodynamischer Effekt von Vereisung an Rotorblättern	21
2.2.3.3	Gesamtanlagensimulationen mit vereisten Rotorblättern	23
2.2.4	IcedBlades 2.5 – Machbarkeitsstudie zur Co-Simulation	25
2.2.5	IcedBlades 2.6 – Überarbeitung der Software nach Vergleich mit Meßergebnissen	27
2.3	IcedBlades 3 – Durchführung von Großausführungsmessungen.....	29
2.3.1	IcedBlades 3.1 - Vorbereitung, Installation und Abbau von Messequipment	29
2.3.2	IcedBlades 3.2 - Messkampagne am meteorologischen Messmast des Fraunhofer-Instituts IWES	33
2.3.2.1	Vereisungsdetektion	35
2.3.2.2	Untersuchungen der Vereisungsphasen.....	38
2.3.2.3	Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Wetterbedingungen und Vereisung	40
2.3.2.4	LiDAR-Messkampagne - Untersuchungen zur LiDAR-Messung unter Vereisungsbedingungen	43
2.3.2.5	Entwicklung einer Klassifizierungsbasierte Vereisungsdetektion	46
2.3.3	IcedBlades 3.3 – Durchführungen von Großausführungsmessungen	51
2.4	IcedBlades 4 – Leitfaden und Eisklassen	51
2.4.1	IcedBlades 4.2 – Entwicklung von Eisklassen	51
2.4.2	IcedBlades 4.1 – Entwicklung eines Leitfadens für Rotorblattvereisungen.....	62
2.5	IcedBlades 5 – Vorhersage des Vereisungsrisikos	63
2.5.1	IcedBlades 5.1 - Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Windkraftanlagen.....	63
2.5.1.1	Das COSMO-DE Wettermodell und Vereisungsparameter.....	63
2.5.1.1.1	Der Flüssigwassergehalt	64
2.5.1.1.2	Der Tröpfchendurchmesser mit medianem Volumen.....	65
2.5.1.1.3	Der Vorhersagehorizont.....	66
2.5.1.2	Standardmodell vereisender Strukturen - Das Makkonenmodell	66
2.5.1.2.1	Vereisungsursachen	67
2.5.1.3	Erweiterung des Makkonenmodells	68
2.5.1.3.1	Massenbilanzierung	68
2.5.1.3.2	Die Massenreduzierung	69
2.5.1.4	Validierung des Zylindermodells durch Messungen am Rödeser Berg.....	71

2.5.1.5	Vereisungsmodell für eine Windenergieanlage.....	73
2.5.1.5.1	Die relative Rotorblattgeschwindigkeit.....	74
2.5.1.5.2	Die Reduktion der Eismasse durch Erosion	74
2.5.1.5.3	Die Berechnung der Nusseltzahl.....	74
2.5.2	IcedBlades 5.2 - Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Regionen 75	
2.5.3	IcedBlades 5.3 - Untersuchung der Vereisungsauswirkung auf Windleistungsprognosen und die Einbindung des Vereisungsrisikos in Windleistungsprognosen.....	77
3	Erfolgskontrollbericht 0325494A – Fraunhofer IWES	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.1	Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.3.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.4	Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Literaturverzeichnis	82

Abbildungen

Abbildung 1: OneWind Modelica Bibliothek.....	17
Abbildung 2: Eismassenverteilung entlang Rotor (von der Nabe bis zur Spitze), basierend auf IEC-61400-4	19
Abbildung 3: lineare Extrapolation der Blattkontur um Cmin für GL Verfahren zu erhalten 20	
Abbildung 4: Vergleich verschiedener Ansätze zur Eismasse Verteilung entlang der Blattspannweite.....	21
Abbildung 5: Vergleich von sauberen und vereisten Auftriebsbeiwerte für verschiedene Vereisungsintensitäten.....	23
Abbildung 6: Vergleich von sauberen und vereisten Widerstandsbeiwerte für verschiedene Vereisungsintensitäten.....	23
Abbildung 7: Die Leistung von vereister WKA mit der originalen Pitch-Regelung	24
Abbildung 8: Relativer Leistungsbeiwert gegen Schnelllaufzahl	24
Abbildung 9: Die Leistung von vereister WKA mit der angepassten Pitch-Regelung	25
Abbildung 10: Co-Simulation Verfahren mit DLL Datei	26
Abbildung 11: Co-Simulation Verfahren mit DLL Datei	26
Abbildung 12: Co-Simulation Verfahren mit FMU/FMI	26
Abbildung 13: Co-Simulation Verfahren mit Python	27
Abbildung 14: Altes Balken Modell in OneWindLoads.....	27
Abbildung 15: Neues Balken Modell in OneWindModelicaBibliothek.....	28
Abbildung 16: Standort des 200m Masts von Fraunhofer IWES	29
Abbildung 17: Ausstattung des 200m Mastes vom Fraunhofer IWES	30
Abbildung 18: Darstellung der verschiedenen Vereisungsphasen [IEA Task 19]	31
Abbildung 19: Position der Eissensoren und Kamera	32
Abbildung 20: Eissensoren auf 135m, Kamera auf 140 m und benachbarte Anlagen	33

Abbildung 21: ICEMONITOR auf 80m	33
Abbildung 22: Dauer der Messkampagne am 200 m Mast	34
Abbildung 23: Vergleich verschiedener Sensoren während eines Vereisungsereignisses	35
Abbildung 24: Vergleich der Vereisungsdetektion mit den verschiedenen Methoden	36
Abbildung 25: Kamerabild des Vereisungsereignisses vom 13.02.2015 um 11:52 Uhr	36
Abbildung 26: Vereisungsprofil in den vier Wintern. Vergleich mit einer Langzeitskorrelation	37
Abbildung 27: Bild von Mastumgebung aus 140 m Masthöhe.....	37
Abbildung 28: Verteilung der Vereisungsursache am Standort Rödeser Berg ..	38
Abbildung 29: Häufigkeit der Dauer der meteorologischen Vereisung am Standort Rödeser Berg	39
Abbildung 30: Häufigkeit der Dauer der Inkubationszeit	39
Abbildung 31: Häufigkeit der Dauer der instrumentalen Vereisung	40
Abbildung 32: Häufigkeit der Dauer der Erholungszeit	40
Abbildung 33: Verteilung der Windgeschwindigkeit unter instrumentale Vereisung	41
Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der Temperatur unter instrumentale Vereisung	41
Abbildung 35: Verteilung der relativen Luftfeuchte mit der Temperatur unter (rot) und ohne instrumentale Vereisung (grün).....	42
Abbildung 36: LiDAR Windcuve V2 während der Messkampagne am Rödeser Berg	43
Abbildung 37: Windmessungen verschiedener Windmessgeräte während eines langen Vereisungsereignisses.....	43
Abbildung 38: Vergleich LiDAR und Ultraschallanemometer (Links) auf 140 m sowie LiDAR und Cupanemometer (rechts) auf 180 m.....	44
Abbildung 39: Ceilometer-Messungen während tiefliegende Wolken.....	44
Abbildung 40: Verfügbarkeit der LiDAR-Messungen im Fall 1 (Tiefe Wolken) .	45
Abbildung 41: Ceilometer-Messungen im Fall 2 (klarer Himmel)	45
Abbildung 42: Verfügbarkeit der LiDAR-Messungen im Fall 2 (Klarer Himmel)	46

Abbildung 43: Klassifikationsbasierte Methode zur Detektion von instrumenteller Vereisung
47

Abbildung 44: Genauigkeit der beiden Methoden in Form einer "Confusion Matrix" für Fall1
48

Abbildung 45: Genauigkeit der beiden Methoden in Form einer "Confusion Matrix" für Fall2
49

Abbildung 46: Darstellung der Modellausgabe sowie des gemessenen Vereisungsereignisses in
Zeitreihe 50

Abbildung 47: Genauigkeit der KNN-Methoden nach der Nachbearbeitung 50

Abbildung 48: IWES 2.5 Windturbine Modell in Dymola..... 52

Abbildung 49: IWES 2.5 MW Windturbine simuliert in Dymola..... 52

Abbildung 50: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf Blatt-Nabe-Verbindung:
S/N Steigung $m=10$ 54

Abbildung 51: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf drehende Nabe: S/N
Steigung $m=4$ 54

Abbildung 52: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf Azimutlager: S/N
Steigung $m=4$ 55

Abbildung 53: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf Turmboden: S/N
Steigung $m=4$ 55

Abbildung 54: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf Blatt-Nabe-
Verbindung: S/N Steigung $m=10$ 56

Abbildung 55: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf drehende
Nabe: S/N Steigung $m=4$ 56

Abbildung 56: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf Azimutlager:
S/N Steigung $m=4$ 57

Abbildung 57: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf Turmboden:
S/N Steigung $m=4$ 57

Abbildung 58: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf Blatt-Nabe-
Verbindung: S/N Steigung $m=10$ 58

Abbildung 59: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf drehende
Nabe: S/N Steigung $m=4$ 58

Abbildung 60: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf Azimutlager: S/N Steigung $m=4$	59
Abbildung 61: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf Turmboden: S/N Steigung $m=4$	59
Abbildung 62: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf Blatt-Nabe-Verbindung: S/N Steigung $m=10$	60
Abbildung 63: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf drehende Nabe: S/N Steigung $m=4$	60
Abbildung 64: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf Azimutlager: S/N Steigung $m=4$	61
Abbildung 65: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf Turmboden: S/N Steigung $m=4$	61
Abbildung 66: Der LWC in Abhängigkeit des MVD's für Stratuswolken.....	66
Abbildung 67: Darstellung der verschiedenen Vereisungsursachen und der daraus resultierenden Vereisungsarten	68
Abbildung 68: Massenbilanzierung der vereisenden Zylinderstruktur	69
Abbildung 69: Vereinfachtes Blockdiagramm des physikalischen Vereisungsmodells	70
Abbildung 70: Messmast und Umgebung.	71
Abbildung 71: Vergleich von Modellvorhersage der Eismasse auf unterschiedlichen Modellevels mit der Wägung durch den ICEMONITOR.....	72
Abbildung 72: Webcam Bilder vom 05.12.2014 (links) bzw. 26.12.2014 (rechts)	72
Abbildung 73: Die Integration des Zylinders in das Rotorblatt einer WEA.....	73
Abbildung 74: Schnitt durch das berechnete Rotorblattelement	74
Abbildung 75: Links: Eisansatz für längliche Objekte nach ISO 12494. Rechts: Bild eines vereisten Rotorblatts.....	75
Abbildung 76: Messmast und Umgebung. Blau dargestellt sind die Gitterpunkte, an denen die COSMO-DE Variablen definiert sind. Kartenmaterial aus OpenStreetMap.	76
Abbildung 77: 1-Stunden Vorhersage für den Maststandort (gekennzeichnet durch Stern) und die Umgebung	76

Abbildung 78: 6–Stunden Vorhersage für den Maststandort (gekennzeichnet durch Stern) und die Umgebung	77
Abbildung 79: Gemessene Leistung und Windleistungsprognose für den Windpark Ulrichstein im Winter 2013.....	79
Abbildung 80: Gemessene Leistung und Windleistungsprognose für den Windpark Ulrichstein im Winter 2014.....	79
Abbildung 81: Leistungskurven für verschiedene prognostizierte Vereisungsmassen.	80

Tabellen

Tabelle 1: Zeitplan über die Projektdauer in Quartalsschritten	13
Tabelle 2: Simulationslastfälle.....	15
Tabelle 3: Eigenschaften der 2.5MW–Anlage–Modell.....	16
Tabelle 4: Inputparameter für den Fall1	47
Tabelle 5: Inputparameter für den Fall 2	47
Tabelle 6: Definition von Lastkomponenten	53
Tabelle 7: Wettervorhersageparameter, die für die Windleistungsprognose vorliegen	64
Tabelle 8: Bezeichnungen der Vorhersagezeiträume.....	66
Tabelle 9: Kenndaten des Windparks Ulrichstein.....	78
Tabelle 10: Ausfallzeiten sowie Gesamtzeiten (Stunden der fünf Monate, die einer Vereisungsklassen zugeordnet werden können) der Leistungsmessung für vier verschiedene massenabhängige Vereisungsklassen	81

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens „IcedBlades“ war eine Verständnisverbesserung zum Verhalten von Windkraftanlagen (WKA) in kalten Klimaregionen, um eine höhere Zuverlässigkeit der Anlagen zu erreichen. Dabei steht in diesem Projekt die Vereisung der Blätter im Fokus, da diese zu einer veränderten Aerodynamik und Gesamtanlagendynamik führt (u.a. auch durch Massenimbilanzen). Somit können 10% aller installierten Anlagen in den klimatisch kalten Gebieten der USA, Kanadas, Europas und Chinas liegen, so dass ihr Anteil in etwa dem der prognostizierten Offshore-Windenergie entspricht (Laakso, 2011).

Dazu wurden neue numerische Modelle entwickelt und in der Simulationssoftware OneWind integriert, die den Eisansatz an Rotorblättern von WKA realitätsnah abbilden und somit eine Ermittlung durch ändernde aerodynamische Eigenschaften der Rotorblättern zulässt. Dies ist erforderlich, da nur mit Kenntnissen zu den realen aerodynamischen Eigenschaften von vereisten Rotorblättern das aerodynamische und das dynamische Verhalten der WKA im Hinblick auf die Strukturermüdung und die Leistungsabgabe untersucht werden kann.

Um die Rotorblattvereisungsklassen zu entwickeln, wurden die Dauer und der Umfang der Vereisung berücksichtigt. Fraunhofer IWES hat die Ergebnisse zur Entwicklung von Eisklassen in Zusammenarbeit mit der DNV.GL ausgewertet. Eine Eisklasse wurde vorgeschlagen.

Um den Zusammenhang zwischen Wetterbedingungen und Vereisung in einem Mittelgebirgsstandort zu untersuchen, wurde eine umfassende Messkampagne am meteorologischen Meßmast des Fraunhofer IWES durchgeführt. Die Ergebnisse bieten gutes Verständnis für die verschiedenen Vereisungsphasen. Das gemessene Vereisungsprofil zwischen 10 m und 200 m gibt einen interessanten Überblick über die vertikale Verteilung der Vereisung im gesamten Rotorblattbereich über mehreren Jahren. Gleichzeitig wurde ein Modell zur automatischen Vereisungsdetektion auf Basis von Klassifikationsmethoden entwickelt. Außerdem wurde die Genauigkeit der laserbasierte Fernmeßgeräte „LiDAR“ unter Vereisung im Rahmen einer zusätzlichen Meßkampagne untersucht.

Des Weiteren wurde ein Verfahren zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Windenergieanlagen und Regionen entwickelt. Mit dem entwickelten Vereisungsmodell ist eine Vorhersage des Vereisungsrisikos für die nächsten 8 Stunden für beliebige Standorte möglich. Das Modell wurde auf Basis des numerischen Wetterprognosemodells COSMO-DE erfolgreich entwickelt. Herausforderungen konnten allerdings identifiziert werden.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit haben das Verständnis der Ingenieure für die Herausforderungen, die mit der Errichtung von WKA in kalten Klimazonen einhergehen, erhöht. Darüber hinaus dient das Forschungsvorhaben dem weiteren Ausbau der internationalen Kooperationen und der Mitarbeit im IEA Implementing Agreement Task 19 (Wind Energy in Cold Climates), dem die Bundesregierung 2005 beigetreten ist.

Dieser Bericht fasst die Arbeit zusammen, welche von Fraunhofer IWES in Bremerhaven und Kassel durchgeführt wurden.

1.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde von September 2013 bis August 2016 bearbeitet. Im Februar 2012 wurde der Projektantrag für IcedBlades gestellt, der Zuwendungsbescheid lag zum 1. Oktober 2013 vor, sodass nahtlos mit den Arbeiten am IcedBlades begonnen werden konnte.

Eine ausführlichere Bewertung des Ablaufs des Projekts befindet sich sowohl in den jeweiligen Sachberichten als auch im Teil II dieses Abschlussberichts.

Tabelle 1 zeigt die Arbeitspakete und Zeitrahmen für ihre Erfüllung. Das Fraunhofer IWES in Bremerhaven und Kassel beteiligte sich an die erste vier Arbeitspaketen des Verbundvorhabens. Die technisch-wissenschaftlichen Arbeitsziele dieser Arbeitspakete des Verbundvorhabens sind wie folgend gelistet:

- **IcedBlades 1** – Untersuchung und Vergleich von Standortbedingungen in deutschen Mittelgebirgen und Skandinavien hinsichtlich saisonal vorhandener Vereisungsbedingungen. Auswertungen verschiedener Richtlinien, Standards, Normen und Literatur zu Rotorblattvereisungen.
- **IcedBlades 2** – Entwicklung von Methoden zur Modellierung des Eisansatzes an Rotorblättern in der Modellersprache Modelica.
- **IcedBlades 3** – Durchführung von Großausführungsmessungen.
- **IcedBlades 4** – Entwicklung eines Leitfadens (Technical Note) für Rotorblattvereisungen und Entwicklung von Eisklassen.
- **IcedBlades 5** – Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Windkraftanlagen und Regionen. Untersuchung der Vereisungsauswirkung auf und die Einbindung des Vereisungsrisikos in Windleistungsprognosen.

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Arbeitspakete IcedBlades 2 und IcedBlades 4 gab es eine Zusammenarbeit von Juli 2014 bis März 2016 zwischen Fraunhofer IWES, DNV.GL und VTT Technical Research Center in Finnland. Das Fraunhofer IWES hat die numerischen Simulationen zur Entwicklung von Eisklassen durchgeführt und ausgewertet. In Kooperation mit dem VTT und dessen Erfahrung mit der Eisbildung an WKA sowie dem Wissen des Fraunhofer IWES im Bereich der Gesamtanlagensimulation erfolgt dann die endgültige Ausarbeitung von Eisklassen in Zusammenarbeit mit dem DNV.GL.

PSP-Code			2013				2014				2015				2016		
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
icedBlades-1	Arbeitspaket 1: Standortbedingungen und Zertifizierungsrichtlinien																
icedBlades-1.1	Untersuchung von Standort- bedingungen in klimatisch kalten Regionen	IWES															
		VTT															
		RES/TCE															
icedBlades-1.2	Auswertungen verschiedener Zertifizierungsrichtlinien zu Rotorblattvereisungen	IWES															
		GL															
		VTT															
icedBlades-1.3	Untersuchung von Teststandorten(deutsche Mittelgebirge/ Kanada)	IWES															
		GL															
		VTT															
		RES/TCE															
icedBlades-2	Arbeitspaket 2: Softwareentwicklung, Modellbildung und Simulation																
icedBlades-2.1	Referenzanlagenmodell erstellen	IWES															
icedBlades-2.2	Entwicklung einer Datenbank mit vereisten aerodynam. Profilen	VTT															
icedBlades-2.3	Entwicklung von Schnittstellen für die OneWind Simulationssoftware	IWES															
		VTT															
icedBlades-2.4	Gesamtanlagenimulationen mit vereisten Rotorblättern	IWES															
		VTT															
		RES/TCE															
icedBlades-2.5	Machbarkeitsstudie einer Co- Simulation	IWES															
icedBlades-2.6	Überarbeitung der Software nach Vergleich mit Meßergebnissen	IWES															
		VTT															
		RES/TCE															
icedBlades-3	Arbeitspaket 3: Durchführungen von Großausführungs-messungen																
icedBlades-3.1	Vorbereitung, Installation und Abbau von Meßequipment	IWES															
		VTT															
		RES/TCE															
icedBlades-3.2	Meßkampagne am meteorologischen Meßmast des Fraunhofer-Instituts IWES	IWES															
icedBlades-3.3	Durchführung von Leistungs- und Lastenmessungen an der Test- Windkraftanlage	IWES															
		GL															
		VTT															
		RES/TCE															

IcedBlades-4		Arbeitspaket 4: Leitfaden (Techn. Note) und Eisklassen																				
IcedBlades-4.1	Entwicklung eines Leitfadens (Technical Notes) für Rotorblattvereisungen	IWES																				
		GL																				
		VTT																				
		RES/TCE																				
IcedBlades-4.2	Entwicklung von Eisklassen	IWES																				
		GL																				
		VTT																				
		RES/TCE																				
IcedBlades-5		Arbeitspaket 5: Vorhersage des Vereisungsrisikos																				
IcedBlades-5.1	Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Windkraftanlagen	IWES																				
		RES/TCE																				
IcedBlades-5.2	Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Regionen	IWES																				
		RES/TCE																				
IcedBlades-5.3	Untersuchung der Vereisungsauswirkung auf und die Einbindung des Vereisungsrisikos in Windeleistungsprognosen	IWES																				
		Projektleitung																				

Tabelle 1: Zeitplan über die Projektdauer in Quartalsschritten

2 Eingehende Darstellung

In dem Verbundvorhaben „Entwicklung von Methoden zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Windkraftanlagen in klimatisch kalten Regionen Deutschlands und Nordeuropa“ wurden im Berichtszeitraum 01.09.2015 - 31.08.2016 folgende Arbeiten und Ergebnisse erzielt:

2.1 IcedBlades 1 – Standortbedingungen und Zertifizierungsrichtlinien

IcedBlades 1 fokussierte auf der Auswertung der meteorologischen Messdaten von Standorten in Deutschland und in Skandinavien. Verfügbare Informationen, u.a. Zertifizierungsrichtlinien, Standards, Normen und Literatur wurden ausgewertet. Ein Standort für Vereisungsmessungen an einer Windkraftanlage des Kooperationspartner Senvion wurde ausgewählt. Das Wissen, dass in IcedBlades 1 gesammelt wurde, wurde in IcedBlades 2, IcedBlades 3 und IcedBlades 4 weiter genutzt.

2.1.1 IcedBlades1.1 – Untersuchung von Standortbedingungen in klimatisch kalten Regionen

Für den Mittelgebirgsstandort Rödeser Berg in Deutschland wurde eine umfassende Messkampagne am 200m Mast des Fraunhofer IWES durchgeführt. Als Hauptergebnis der Messungen in vier Wintern konnte gezeigt werden, dass die Vereisung für die Windenergieanlagen in solchen Standorten ein sehr relevantes Thema ist. Das Vereisungsprofil zwischen 10 m und 200 m zeigt, dass die Vereisungsdauer meistens mit der Höhe zunimmt. Mehr als 760 Vereisungstunden konnten in einem Jahr detektiert werden. Der Temperaturbereich liegt am häufigsten zwischen 1 °C und – 4 °C. Vereisungsdauer variiert zwischen wenige Stunden und zwei Wochen. Außerdem zeigt die Verteilung der Vereisungsursachen im untersuchten Zeitraum von vier Wintern, dass das sogenannte In-Cloud-Icing die häufigste Ursache für Vereisung mit 87% ist. Die Niederschlagvereisung liegt bei 13%.

Detaillierte Untersuchungen der Vereisungsbedingungen am Mittelgebirgsstandort Rödeser Berg in Deutschland sind im Abschnitt 2.3.2 IcedBlades 3.2 - Messkampagne am meteorologischen Messmast des Fraunhofer-Instituts IWES – ausführlich dargestellt.

2.1.2 IcedBlades 1.2 – Auswertungen verschiedener Zertifizierungsrichtlinien für Rotorblattvereisungen

Verfügbare Zertifizierungsrichtlinien, Normen und Standards einschließlich IEC 61400-1 Edition 3 (IEC 61400-1, International Standard "Wind turbines – Part 1: Design requirements", Edition 3, IEC, 2005 + Amendment A1, 2010), GL Richtlinie Edition 2010 (GL, 2010) und Richtlinie für Windenergieanlagen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt, März 2012) hinsichtlich der Vorgaben zur Lasten- und Leistungsberechnung vereister Windkraftanlagen wurden vom Projektpartner DNV.GL ausgewertet. Anhand dieser Auswertung hat das Fraunhofer IWES den DNV.GL unterstützt, um die Simulationslastfälle für die Untersuchung im IcedBlades 2 zu entwickeln. Die Simulationslastfälle wurden festgelegt und sind in Tabelle 2 gelistet.

Mass imbalance				
Ice scenarios	Ice intensity	Mass or Aerodynamics influenced	Imbalance	Icing frequency (days)
4	Average Icing	Mass influenced IECed4	2Blades Iced	7
5	Average Icing	Mass influenced GL50% (Dibt)	2Blades Iced	7
6	Average Icing	Mass influenced GL	2Blades Iced	7
Aerodynamic penalties				
Ice scenarios	Ice intensity	Mass or Aerodynamics influenced	Imbalance	Icing frequency (days)
7	Light icing	Aerodynamics influenced	3Blades Iced	7
11	Moderate icing	Aerodynamics influenced	3Blades Iced	7
Aerodynamic imbalance				
Ice scenarios	Ice intensity	Mass or Aerodynamics influenced	Imbalance	Icing frequency (days)
8	Light icing	Aerodynamics influenced	2Blades Iced	7
9	Light icing	Mass (IECed4) + Aerodynamics influenced	2Blades Iced	7
12	Moderate icing	Aerodynamics influenced	2Blades Iced	7
13	Moderate icing	Mass (IECed4) + Aerodynamics influenced	2Blades Iced	7
Icing frequencies				
Ice scenarios	Ice intensity	Mass or Aerodynamics influenced	Imbalance	Icing frequency (days)
17	Moderate icing	Mass (IECed4) + Aerodynamics influenced	2Blades Iced	1
18	Moderate icing	Mass (IECed4) + Aerodynamics influenced	2Blades Iced	10.42
19	Moderate icing	Mass (IECed4) + Aerodynamics influenced	2Blades Iced	31.25
20	Moderate icing	Mass (IECed4) + Aerodynamics influenced	2Blades Iced	62.5
21	Moderate icing	Mass (IECed4) + Aerodynamics influenced	2Blades Iced	93.75

Tabelle 2: Simulationslastfälle

2.1.3 IcedBlades 1.3 – Untersuchung von Teststandorten

Aufgrund der späten Projektbewilligung für die deutschen Partner hat Senvion, entgegen der ursprünglichen Planung, dem Fraunhofer IWES und dem DNV.GL Messdaten von einer bereits früher durchgeführten Vereisungsmess-Kampagne zur Verfügung gestellt. Dies war für den reibungslosen Projektfortschritt erforderlich.

Die zur Verfügung gestellten Daten stammen aus unabhängig vom IcedBlades-Projekt durchgeführten Vereisungsmessungen mit einer 2 Megawatt-Windkraftanlage von Senvion des ebenfalls am Projekt beteiligten Partners TCE in Kanada.

Diese Messdaten wurden bereits vor dem Projektstart in Deutschland von Senvion in Zusammenarbeit mit dem finnischen Projektpartner VTT mit entsprechenden Daten der nicht vereisten Anlage verglichen, und so der Einfluss der Vereisung auf die Leistung und die Lasten der Anlage untersucht. Aus Geheimhaltungsgründen stellt Senvion als Hersteller der Windkraftanlage allerdings keine anlagenspezifischen Daten zur Verfügung, so dass eine direkte Simulation dieser Windkraftanlage mittels der am Fraunhofer-Institut entwickelten OneWind-Software nicht möglich ist. Als Alternative wird nun eine wesentlich größere 2.5 Megawatt-Windkraftanlage vom Fraunhofer-Institut zur Vereisungssimulation herangezogen, deren erforderlichen Anlagenwerte zur Verfügung stehen. Auf diesem Wege lässt sich dann in vergleichbarer Weise der relative Einfluss der Vereisung auf die Leistung und die Lasten untersuchen, wie es bereits für die Anlage von Senvion geschehen ist. Zudem lassen sich Größeneffekte zwischen den verschiedenen Megawatt-Klassen beider Anlagen vergleichen.

2.2 IcedBlades 2 – Softwareentwicklung, Modellbildung und Simulation

IcedBlades 2 beschäftigte sich mit der Entwicklung eines numerischen Modells in der Simulationssoftware Onewind, mit dem der Eisansatz und die daraus resultierenden

Lasten an den Rotorblättern von Windkraftanlagen bestimmt werden können. Mithilfe dieses Modells wurde das Verständnis der Ingenieure im Hinblick auf das dynamische Verhalten von Windkraftanlagen unter dem Einfluss von Rotorblattvereisungen verbessert.

2.2.1 IcedBlades 2.1 – Referenzanlagenmodell erstellen

Ein 2.5MW-Anlagen-Modell vom Fraunhofer IWES in Bremerhaven wurde als das Referenzanlagenmodell für das Projekt ausgewählt und in OneWind implementiert.

Die zentralen Eigenschaften der Windkraftanlage sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Rated Power	2.5	MW	Rotor Cone Angle	2.5	degree
Cut-in Wind Speed	3	m/s	Rotor Overhang	3.55	m
Rated Wind Speed	10.8	m/s	Blade Length	48.5	m
Cut-out Wind Speed	23	m/s	Hub Diameter	3	m
Cut-in Rotor Speed	6.72	rpm	Tower Height	90	m
Rated Rotor Speed	13	rpm	Tilt Angle	5	degree
Rated Tip Speed	68	m/s	Gearbox Ratio	119:1	---
Rotor diameter	100	m	Wind Class	IEC II	---
Control system	Variable Speed, Collective Pitch				
Generator	Asynchronous Induction Generator				

Tabelle 3: Eigenschaften der 2.5MW-Anlage-Modell

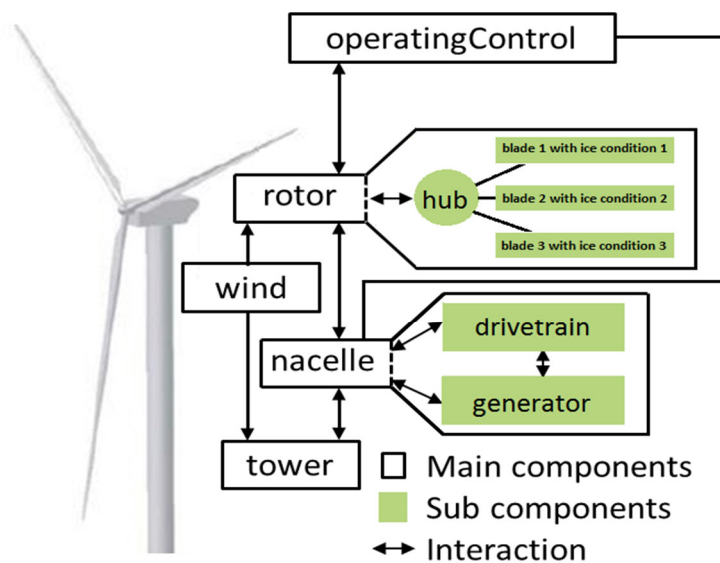
2.2.2 IcedBlades 2.3 – Entwicklung einer Schnittstelle für die OneWind Simulationssoftware

OneWind® Modelica-Bibliothek ist ein komponentenbasiertes Modell von WKA, das am Fraunhofer IWES entwickelt wurde. Die Entwicklung von OneWind Modelica-Bibliothek basiert auf der Modelica Sprache, die eine objektorientierte und Gleichungsbasierte Sprache für die Beschreibung komplexer Systeme ist. OneWind wendet ein strukturelles auf der Modal-Reduktionsmethode basiertes Balkenmodell um die Deformation von Rotorblättern und Turm von WKA zu modellieren. Es ist ein aero-servo-elastisches WKA-Lastsimulationswerkzeug im Zeitbereich, das Strukturmechanik, Aerodynamik, Regelung und externe Lasten (Wind oder weiter gefasst Umwelt) in Beziehung zueinander setzt. Es enthält auch alle unabhängigen Subkomponenten von sowohl Offshore- und Onshore-WKA wie Rotor, Antriebsstrang, Generator, Steuerung und Turm sowie Wind- und Wellenmodelle.

Zu den OneWind Funktionen gehört die Möglichkeit, die vorhandenen Funktionalitäten auszutauschen oder zu ändern. Auch die Erweiterung durch anwenderspezifische Funktionalitäten ist erwähnenswert. Die Freiheitsgrade (DOF) sind Starrkörperbewegungen DOF und modal DOF. Die modale Verschiebungsreaktion wird durch Eigenvektoren multipliziert, um die Lösung der Bewegungsgleichung in dem geometrischen Koordinatensystem zu erhalten.

In diesem Projekt werden Eisbildungs-Modelle basierend auf verschiedenen Vereisungsszenarien implementiert. Eisbildungs-Szenarien zeichnen sich durch ihre Intensität sowie eisinduzierte Massenänderungen und aerodynamische Ungleichgewichte aus.

OneWind wurde um eine Schnittstelle erweitert, um die ermittelten aerodynamischen Beiwerte und die Massen von den vereisten Rotorblättern zu integrieren. So lässt sich der Einfluss vereister Rotorblätter auf das dynamische Verhalten der Gesamtanlage untersuchen. Im Vergleich zu anderer Simulationssoftware (z.B. Bladed) ist es dabei ein zentraler OneWind Vorteil, dass verschiedene Vereisungsbedingungen für jedes Rotorblatt verwenden können (Abbildung 1).



Onshore wind turbine with corresponding component instances and interaction.

Abbildung 1: OneWind Modelica Bibliothek

2.2.3 IcedBlades 2.4 – Gesamtanlagensimulationen mit vereisten Rotorblättern

2.2.3.1 Auswirkungen der Vereisung an Rotorblättern

Der Einfluss von Eisansatz an Rotorblättern von WKA hat enorme Auswirkungen. Hier eine kurze Zusammenfassung:

- Reduzierung der Leistungsabgabe durch ein Fehlverhalten des Turbinenreglers.
- Inhomogene Eis Verteilung auf Rotorblättern verursacht aerodynamisches und strukturelles Ungleichgewicht, das die Belastung der Komponenten erhöht.
- Ein möglicher Eiswurf stellt dabei eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit dar.

- Vereisung beeinflusst Windmessungen und führt damit in der Regel zu Messfehlern oder Datenverlusten
- Eis an Rotorblättern kann den Geräuschpegel einer WKA erhöhen.

Als Folge müssen die Auswirkungen von Rotorblatteisbildung auf aerodynamischen Koeffizienten (Auftrieb und Widerstand) sowie die Massenverteilung in der Konstruktion von Windenergieanlagen für vereisungsgefährdete Regionen berücksichtigt werden. In den folgenden Abschnitten (2.2.3.2 und 2.2.3.3) werden die beiden Folgen der Rotorblattvereisung basierend auf den relevanten Methoden und Leitlinien untersucht.

2.2.3.2 Auswirkungen von Eismassen an Rotorblättern

2.2.3.2.1 Auswirkungen von Eismasse (IEC 61400-1, International Standard "Wind turbines – Part 1: Design requirements", Edition 4, 2016)

Die Dauer der Vereisung an Rotorblättern variiert deutlich geographisch und jährlich. Basierend auf IEC - 61400-4 (IEC 61400-1, International Standard "Wind turbines – Part 1: Design requirements", Edition 4, 2016) wird empfohlen, die Auswirkungen von Vereisung auf eine WKA mit Messungen vor Ort zu beurteilen. Jedoch kann die Vereisungsdauer, im Falle der Nichtverfügbarkeit von Messungen, mit 750 Stunden jährlich angesetzt werden. Es wird angenommen, dass die zusätzliche Eismasse an der Blattvorderkante angreift (letztlich eine Art Linienmasse an der Blattvorderkante). Die Eismassenverteilung erhöht sich linear von Null in der Rotorachse auf den Maximalwert an der Rotorspitze. Die Eislastverteilung wird wie folgt berechnet

$$M \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right] = A \cdot C_{85\%} \cdot r \quad (1)$$

mit:

M = Masseverteilung an der Vorderkante des Rotorblatts

A = $0.125 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$, $C_{85\%}$ = Sehnenlänge bei 85% Rotorradius [m], r = Rotorradius [m]

Die Eismassenverteilung entlang des Rotorblatts (von der Nabe bis zur Spitze) wird in Abbildung 2 gezeigt.

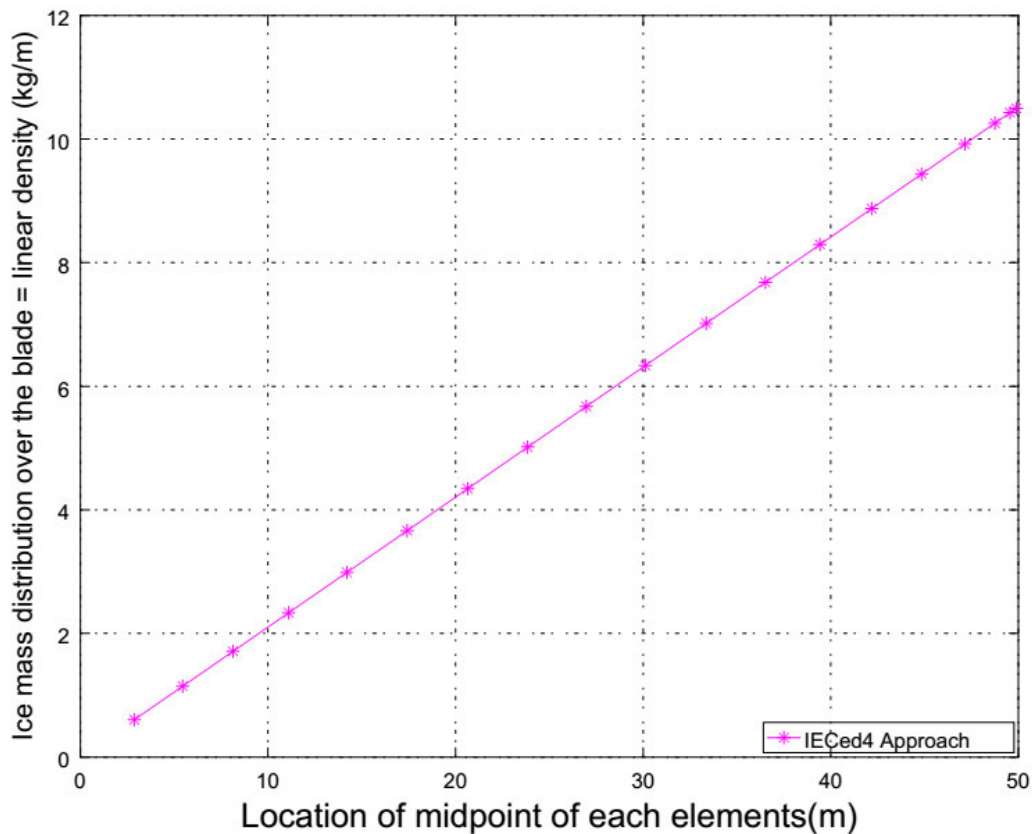


Abbildung 2: Eismassenverteilung entlang Rotor (von der Nabe bis zur Spitze), basierend auf IEC-61400-4

- ✓ Anzahl der Blattelemente = 19
- ✓ Sehnenlänge bei 85 % Rotorradius[m] = 1.68325
- ✓ $A = 0.125 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
- ✓ Nabe Radius = 1.5

2.2.3.2.2 Eismasse Formulierung (GL, 2010)

Nach Angaben der GL-Richtlinie für nicht rotierten Teile von Windenergieanlagen muss mit Eisbildung auf allen witterungsausgesetzten Oberflächen (Dicke 30 mm) gerechnet werden. Die Dichte des Eises sollte als $\rho = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angesehen werden. Im Falle von Stillstand sollen die Rotorblätter auch auf allen Seiten für den Grad der Eisbildung geprüft werden. Für die rotierten Rotoren sollten beide Bedingungen "Eisbildung auf alle Rotorblätter (symmetrisch)" und "Eisbildung auf alle Rotorblätter mit einer Ausnahme (asymmetrisch)" untersucht werden.

Die Eis Massenverteilung (Masse / Einheitslänge) für ein Rotorblatt wird auf der Vorderkante angenommen. Es erhöht sich linear von Null in der Rotorachse auf den Wert μ_E am halben Radius, und bleibt dann auf dem äußersten Radius konstant. Der Wert μ_E wird wie folgt berechnet (GL, 2010):

$$\mu_E = \rho_E \cdot k \cdot C_{\min} (C_{\max} + C_{\min}) \quad (2)$$

μ_E = Massenverteilung auf die Anströmseite des Rotorblatts bei der halben Rotorradius

ρ_E = Dichte des Eisens $\rho = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$k = 0.00675 + 0.3 \exp(-0.32 R/R_1)$, dimensionslos

R = Rotorradius [m]

$R_1 = 1$ [m]

C_{\max} = maximale Sehnenlänge [m]

C_{\min} = Sehnenlänge an der Blattspitze, linear extrapoliert von der Blattkontur

Basierend auf der Definition in GL Verfahren, ist C_{\min} nicht die Sehnenlänge des letzten Blattelements (Mindestsehnenlänge, die an der Spitze ist) sondern soll durch lineare Extrapolation der Blattkontur berechnet werden. Die äußersten Teile der Sehnenverteilung werden durch eine Linie verbunden, deren Schnittpunkt von der Blattspitze Abstand als C_{\min} angesehen wird.

In der folgenden Skizze (Abbildung 3) schneidet die grüne Linie die y-Achse bei 0,6 Meter. Aufgrund der symmetrischen Verteilung der Sehnenlänge entlang des Blattes, verdoppelt sich dieser Wert ($C_{\min} = 1.2$ m).

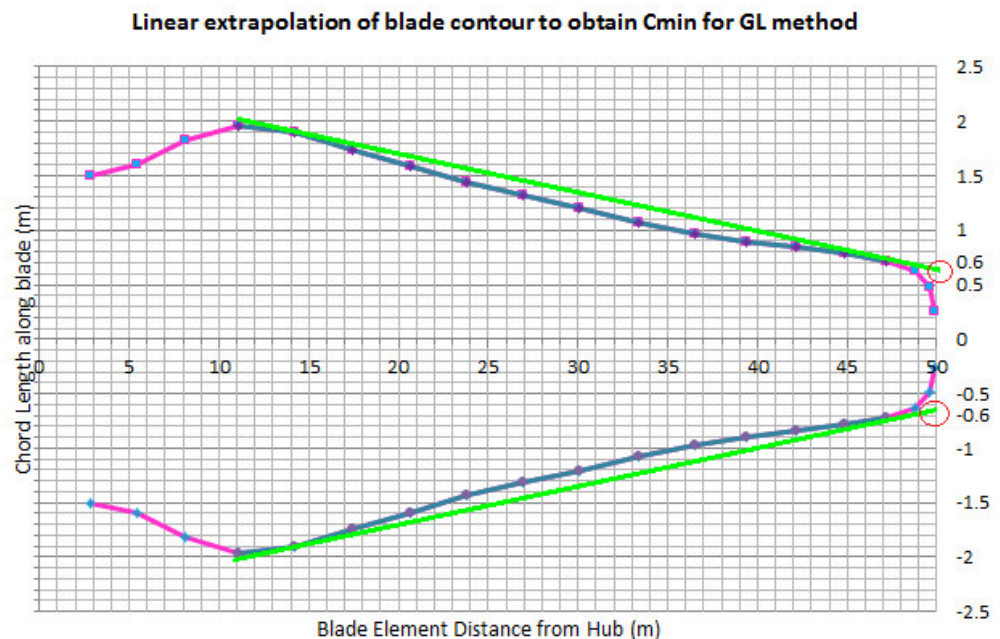


Abbildung 3: lineare Extrapolation der Blattkontur um C_{\min} für GL Verfahren zu erhalten

Die Eis-Massenverteilung entlang der Rotorblätters (von der Nabe bis zur Spitze) basiert auf diesem Ansatz und wird auch in Abbildung 4 verwendet.

- ✓ Anzahl der Blätterelemente: 19
- ✓ Maximale Sehnenlänge: $C_{\max} = 3.92725$ [m]
- ✓ Sehnenlänge an der Blattspitze: $C_{\min} = 1.2$ [m]
- ✓ $A = 0.125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

- ✓ Rotorradius: $RR = 50$ [m]
- ✓ $R_1 = 1$ [m]
- ✓ Narben1: Radius: 1.5 [m]
- ✓ Eisdichte: $\rho_E = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

2.2.3.2.3 Vergleich der Eismasse (IEC 61400-1, International Standard "Wind turbines - Part 1: Design requirements", Edition 4, 2016) und Eismasse (GL, 2010)

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist, führt der IECed₄ Ansatz zu einer linearen Abhängigkeit der Eismasse vom Rotorradius, während der GL Ansatz nur bis zur Hälfte des Rotorradius eine lineare Abhängigkeit zeigt und danach einen konstanten Wert annimmt. Daraus kann geschlossen werden, dass der GL Ansatz einen höheren Wert für die Eisverteilung ergibt als der IECed₄ Ansatz. Ausgehend von dem ersten Blattabschnitt (in der Nähe Wurzel – Abstand 2,87m ist die Eismasse nach dem IECed₄ Ansatz 0,60492 kg / m und damit deutlich geringer als nach der GL -Methode (3,34 kg / m). Sogar der 50 % GL Ansatz führt zu einem höheren Wert (1,67 kg / m).

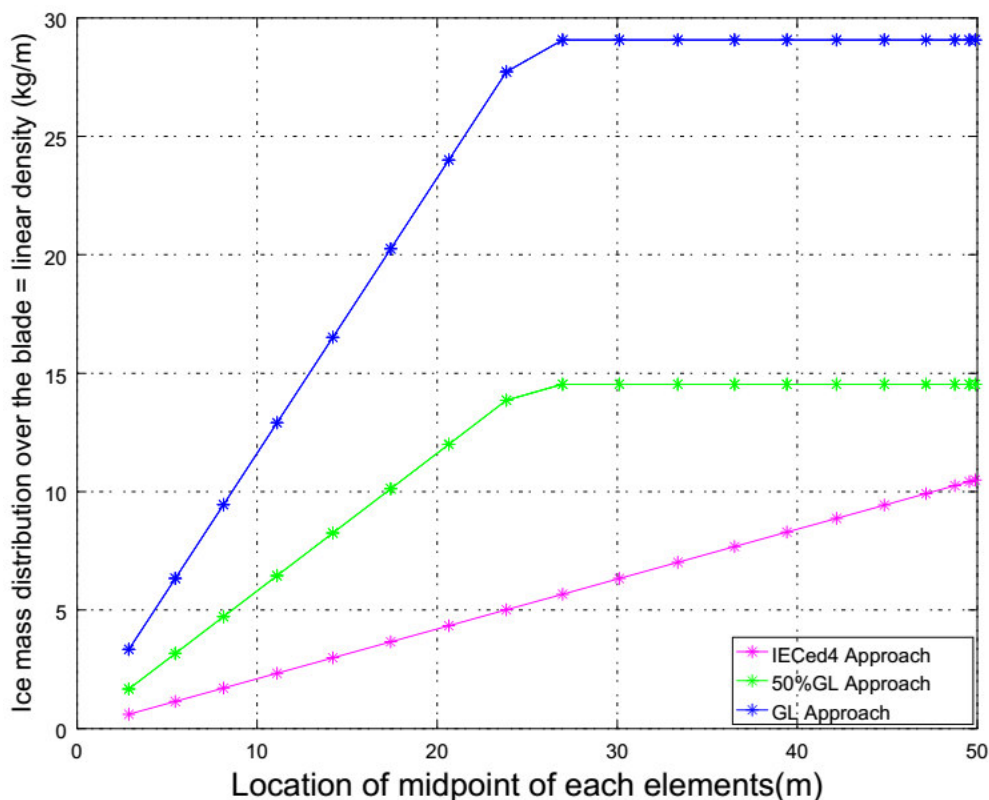


Abbildung 4: Vergleich verschiedener Ansätze zur Eismasse Verteilung entlang der Blattspannweite

2.2.3.2.4 Aerodynamischer Effekt von Vereisung an Rotorblättern

Eisbildung an Rotorblättern verschlechtert die aerodynamischen Eigenschaften eines sauberen aerodynamischen Profils. Um die Schwankungen der Profil-Performance zu

bestimmen, werden die folgenden Vorgehensweisen für die saubere Profileigenschaften modifiziert angewendet.

Aerodynamischen Profil-Penalty-Faktoren werden mit dem Auftriebsbeiwert C_L und Widerstandsbeiwert C_D eines sauberen aerodynamischen Profils für Anstellwinkel im Bereich von -2° bis $+14^\circ$ multipliziert. Für Anstellwinkel außerhalb dieses Bereichs werden Auftriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert durch Extrapolation mittels Viterna oder ähnlichen Ansätzen bestimmt. Die Penalty-Faktoren für Auftriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert sind Funktionen der Anstellwinkel wie in der folgenden Gleichung (Lehtomäki, 2014) gezeigt:

$$C_{L_{pen}}(AoA) = -0.0018 * AoA^2 - 0.0018 * AoA + 0.97 \quad (3)$$

leicht

$$C_{D_{pen}}(AoA) = 0.0836 * AoA + 1.89 \quad (4)$$

$$C_{L_{pen}}(AoA) = -0.0012 * AoA^2 - 0.0023 * AoA + 0.95 \quad (5)$$

mäßig

$$C_{D_{pen}}(AoA) = 0.3811 * AoA + 2.73 \quad (6)$$

$$C_{L_{pen}}(AoA) = -0.0008 * AoA^2 - 0.00152 * AoA + 0.91 \quad (7)$$

extrem

$$C_{D_{pen}}(AoA) = 0.2982 * AoA + 5.24 \quad (8)$$

$$C_{L_{pen}}(AoA) = -0.0014 * AoA^2 - 0.0017 * AoA + 0.9509 \quad (9)$$

durchschnittlich

$$C_{D_{pen}}(AoA) = 0.0191 * AoA + 3.1151 \quad (10)$$

$C_{L_{pen}}$ = aerodynamisches Profil Auftriebsbeiwerte Penalty-Faktor

$C_{D_{pen}}$ = aerodynamisches Profil Widerstandsbeiwerte Penalty-Faktor

AoA = Anstellwinkel [deg]

Diese Penalty-Faktoren werden auf saubere aerodynamische Koeffizienten wie folgt angewandt:

$$C_{L_{iced}} = C_{L_{pen}}(AoA) * C_{L_{clean}} \quad (11)$$

$$C_{D_{iced}} = C_{D_{pen}}(AoA) * C_{D_{clean}} \quad (12)$$

Ein Vergleich der sauberen und vereisten Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte von NACA64 für verschiedenen Vereisungsintensitäten (leicht, mäßig, durchschnittlich und extrem) ist in Abbildung 5 und Abbildung 6 bzw. dargestellt. Die aerodynamischen Koeffizienten werden im Vergleich zum Anstellwinkel dargestellt. Abweichungen von C_L und C_D für eisfreie sowie eisbeschädigte Rotorblätter konnten für verschiedene Vereisungsintensitäten beobachtet werden. Es ist zu beachten, dass beide Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte am meisten durch die extreme Vereisung beeinflusst werden. Hier ist zu erwähnen, dass in den Auftriebsbeiwerten verschiedene Vereisungseffekte in unterschiedlichen Bereichen der Anstellwinkel zu sehen sind. Wie wir sehen können, gibt es auch im Falle von leichter Vereisung, einen erheblichen Rückgang (ca. 35%) der Auftriebsbeiwerte im Bereich von 0 bis 30 Grad Anstellwinkel. Im Bereich von 30 bis 100 Grad sind die Auftriebsbeiwerte fast nicht von Vereisung betroffen. Für Widerstandsbeiwert, wie es aus Abbildung 6 beobachtet wird, führt Vereisung immer zu höheren Werten. Daher ist der wichtige Faktor, der die aerodynamische Leistung der WKA beschreibt, die so genannte Gleitzahl reduziert.

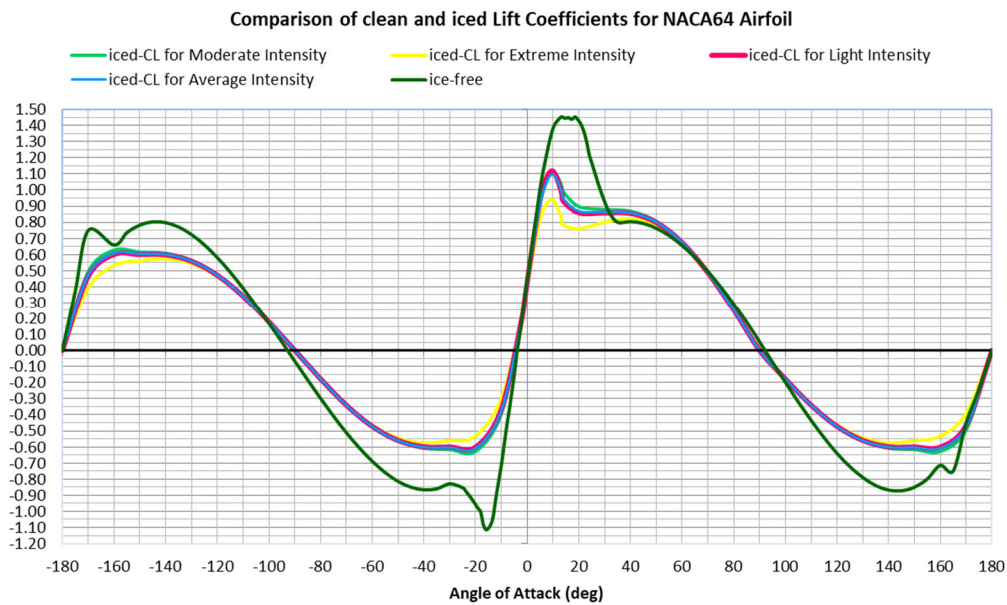


Abbildung 5: Vergleich von sauberen und vereisten Auftriebsbeiwerte für verschiedene Vereisungsintensitäten

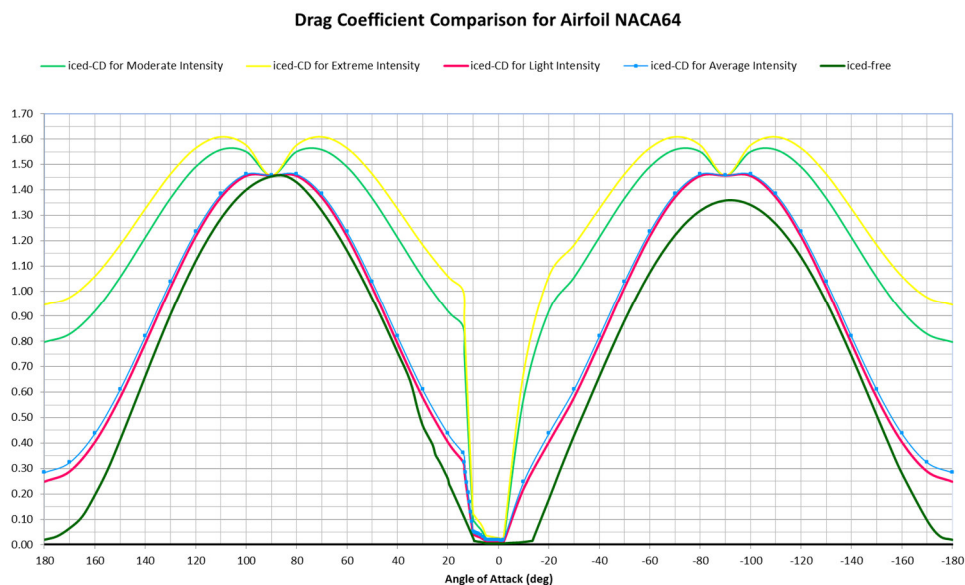


Abbildung 6: Vergleich von sauberen und vereisten Widerstandsbeiwerte für verschiedene Vereisungsintensitäten

2.2.3.3 Gesamtanlagensimulationen mit vereisten Rotorblättern

Mit der entwickelten Schnittstelle (im IcedBlades 2.3) wurden Gesamtanlagensimulationen im Zeitbereich durchgeführt, um die Leistungsverluste und die Strukturmechanik der Windkraftanlage unter dem Einfluss des Rotorblatteisansatzes zu bestimmen. Die Lastfälle wurden mittels verschiedener Vereisungslastfälle definiert.

Die Last-Simulationsergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Es kann beobachtet werden, dass es bei 13 m/s Windgeschwindigkeit aufgrund eines Regeler-Fehlverhaltens zum Strömungsabriss kommt. Abbildung 8 zeigt, dass der Leistungsbeiwert negativ sein könnte, wenn die Turbine vereist ist. Um das Problem Strömungsabriss zu überwinden, wurde die Pitchregelung angepasst, so dass ein besserer Leistungsbeiwert erreicht wurde (Abbildung 9).

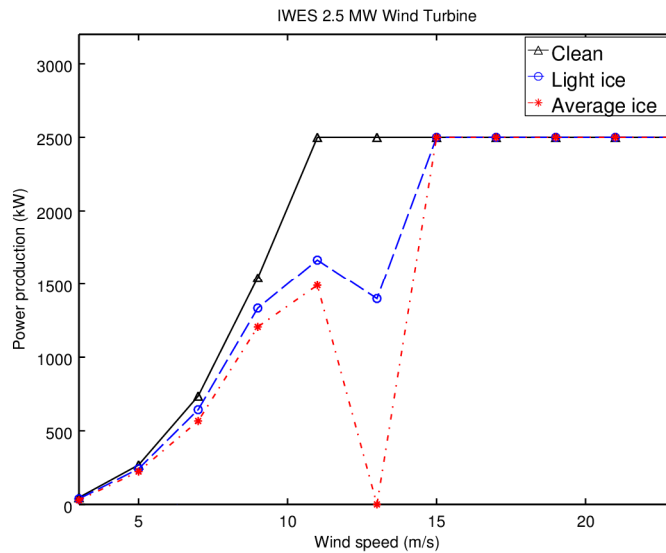


Abbildung 7: Die Leistung von vereister WKA mit der originalen Pitch-Regelung

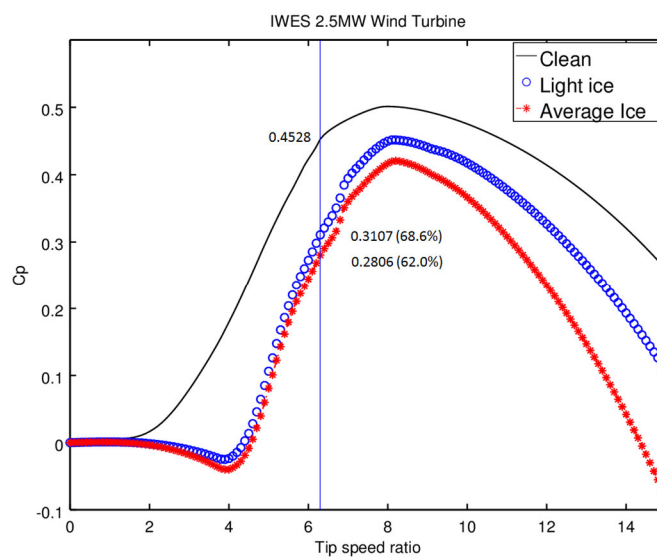


Abbildung 8: Relativer Leistungsbeiwert gegen Schnellaufzahl

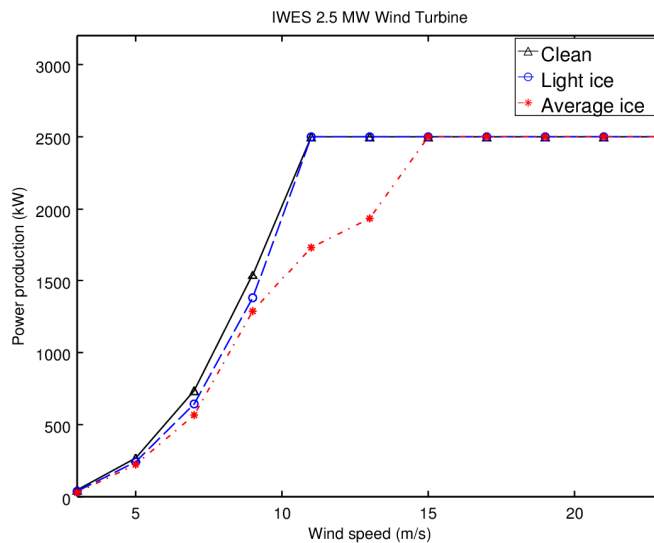


Abbildung 9: Die Leistung von vereister WKA mit der angepassten Pitch-Regelung

Die Ergebnisse wurden auf der „Anti-Icing for Wind Turbines“ Konferenz am 06/07 Mai 2015 in Hamburg präsentiert (IcedBlades 2.4). Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung von Eisklassen.

2.2.4 IcedBlades 2.5 – Machbarkeitsstudie zur Co-Simulation

Der heutige Stand der Wissenschaft zur Berechnung des Eisansatzes an Rotorblättern entstammt, historisch betrachtet, aus der Luftfahrtindustrie. Die meisten existierenden Simulations-Tools wurden für den Flugzeugbau entwickelt und dienen der Bestimmung des Eisansatzes an Tragflächen. Die physikalischen Phänomene bei der Vereisung von Tragflächen und Rotorblättern können jedoch nur schwer miteinander verglichen werden. Deshalb wurden einige dieser Simulationswerkzeuge weiterentwickelt, um den zusätzlichen Ansprüchen bei der Berechnung des Eisansatzes an Windkraftanlagen gerecht zu werden. Für Windkraftanlagen existieren derzeit die vier Stand-Alone-Tools LEWICE (LEWICE), CANICE (Paraschivoiu, I., Saeed, F., 2001), FENSAP-ICE (FENSAP-ICE) und TURBICE (Makkonen L. L., 2001), sowie eine Hybrid-Lösung (LEWICE + CFD) (Dairo, 2001).

TURBICE ist ein selbstentwickelter Simulation-Code vom VTT, dessen Entwicklung bis ins Jahr 1990 zurückgeht. Die ursprüngliche Motivation für die Entwicklung von TURBICE war die Erstellung eines Design-Tools für Rotorblatt-Heizsysteme. TURBICE wurde anhand von Messergebnissen als auch anhand ähnlicher Software-Tools zur Berechnung von Eisansatz validiert. Wie sich herausstellte, liefert die von dem Projektpartner VTT zur Vereisungssimulation entwickelte Software TURBICE keine besseren aerodynamischen Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte vereister Rotorblattprofile als man durch Windkanalmessungen ermittelt hat. Da zudem die Berechnungen mit TURBICE sehr zeitaufwendig sind und sich bei stärkerer Vereisung zudem große Unterschiede zu den Windkanalmessungen ergaben, wurde beschlossen, auf das Softwareprogramm zu verzichten. Da sich die TURBICE-Software wie beschrieben als zu zeitaufwendig und bei größerem Eisansatz als unzuverlässig erwiesen hat, wird die Machbarkeitsstudie einer Co-Simulation von TURBICE mit der am Fraunhofer-Institut zur dynamischen Windkraftanlagensimulation entwickelten OneWind-Software nicht mehr verfolgt. Stattdessen wurde FENSAP-ICE verwendet.

Eine Machbarkeitsstudie zur Co-Simulation von OneWind und FENSAP-ICE wurde durchgeführt. FENSAP-ICE ist ein umfassender Vereisungs-Code für Eis Simulationen in 3D. Es verfügt über vier Module. Das erste Modul, FENSAP, berechnet mittels der Euler oder Navier-Stokes Gleichungen den Luftstrom. Das Modul DROP3D verwendet den berechneten Luftstrom für die Berechnungen des Tropfenschlags. Schließlich verwendet ICE3D die Scherkräfte und Wärmeströme aus der Luftstrom-Berechnungen (in FENSAP) und dem Wasserfang (in DROP3D) um die 2D-Form des Eises auf der 3D-Oberfläche zu berechnen. Vier Co-Simulation Verfahren wurden untersucht (Abbildung 10, 11, 12 und 13). Nach der Untersuchung und Diskussion mit Spezialisten von EnginSoft, wurde ein Co-Simulations-Verfahren auf Basis der Python Sprache gewählt (Abbildung 13). Eine Modell-Verifizierung wurde durch eine Vergleich mit einer OneWind Simulation durchgeführt.

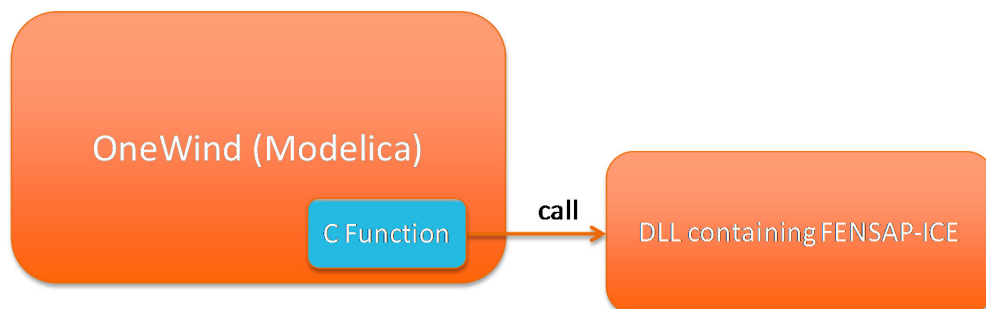


Abbildung 10: Co-Simulation Verfahren mit DLL Datei

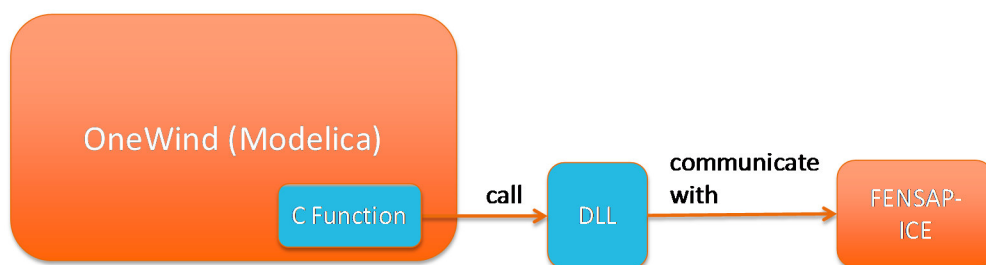


Abbildung 11: Co-Simulation Verfahren mit DLL Datei

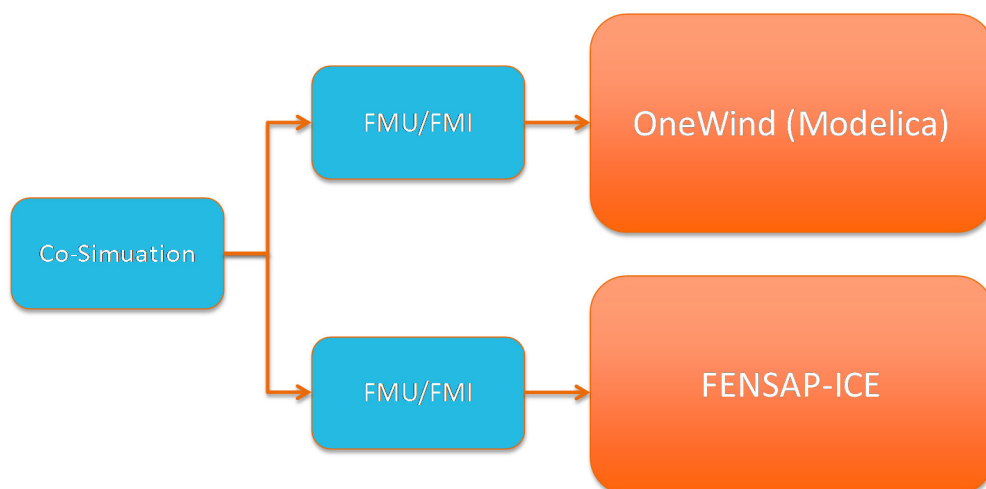


Abbildung 12: Co-Simulation Verfahren mit FMU/FMI

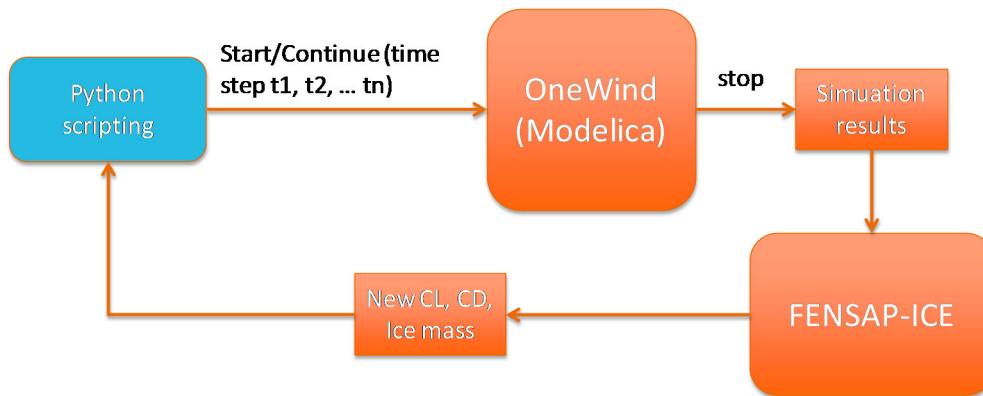


Abbildung 13: Co-Simulation Verfahren mit Python

2.2.5 IcedBlades 2.6 – Überarbeitung der Software nach Vergleich mit Meßergebnissen

Die modale Reduktionsmethode für das Rotorblatt Modell wurde in OneWindLoads mit Java implementiert (Abbildung 14). Entsprechend wird diese immer im Preprocessing durchgeführt. Um eine gleichzeitige modale Reduktion für das vereiste Rotorblatt zu realisieren, wurde ein neues Balken Modell mit modaler Reduktion in OneWind in der Modelica Sprache implementiert (Abbildung 15).

Ein anisotropes Balken Finite-Elemente-Modell wurde in OneWind umgesetzt. In dieser Formulierung kann die Balken Ablenkungen und Drehungen durch Polynome beliebig höherer Funktion beschrieben werden. Die Steifigkeit und Massenmatrix eines Balkens sind aus der elastischen Energie und die kinetische Energie abgeleitet.

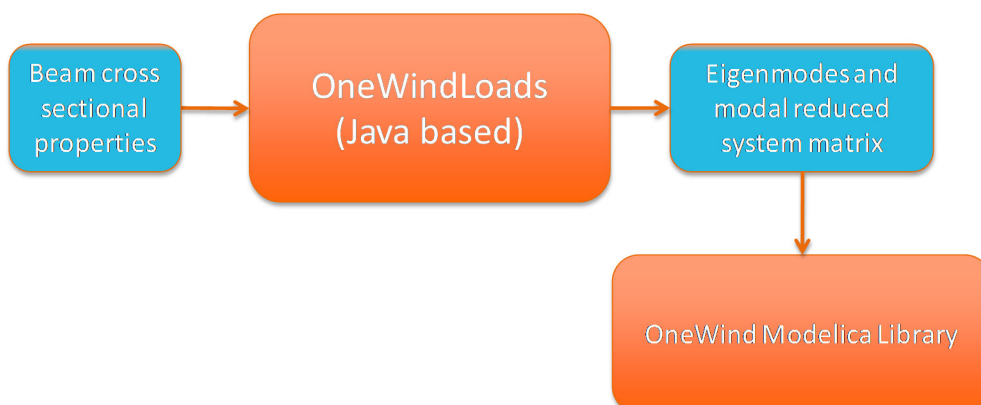


Abbildung 14: Altes Balken Modell in OneWindLoads

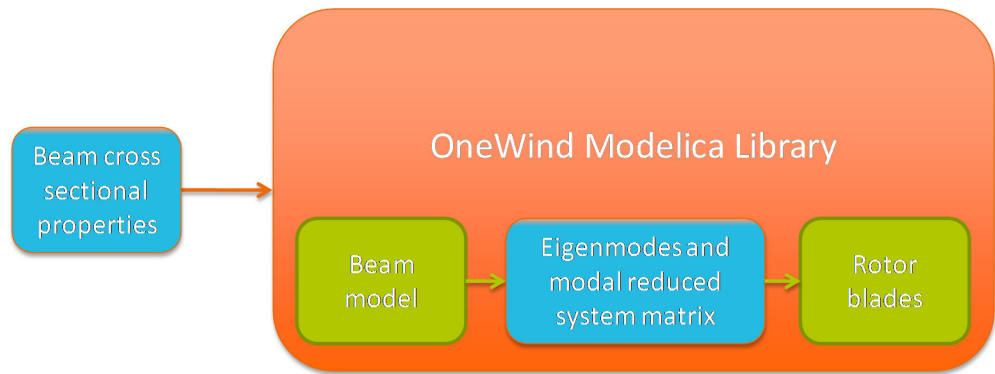


Abbildung 15: Neues Balken Modell in OneWindModelicaBibliothek

Gleichung 13 zeigt die elastische Energie des Balkens:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L (\varepsilon^T S \varepsilon) dz' \quad (13)$$

Die Querschnittsteifigkeitsmatrix S wird wie folgt definiert:

$$S = \begin{bmatrix} \kappa_x GA & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_y GA & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & EA & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & EI_x & EI_{cross} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & EI_{cross} & EI_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & GJ \end{bmatrix} \quad (14)$$

Wenn das ausgewählte Koordinatensystem für die Rotorblätter Analyse sich von dem Koordinatensystem unterscheidet, um zum Beispiel die Querschnittsteifigkeitseigenschaften zu berechnen, wird folgende Transformationsmatrix T verwendet:

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_1 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & -e_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

s_1, s_2 sind die Schubmittelpunkte und e_1, e_2 sind die elastischen Mittelpunkte.

Die kinetische Energie kann wie folgt erhalten werden:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{r}^T \dot{r} dV \\ &= \frac{1}{2} \dot{\alpha}^T \int_0^L (N(z')^T E N(z')) dz' \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (16)$$

E ist die Querschnitts Massenmatrix:

$$E = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu^* x_2 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & \mu^* x_1 \\ 0 & 0 & \mu & \mu^* x_2 & -\mu^* x_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu^* x_2 & I_{xx} & -I_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & -\mu^* x_1 & -I_{xy} & I_{yy} & 0 \\ -\mu^* x_2 & \mu^* x_1 & 0 & 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (17)$$

x_1, x_2 sind die Gleichgewichtspunkte.

2.3 IcedBlades 3 – Durchführung von Großausführungsmessungen

2.3.1 IcedBlades 3.1 - Vorbereitung, Installation und Abbau von Messequipment

Zur Bestimmung des Zusammenhanges von Wetterbedingungen und Vereisungen wurde am meteorologischen Messmast des Fraunhofer IWES eine Messkampagne durchgeführt. Sowohl der Standort als auch die Infrastruktur bieten ideale Voraussetzungen für die geplanten Untersuchungen. Dieser nordhessische Standort im Mittelgebirge ist aufgrund der Höhe und Topologie gut für meteorologische Messungen zur Bestimmung von Vereisungsbedingungen geeignet. Der Mast liegt auf ca. 400 m über Normalnull (N.N.) an einem Hügel mit dem Namen Rödeser Berg nahe der Ortschaft Nothfelden und ca. 30 km von Kassel entfernt. Abbildung 16 zeigt ein Luftbild des Standorts.

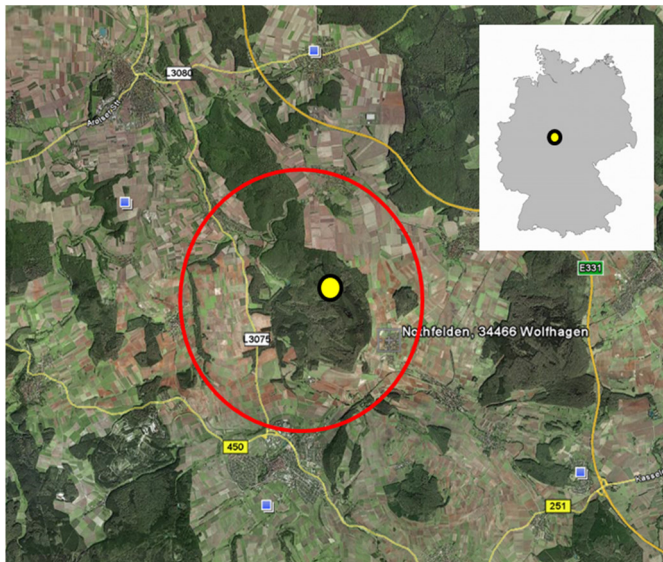


Abbildung 16: Standort des 200m Masts von Fraunhofer IWES

Der 200 m Mast ist Europas höchster meteorologischer Mast und verfügt über mehr als 40 meteorologischer Sensoren, die auf 14 verschiedenen Höhen zwischen 10 m und 200 m installiert sind. Der Höhenunterschied zwischen den Messpunkten liegt zwischen 10 m und 20 m, sodass ein Windprofil und möglicherweise ein Vereisungsprofil erstellt werden kann. An verschiedenen Positionen sind sowohl beheizte als auch unbeheizte Anemometer (auf

gleicher Höhe) installiert. Der Vergleich von beheizten und unbeheizten Anemometer-Messungen während einer Vereisung ermöglicht eine Vereisungsdetektion. Abbildung 17 zeigt den 200 m Mast und die installierten Sensoren. Darüber hinaus wurden drei Eissensoren installiert, die die Sensorik des Mastes ergänzen. Diese wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

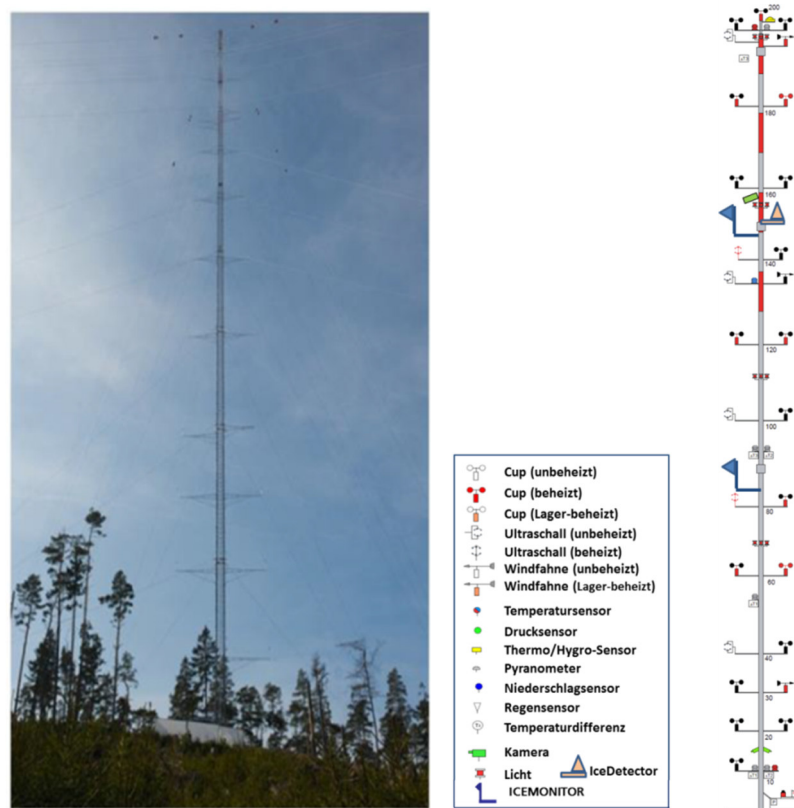


Abbildung 17: Ausstattung des 200m Mastes vom Fraunhofer IWES

Für die Erkennung der Vereisung auf verschiedenen Höhen und für die Untersuchung des Zusammenhanges von Wetterbedingungen und Vereisungsfällen wurden Eissensoren, die die Ausrüstung des meteorologischen Mastes ergänzen, installiert. Um die Vereisung auf verschiedenen Höhen messen zu können und gleichzeitig eine Qualitätskontrolle der Messungen zu ermöglichen, wurde ein Konzept erarbeitet. Bei der Auswahl der Eissensoren wurde eine Marktrecherche durchgeführt. Der Kontakt zur internationalen Experten, z.B. Experten der IEA Task 19 Gruppe, war dabei eine Hilfe. Für die quantitative Erfassung der Eismengen in zwei verschiedenen Höhen wurde der Eissensor ICEMONITOR der Firma Combitech in Schweden ausgewählt. Dieser Sensor misst das Gewicht des Eises, das sich auf einem rotierenden Zylinder mit 50 cm Länge bildet (während instrumentaler Vereisung). Eine Lagerheizung soll dafür sorgen, dass das Lager eisfrei bleibt und der Sensor fehlerfrei misst. Das gebildete Eis wird dagegen nicht abgetaut, um eine instrumentale Vereisung nachbilden zu können. Der Sensor misst nach der ISO-Norm 12494 (Atmospheric icing of structures, siehe (Foder, 2001)) und soll für die Validierung des physikalischen Modells in AP 5 gut geeignet sein. Der zweite Sensortyp ist der IceDetector 0872F1 der Firma Goodrich aus den USA. Dieser Sensor gibt Informationen über die Dicke einer Vereisung während einer Eisansammlungsphase (Accretion period). Wenn die Eisschicht eine bestimmte Schwelle erreicht hat, z.B. 4 mm, wird die Heizung des Sensors automatisch gestartet, um das bereits gebildete Eis abzutauen. Dadurch kann der Sensor neues Eis während der Eisansammlungsphase detektieren.

Um die Vereisung optisch detektieren zu können, wurde eine spezielle Kamera verwendet. Die Nutzung einer Kamera wurde von verschiedenen Experten empfohlen. Da diese kein Bestandteil der Beschaffung von IcedBlades war, wurde eine Kamera des 200 m Mastes des Fraunhofer IWES verwendet. Die Kamera ist vom Typ Mobotix DualNight M12 und ist in der Lage, Tag- und Nachtaufnahmen in einem vorprogrammierten Zeitschritt zu erzeugen. Der Zeitschritt für die Aufnahmen wurde auf 10 Minuten festgelegt (analog zu den meist verwendeten Mast-Sensoren, die 10 minütige Werte liefern).

Abbildung 18 zeigt eine schematische Darstellung der verschiedenen Vereisungsphasen, so wie sie von der IEA Wind Task 19 definiert sind.

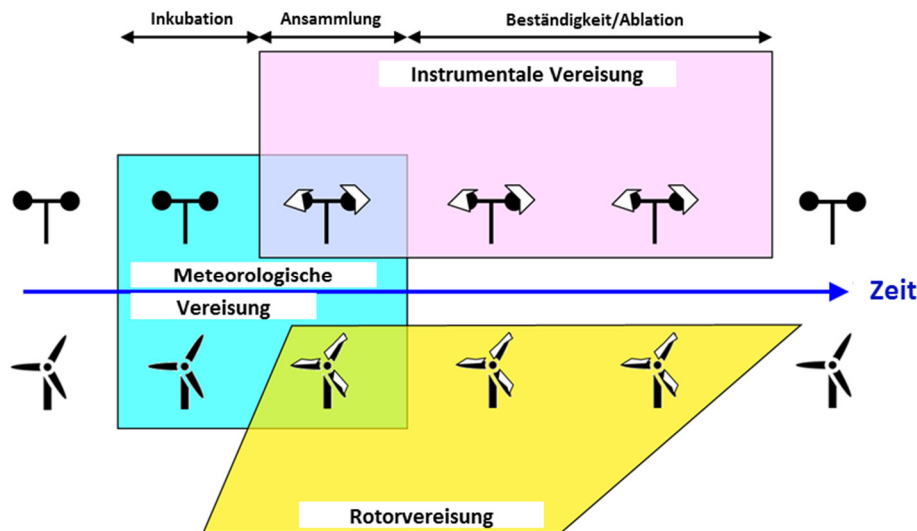


Abbildung 18: Darstellung der verschiedenen Vereisungsphasen [IEA Task 19]

Meteorologische Vereisung: Periode, während dessen die meteorologischen Bedingungen (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Wassergehalt in der Luft (auch „Liquid water content“ oder LWC genannt), Wassertröpfchengröße (auch „Median Volume Diameter“ oder MVD genannt)) eine Vereisung ermöglichen. Eine meteorologische Vereisung ist generell schwer zu detektieren, da genaue Informationen über die Tröpfchengröße MVD und Wassergehalt LWC schwer zu bekommen sind. In diesem Projekt wurde für die meteorologische Vereisung ein Ceilometer für die Detektion von Wolken, Wolkendichte/-breite und Nebel benutzt. Auf Basis dessen lassen sich indirekt Informationen über LWC und MVD ableiten.

Instrumentale Vereisung: Eine Periode, in der sich Eis auf einer Struktur oder Instrumentation befindet. In diesem Projekt wurde die instrumentale Vereisung durch unterschiedliche Methoden detektiert. Zum einen wurde die Methode der Doppel-Anemometrie (der Vergleich von beheizten und unbeheizten Anemometern) benutzt (siehe Abschnitt 2.3.2). Zum anderen konnte die instrumentale Vereisung durch die Messungen des Eissensors ICEMONITOR sowie durch die Kamerabeobachtung festgestellt werden.

Rotorvereisung: Eine Periode, in der sich Eis auf den Rotorblättern einer Windenergieanlage befindet. Die Rotorvereisung unterscheidet sich von instrumentaler Vereisung wegen der Dimension, Form und Rotation der Windenergieanlage. Inkubations- und Erholungszeit sind generell bei der Rotorvereisung kürzer als bei der instrumentalen

Vereisung. Es ist zu berücksichtigen, dass sich die Rotorvereisung zwischen in Betrieb genommener und stillstehender Anlage stark unterscheidet.

Inkubationszeit: Zeit zwischen dem Beginn einer meteorologischen Vereisung und einer instrumentalen Vereisung. Die Dauer der Inkubationszeit hängt sowohl von der Oberflächentemperatur des Instrumentes oder des Rotors als auch von seiner Struktur ab.

Eisansammlungsphase: Periode, in der die Eisbildung stattfindet. Diese findet statt, wenn sowohl meteorologische als auch instrumentale Vereisung auftreten.

Beständigkeit: Periode direkt nach dem Ende der meteorologischen Vereisung, in der die abgebildete Eismenge weder wächst noch schrumpft.

Ablation: Periode zwischen dem Ende der meteorologischen Vereisung und dem Ende der instrumentalen Vereisung, in der die abgebildete Eismenge reduziert wird. Diese Reduktion kann entweder durch das Schmelzen, die Erosion oder durch die Sublimation von Eis entstehen.

Die im IcedBlades beschafften Sensoren wurden in zwei unterschiedlichen Höhen am Mast montiert. Auf 85 m Höhe wurde ein ICEMONITOR installiert. Auf 135 m Höhe wurden sowohl ein zweiter ICEMONITOR als auch ein IceDetector installiert. Um die Genauigkeit der Messungen der Eissensoren prüfen zu können, wurde auf ca. 140 m, direkt oberhalb der zwei Eissensoren, eine Kamera für die optische Detektion der Vereisung installiert, wie in Abbildung 19 dargestellt ist. Mit diesem Installationskonzept und mit der Sensorik des Mastes lassen sich Untersuchungen zur Vereisung im Rotorkreis einer mittelgroßen Windenergieanlage, d. h. im unteren bzw. oberen Bereich des Rotorkreises und auf Nabenhöhe erstellen.

Abbildung 20 (links) zeigt eine Draufsicht der auf 140 m installierten Kamera (links im Bild) und des auf 135 m installierten ICEMONITORS (rechts im Bild). Abbildung 19 (rechts) zeigt eine Seitenansicht des ICEMONITORS, eines IceDetectors auf 135 m sowie weiterer benachbarter Anlagen.

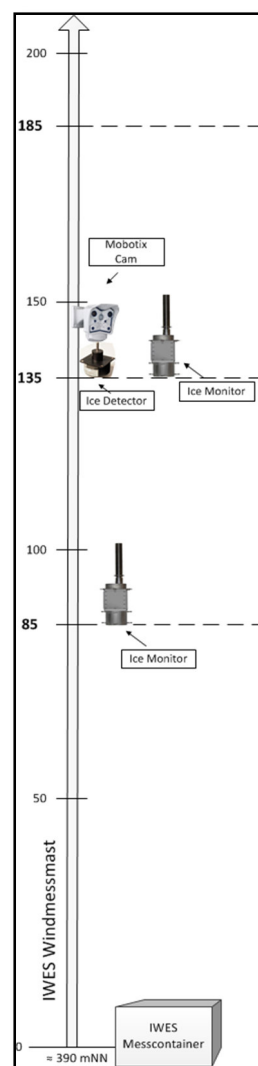


Abbildung 19:
Position der
Eissensoren und
Kamera



Abbildung 20: Eissensoren auf 135m, Kamera auf 140 m und benachbarte Anlagen

Der auf 80m installierte ICEMONITOR ist in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: ICEMONITOR auf 80m

2.3.2 IcedBlades 3.2 - Messkampagne am meteorologischen Messmast des Fraunhofer-Instituts IWES

Die im IcedBlades geplante Messkampagne erstreckte sich generell auf vier Winter von 2012 bis 2016. Es wurde entschieden, den Winter 2012/2013 mitaufzunehmen, da viele Vereisungsereignisse auf Basis der Mastinstrumentation bereits detektiert wurden. Ein Winter ist vom 01. November bis zum 30. April definiert. Gleichzeitig wurde eine zusätzliche Messkampagne mit einem Laseranemometer (LiDAR-Gerät) des Fraunhofer IWES zum Vergleich und zur Kontrolle der herkömmlich gemessenen Windgeschwindigkeiten am meteorologischen Mast durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messkampagne sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

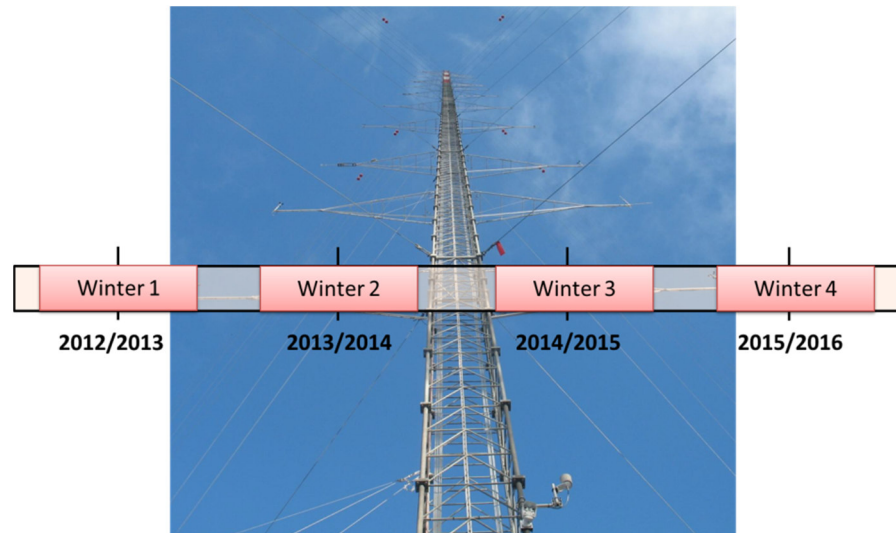
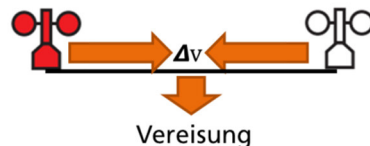


Abbildung 22: Dauer der Messkampagne am 200 m Mast

Bei den vier Messkampagnen wurde auf verschiedenen Höhen zwischen 10 m und 200 m gemessen. Neben den Messungen der meteorologischen Parameter am 200 m Mast wurde die Detektion der Vereisung ebenfalls in allen Höhen durchgeführt. Für die Vereisungsdetektion wurden drei Hauptmethoden verwendet.

- **Eissensoren:** Auf Basis der installierten Eissensoren konnte eine Vereisungsdetektion auf 80 m und 140 m durchgeführt werden (instrumentale Vereisung).
- **Kamera:** Auf Basis der von der Kamera gelieferten Bilder konnte eine Vereisungsdetektion sowie eine Prüfung der Detektion durch die Eissensoren auf 140 m durchgeführt werden (Instrumentale Vereisung).

Methode der Doppel-Anemometrie: Diese Methode basiert auf dem Vergleich zwischen beheiztem und unbeheiztem Anemometer auf gleicher Höhe. Wenn das unbeheizte Anemometer von einer Vereisung beeinflusst ist, entsteht eine Differenz in der Messung der Windgeschwindigkeit im Vergleich zum beheizten Anemometer. Wenn diese



Differenz größer als ein definierter Schwellenwert bei negativen Temperaturen ist, dann wird von einer instrumentalen Vereisung ausgegangen. Auf Basis dieser Methode konnte in acht Höhen zwischen 10 m und 200 m eine Detektion der instrumentalen Vereisung durchgeführt werden. Das Verhalten von Vereisung eines unbeheizten Anemometers hängt vom Anemometertyp ab. Im Fall einer Vereisung messen Cupanemometer häufig geringere Geschwindigkeit oder gar keine (0 m/s). Das passiert, da durch Eis die mechanische Rotation des Cups gestört und verlangsamt wird. Dagegen misst ein vereistes Ultraschallanemometer (USA) übertrieben hohe Windgeschwindigkeiten, wenn ein Transponder vereist ist. Durch die Vereisung ändert sich die Übertragungszeit zwischen Sender und Empfänger, was zu diesem Verhalten führen kann. Abbildung 23 zeigt das Verhalten vom Cup- als auch vom Ultraschallanemometer während eines Vereisungsereignisses, das am 200 m Mast beobachtet wurde. Während der instrumentalen Vereisung misst das unbeheizte Cupanemometer (in blau) weniger als das beheizte Cupanemometer (in rot). Die

Messwerte des USA (in schwarz) sind hingegen viel höher als die vom beheizten Cupanemometer (instrumentale Vereisung).

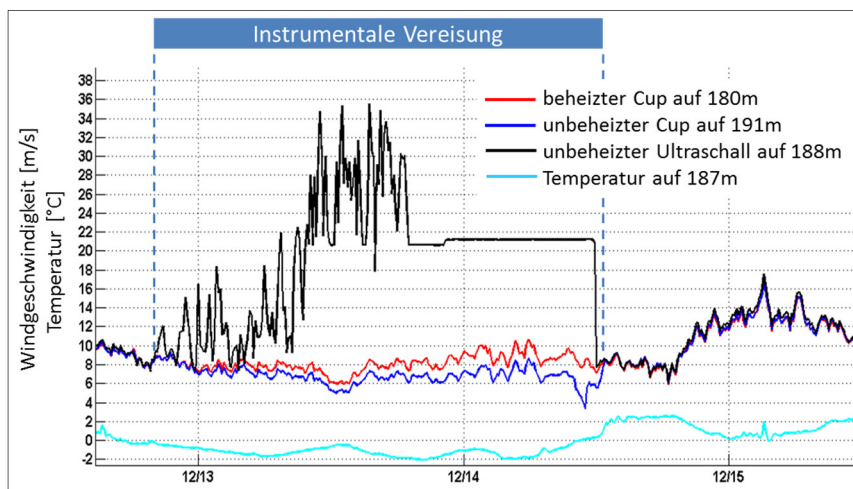


Abbildung 23: Vergleich verschiedener Sensoren während eines Vereisungsereignisses

- **Ceilometer und Temperaturmessung:** Durch Informationen über Wolken, Nebel oder Regen lässt sich die meteorologische Vereisung in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmen.

2.3.2.1 Vereisungsdetektion

Ein Vergleich der Vereisungsdetektion mit den verschiedenen Methoden kann exemplarisch in Abbildung 23 während eines Vereisungsereignisses von ca. 51 Stunden instrumentaler Vereisung dargestellt werden. Die Dauer der meteorologischen Vereisung betrug ca. 40 Stunden. Die Detektion wurde auf Höhen von 135 m bzw. 140 m durchgeführt, da dort ein Vergleich der verschiedenen Methoden möglich ist. Für die instrumentale Vereisung wurden die Methoden der Doppel-Anemometrie, Kamera und Eissensor verwendet. Für die meteorologische Vereisung wurde das Ceilometer in Abhängigkeit von der Temperatur und Luftfeuchte eingesetzt. Die Abbildung 24 zeigt eine Detektion der instrumentalen Vereisung auf Basis der Doppel-Anemometrie-Methode, hier durch den Vergleich von einem beheizten Ultraschallanemometer (grün) mit einem unbeheizten Cupanemometer (blau). Eissensor-Messungen (in kg/m) sind in orange dargestellt. Mit der Kamera-Beobachtung (lila) können dann zwei Zustände (0 = Keine Vereisung und 1 = Vereisung) abgeleitet werden. Die unterste Grafik zeigt den Verlauf der Temperatur (blau), relative Luftfeuchtigkeit (orange) und Ceilometer-Messungen (schwarz). Die Messungen vom Ceilometer unterscheiden zwischen drei Zuständen (0=klarer Himmel; 2=Wolken; 3=Niederschlag).

Es ist zu beobachten, dass der Eissensor ICEMONITOR bei leichter Vereisung ungenau ist. Die Lagerheizung reicht in vielen Fällen nicht aus, um das Lager eisfrei zu halten, woraus falsche Messungen resultieren. Trotz Kalibrierung tauchen negative Werte auf, siehe Abbildung 24.

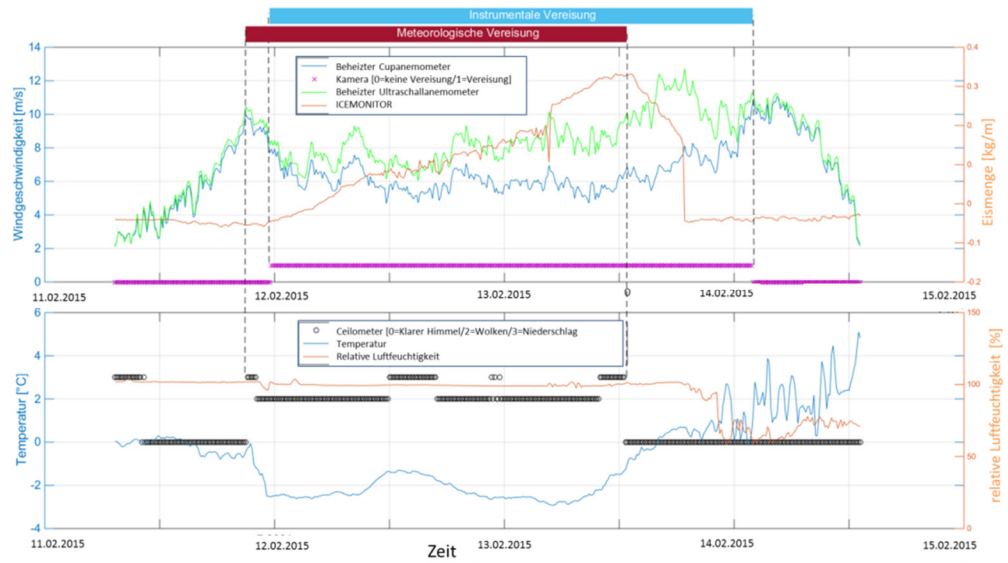


Abbildung 24: Vergleich der Vereisungsdetektion mit den verschiedenen Methoden

Abbildung 25 zeigt ein Kamerabild des Vereisungsereignisses vom 13.02.2015 um 11:52 Uhr. Das Foto zeigt die eingesetzten Eissensoren nach etwa 18 Stunden andauernder Vereisung. Es wurden Eisanlagerungen von ca. 5 g/cm² ermittelt.

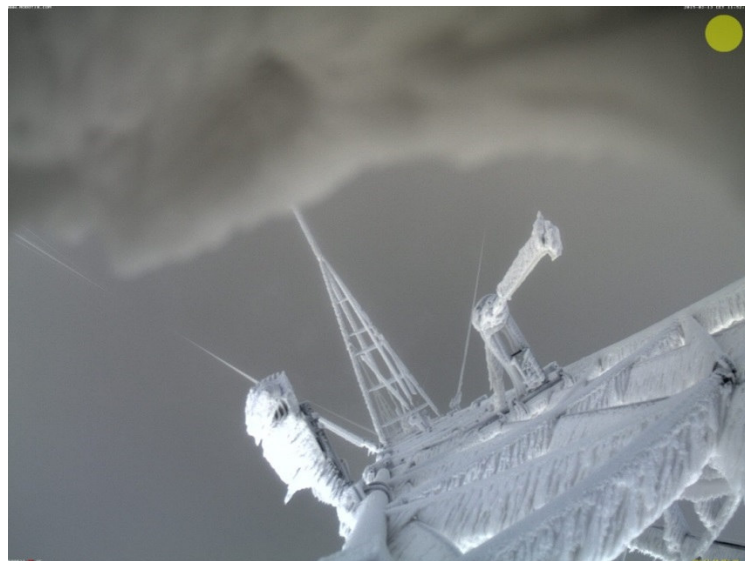


Abbildung 25: Kamerabild des Vereisungsereignisses vom 13.02.2015 um 11:52 Uhr

Als Ergebnis der Messungen in allen vier Wintern konnte ein Vereisungsprofil vom Standort Rödeser Berg dargestellt werden. Abbildung 26 zeigt eine Darstellung des Vereisungsprofils in vier Jahren zwischen 10 m und 200 m Höhe. Das gemessene Vereisungsprofil zwischen 10 m und 200 m gibt einen interessanten Überblick über die vertikale Verteilung der Vereisung im gesamten Rotorblattbereich über mehreren Jahren. Generell steigt die Anzahl der Vereisungstunden mit der Höhe. Der Winter 2012/2013 war ein vereisungsreicher Winter im Vergleich zu den darauffolgenden Winterjahren. Auf 135 m Höhe wurden 680 Stunden Vereisung detektiert und 670 Stunden auf 191 m, was 21 % der

Messungen in diesem Winter entspricht. In den darauffolgenden Wintern von 2013 bis 2015 wurde eine Zahl von 320 Stunden Vereisung nicht überschritten. Interessant zu beobachten ist, dass im Winter 2014/2015 die Anzahl der detektierten Vereisungsstunden auf 135 m (315 Stunden) größer als die Anzahl auf 160 m (250 Stunden) oder 191m (280 Stunden) war. Dieses Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass sich die Wolken in vielen Fällen auf dieser Höhe befinden, wie exemplarisch in Abbildung 27 dargestellt ist.

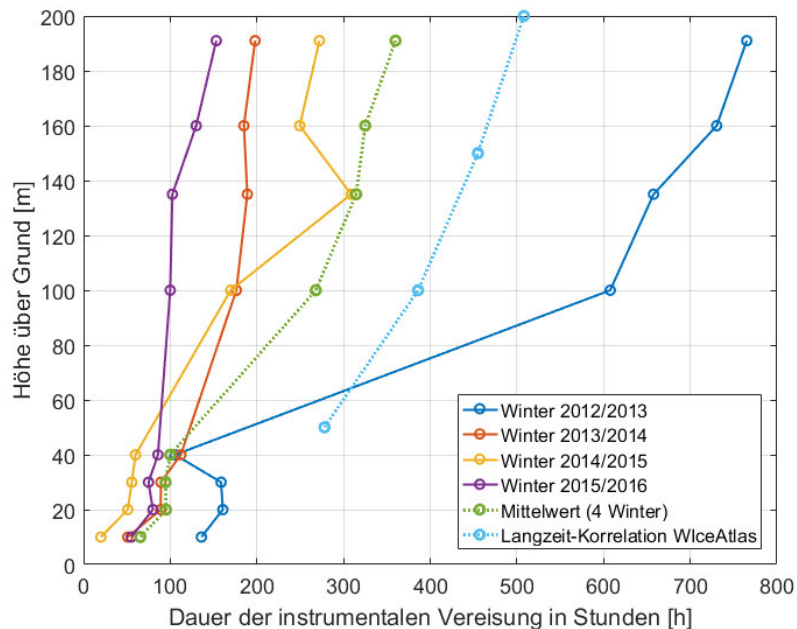


Abbildung 26: Vereisungsprofil in den vier Wintern. Vergleich mit einer Langzeitkorrelation

Abbildung 27 zeigt ein Bild der erwähnten Situation auf 140 m. Aufgrund der Höhe über Normalnull (über 500 m) sind tiefe Wolken an dem Maststandort sehr relevant



Abbildung 27: Bild von Mastumgebung aus 140 m Masthöhe.

Die Verteilung der Vereisungsursachen im untersuchten Zeitraum von vier Wintern lässt sich in Abbildung 28 darstellen. Das sogenannte In-Cloud-Icing ist die häufigste Ursache mit 87%. Die Niederschlagvereisung liegt bei 13%. Die Niederschlagvereisung lässt sich in die zwei Arten „nasser Schnee“ und „gefrorener Regen“ unterteilen.

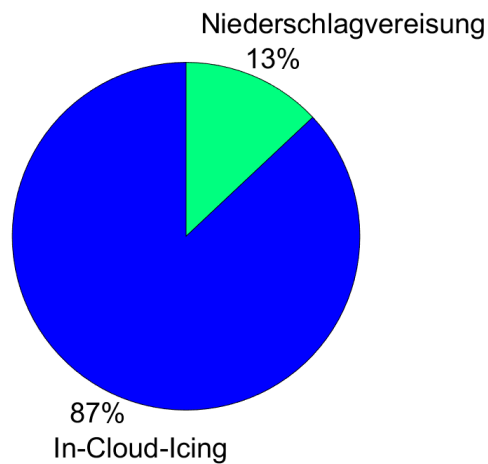


Abbildung 28: Verteilung der Vereisungsursache am Standort Rödeser Berg

2.3.2.2 Untersuchungen der Vereisungsphasen

In diesem Abschnitt werden die Vereisungsphasen am Standort Rödeser Berg statistisch untersucht. Die Dauer und Häufigkeit der meteorologischen Vereisung werden in Abbildung 29 dargestellt. Am häufigsten ist eine Dauer von 5 Stunden, in mehr als 40% der Fälle aufgetreten. Eine längere Dauer der meteorologischen Vereisung wurde ebenso beobachtet. Bei der detektierten meteorologischen Vereisung handelt es sich um Vereisung, auf die eine instrumentale Vereisung folgt. Die Detektion der meteorologischen Vereisung wurde auf Basis von Ceilometer-Messungen sowie Luftfeuchtigkeit und Temperatur ermittelt. Bei dieser Methode lassen sich zwar die Existenz einer Wolke oder Nebel bzw. die Existenz von LWC in der Luft ermitteln, Informationen über die Tröpfchengröße, die eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Vereisung spielt, bleiben aber unbekannt. Deshalb sind die Dauer und das Auftreten der meteorologischen Vereisung sowie die Inkubationszeit mit einer Unsicherheit zu betrachten. Die Detektion einer meteorologischen Vereisung ist generell schwer realisierbar.

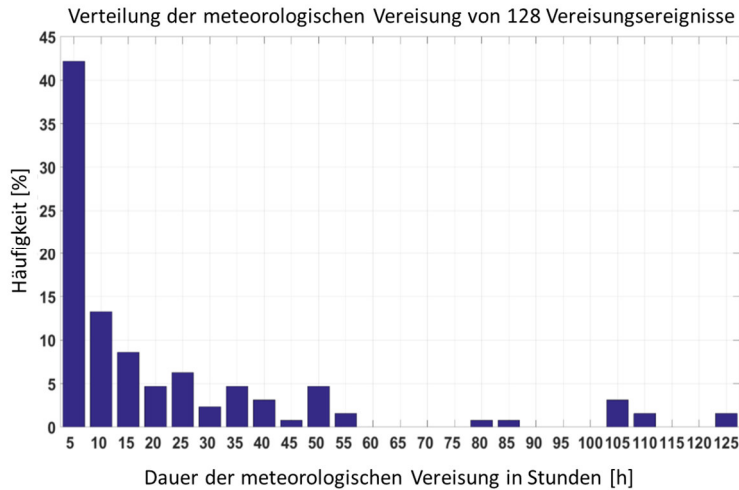


Abbildung 29: Häufigkeit der Dauer der meteorologischen Vereisung am Standort Rödeser Berg

Die Inkubationszeit lässt sich in Abbildung 30 darstellen. In knapp 65% der Fälle liegt die Inkubationszeit unter 1 Stunde. Innerhalb der ersten Stunde wurde in 66% der Fälle eine Inkubationszeit von weniger als 10 Minuten beobachtet.

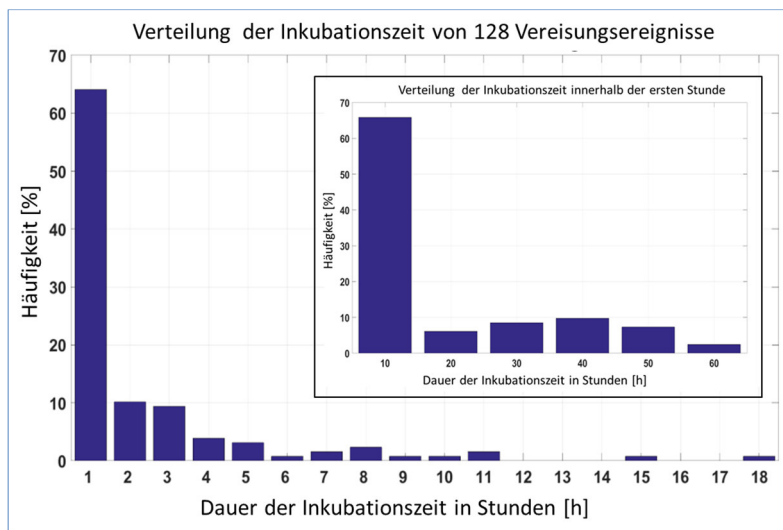


Abbildung 30: Häufigkeit der Dauer der Inkubationszeit

Die Dauer und Häufigkeit der instrumentalen Vereisung lässt sich in Abbildung 31 darstellen. Die Dauer variiert zwischen 5 Stunden und 285 Stunden. Häufiger taucht instrumentale Vereisung mit einer Dauer zwischen 5 Stunden und 65 Stunden auf. Auf Basis der Untersuchungen konnte ein Konversionsfaktor von 1,4 von einer meteorologischen zu einer instrumentalen Vereisung beobachtet werden. Dieser Wert stimmt mit dem Faktor der Vereisungskarte von Wichura des Deutschen Wetterdienstes überein (Wichura, 2013).

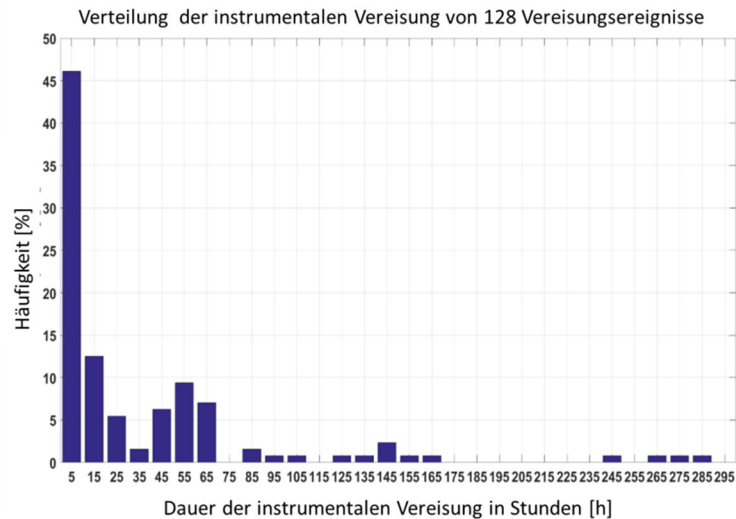


Abbildung 31: Häufigkeit der Dauer der instrumentalen Vereisung

Die Erholungszeit (Beständigkeit/Ablation) variiert ebenso zwischen 1 Stunde (mit über 50%) und 28 Stunden (mit unter 3%) bei 129 Vereisungsereignissen. Ein Ende der Vereisung kann meistens zwei Ursachen haben. Die erste Ursache ist das Schmelzen durch Temperaturen über Null. Diese kann je nach Temperatur und gebildeter Eisdichte bis zu drei Stunden dauern. Die zweite Ursache ist hohe Windgeschwindigkeit, die zu einem Eisabwurf führen kann. Abbildung 32 zeigt die relativen Häufigkeiten von Erholungszeiten.

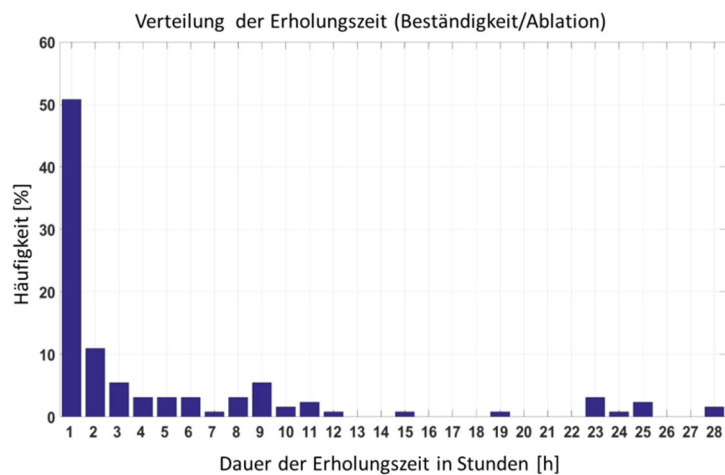


Abbildung 32: Häufigkeit der Dauer der Erholungszeit

2.3.2.3 Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Wetterbedingungen und Vereisung

Die Verteilung der Windgeschwindigkeiten unter Vereisung (instrumentale Vereisung) zeigt, dass Vereisung häufiger auftritt bei Windgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und 8 m/s. Vereisung findet auch statt bei hohen Windgeschwindigkeiten bis 16 m/s. Die Häufigkeit ist aber gering, da hohe Windgeschwindigkeiten zu Eisabwurf und damit zum Vereisungsende führen können.

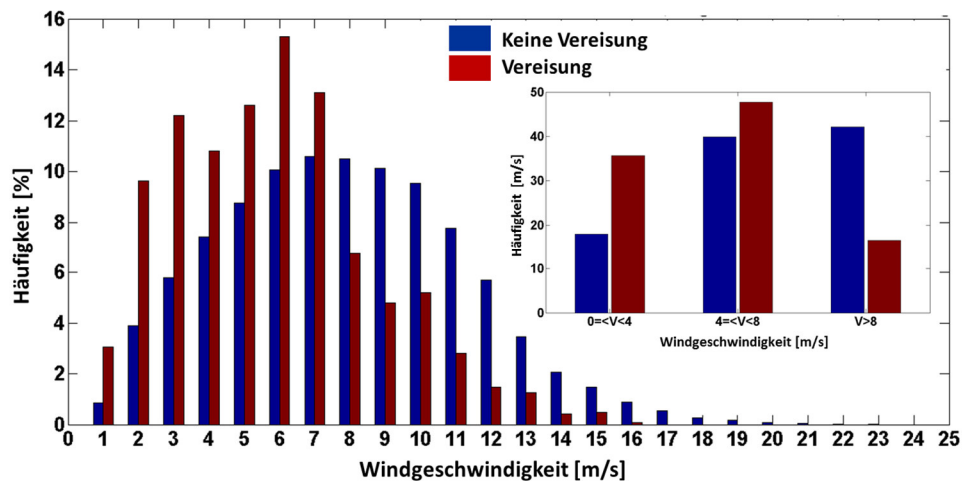


Abbildung 33: Verteilung der Windgeschwindigkeit unter instrumentale Vereisung

Die Verteilung der Temperatur unter instrumentaler Vereisung zeigt, dass Vereisung am Standort Rödeser Berg bei Temperaturen zwischen 4 °C und -9 °C stattgefunden hat.

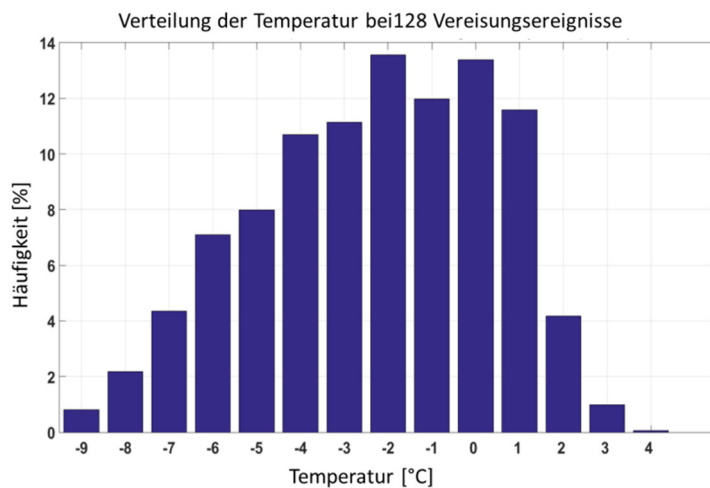


Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der Temperatur unter instrumentale Vereisung

Die ersten zwei Stunden der instrumentalen Vereisung beinhalten auch die Inkubationsphase. Die Verteilung der Temperaturen in den ersten zwei Stunden variiert um die 0°C und liegt zwischen den maximalen Werten von 1°C und -8°C.

Abbildung 35 zeigt eine Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit bei verschiedenen Temperaturen sowohl unter instrumentaler Vereisung (rot) als auch ohne Vereisung (grün).

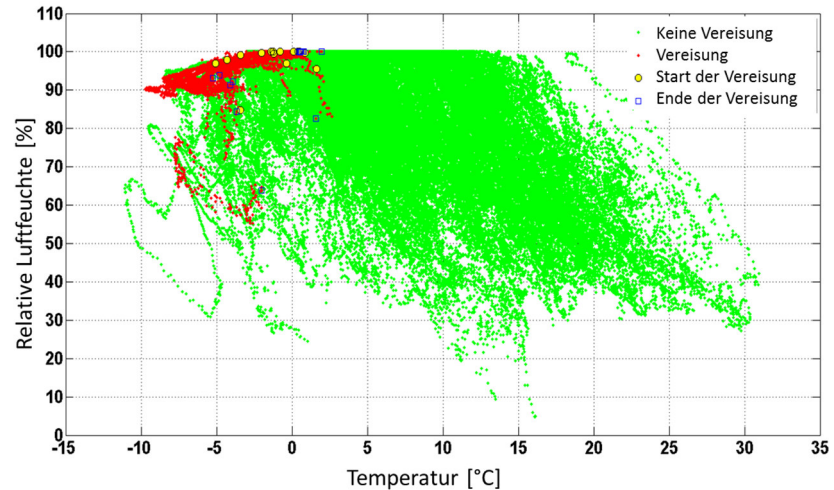


Abbildung 35: Verteilung der relativen Luftfeuchte mit der Temperatur unter (rot) und ohne instrumentale Vereisung (grün)

Es kann beobachtet werden, dass beim Beginn einer instrumentalen Vereisung die relative Luftfeuchtigkeit über 85% liegt (Meistens 100%). Die Werte unter 80% sind bei instrumentaler Vereisung, aber keiner vorherrschenden meteorologischen Vereisung, aufgenommen.

Die in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Variation der Vereisungsdauer von Jahr zu Jahr. Die Lokalität und das Vereisungsprofil müssen betrachtet werden.
- Vereisungsprofil sollte berücksichtigt werden (Gesamtrotorblatt der Anlage).
- In-Cloud-Icing ist die häufigste Vereisungsursache für Windenergieanlagen.
- Inkubationszeit dauert meistens weniger als 1 Stunde.
- Neben der Doppel-Anemometrie ist eine optische Prüfung mit einer Kamera empfehlenswert.
- Der Eissensor ICEMONITOR ist bei leichter Vereisung ungenau. Lagerheizung reicht in vielen Fällen nicht aus, um das Lager eisfrei zu halten, woraus falsche Messungen resultieren können. Trotz Kalibrierung tauchen negative Werte auf.
- Auf Basis der Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen den Wetterbedingungen und der Vereisung konnten Grenzen der Wetterparameter bei Vereisung beobachtet werden (Temperatur < 3°C, Luftfeuchtigkeit > 85%, Windgeschwindigkeit > 2m/s)
- Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit können für eine erste Einschätzung benutzt werden – Achtung Überschätzungsgefahr!
- Zwei für die Vereisung entscheidende Größen sind nicht leicht zu messen. LWC (Liquid water content) kann nur durch die Existenz von Wolken oder Niederschlag bestätigt werden. MVD (median volume diameter) bleibt nach wie vor unbekannt.

Teile der Ergebnisse dieser Untersuchung wurden auf der WindEurope-Konferenz 2016 in Hamburg gemeinsam mit DNV-GL (Freudenbach, Steiniger, Khadiri-Yazami, Tang, & Säger, 2016) sowie den Experten der IEA-Wind Task 19 vorgestellt und diskutiert.

2.3.2.4 LiDAR-Messkampagne – Untersuchungen zur LiDAR-Messung unter Vereisungsbedingungen

LiDAR-Geräte bieten eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen mastgestützten Windmessungen. Sie sind mobil und ermöglichen Messungen von Windprofilen in mehreren Höhen ohne den Einsatz teurer und aufwändiger Mastsysteme. In dieser Studie soll die Genauigkeit der LiDAR-Messung sowie die Einsetzbarkeit von LiDAR unter Vereisungsbedingungen untersucht werden. Basis dieser Untersuchungen ist eine Messkampagne mit dem gepulsten LiDAR Windcube V2 der Firma Leosphere, siehe Abbildung 36. Die Messkampagne wurde am 200 m Mast des Fraunhofer IWES im Winter 2012/2013 durchgeführt.



Abbildung 36: LiDAR Windcube V2 während der Messkampagne am Rödeser Berg

Abbildung 37 zeigt Windmessungen verschiedener Messgeräte während eines langen Vereisungsereignisses. Messungen von sowohl unbeheizten als auch lagerbeheizten Anemometern wurde von Vereisung beeinflusst. Diese lässt sich im Fall von Cupanemometern entweder durch Verlangsamung oder durch einen totalen Halt der Messungen (rot, blau, magenta), wie im vorherigen Abschnitt dargestellt ist, feststellen. Als Referenz wurde ein beheiztes Cupanemometer (Lila) verwendet. Die Messungen vom LiDAR (schwarz) stimmen gut mit den Messungen der beheizten Anemometer während der Vereisung überein. Nach diesem Vereisungsereignis stimmen die Messungen aller Anemometer wie erwartet überein.

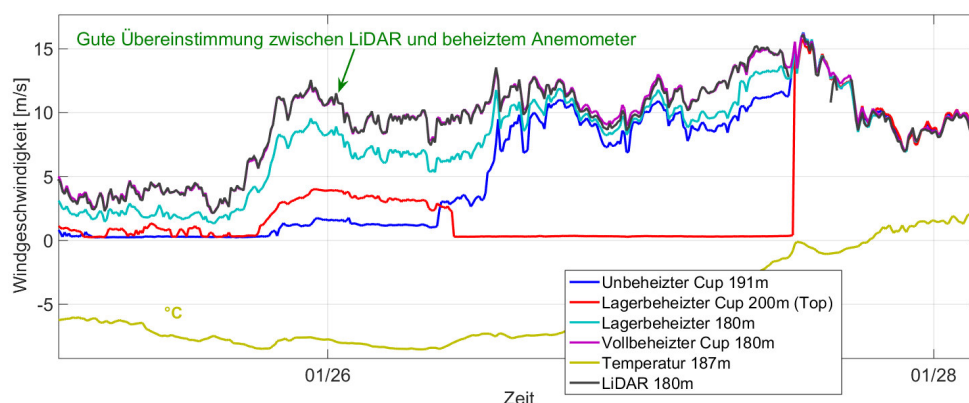


Abbildung 37: Windmessungen verschiedener Windmessgeräte während eines langen Vereisungsereignisses

Einen genaueren Vergleich der LiDAR-Messung und Messungen von beheizten Cup- und Ultraschallanemometern zeigen die Streudiagramme in der Abbildung 38 (links) und Abbildung 38 (rechts). Messungen während einer Vereisung sind in rot dargestellt. Blaue Punkte repräsentieren Messungen bei keiner Vereisung. Die Dauer der Messungen beträgt ca. einen Monat mit mehreren Vereisungsereignissen.

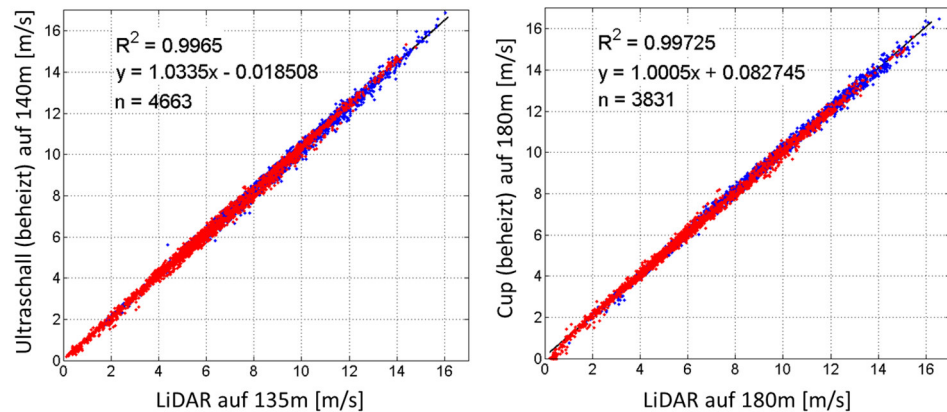


Abbildung 38: Vergleich LiDAR und Ultraschallanemometer (Links) auf 140 m sowie LiDAR und Cupanemometer (rechts) auf 180 m

Auf Basis der zwei Streudiagramme kann entnommen werden, dass die LiDAR-Messungen mit den Messungen von den beheizten Anemometern (Cup und USA) während der Vereisung (Rot) gut übereinstimmen. Es konnten keine vereisungsbedingten Ausreißer beobachtet werden. Ein Bestimmtheitsmaß von 0.99 ist ein repräsentativer Wert für den Standort Rödeser Berg.

Trotz guter Messgenauigkeit leiden LiDAR-Geräte an der Problematik der Verfügbarkeit in zwei Hauptfällen, die im Winter entstehen können.

Fall1: Tiefe Wolken, Nebel oder starker Schnee. Diese verursachen eine hohe Rückstreuung in niedrigen Höhen aber schwache Rückstreuung in großen Höhen, da das Signal nicht ganz durchdringen kann. Auf Basis von Ceilometer-Messungen zeigt die Abbildung 39 die Position und Dichte der Wolken während einer LiDAR-Messung (ca. 10 Stunden). In den ersten 4,5 Stunden lag die Wolkenunterkante (schwarze Punkte) knapp bei 180 m. In den restlichen 5,5 Stunden lag sie sogar bei 100 m Höhe.

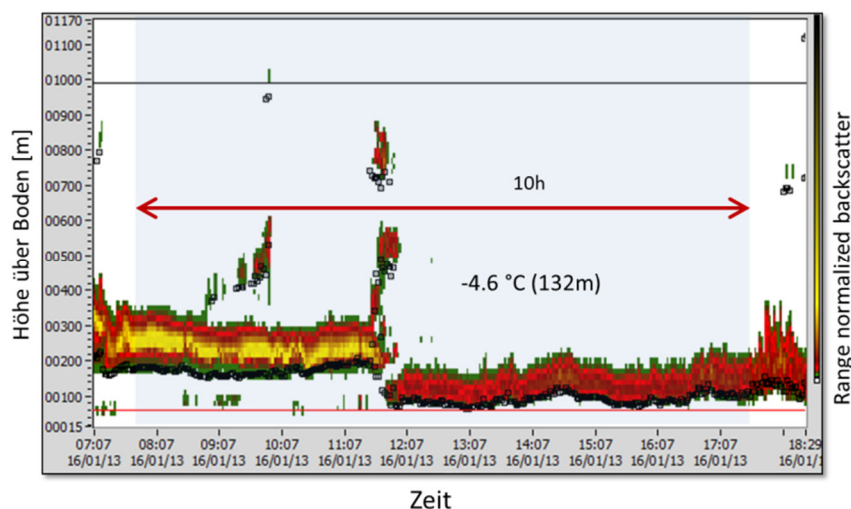


Abbildung 39: Ceilometer-Messungen während tief liegende Wolken

Die Verfügbarkeit der LiDAR-Messung in diesem Fall zeigt Abbildung 40. Für alle Höhen unter 100 m lag die Verfügbarkeit bei 100%. Über 100 m konnte das LiDAR-Gerät zwar bis 200 m messen, die Verfügbarkeit ist aber niedriger geworden, 80 % bei 180 m und 53 % bei 200 m.

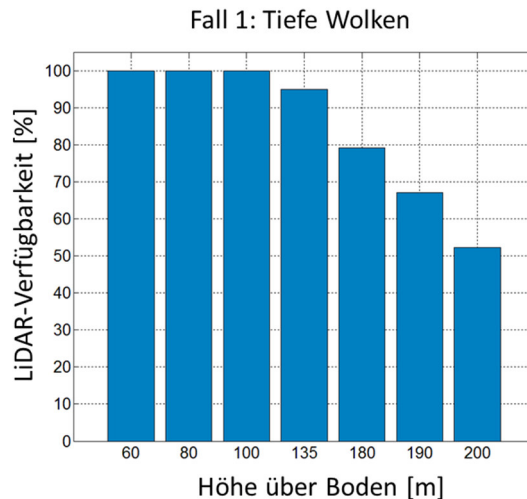


Abbildung 40: Verfügbarkeit der LiDAR-Messungen im Fall 1 (Tiefe Wolken)

Fall 2: Klare Atmosphäre. In manchen kalten Tagen können solche Situationen entstehen (klarer Himmel, geringe Luftdichte und Luftdruck). In der Atmosphäre befinden sich in diesem Fall nicht ausreichend viele Partikel, die die Streuung fördern. Die Verfügbarkeit des LiDAR ist deswegen gering bis null.

Ähnlich wie Abbildung 39 zeigt die Abbildung 41 ein Beispiel für Fall 2 auf Basis einer Ceilometer-Messung. Für die in der Abbildung 41 dargestellte Zeit von 4 Stunden konnte keine Rückstreuung festgestellt werden. Es befinden sich weder Wolken noch Nebel in dieser Situation.

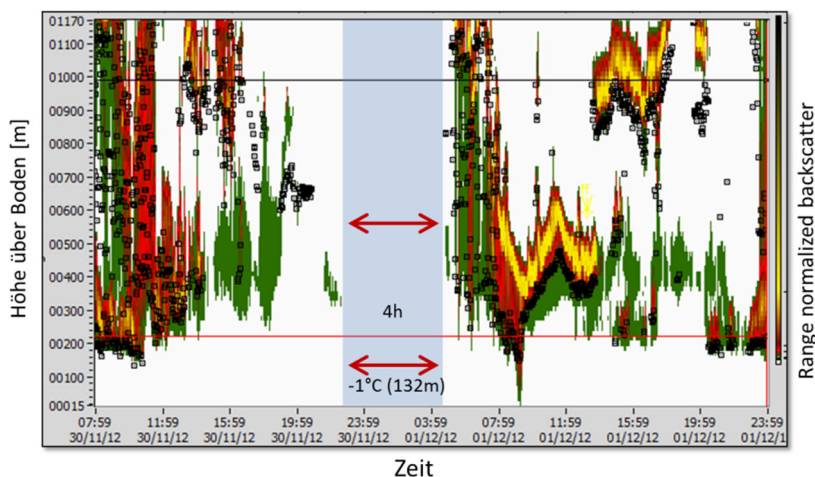


Abbildung 41: Ceilometer-Messungen im Fall 2 (klarer Himmel)

Die Verfügbarkeit der LiDAR-Messung in dieser Zeit lässt sich in Abbildung 42 darstellen. Sogar bei niedrigen Höhen bis 100 m lag die Verfügbarkeit deutlich unter 80%. 28% bei 135 m und fast 0% über 180m Höhe.

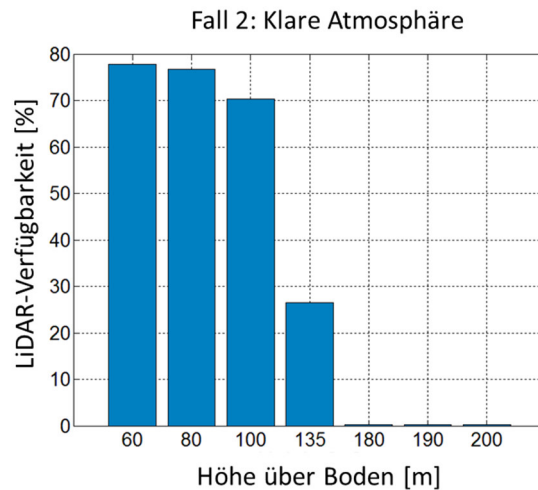


Abbildung 42: Verfügbarkeit der LiDAR-Messungen im Fall 2 (Klarer Himmel)

Die in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- LiDAR zeigen gute Messgenauigkeit unter Vereisungsbedingungen
- Probleme bei der Verfügbarkeit der LiDAR-Messung in zwei Fällen wurden festgestellt:
 - o Tiefe Wolken
 - o Klarer Himmel

Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden auf der WinterWind-Konferenz 2014 in Schweden vorgestellt (Khadiri-Yazami, Durstewitz, Klaas, Peterson, & Baier, 2014) sowie mit den Experten der IEA-Wind Task 19 diskutiert.

2.3.2.5 Entwicklung einer Klassifizierungsbasierte Vereisungsdetektion

Die Detektion von instrumentaler Vereisung auf Basis von meteorologischen Parametern ist eine große Herausforderung. In diesem Kontext wurde eine Methode entwickelt, mit Hilfe dessen eine instrumentale Vereisung auf Basis von einfachen und verfügbaren Wetterparametern ermöglicht wird. Die Methode basiert auf der Nutzung von „Machine Learning“ Verfahren für die Klassifikation der Vereisungsereignisse. Abbildung 43 zeigt eine schematische Darstellung der entwickelten Methode.

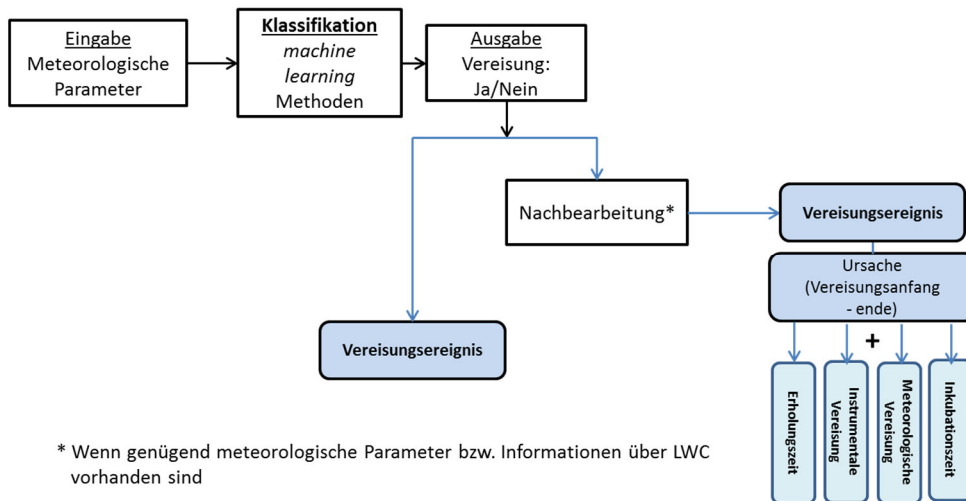


Abbildung 43: Klassifikationsbasierte Methode zur Detektion von instrumenteller Vereisung

Als Eingabeparameter wurden die für die Vereisung entscheidenden Größen verwendet. Es wird zwischen zwei Fällen unterschieden. Im Fall 1 werden einfache und meist verfügbare Parameter wie Temperatur (T), Windgeschwindigkeit (VW) und relative Luftfeuchte (RH) verwendet. Im Fall 2 wurden Informationen über die Präsenz von Wassergehalt in der Luft, dem sogenannten LWC (Liquide water content), als zusätzliche Option benutzt. Diese Information zum LWC wurde auf Basis von Ceilometer-Messungen als Binärsystem mit 1 für die Existenz von LWC und 0 für das Gegenteil entnommen. Da eine Messung von LWC nicht möglich ist, wurde angenommen, dass im Fall von dichten Wolken oder Nebel auf der Höhe der betroffenen Sensoren am Mast der Wert 1 eingetragen wird. Da ein Vereisungszustand für eine Zeit t auch vom vorherigen Zustand $t-1$ abhängt, wurden Messwerte aus der vergangenen Zeit als Eingangsparameter verwendet; die Temperatur im Fall 1 und die Temperatur sowie der Flüssigwassergehalt im Fall 2. Um die Dauer der Inkubationszeit sowie der Erholungszeit in einem Vereisungsprozess zu berücksichtigen, wurden Werte aus vergangenen Zeitschritten verwendet, z.B. von $t-1$ bis $t-7$ ($t-1$ bedeutet $t - 10$ Minuten).

Tabelle 4 zeigt die Inputparameter für den Fall 1. Tabelle 5 für den Fall 2.

Eingangsparameter						Target (als 2 Klassen: 0 / 1)
T (t)	VW (t)	RH (t)	T (t-3)	T (t-6)	T (t-7)	„Vereisung: 1“ oder „Keine Vereisung: 0“ für die Zeit (t)

Tabelle 4: Inputparameter für den Fall1

Eingangsparameter										Target
T (t)	VW (t)	RH (t)	LW C (t)	T (t-3)	LWC (t-3)	T (t-6)	LWC (t-6)	T (t-7)	LWC (t-7)	„Vereisung“ oder „Keine Vereisung“ für die Zeit (t)

Tabelle 5: Inputparameter für den Fall 2

In dieser Untersuchung wurden zwei Methoden für die Klassifizierung verwendet:

Künstliche neuronale Netze (KNN): bezeichnen ein überwachtes maschinelles Lernverfahren, das sowohl zur Klassifikation als auch zur Regression eingesetzt wird. Ein

neuronales Netz besteht aus künstlichen Neuronen die miteinander vernetzt sind. Jede Verbindung zwischen zwei Neuronen ist dabei gewichtet. Die Gewichtung eines Neurons bestimmt den Einfluss der Eingabe eines Neurons bezüglich einer definierten Aktivierungsfunktion. In der Trainingsphase lernt das Netz durch die Modifikation der Gewichte.

Random Forest (RF): ist ein Klassifikationsverfahren, welches aus mehreren verschiedenen, unkorrelierten Entscheidungsbäumen besteht. Alle Entscheidungsbäume sind unter einer bestimmten Art von Randomisierung während des Lernprozesses gewachsen. Für eine Klassifikation darf jeder Baum in diesem Wald eine Entscheidung treffen und die Klasse mit den meisten Stimmen entscheidet die endgültige Klassifikation. Neben einer Klassifikation kann der Random Forest auch zur Regression eingesetzt werden.

Für das Training der Netze mit den vorgestellten Methoden wurden historische Daten für den Fall 1 und Fall 2 verwendet. Die Daten kommen aus Messungen am 200 m Mast des Fraunhofer IWES in Kassel auf 135 m Höhe.

Trainingsdaten
8191 Messpunktpunkte (ca. 57 Tage) davon 1659 Vereisungspunkte (13 Vereisungsereignisse)

Zum Testen der trainierten Netze wurden andere historische Testdaten verwendet, die aus für die Netze unbekanntem Zeitreihen stammen.

Testdaten
14079 Messpunkte (78 Tage) davon 2011 Vereisungspunkte (4 Vereisungsereignisse)

Testergebnisse im Fall 1:

Für den Fall 1 wurden lediglich die Parameter T, VW und RH als Eingangsparameter verwendet. Das Testergebnis wird in Form einer sogenannten „Confusion Matrix“ dargestellt, siehe Abbildung 44. Basierend auf den zwei Klassen 0 für keine Vereisung und 1 für Vereisung zeigt diese Darstellung die Übereinstimmungsquote zwischen der Ziel-Klasse (Target class) und der Ausgabe-Klasse des Netzes (Output class) für die verwendeten Methoden KNN und GBM.

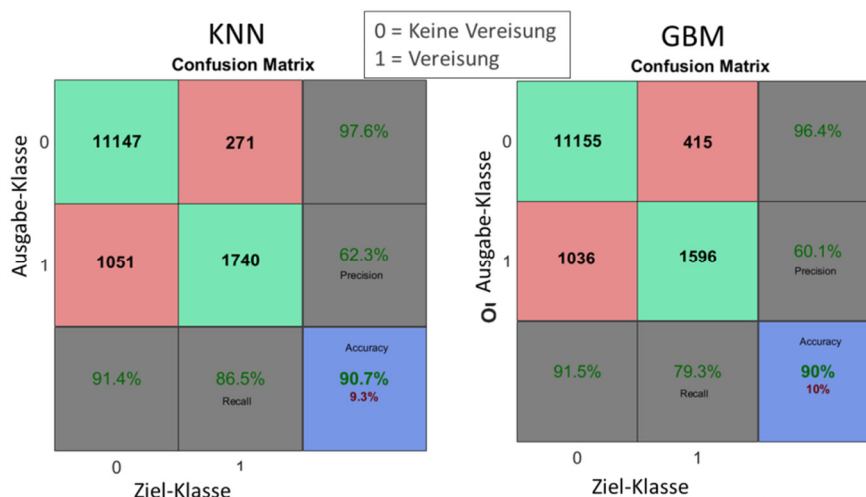


Abbildung 44: Genauigkeit der beiden Methoden in Form einer "Confusion Matrix" für Fall 1

Beide Methoden KNN und GBM zeigen eine fast ähnliche Gesamtgenauigkeit von 90%. Im Fall von KNN wurde für das Treffen der Klasse 1 eine Trefferquote (Recall) von 86% und einer Genauigkeit von 62,3% ermittelt. Bei GBM lag die Trefferquote für die Klasse 1 bei 79,3% und die Genauigkeit bei 60,1%. Für das Treffen der Klasse 0 lagen die Trefferquote und Genauigkeit bei über 90%. Generell liefern die zwei Methoden ähnliche Ergebnisse für die Klassifikation.

Testergebnisse im Fall 2:

Die Abbildung 45 zeigt die Testergebnisse für Fall 2. Durch Informationen über den LWC als weiterer Inputparameter konnte eine bessere Genauigkeit für den Testzeitraum erzielt werden. Die Gesamtgenauigkeit lag bei 95,2% für KNN und 94,5% für GBM. Die Genauigkeit für Klasse 1 lag bei 78,4 % für KNN und 75,1 % für RF.

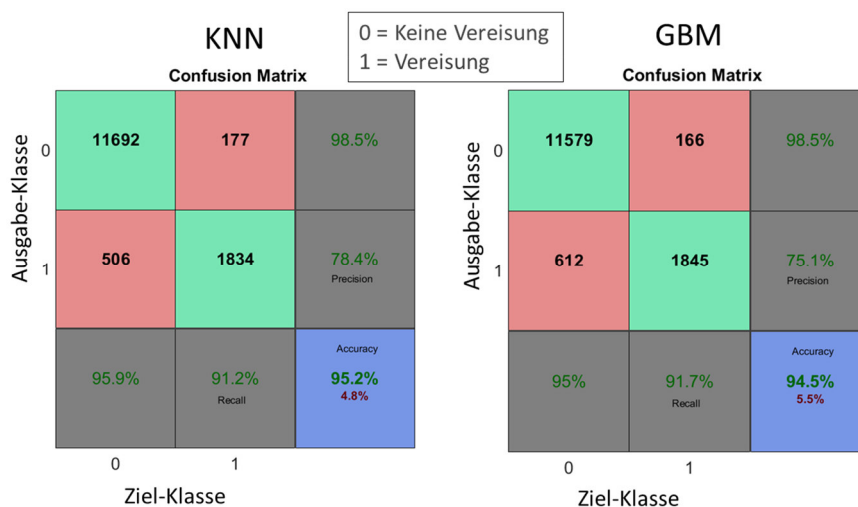


Abbildung 45: Genauigkeit der beiden Methoden in Form einer "Confusion Matrix" für Fall2

Durch die Existenz der Information zum LWC kann in diesem Fall eine Nachbearbeitung der Ergebnisse stattfinden. Durch die Darstellung der Ergebnisse und Eingangsparameter in der Zeitreihe, siehe Abbildung 46, können auf Basis der LWC-Information unlogisch klassifizierte Vereisungspunkte oder Nicht-Vereisungspunkte korrigiert werden. Nicht kontinuierliche Vereisungspunkte können verbunden werden, so dass ein Vereisungsereignis wieder rekonstruiert werden kann. Dadurch können Vereisungsereignisse vollständig erstellt und deren Parameter bestimmt werden.

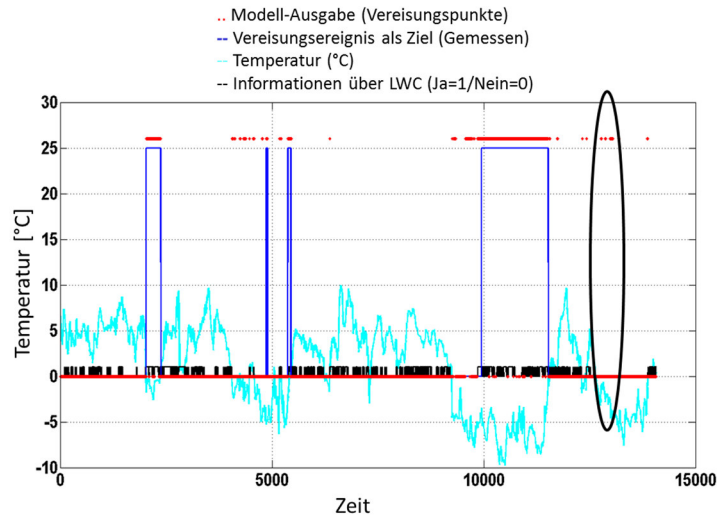


Abbildung 46: Darstellung der Modellausgabe sowie des gemessenen Vereisungsereignisses in Zeitreihe

Nach dem Schritt der Nachbearbeitung konnte eine gesamt Genauigkeit von 99,9% erzielt werden, siehe Abbildung 47.

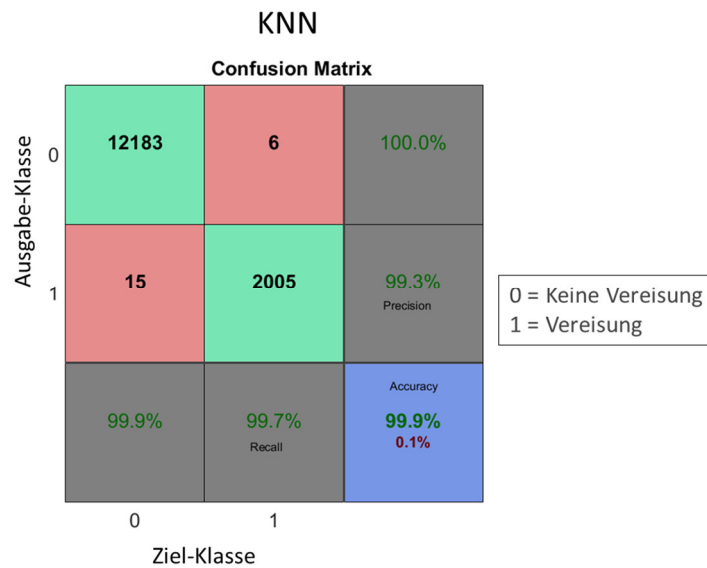


Abbildung 47: Genauigkeit der KNN-Methoden nach der Nachbearbeitung

Die vorgestellte Klassifizierungsmethode zur Vereisungsdetektion auf Basis von meteorologischen Parametern zeigt vielversprechende Ergebnisse. Beide Verfahren KNN und RF haben nahezu identische Ergebnisse geliefert. Mit die Nutzung von Temperatur, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte als Eingangsparameter konnte eine gute Genauigkeit von 90% erreicht werden (Fall 1), wobei die Genauigkeit der Klasse 1 (62,3% am wichtigsten ist). Durch die Berücksichtigung von Informationen zum Wassergehalt LWC und nach der Nachverarbeitungsphase konnte eine fast hundertprozentige Genauigkeit erzielt werden. Um die Genauigkeit der Methode, vor allem von Fall 1, zu erhöhen, müssen in der Zukunft mehr Daten beim Training verwendet werden.

Die vorgestellte Methode kann einen wichtigen Beitrag zur Standortbegutachtung leisten. Auf Basis von einfachen Wetterparametern, diese können aus Messungen oder auch Parameter aus Wettermodellen sein, kann ein beliebiger Standort hinsichtlich der zu erwartenden Vereisungsstunden und –Ereignisse evaluiert werden. Eine Verknüpfung zu dem möglichen Leistungsverlust, zum Beispiel durch die IEA-Site-Classification oder die in IcedBlades entwickelten Vereisungsklassen, wäre dann möglich. Diese Methode muss allerdings an anderen Standorten mit verschiedenen Arten und Dauer der Vereisung getestet und gegebenenfalls erweitert werden.

Die in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Vielversprechende Ergebnisse durch die vorgestellten Klassifikationsmethoden
- Verbesserung durch LWC (Liquid water content) war zu erwarten
- Test der Übertragbarkeit (Ortsabhängigkeit) soll durchgeführt werden
- Training mit mehr Daten sowie Untersuchung weiterer Inputparameter sollen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse dieser Methode wurden auf der WinterWind-Konferenz 2016 in Schweden vorgestellt (Khadiri-Yazami, Scholz, Baier, Tang, & Durstewitz, 2016) sowie mit den Experten der IEA-Wind Task 19 diskutiert.

2.3.3 IcedBlades 3.3 – Durchführungen von Großausführungsmessungen

Die Leistungsabgabe und die Belastungen an den Rotorblättern wurden bei vorhandener Vereisung der Senvion-Windkraftanlage gemessen. Die Ergebnisse dieser Großausführungsmessung wurden auf der Basis spezifizierter Vereisungslastfälle ausgewertet.

2.4 IcedBlades 4 – Leitfaden und Eisklassen

Die ingenieurwissenschaftliche Dimensionierungsanforderungen für Windkraftanlagen an vereisungsgefährdeten Standorten in Form einer Richtlinie oder eines Leitfadens wurden entwickelt. Diese Eisklassen unterscheiden sich hinsichtlich der Dauer und des Umfangs der Vereisung und wurden somit durch ihren Einfluß auf die Lasten der Windkraftanlage in den obigen Dimensionierungsanforderungen berücksichtigt.

2.4.1 IcedBlades 4.2 – Entwicklung von Eisklassen

Hinweis: Um eine bessere logische Ordnung in Bezug auf die wichtigsten Projektziele zu erreichen wird IcedBlades 4.2 (Entwicklung von Eisklassen) bevor IcedBlades 4.1 (Entwicklung neuer technischer Hinweis für Vereisungsbedingungen) beschrieben.

Die 2,5 MW WKA von IcedBlades 2.1 wurde als Referenzturbinen verwendet und in OneWind modelliert. Die Lastsimulationen wurden mittels Dymola durchgeführt (Abbildung 48 und Abbildung 49).

Eingehende Darstellung

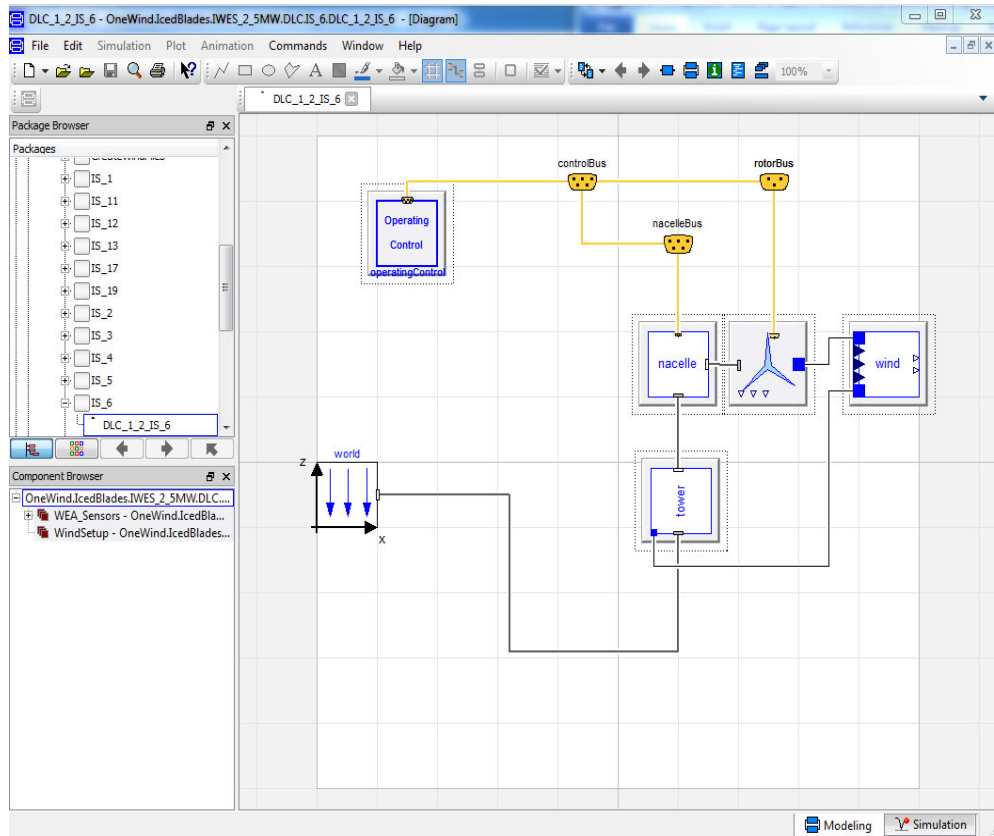


Abbildung 48: IWES 2.5 Windturbine Modell in Dymola

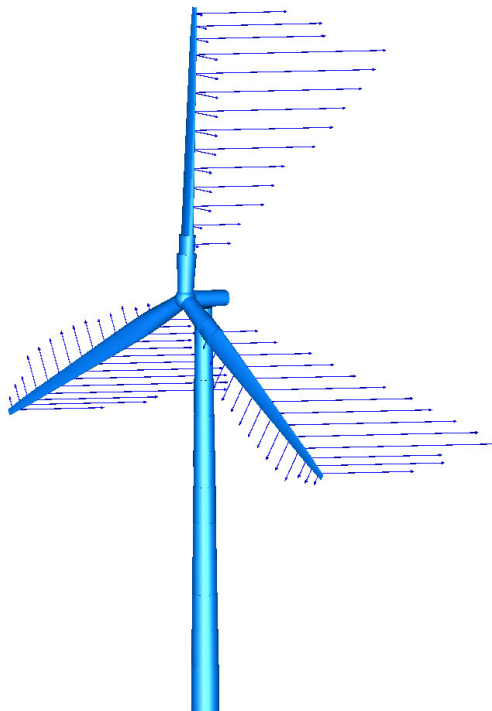


Abbildung 49: IWES 2.5 MW Windturbine simuliert in Dymola

Eine detaillierte Beschreibung der Sensitivitätsanalyse sowie die komplette Lasten Ergebnisse sind in der Präsentation "Performance von vereisten Windenergieanlagen " an

der IQPC veröffentlicht (Xin Gu, 2015). Die Untersuchung von IWES und DNV.GL wird verwendet, um die Abweichung der Lasten Ergebnisse miteinander zu verifizieren.

Das Simulationstool OneWind ist in der Lage, die aerodynamischen Beiwerte für jedes einzelne Blatt zu definieren. Daher kann das aerodynamische Ungleichgewicht physikalisch korrekt modelliert werden, und es muss nicht über einen pauschalen Anstellwinkelfehler von üblicherweise 3° gearbeitet werden.

Es wurden folgende Simulationen mit jeweils 6 Windsamen (basierend auf der Yaw-Fehler) durchgeführt:

- Referenzfalls (Windturbinenbetrieb in einem normalen Zustand, ohne Vereisung Effekte)
- 11 Vereisungsszenarien (abhängig von entweder aerodynamischen oder Massen Ungleichgewicht durch Vereisung verursacht)

Die Ergebnisse wurden dann nachbearbeitet um die Ermüdungslasten zu analysieren. In der Nachbearbeitungsstufe von MLife wurde der Rainflow-Werkzeugkasten in MATLAB angewendet (Verwendung von Rayleigh-Verteilung der Windgeschwindigkeit) mit 20 Jahren Lebenszeit für Windturbine. Die Lastskala wurde auf der Basis von S / N-Kurven mit konstanten Steigungen umgewandelt. Vier Werte für S / N Steigung wurden untersucht ($m = 4, 7, 10$ und 14), die jeweils ein bestimmtes Material für die Komponente darstellt; beispielsweise $m = 4$ ist für Stahl und $m = 7$ für Beton. Die Kräfte und Momente wurden in drei Richtungen von x, y und z berechnet. DLC wurden auch für die Nabe rotierenden und feststehenden, Azimutlager, Turm oben und unten berechnet.

Um eine bessere Bewertung von der vereisten Turbine zu ermöglichen wurden die normiert. Daher sind Werte über 1 in der Tat eine Lasterhöhung durch Vereisung zuzuordnen. Die Definition von Lastkomponenten für die Studie werde in Tabelle 4 gezeigt.

Load Components	Defenition	Unit
fRootFzc3	force at Blade Root	kN
tRootMxc3	moment at Blade Root	kNm
tRootMyc3	moment at Blade Root	kNm
tRootMzc3	moment at Blade Root	kNm
fHubRotFz	force at Hub-Rorating	kN
tHubRotMx	moment at Hub-Rorating	kNm
tHubRotMy	moment at Hub-Rorating	kNm
tHubRotMz	moment at Hub-Rorating	kNm
fYawBrFzp	force at Yaw-Bearing	kN
tYawBrMxp	moment at Yaw-Bearing	kNm
tYawBrMyp	moment at Yaw-Bearing	kNm
tYawBrMzp	moment at Yaw-Bearing	kNm
fFootBrFzp	force at Tower-Bottom	kN
tFootBrMxp	moment at Tower-Bottom	kNm
tFootBrMyp	moment at Tower-Bottom	kNm
tFootBrMzp	moment at Tower-Bottom	kNm

Tabelle 6: Definition von Lastkomponenten

In Abbildung 50 bis Abbildung 53 sind der Einfluss der Massenimbalance aufgetragen.

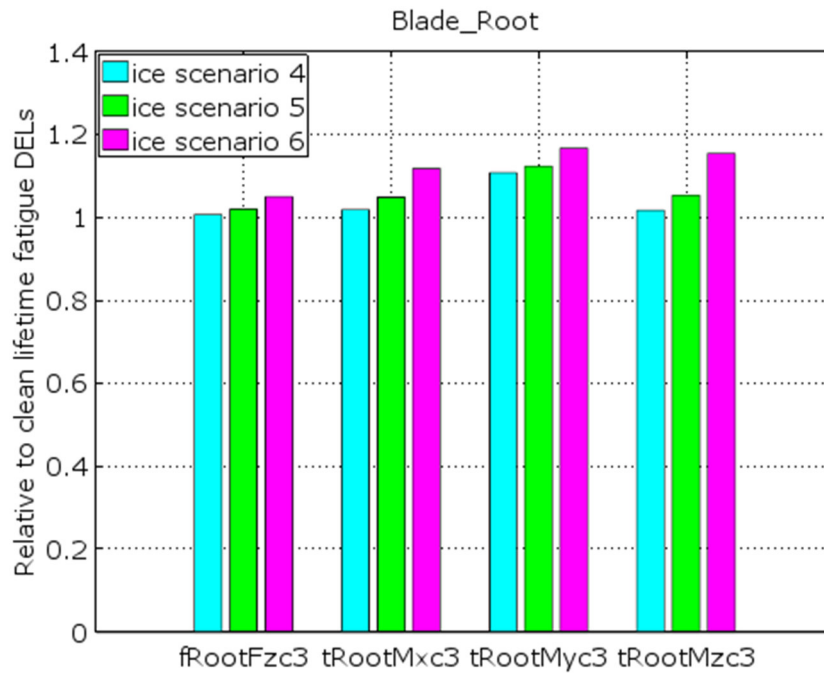


Abbildung 50: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf Blatt-Nabe-Verbindung: S/N Steigung m=10

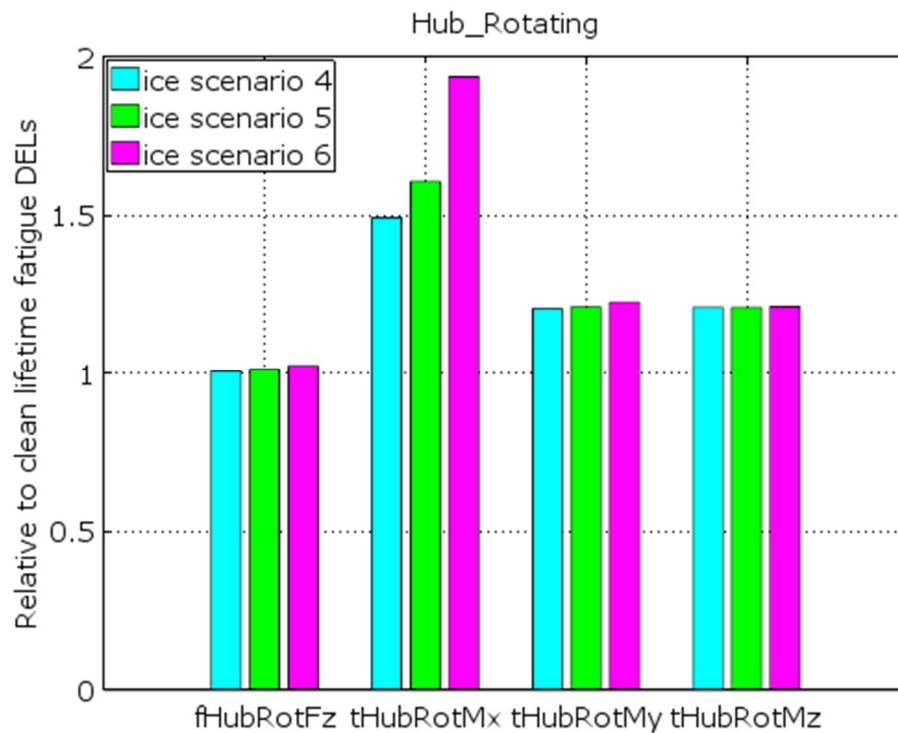


Abbildung 51: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf drehende Nabe: S/N Steigung m=4

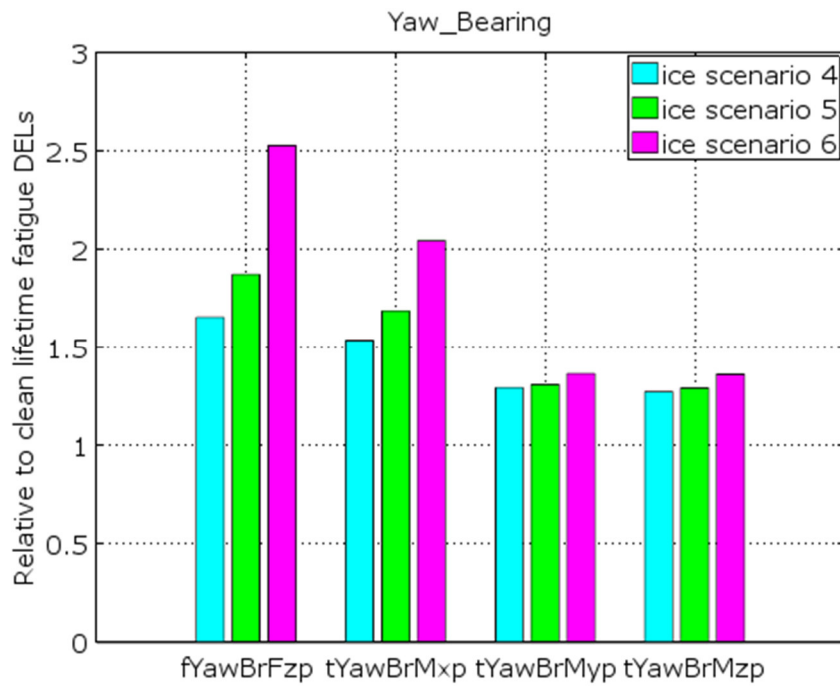


Abbildung 52: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf Azimutlager: S/N Steigung $m=4$

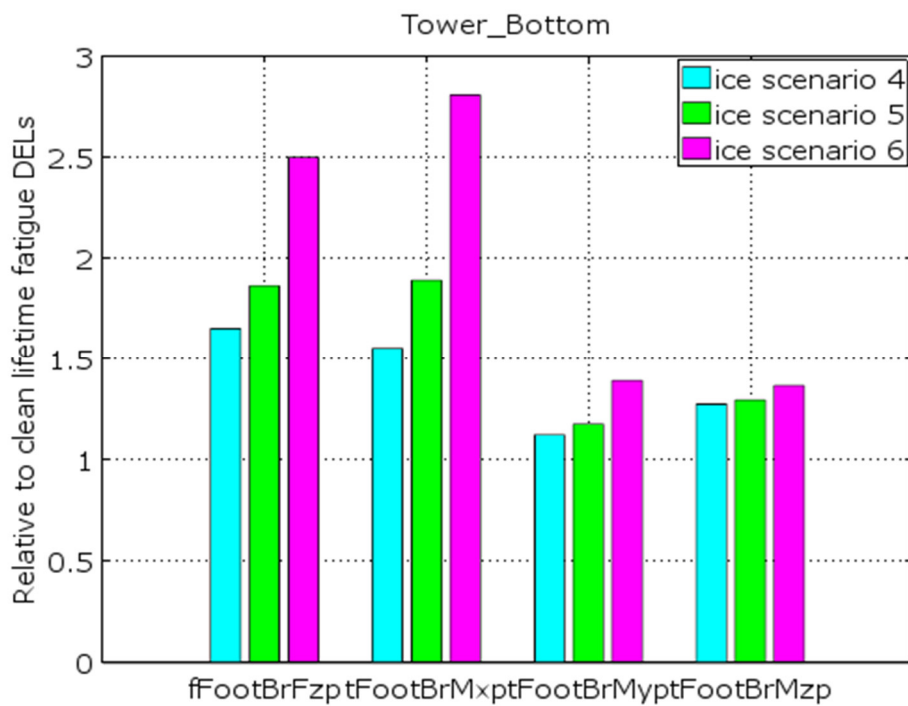


Abbildung 53: Ermüdungslasten aufgrund Masse Ungleichgewicht auf Turmboden: S/N Steigung $m=4$

In Abbildung 54 bis Abbildung 58 sind der Einfluss der aerodynamischen Penalties aufgetragen.

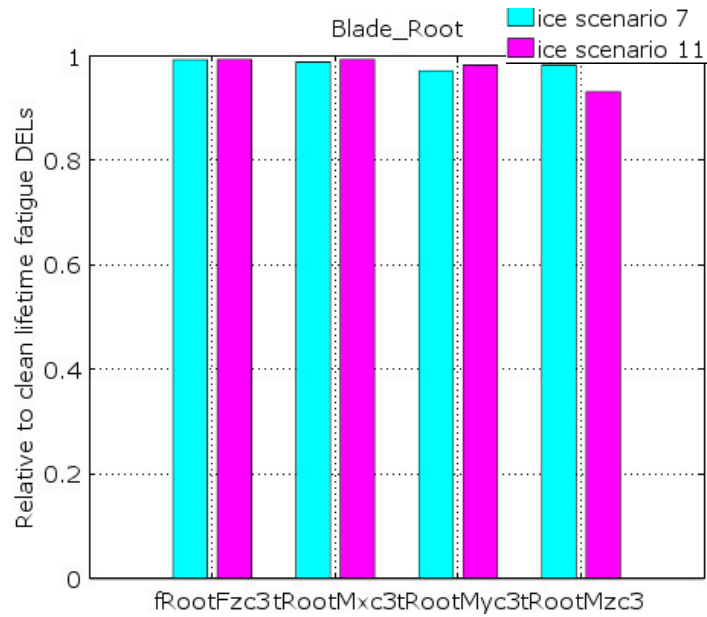


Abbildung 54: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf Blatt-Nabe-Verbindung: S/N Steigung $m=10$

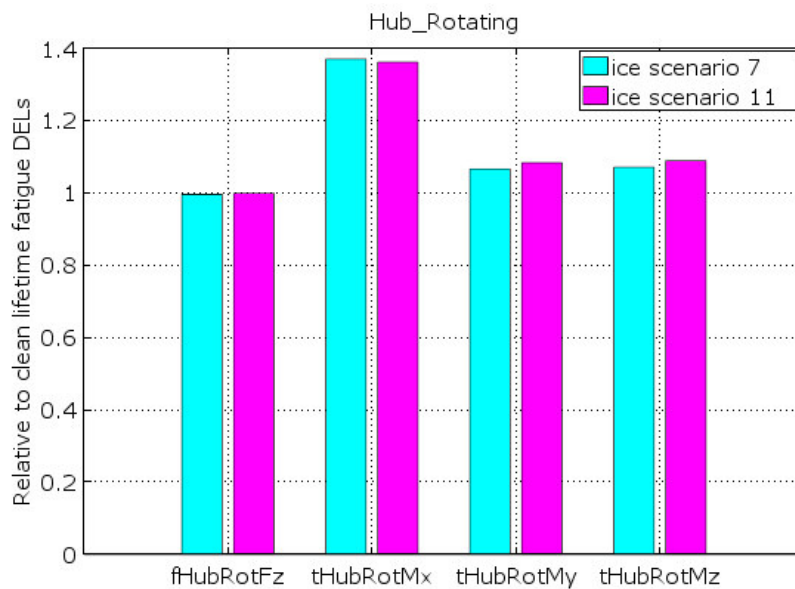


Abbildung 55: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf drehende Nabe: S/N Steigung $m=4$

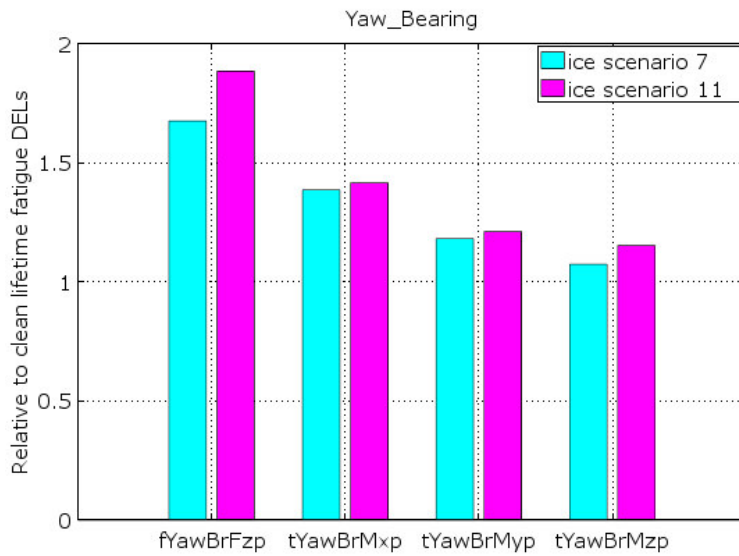


Abbildung 56: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf Azimutlager: S/N Steigung $m=4$

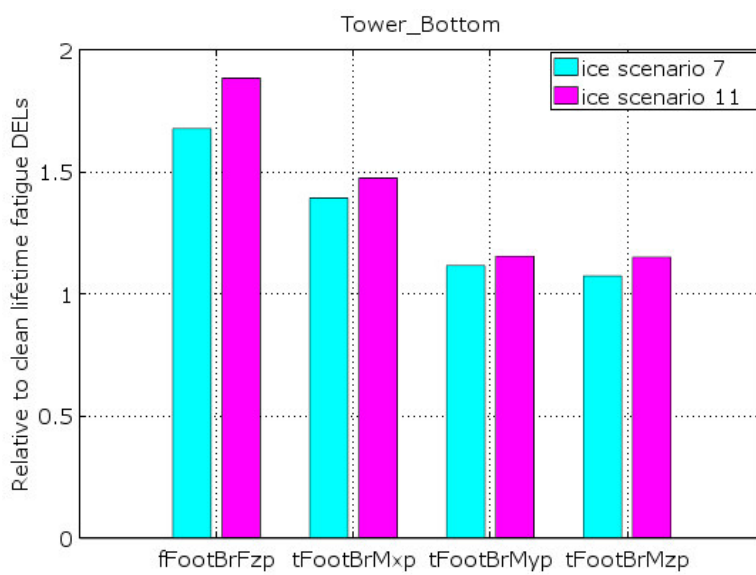


Abbildung 57: Ermüdungslasten von verschiedenem aerodynamischem Penalty auf Turmboden: S/N Steigung $m=4$

In Abbildung 58 bis Abbildung 61 sind der Einfluss des aerodynamischen Ungleichgewichts aufgetragen.

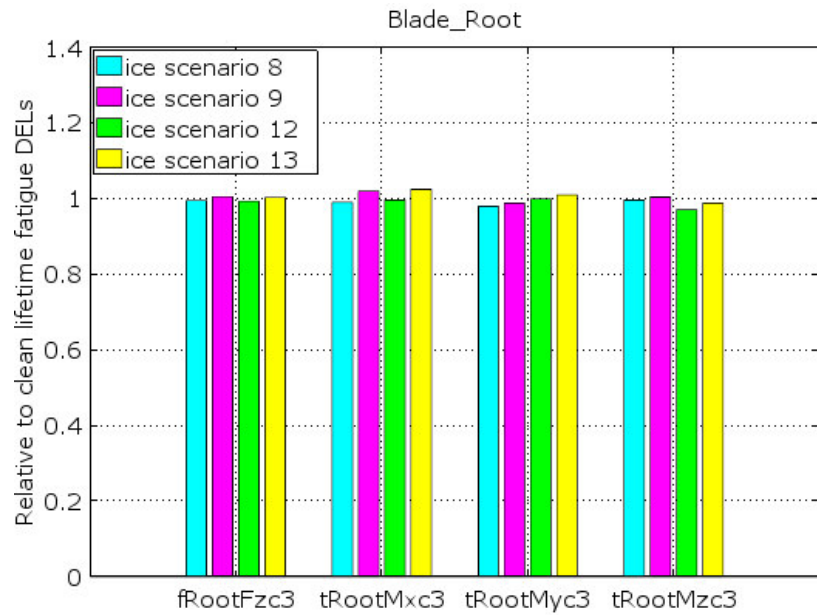


Abbildung 58: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf Blatt-Nabe-Verbindung: S/N Steigung $m=10$

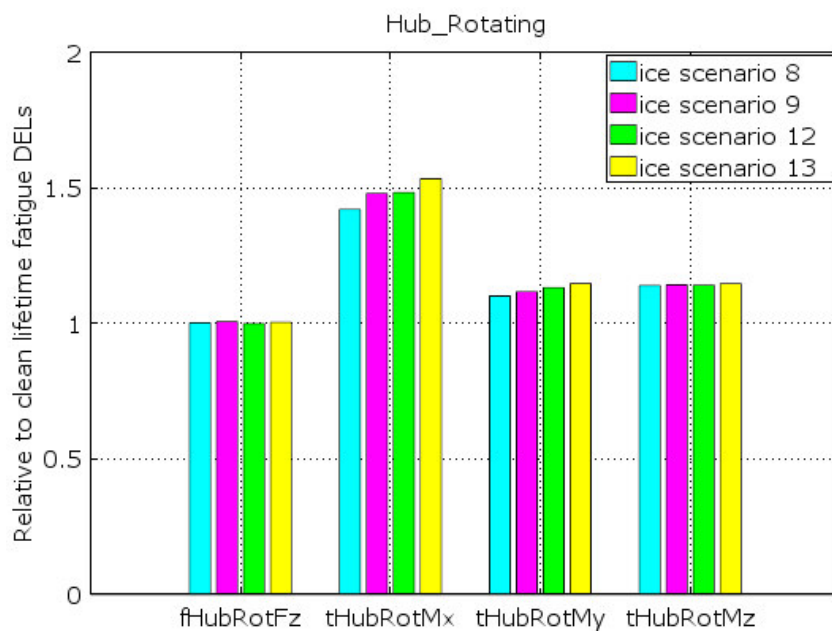


Abbildung 59: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf drehende Nabe: S/N Steigung $m=4$

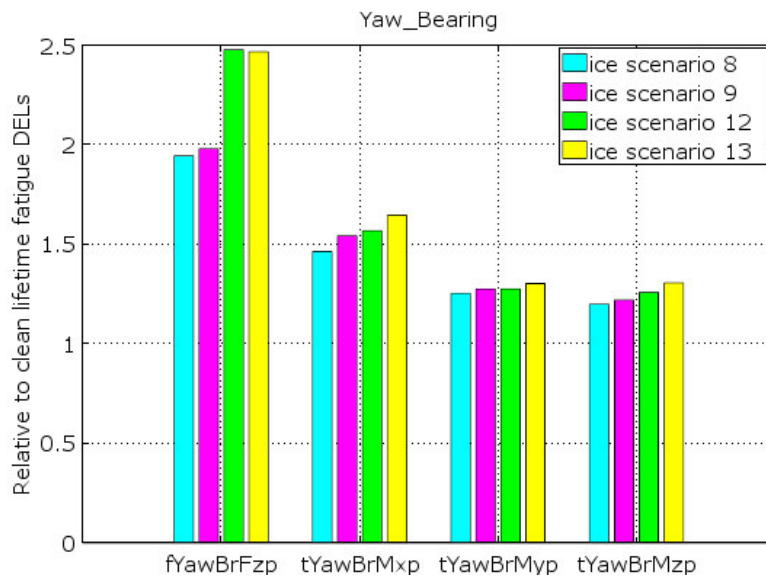


Abbildung 60: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf Azimutlager: S/N Steigung $m=4$

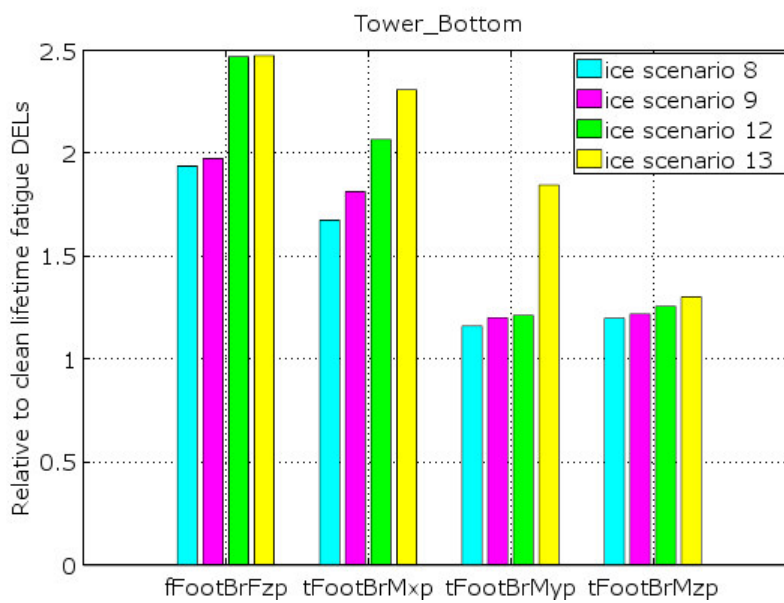


Abbildung 61: Ermüdungslasten aufgrund aerodynamisches Ungleichgewicht auf Turmboden: S/N Steigung $m=4$

In Abbildung 62 bis Abbildung 65 sind der Einfluss der Vereisung Frequenz aufgetragen.

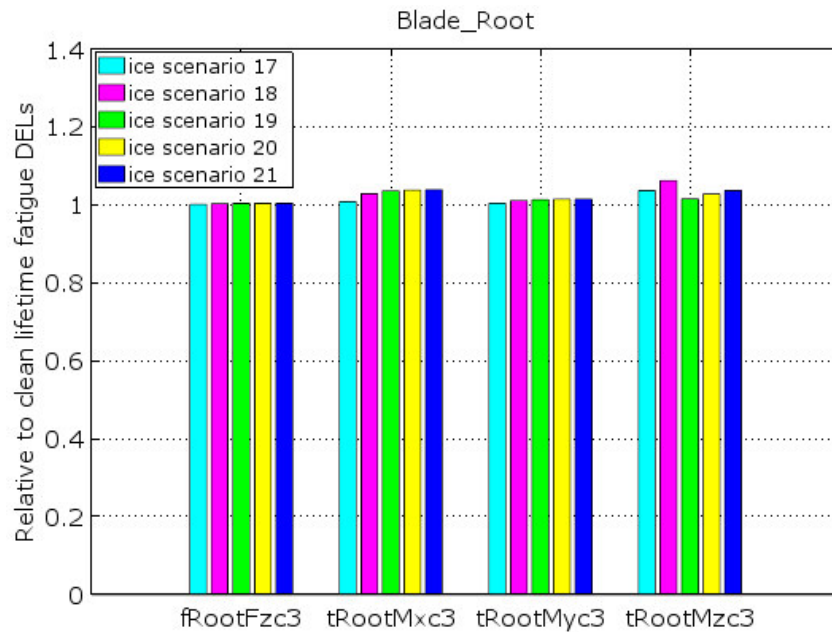


Abbildung 62: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf Blatt-Nabe-Verbindung: S/N Steigung m=10

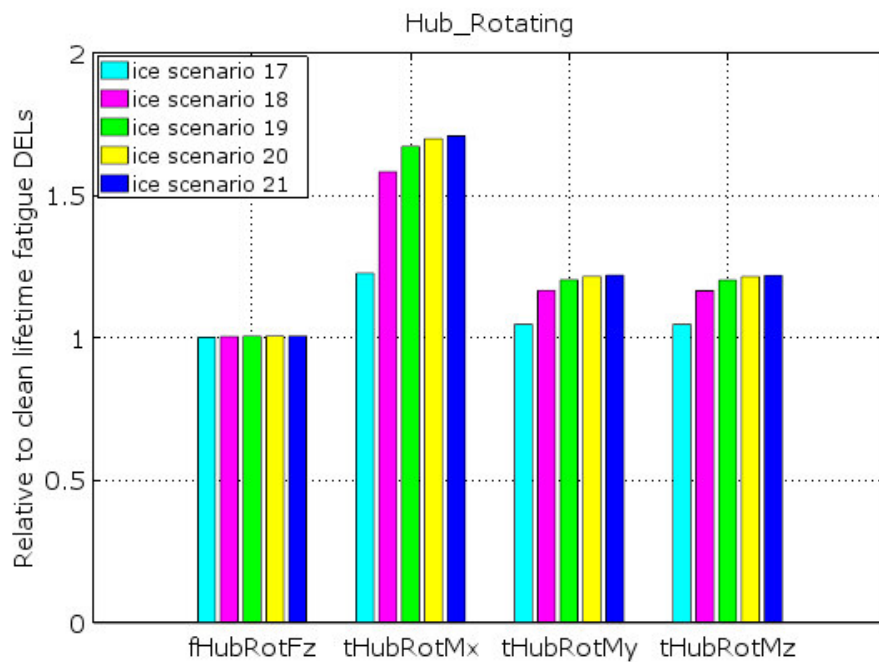


Abbildung 63: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf drehende Nabe: S/N Steigung m=4

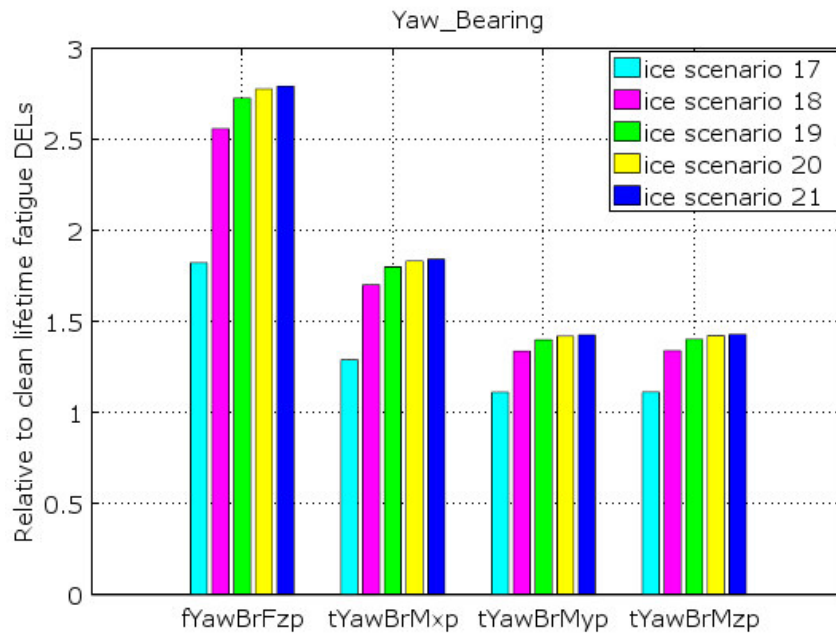


Abbildung 64: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf Azimutlager: S/N Steigung $m=4$

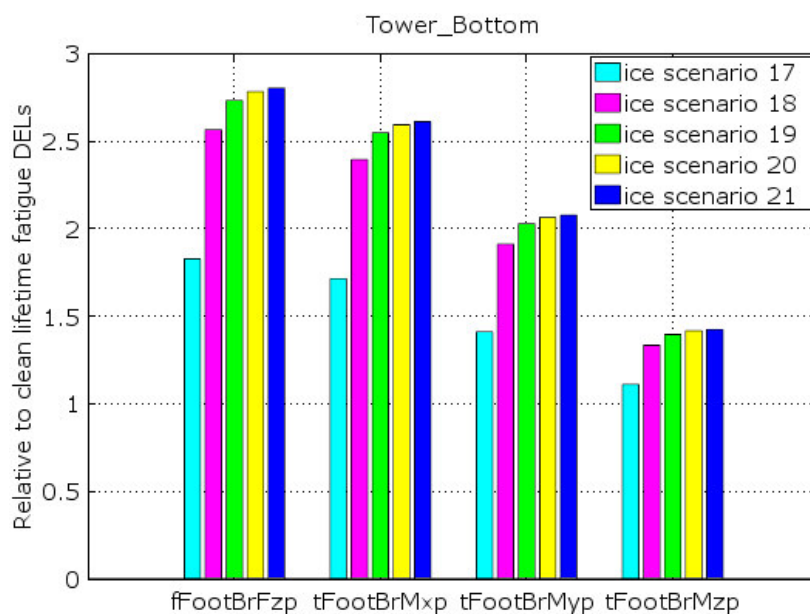


Abbildung 65: Ermüdungslasten für verschiedene Vereisungsfrequenz auf Turmboden: S/N Steigung $m=4$

In Anbetracht der Masseimbalance des Rotors könnte aus den Abbildung 50-53 geschlussfolgert werden, dass die Vereisung Szenario 6 die meisten Auswirkungen auf die Ermüdungslasten hat (Vergleich mit Eis Szenario 4 und 5). Das Massenungleichgewicht wirkt sich erheblich auf den Moment M_x im rotierenden Nabe Koordinatensystem.

Die Untersuchung des Einflusses der Vereisungsintensität auf die Windturbine wird, unter Berücksichtigung aerodynamischer Wirkung der Vereisung auf allen drei Blättern, durch aerodynamische Penalties durchgeführt. Das Eis Szenario 7 entspricht leichter Vereisung während Eis Szenario 11 eine mäßige Vereisung darstellt. Aus diesen Aufnahmepunkten ergibt sich, dass beide Turmbodenkonstruktion und Azimutlager stark von M_{xp} (moderate Vereisung hat mehr Einfluss) betroffen sind. Darüber hinaus haben beide Intensitäten ähnliche Auswirkungen auf die drehende Nabe und die maximale Wirkung ist auf $t_{HubRotMx}$ component (Abbildung 54-57).

Aerodynamisches Ungleichgewicht wurde durch die Kombination von Masse (bezogen auf IECed₄ Standard) und aerodynamische Wirkung, zusammen mit der Vereisung an zwei Blättern untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Unterschied auf Turmboden bei Eis Szenario 13 (2 Blätter beeinflusst durch Masse und Aerodynamik mäßige Vereisung) am einflussreichsten auf alle Komponenten, vor allem auf F_z ist. Das Azimutlager ist auch durch das aerodynamische Ungleichgewicht besonders bei der $f_{YawBrFz}$ Komponente und für mäßige Vereisung (Abbildung 58-61) betroffen.

Um den Vereisungs-Frequenzeffekt auf Windkraftanlagen zu untersuchen wurden fünf verschiedene Vereisungsdauern mit mäßigem Vereisungszustand von zwei Blättern geprüft. Die Belastungen steigen linear mit der Vereisungsdauer an (Abbildung 62-65).

Im Allgemeinen zeigen die folgenden Lastkomponenten der 2.5MW IWES Testturbine eine erhöhte Belastung aufgrund der Vereisung:

Mz Blattfuß (Pitch- Moment)	10% (m=10)
Mx Blatt (seitlich Moment)	10% (m=10)
Mx Drehnabe (m=4)	40%
Fz (Vertikale Kraft in Turm oben und unten) relevant)	70% (not relevant)
Mx Seite-Seite Turm Biegemoment an allen Turmsektionen relevant wenn My größer als Mx ist)	25% (nicht relevant)
My Vorwärts-Rückwärts- Turm Biegemoment an allen Turmsektionen	10% (relevant)

Auf der Basis der Simulationsergebnisse des Fraunhofer IWES und DNV.GL werden eine einzige Eisklasse durch DNV.GL vorgeschlagen und mit den folgenden Parametern modelliert (Steiniger, 2016):

- inhomogene aerodynamische Vereisung mit Penalty-Faktor "durchschnittliche Vereisung" für alle drei Blätter und zusätzlich einen Pitch-Fehler von 3° für das einzelnen nicht vereisten Blatt
- inhomogene Eis-Massenverteilung für zwei Blätter auf die volle Tragweite und 50% der Eismasse für das dritte Blatt anwenden.

2.4.2 IcedBlades 4.1 – Entwicklung eines Leitfadens für Rotorblattvereisungen

Das Ziel der IcedBlades 4.1 ist Kriterien für die Lastberechnung von Windkraftanlagen unter Vereisungsbedingungen zu entwickeln, die die Grundlage für das Design und die Zertifizierung von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen darstellen. Aufgrund der entwickelten Modellierungsansätze und den von dem Fraunhofer IWES und DNV.GL durchgeführten Sensitivitätsstudien im IcedBlades 4.2 werden die qualitativen und quantitativen Anforderungen formuliert.

Nach IcedBlades 4.1 wird das folgende Modell für das Design und die Zertifizierung

Vereisung von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen vorgeschlagen (Steiniger, 2016):

- inhomogene Eis-Massenverteilung für zwei Blätter auf die volle Tragweite und 50% der Eismasse für das dritte Blatt anwenden.
- inhomogene aerodynamische Vereisung mit Straffaktoren für "durchschnittliche Vereisungsdauer" für alle drei Blätter und zusätzlich einen Steigungsfehler von 3° für die einzelnen nicht vereisten Blätter.
- Vereisungsdauer von 30 Tagen im Jahr.
- Anwendung des turbulenten Wind für die Simulation von Zeitreihen für alle Zeitreihen (mit und ohne Vereisungsbedingungen).

2.5 IcedBlades 5 – Vorhersage des Vereisungsrisikos

In diesem Arbeitspaket wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich das Risiko der Vereisung von Windkraftanlagen vorhersagen lässt. Die Arbeiten sind in drei Schritten unterteilt. Als erstes wurde ein physikalisches Modell zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Windkraftanlagen basierend auf Wetterprognosedaten entwickelt. Das Modell wurde zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Regionen erweitert. Zum Schluss wurden Untersuchungen zur Vereisungsauswirkung auf die Windleistungsprognosen durchgeführt.

2.5.1 IcedBlades 5.1 - Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Windkraftanlagen

In den folgenden Abschnitten wird ein Verfahren zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Windenergieanlagen (WEA) vorgestellt. Die Grundlage der entwickelten Vereisungsvorhersage bildet das numerische Wetterprognosemodell COSMO-DE des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Als Standardmodell für die Berechnung von Vereisung auf diversen Strukturen hat sich das sogenannte Makkonenmodell herausgebildet, das die Vereisungsrate eines Zylinders beschreibt. Dieses Modell wird mit diversen Erweiterungen nach Vorbild von Davis et al. (Davis, Hahmann, Clausen, & Zagar, 2014) so umformuliert, dass eine Berechnung der Eismasse auf den Rotorblättern von WEA ermöglicht wird.

In einer Literaturrecherche konnten keine Vereisungsstudien gefunden werden, die auf dem COSMO-DE Wetterprognosemodell basieren. Bisherige Studien nutzen als Grundlage häufig das WRF-Modell (siehe (Davis, Hahmann, Clausen, & Zagar, 2014), (Nygaard B. E., 2009), (Børkjedal, Hansson, & van der Velde, 2015)). Da das COSMO-DE Modell eine höhere Auflösung (2,8 km x 2,8 km) als das WRF-Modell (12 km x 12 km) bietet, wurde dieses Modell für die Vereisungsfragestellung verwendet.

2.5.1.1 Das COSMO-DE Wettermodell und Vereisungsparameter

Das „Lokal-Modell Kurzzeitfrist“ (LMK) des DWD wurde entwickelt, um ein modellgestütztes Vorhersageverfahren für den Kurzzeitfristbereich (bis 18h) bereit zu stellen. Die Vorhersagefrist liegt bei 21 Stunden mit 8 Modellläufen pro Tag. Die horizontale Gittermaschenweite beträgt ungefähr 2,8 km (M. Baldauf, 2014).

Die Wetterparameter werden im COSMO-DE auf einem sphärischen Gitter definiert. Die vertikale Gitterstruktur besteht aus 50 Schichten. Für die Vereisungsprognose lagen folgende Parameter auf verschiedenen Modellschichten vor:

- Modellorographie h
- Temperatur T

- Luftdruck p_o
- Horizontale Windgeschwindigkeit U, V
- spezifische Luftfeuchtigkeit Q_v
- Wolkenwassermasse Q_c
- Regenwassermasse Q_r
- Schneewassermasse Q_s
- Graupelwassermasse Q_g
- Wolkenbedeckungsgrad CLC
- vertikale Windgeschwindigkeit ω

Wenn als Referenzdruck an der Erdoberfläche der Luftdruck auf Meeressniveau ($p_{sl} = 1000 \text{ hPa}$) angenommen wird, kann für die verschiedenen Modellschichten eine entsprechende Referenzerhöhung über dem Erdboden angegeben werden.

Modellschicht	Höhe über der Erdoberfläche	Zugeordneter Referenzdruck	Wettervorhersageparameter
Bodenfeld	0 m	1000 hPa	h, p_o
49	51,43 m	993,92 hPa	h, T
48	94,64 m	988,83 hPa	$h, U, V, Q_r, Q_s, Q_g, CLC$
47	150 m	982,35 hPa	$h, T, U, V, Q_v, Q_r, Q_s, Q_g, CLC$
46	217,86 m	974,45 hPa	$h, U, V, Q_r, Q_s, Q_g, CLC$
44	392,5 m	954,38 hPa	h, T

Tabelle 7: Wettervorhersageparameter, die für die Windleistungsprognose vorliegen sowie die zugeordneten Referenzhöhen über NN und Referenzdrücke bei Annahme eines Bodendrucks von $p_{sl} = 1000 \text{ hPa}$

Des Weiteren liegt die interpolierte vertikale Windgeschwindigkeit ω auf den Druckflächen 950 hPa, 975 hPa und 1000 hPa vor.

Für die Berechnung für Windenergieanlagen (WEA) scheinen die Modellschichten 46, 47 und 48 von besonderem Interesse, da sie die Höhen der Naben und Rotorblätter typischer Anlagen abbilden. Um eine möglichst exakte Berechnung durchzuführen, sollten alle Parameter auf einer Modellschicht vorliegen.

Zunächst wird die Temperatur auf den Modellschichten 46, 48 und auf Bodenniveau berechnet. In der Troposphäre (Schicht über der Erdoberfläche) kann genähert von einem konstanten atmosphärischen Temperaturgradienten ausgegangen werden (Schumann, 2012). Dieser wird mit Hilfe der Temperaturen auf den Modellschichten 44, 47 und 49 und den dazugehörigen ortsabhängigen, exakten Höhen aus der Modellorographie bestimmt.

Bei Annahme eines konstanten atmosphärischen Temperaturgradienten kann der Luftdruck in einer Modellschicht durch die barometrische Höhenformel angenähert werden. Die vertikale Windgeschwindigkeit wird anschließend den Modellschichten 46, 47 und 48 zugeordnet. Dafür werden die drei Druckflächen 950 hPa, 975 hPa und 1000 hPa, auf denen die vertikale Windgeschwindigkeit vorliegt, in ihre Höhen umgerechnet.

Die lokale Höhendifferenz zwischen Druckfläche und Modellschicht wird gebildet und ein Minimum gesucht. Damit können die vertikalen Windgeschwindigkeiten den verschiedenen Modellschichten zugeordnet werden.

Durch die oben genannte Vorgehensweise liegen alle relevanten Wetterparameter auf den Modellschichten 46, 47 und 48 vor. Auf dieser Grundlage kann in diesen Schichten die Berechnung der Vereisung erfolgen.

2.5.1.1.1 Der Flüssigwassergehalt

Eine entscheidende Größe bei Vereisungsvorgängen ist der Flüssigwassergehalt (Liquid Water Content, LWC) in der Luft. Die allgemein bekannte „Relative Luftfeuchtigkeit“ gibt das Verhältnis zwischen der aktuellen Konzentration von Wassermolekülen in der Luft zu deren Konzentration bei Sättigung an.

Steigt die relative Luftfeuchtigkeit auf 100 % bzw. überschreitet sie sogar, wird von gesättigter bzw. übersättigter Luft gesprochen. Befinden sich ausreichend Nukleationskeime in der Luft, wird der Zustand der Übersättigung durch Kondensation verlassen und die relative Luftfeuchtigkeit sinkt zurück auf 100 % (siehe (Schumann, 2012)). Die relative Luftfeuchtigkeit kann somit als Indikator genutzt werden, ob sich Wolken oder Wassertropfen bilden - unter der Voraussetzung, dass sich genügend Nukleationskeime in der Luft befinden. Über die Masse der bereits kondensierten Wassertropfen in der Atmosphäre gibt sie genauso wenig Auskunft, wie über deren Beschaffenheit. Diese Informationen sind für eine zuverlässige Vereisungsvorhersage unabdingbar. Daher ist die relative Luftfeuchtigkeit als alleinige Größe zur Berechnung der Vereisung nicht geeignet.

Im COMSO-DE Modell werden der skalige Niederschlag und die damit verbundenen Umwandlungsprozesse durch eine sogenannte 1-Momenten-Bulk-Formulierung (Kessler-Typ) bestimmt. Mit deren Hilfe werden neben dem Wasserdampf fünf verschiedene Kategorien der atmosphärischen Erscheinungsformen von Wasser (Hydrometeore) explizit prognostiziert (M. Baldauf, 2014). Es werden die fünf Kategorien Wolkenwasser, Wolkeneis, Regenwasser, Schnee und Graupel berücksichtigt. Das Wolkenwasser wird dabei nur prognostiziert, wenn die relative Luftfeuchtigkeit in einem Gitterelement 100 % beträgt, die Bewölkung also explizit aufgelöst werden kann.

In Deutschland wird Vereisung von WEA zumeist durch Wolkenwasser oder nassen Schnee hervorgerufen. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Parametrisierung des LWC im Wettervorhersagemodell entscheidend für die Qualität einer Vereisungsvorhersage ist (Davis, Hahmann, Clausen, & Zagar, 2014).

2.5.1.1.2 Der Tröpfchendurchmesser mit medianem Volumen

Die Größe der Wassertropfen in der Luft wird im COSMO-DE Modell nicht prognostiziert, ist für die Vereisungsvorhersage allerdings ein wichtiger Parameter. In diesem Modell wird für das Wolkenwasser der Tröpfchendurchmesser mit medianem Volumen (Median Volume Diameter, MVD) verwendet. Es handelt sich um den Durchmesser, der das Wasservolumen der Tröpfchenverteilung in zwei Hälften teilt.

Im Rahmen ihrer Untersuchungen der Flugzeugvereisung veröffentlichte das „National Advisory Committee For Aeronautics“ (NACA) Empfehlungen zur Berücksichtigung meteorologischer Parameter. Eine Zusammenfassung wird im „Aircraft Icing Handbook“ gegeben (Heinrich, Ross, Zumwalt, Provorse, & Padmanabhan, 01.01.1991), in dem auch durchschnittliche Maximalwerte des LWC in Abhängigkeit von der Temperatur und des MVD für Stratuswolken aufgelistet sind. Abbildung 66 zeigt das auf diesen Werten basierende Diagramm. Gemäß der „World Meteorological Organization“ (WMO) sind Wolken des Typus Stratus zwischen der Erdoberfläche und einer Höhe von maximal 1200 m vorzufinden (WMO classification of clouds), und damit für die Vereisung bodennaher Strukturen relevant. Die Interpolation des MVD erfolgt anhand des Diagrammes in zwei Schritten:

1. Ausgehend von der gegebenen Umgebungstemperatur wird für verschiedene festgesetzte MVD der LWC interpoliert. Es entsteht eine Isotherme, die den Zusammenhang zwischen LWC und MVD angibt.
2. Durch die Isotherme aus Schritt 1 lässt sich der MVD mit Hilfe des gegebenen LWC ablesen.

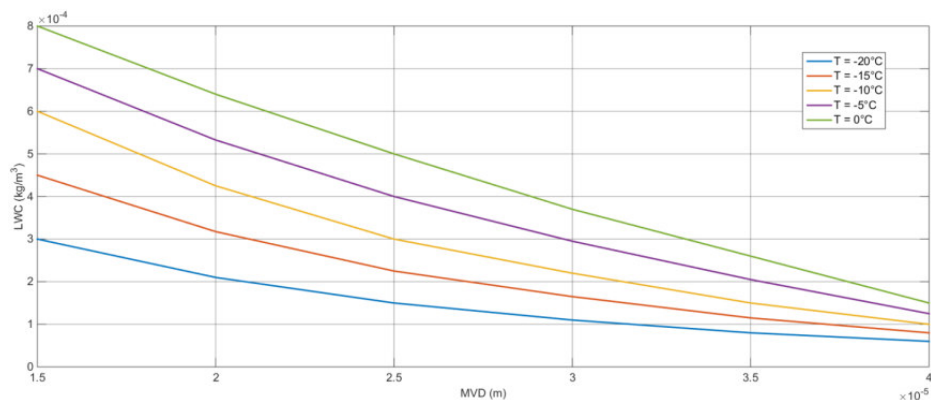


Abbildung 66: Der LWC in Abhängigkeit des MVD's für Stratuswolken. Verschiedene Isothermen, die aus Messungen nach (Heinrich, Ross, Zumwalt, Provorse, & Padmanabhan, 01.01.1991) hervorgehen, sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

Als Minimum wird für den MVD ein Wert von 15 µm und als Maximum ein Wert von 40 µm angenommen.

2.5.1.1.3 Der Vorhersagehorizont

Im COSMO-DE Modell wird eine Vorhersagefrist von 21 Stunden mit Modellläufen alle drei Stunden, insgesamt acht pro Tag, erreicht. Aufgrund der hohen Unsicherheit in der Prognose des Flüssigwassergehalts liegt der Fokus hier auf dem kurzfristigsten Bereich. Die Wetterparameter werden mit einer Vorhersagefrist von acht Stunden aus der Datenbank abgefragt. In den folgenden Untersuchungen des Vereisungsmodells werden lediglich Vorhersagezeiträume genutzt, die stündlich aufzulösen sind. Besonders häufig werden dabei die „Kürzestfrist“ sowie die „6-Stunden Vorhersage“ dargestellt, anhand derer die zeitliche Variation der Modellgüte im kurzfristigen Bereich verdeutlicht werden soll. In Tabelle 8 wird der Zusammenhang zwischen Vorhersagefrist und Bezeichnung veranschaulicht.

Modellauf	Vorhersagefrist								
	15min.	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h
i	Kürzestfrist						6-Stunden		
i+1 (+3h)	Kürzestfrist						6-Stunden		

Tabelle 8: Bezeichnungen der Vorhersagezeiträume. Kürzestfrist und 6-Stunden Vorhersage sind exemplarisch dargestellt, um den Zusammenhang zwischen der Bezeichnung und der Vorhersagefrist des Wettermodells zu verdeutlichen.

2.5.1.2 Standardmodell vereisender Strukturen – Das Makkonenmodell

Einen Vorteil zylinderförmiger Strukturen bilden die vielfältigen Untersuchungen der Umströmungseigenschaften. Insbesondere für die Trajektorien von Wassertröpfchen, die in einem Luftstrom um einen Zylinder herumströmen, gibt es reproduzierte numerische Näherungen (Finstad, Lozowski, & Gates, 1988).

Im Anhang der ISO 12494 wird die Modellierung von Vereisung nach dem Makkonenmodell empfohlen, das sich bereits in diversen Studien für verschiedene Vereisungsarten bewährt hat (z.B. (Dobesch, Makkonen, & Nikolov, 2005) oder (Nygaard B. E., 2009)).

Das Makkonenmodell beschreibt die Eisbildung aufgrund von Wasserpartikeln in der Luft, die mit einem Objekt kollidieren (Makkonen L., 2000). In typischen Vereisungsbedingungen formen sich signifikante Eismassen durch diese aufprallenden

Wassermassen - das Eiswachstum durch Kondensation von Wasserdampf (Raureif) ist hingegen vernachlässigbar (Makkonen L., 2000). Das Modell lässt sich für verschiedene Erscheinungsformen von Wasser in der Luft anwenden. So wird Vereisung durch gefrierenden Niederschlag, nassen Schnee und Wolkentropfen berücksichtigt. Wolkentropfen zeichnen sich im Gegensatz zu Regentropfen dadurch aus, dass sie kleiner als etwa 50 µm sind und keine nennenswerte Relativbewegung zur Luftströmung besitzen (M. Baldauf, 2014).

Makkonen beschreibt die Vereisungsrate eines Zylinders durch seinen Querschnitt A , den Flüssigwassergehalt in der Luft LWC , die Wasserpartikelgeschwindigkeit V sowie drei Korrekturfaktoren α_1 , α_2 und α_3 . Für einen Zylinder mit einer Länge von einem Meter mit dem Durchmesser D gilt:

$$I = \frac{dM}{dt} = \alpha_1(t) * \alpha_2(t) * \alpha_3(t) * LWC(t) * V(t) * D$$

Formel 1

Die drei Korrekturfaktoren Kollisionseffizienz α_1 , Anhafteffizienz α_2 und Wachstumseffizienz α_3 nehmen abhängig von den Umgebungsparametern Werte zwischen 0 und 1 an und reduzieren so die maximale Vereisungsrate. Weiterhin ist zu beachten, dass der LWC in der Luft gleichzeitig in verschiedenen Erscheinungsformen vorliegen kann. Für jede Erscheinungsform ändern sich sowohl die Korrekturfaktoren als auch die Wasserpartikelgeschwindigkeit in Formel 1. Auf die Besonderheiten der verschiedenen Vereisungsursachen wird im Folgenden eingegangen.

2.5.1.2.1 Vereisungsursachen

Die Art der Vereisung ist abhängig von den zu Grunde liegenden Hydrometeoren in der Atmosphäre. Gemäß ISO 12494 kann zwischen gefrierendem Regen, nassem Schnee und Wolkenwasser als Vereisungsursache unterschieden werden (Foder, 2001). Einhergehend mit den verschiedenen Vereisungsursachen bilden sich verschiedene Eistypen aus. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Modellierungen der verschiedenen Vereisungsarten so, wie sie in dieser Vereisungsprognose vorgenommen werden.

Die Vereisung durch gefrierenden Regen tritt gemäß ISO 12494 in einem Temperaturbereich $-10^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$ auf und führt zu Glatteisbildung. Für Glatteis kann eine Dichte von $900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenommen werden (Foder, 2001).

Laut ISO 12494 führt die Vereisung durch Wolkenwasser in Abhängigkeit von Temperatur und Windgeschwindigkeit zu unterschiedlichen Eisdichten. Diese können zwischen $150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und $700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ variieren.

Vereisung durch nassen Schnee tritt laut ISO dann auf, wenn die Temperatur im Bereich $0^\circ\text{C} < T < 3^\circ\text{C}$ liegt. Abweichend zu Makkonen wird in diesem Modellentwurf die Vereisung nach Nygaard, beschrieben in Eliasson et al. (Eliasson, Agustsson, Hannesson, & Thorsteins), berechnet. Die Dichte der durch nassen Schnee gebildeten Eismasse wird mit $700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenommen.

In Abbildung 67 ist eine Zusammenfassung der Vereisungsprognose mit den verschiedenen Vereisungsursachen und den daraus resultierenden Vereisungsarten dargestellt.

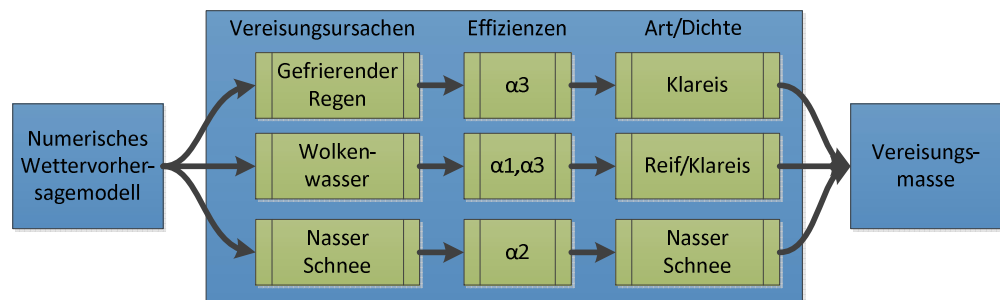


Abbildung 67: Darstellung der verschiedenen Vereisungsursachen und der daraus resultierenden Vereisungsarten

2.5.1.3 Erweiterung des Makkonenmodells

Die Vereisungsdauer ist weder für die Vereisung von Hochspannungsanlagen, noch für die Flugzeugvereisung von einer ähnlich großen Bedeutung wie für WEA, deren Leistungsumsetzung bei jeglicher auftretender Eismasse reduziert ist (Davis, Hahmann, Clausen, & Zagar, 2014).

Der Fokus bisheriger Arbeiten lag zumeist auf der Maximalmasse, die sich mit dem Makkonenmodell gut abschätzen lässt. Um eine begründete Berechnung der Vereisungsdauer vorzunehmen, müssen neben der Wachstumsrate der Vereisung auch Reduktionsprozesse berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt wird versucht, den vereisenden Zylinder in einer Massenbilanzgleichung zu beschreiben. Darauf aufbauend soll das Makkonenmodell erweitert werden, um eine Abschätzung der Vereisungsdauer zu ermöglichen.

Insbesondere für die Vereisung in Mitteldeutschland erscheint eine gute Einschätzung der Vereisungsdauer sinnvoll, da bereits gezeigt wurde, dass es zu vielen leichten, kurzen Vereisungsereignissen am Standort Rödeser Berg kommt (siehe 2.3.2.2).

2.5.1.3.1 Massenbilanzierung

Die Änderungsrate der Eismasse ergibt sich aus den auf das Objekt eintreffenden und vom Objekt verschwindenden Wasser-Massenflüssen. Sie kann folglich folgendermaßen beschrieben werden:

$$\sum_{in=1}^n \dot{m}_{in} - \sum_{aus=1}^m \dot{m}_{aus} = \frac{dM}{dt}$$

Formel 2

Für einen langsam rotierenden Zylinder setzen sich die einflussreichsten Massenflüsse dabei zusammen aus:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{Tropfen}$$

Formel 3

$$\dot{m}_{aus} = \dot{m}_{Sublimation} + \dot{m}_{Eisfall} + \dot{m}_{Schmelzwasser}$$

Formel 4

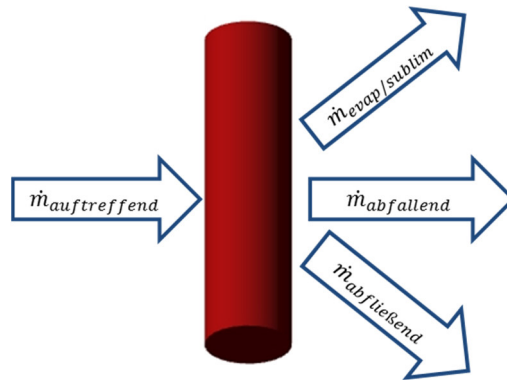


Abbildung 68: Massenbilanzierung der vereisenden Zylinderstruktur

Battisti berücksichtigt in der Massenbilanzierung einer Struktur zusätzlich das auf der Oberfläche stehende Wasser (Battisti, 2015). Hier wird davon ausgegangen, dass sich Flüssiganteile des Wassers nicht lange auf der Oberfläche halten. Zu den Gravitationskräften bei einer vertikalen Zylinderstruktur kommen bei WEA zusätzliche Zentrifugalkräfte. Daher wird davon ausgegangen, dass stehendes Wasser zügig abtransportiert wird. In der Wachstumsrate nach Makkonen wird der nicht gefrierende Flüssigwasseranteil durch einen Faktor ausgeschlossen. Es wird also davon ausgegangen, dass er abfließt.

Der Zusammenhang zwischen der Vereisungsrate und aufprallender Wassermasse wird nach dem Makkonenmodell gut abgebildet. Die folgenden Absätze beschäftigen sich mit der Massenreduzierung \dot{m}_{aus} .

2.5.1.3.2 Die Massenreduzierung

Für das Zylindermodell wurden die unbekanntenen Massenflüsse aus der Wärmebilanzierung Makkonens hergeleitet. Makkonen selbst gibt in einer Studie lediglich eine vereinfachte Annahme für das vollständige Abschmelzen der akkumulierten Eismasse an (Sundin & Makkonen, 1998), die in dieser Untersuchung lediglich als einer von drei Reduktionsprozessen – als Eisabwurf - berücksichtigt wird.

Schmelzen

1. Als wichtigster Prozess der Eisreduktion bei Temperaturen $T > 0^{\circ}\text{C}$ wird neben dem Eisabwurf das Schmelzen der Eismasse angenommen. Zur Modellierung des Schmelzvorgangs wird die Wärmebilanz nach Makkonen mit leichten Anpassungen verwendet. Die Schmelzwassermasse ergibt sich dann unter folgenden Annahmen: Während des Schmelzens treffen keine weiteren Wassertropfen auf die eisbedeckte Oberfläche auf.
2. Die frei werdende Wärme wird alleine durch die Umwandlung von Eis in Schmelzwasser, das sofort von der Oberfläche abfließt, abtransportiert.

Sublimation

Als wichtigster Prozess für die Eismassenreduktion bei Temperaturen $T < 0^{\circ}\text{C}$ wird Sublimation angenommen. Sublimation bezeichnet den direkten Phasenübergang von Eis zu Wasserdampf, ohne zuvor zu verflüssigen. Auch die Sublimationswassermasse wird hier aus der Wärmebilanz nach Makkonen gewonnen.

Eisabwurf

Wie auch in der Arbeit von Davis wird davon ausgegangen, dass der Eisabwurf zu einer vollständigen Enteisung der untersuchten Struktur führt. Dabei wird die Bedingung nach Makkonen genutzt:

$$T > 0^{\circ}\text{C} \quad \text{für mindestens 3 Stunden}$$

Abbildung 6g zeigt das Blockdiagramm des entwickelten physikalischen Vereisungsmodells. In jedem Zeitschritt wird auf Basis des Durchmessers die Eismasse gemäß des hier formulierten Vereisungsmodells bestimmt. Im Anschluss wird der Durchmesser der Struktur für die Berechnung im folgenden Zeitschritt numerisch berechnet. Die dargestellte Programmstruktur ist für die Berechnung des Standardmodells und der Vereisung des Rotorblattes einer WEA identisch.

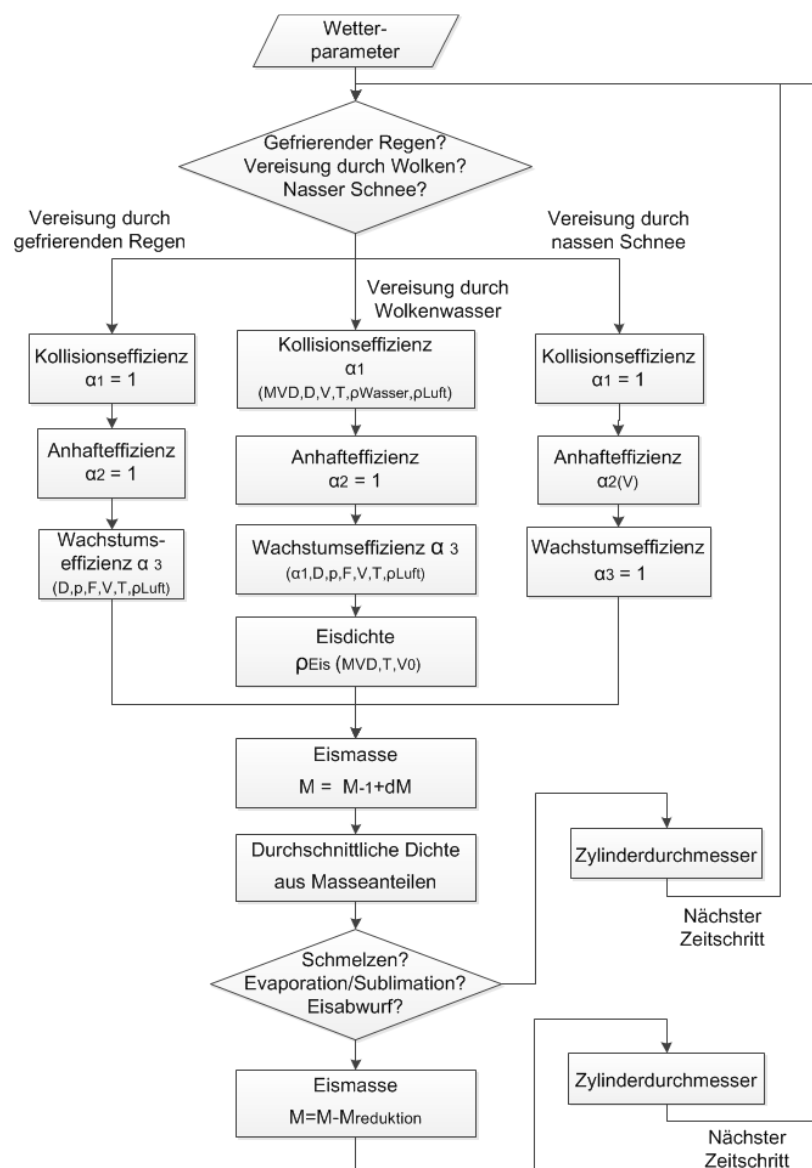


Abbildung 6g: Vereinfachtes Blockdiagramm des physikalischen Vereisungsmodells

2.5.1.4 Validierung des Zylindermodells durch Messungen am Rödeser Berg

Zur Validierung des Vorhersagemodells für eine Zylinderstruktur werden die prognostizierten Vereisungswerte mit Messungen am Messmasten verglichen. Zu diesem Zweck werden die Kurzzeitfrist sowie die 6-Stunden Vorhersage der Eismasse ausgewertet. Die Berechnung der Eismasse bezieht sich zunächst auf den nächsten Nachbarn, der in Abbildung 70 markiert ist. Anschließend wird der Einfluss der Lokalität der Vereisungsvorhersage untersucht. Dafür wird die prognostizierte Eismasse für alle in Abbildung 70 eingezeichneten Koordinatengitterpunkte berechnet und ein Mittelwert gebildet. Der Hintergrund ist, dass für die Prognose in Windparks häufig nicht die exakten Positionen der einzelnen Anlagen vorliegen und sie außerdem eine große räumliche Ausdehnung aufweisen. Somit gestaltet es sich schwierig einen einzelnen Koordinatengitterpunkt aufzufinden, der die Situation eines gesamten Windparks repräsentiert.

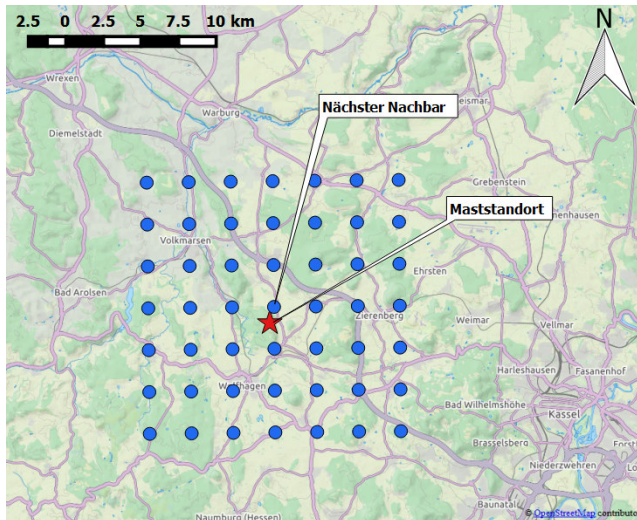


Abbildung 70: Messmast und Umgebung. Blau dargestellt sind die Gitterpunkte, an denen die COSMO-DE Variablen definiert sind. Zur Berechnung der $\bar{\sigma}$ -Eismasse in der Umgebung des Messmastes wurden alle hier eingezeichneten Modellgitterpunkte verwendet. Kartenmaterial aus OpenStreetMap.

Einen optimalen Referenzwert zur Modellvalidierung bildet die Wägung der Eismasse durch einen Standardzylinder, der am Messmast auf einer Höhe von 14,5 m installiert wurde. Ein Vergleich zwischen Vorhersage der Eismasse und Messung durch den ICEMONITOR für ein Vereisungsereignis ist in Abbildung 71 dargestellt. Es fällt auf, dass auf Level 48 (cyan) die größte Eismasse prognostiziert wird. Weiterhin wird deutlich, dass sich aufgrund der Wetterprognose die Vereisungsvorhersage selbst im Bereich zwischen 6 Stunden und der Kurzzeitfrist-Vorhersage deutlich verändert. Während zunächst die gemessene Eismasse von der Prognose unterschätzt und gleichzeitig am Ende des Monats Dezember ein stärkeres Vereisungsereignis prognostiziert wird, das wiederum vom ICEMONITOR nicht registriert wurde, kehren sich diese Verhältnisse in der Kurzzeitfrist-Vorhersage um.

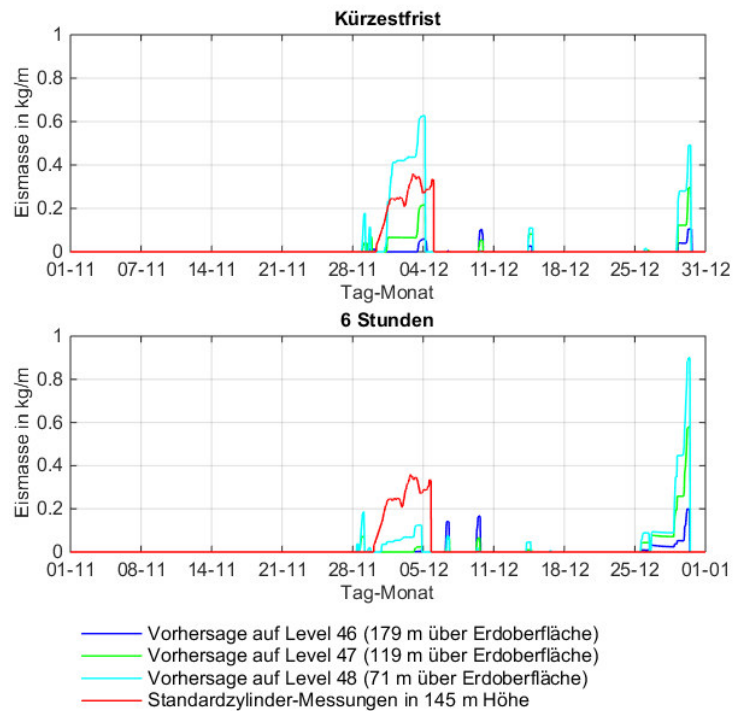


Abbildung 71: Vergleich von Modellvorhersage der Eismasse auf unterschiedlichen Modellevels mit der Wägung durch den ICEMONITOR.

Bei der Auswertung von Bildern einer Webcam, die auf den Eiskollektor gerichtet ist, wird deutlich, dass dieser während des registrierten Vereisungsereignisses nicht rotieren konnte, da offenbar die Lager zugefroren waren (siehe Abbildung 72, links). Weiterhin ist auch für das prognostizierte Vereisungsereignis Ende Dezembers eine leichte Vereisung des Eiskollektors erkennbar, die aber - auch durch das starke Rauschen der Messwerte des Eiskollektors - nicht registriert wurde.

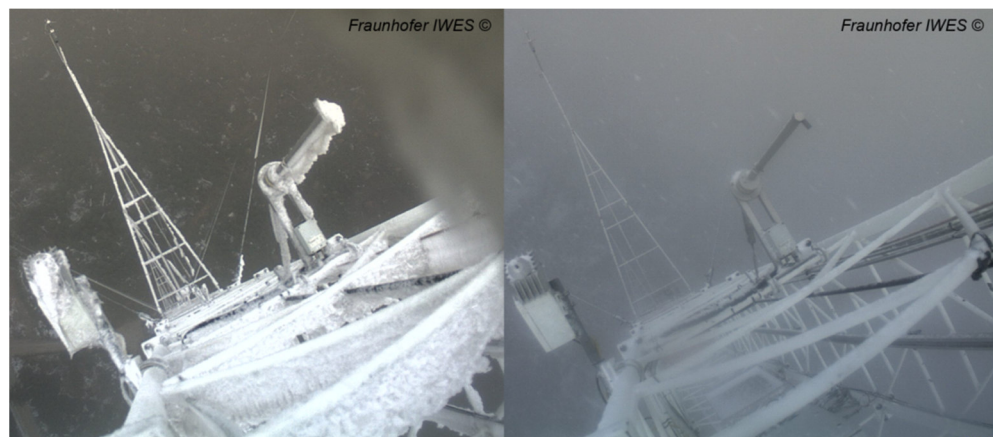


Abbildung 72: Webcam Bilder vom 05.12.2014 (links) bzw. 26.12.2014 (rechts)

Insgesamt wird deutlich, dass die bisherigen Wägungen der Eismasse durch den Standardzylinder am Messmasten nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen.

2.5.1.5 Vereisungsmodell für eine Windenergieanlage

Die Berechnung der Vereisung von WEA wurde in vergangenen Studien häufig auf der Basis des Makkonenmodells durchgeführt, das mit statistischen Verfahren verknüpft wurde. Zum Beispiel Byrkjedal et al. nutzen die prognostizierte Wachstumsrate des Makkonenmodells, um Leistungsverluste abzuschätzen (Børkjedal & Vindteknikk, 2009). Battisti et. al. beschreiben die Berechnung der Vereisungsmasse einer zylinderförmigen Struktur als unzureichend für die Bestimmung der Eismasse einer WEA (Battisti, 2015), da insbesondere die relative Geschwindigkeit des Rotorblattes in Bezug auf die Wassertröpfchengröße und die Flügelgeometrie einen großen Einfluss auf die Eisakkumulation haben. Diese Parameter werden im Standardmodell nicht berücksichtigt. Davis et. al. versuchen in ihrem Modell hingegen einen begründeten Zusammenhang zwischen der Zylindervereisung und der Vereisung der Rotorblätter von WEA herzustellen (Davis, Hahmann, Clausen, & Zagar, 2014). Dabei wird sowohl auf die relative Geschwindigkeit als auch auf die Flügelgeometrie eingegangen. Davis konnte mit seinem Modell gute Ergebnisse erzielen. In diesem Arbeitspaket wird ein Modell entwickelt, das die Eismasse auf einem Rotorblattelement einer Referenzturbinen auf der Grundlage des Zylindermodells, nach dem Vorbild des „iceBlade“ Modells von Davis, abbilden soll. Im Vergleich zu dem Vereisungsmodell der Zylinderstruktur werden vier wesentliche Veränderungen vorgenommen. Die Berechnung erfolgt für ein Rotorblattelement, das bei 85 % der gesamten Flügellänge liegt, da davon auszugehen ist, dass dieser Abschnitt des Rotorblattes den größten Leistungsbeitrag besitzt (Burton, 2011). Abbildung 73 zeigt die Integration des Zylinders in das Rotorblatt einer Windenergieanlage.

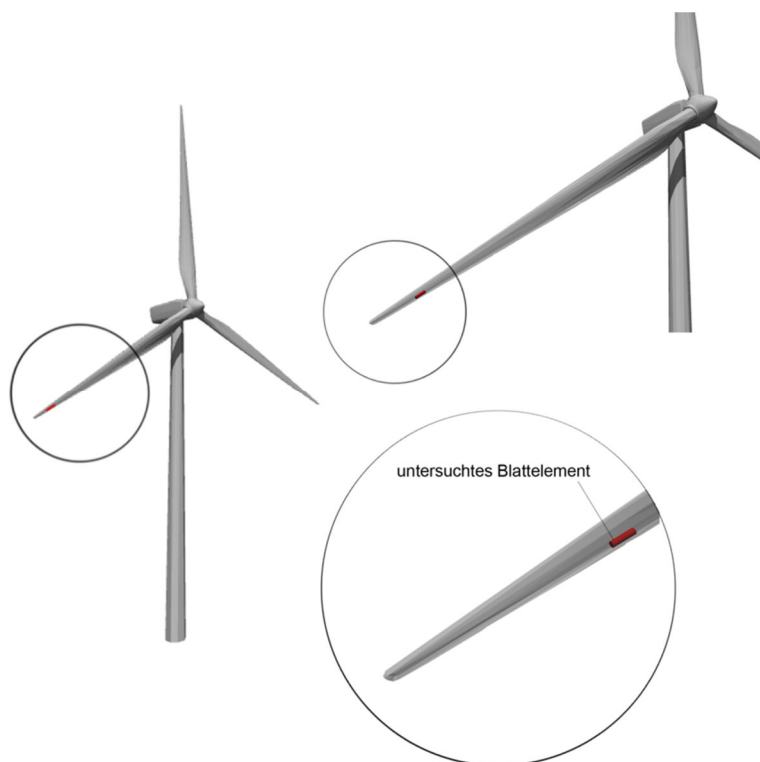


Abbildung 73: Die Integration des Zylinders in das Rotorblatt einer WEA. Das abgebildete Blattelement liegt bei 85 % der Gesamtflügellänge.

Für die Erstellung einer Referenzturbinen wurde die Blattgeometrie einer typischen Anlage vermessen. Dabei ergab sich ein Vorderkantendurchmesser (d in Abbildung 74) von $d = 24,5 \text{ cm}$. Die Sehnenlänge (c in Abbildung 74) wurde mit $c = 1,52 \text{ m}$ ermittelt. Für die

Drehzahl wird ein Maximalwert von $22\frac{1}{5}$ angenommen. Der Rotordurchmesser beträgt 70,4 m.

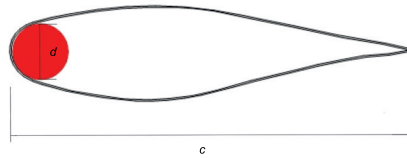


Abbildung 74: Schnitt durch das berechnete Rotorblattelement

2.5.1.5.1 Die relative Rotorblattgeschwindigkeit

Der größte Unterschied zu der Vereisung eines Zylinders kommt durch die Rotation der Rotorblätter und der damit verbundenen hohen Geschwindigkeit des untersuchten Blattelements zustande. Da bereits für eine geringe Drehzahl die prognostizierte vertikale Windgeschwindigkeit wesentlich kleiner als die Blattgeschwindigkeit ist ($\omega \ll v_{Blatt}$), wird $\omega \approx 0$ angenommen. Die relative Gesamtgeschwindigkeit von auftreffenden Wolkenwassertröpfchen ergibt sich dementsprechend zu $\sqrt{V^2 + U^2 + v_{Blatt}^2}$.

Die Geschwindigkeit des Blattelements wird mit Hilfe der idealen Leistungskurve der Referenzturbinen abgeschätzt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Leistung proportional zur Drehzahl ist ($P \propto n$). Die Leistung wird wiederum in Abhängigkeit der horizontalen Windgeschwindigkeit durch die ideale Leistungskurve der Referenzturbinen berechnet. Dementsprechend wird die Windgeschwindigkeit des Blattelements angenommen:

$$v_{Blatt} = n * 2\pi * R * 85 \%$$

Formel 5

2.5.1.5.2 Die Reduktion der Eismasse durch Erosion

Während des Sublimationprozesses kann das akkumulierte Eis brüchig werden und durch die Winderosion werden in der Folge kleine Eispartikel abgetragen (Davis, Hahmann, Clausen, & Zagar, 2014). Børkjedal et al. berücksichtigen einen empirischen Faktor von 2,5 in der Berechnung der sublimierenden Eismasse zur Beschreibung der erodierenden Massenverluste, der in dieser Untersuchung ebenso verwendet wird (Børkjedal & Vindteknikk, 2009).

2.5.1.5.3 Die Berechnung der Nusseltzahl

Die Berechnung der Nusseltzahl in der Wärmebilanzierung erfolgt nach Wang et al. (Wang, Naterer, & Bibeau, 2007) die die durchschnittliche Nusseltzahl eines typischen Flügels durch Messungen im Windkanal angeben. Dabei wird explizit die Veränderung durch auftreffende Wassertropfen anhand einer modifizierten Reynoldszahl berücksichtigt:

$$Re_{LWC} = \frac{v * c}{\nu} * \left(1 + \frac{LWC}{RH * 4}\right)$$

$$Nu = 2,483 * Re_{LWC}^{0,389} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad Re_{LWC} \leq 600000$$

$$Nu = 0,0943 * Re_{LWC}^{0,636} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad Re_{LWC} > 600000$$

Formel 6

Die Ausbildung der Eisform am Rotorblatt

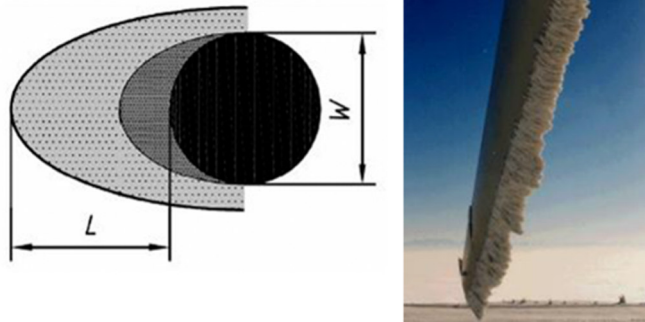


Abbildung 75: Links: Eisansatz für längliche Objekte nach ISO 12494. Rechts: Bild eines vereisten Rotorblatts

Für die Vereisung des Flügels einer WEA ist davon auszugehen, dass sich die Eismasse vollständig an der Vorderkante ansammelt (siehe Abbildung 75). Im Gegensatz zu der uniformen Akkumulation um einen Standardzylinder wird die Berechnung gemäß ISO 12494 vorgenommen. Das Eiswachstum in der Verlängerung der Längsachse des Objektquerschnitts, in Abbildung 75 mit L bezeichnet, wird dabei achtmal so groß wie die Verbreiterung, hier mit W bezeichnet.

2.5.2 IcedBlades 5.2 - Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Vereisungsrisikos für Regionen

Durch die hohe Auflösung des COSMO-DE Wettermodells von 2,8 km besteht die Möglichkeit, eine regionale Vereisungsvorhersage vorzunehmen, in der die Orographie berücksichtigt wird. Zu diesem Zweck wird an jedem Gitterpunkt mit den lokal definierten Wetterparametern eine Vereisungsprognose vorgenommen. In gleicher Art und Weise können mit dem entwickelten Vereisungsmodell durch die Nutzung von Reanalysedaten – anstelle von Vorhersagedaten – hoch aufgelöste Vereisungskarten erstellt werden.

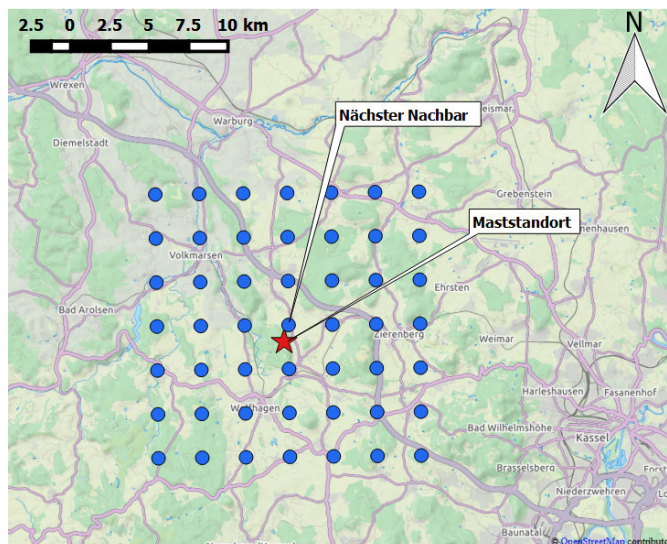


Abbildung 76: Messmast und Umgebung. Blau dargestellt sind die Gitterpunkte, an denen die COSMO-DE Variablen definiert sind. Kartenmaterial aus OpenStreetMap.

In Abbildung 76 sind der Messmast am „Rödeser Berg“ sowie die Umgebung dargestellt. Blau eingezeichnet sind die Gitterpunkte, an denen die COSMO-DE Wetterparameter definiert sind. Die Berechnungen in diesem Abschnitt erfolgen für einen Standardzylinder. Die Abbildung 77 und Abbildung 78 stellen die prognostizierten Eismassen für einen Standardzylinder in der Umgebung des Messmastes dar. Die Auswertung erfolgt für Modelllevel 48 (ca. 100m über der Erdoberfläche). Wie auch bei Davis (vgl. (Davis, Hahmann, Clausen, & Zagar, 2014)), konnten für die vertikalen Modellschichten keine starken Veränderungen in den Prognoseparametern festgestellt werden. In den Abbildungen sind weiterhin der Mast und die Position des Eissensors ICEMONITOR durch einen Stern dargestellt.

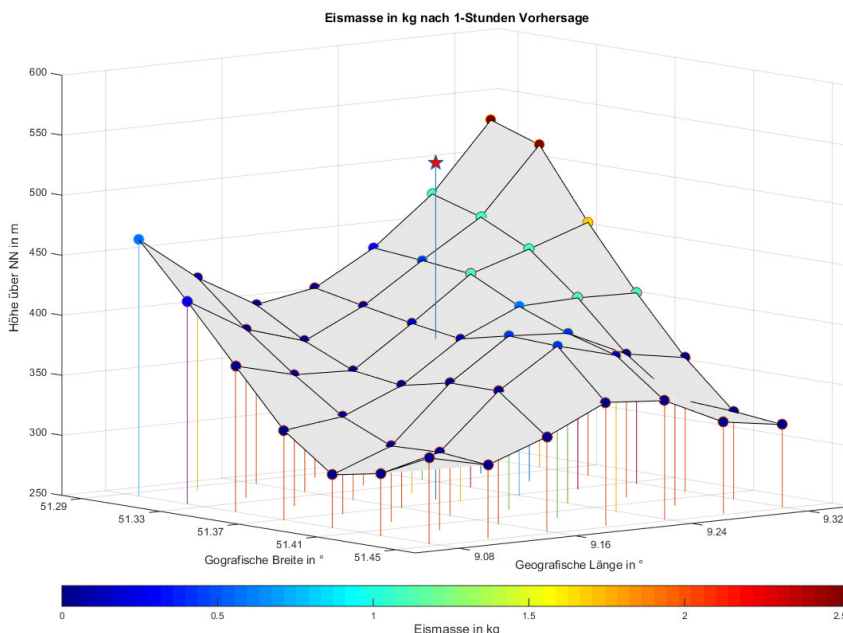


Abbildung 77: 1-Stunden Vorhersage für den Maststandort (gekennzeichnet durch Stern) und die Umgebung

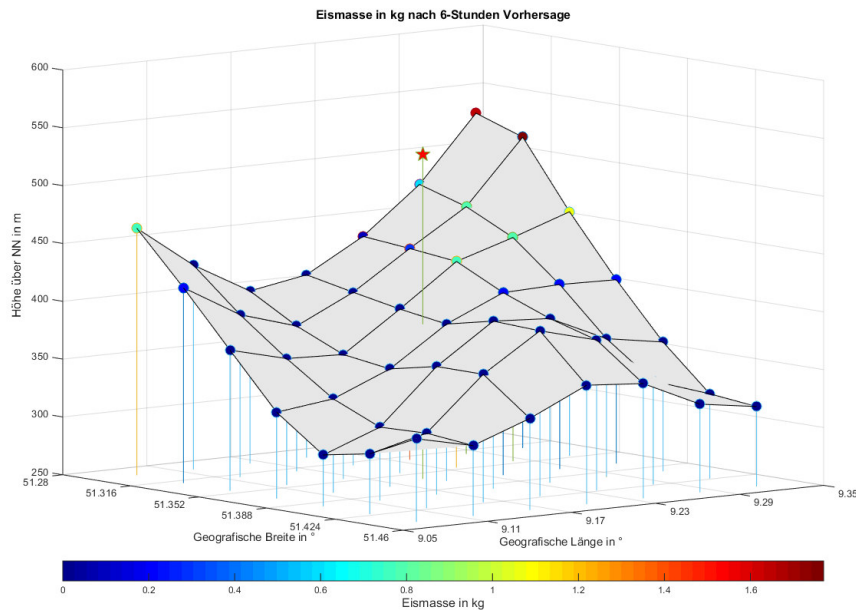


Abbildung 78: 6-Stunden Vorhersage für den Maststandort (gekennzeichnet durch Stern) und die Umgebung

Die Orographie des „Rödeser Bergs“ ist auch im hochauflösenden COSMO-DE Wettermodell subskalig und kann nicht aufgelöst werden. Gleichzeitig ist die Vorhersage der Wetterparameter - und damit auch die Vorhersage der Vereisungsmasse - stark von der lokalen Orographie abhängig. Die Vorhersage einer lokalen Vereisungsmasse hängt unmittelbar von den durch das Wettermodell prognostizierten Wetterparametern ab, die somit maßgebend für eine zuverlässige Vereisungsvorhersage sind.

Durch einen Vergleich von Abbildung 77 und Abbildung 78 wird deutlich, dass auch im kurzfristigen Vorhersagezeitraum (6-Stunden bzw. 1-Stunden Vorhersage) noch deutliche Änderungen der prognostizierten Eismasse auftreten. Die vorhergesagte Maximalmasse steigt von etwa 1,8 kg auf mehr als 2,5 kg an (dunkelrot). Weiterhin lässt sich der bedeutende Einfluss der Orographie erkennen.

Für Windparks mit großer räumlicher Ausdehnung kann durch eine räumliche Vereisungsprognose die Orographie berücksichtigt werden. Einzelne Anlagen und kleine Windparks können allerdings auch bei der Auflösung von 2,8 km subskalig erscheinen und von dem Wettermodell nicht explizit aufgelöst werden. In diesem Fall muss entweder eine Mittelung über einen Koordinatengitterausschnitt erfolgen oder ein repräsentativer Koordinatengitterpunkt ausgewählt werden.

2.5.3 IcedBlades 5.3 - Untersuchung der Vereisungsauswirkung auf Windleistungsprognosen und die Einbindung des Vereisungsrisikos in Windleistungsprognosen

Zur Untersuchung des Einflusses der Vereisungsvorhersage auf die Windleistungsprognose wird der Windpark „Ulrichstein“ analysiert. Da keine Informationen über die Positionen der einzelnen Anlagen im Windpark Ulrichstein vorlagen, wurde die geografische Ausdehnung anhand von Satellitenbildern abgeschätzt. Dabei konnte ein im Windpark zentral angeordneter Koordinatengitterpunkt des COSMO-DE Modells ausgemacht werden, der repräsentativ die Wetterparameter im Windpark vorgibt. Die Nachbarpunkte liegen aufgrund der geringen geografischen Ausdehnung des Windparks bereits außerhalb von diesem und wurden daher bei der Analyse vernachlässigt. Um eine etwaige

höhenabhängige Änderung der Eismasse einzufangen, wurden die berechneten Eismassen für die Level 46, 47 und 48 gemittelt.

Die Auswertung erfolgt anhand von fünf Monaten für die Wetterprognosedaten des COSMO-DE Modells vorliegen, nämlich November 2013 bis Januar 2014 sowie November und Dezember 2014. Mithilfe der Vereisungsprognose lässt sich für den angegebenen Zeitraum eine Gesamtvereisungszeit (Vereisungsmasse > 100g mit Vorhersage für Referenzturbinen) von 674 Stunden feststellen. In Tabelle 9 sind die Kenndaten des Windparks festgehalten.

Windpark	Nennleistung	Höhe über Erdoberfläche	Vereisungsstunden gemäß Vorhersage
Ulrichstein	10,3 MW	515,34 m (ermittelt aus COSMO-DE Koordinatenpunkt)	674 Stunden

Tabelle 9: Kenndaten des Windparks Ulrichstein

2.5.1.5.4 Ausgewählte Vereisungsereignisse

In den Abbildung 79 und Abbildung 80 werden exemplarisch zwei Vereisungsereignisse dargestellt, für die eine Vorhersage durch das Vereisungsmodell erfolgen kann. In Abbildung 79 ist zu erkennen, dass ab dem 14. Dezember 2013 die prognostizierte Leistung mit steigender Windgeschwindigkeit zunimmt. Im gleichen Zeitraum wird eine Vereisung prognostiziert, die offenbar verhindert, dass die WEA anlaufen. Erst mit dem vorhergesagten Ende des Vereisungsereignisses laufen die WEA an und eine Leistung wird umgesetzt. Ein ähnliches Verhalten lässt sich auch in Abbildung 80 erkennen. Während des vorhergesagten Vereisungsereignisses wird zwar eine geringe Leistung prognostiziert, allerdings werden keine Werte gemessen. Das Ende des Vereisungsereignisses wird in der Prognose für den 5. Dezember vorhergesagt. Eine Leistung der Anlagen wird allerdings erst wieder ab dem 7. Dezember gemessen. Zum gleichen Zeitpunkt übersteigt die Windgeschwindigkeit wieder deutlich einen Wert von 5 m/s.

Bei beiden Vereisungsereignissen wird deutlich, dass diese von der 6-Stunden Vorhersage prognostiziert werden, sodass die Leistungsverluste der WEA mit Hilfe des Vereisungsmodells vorhersehbar gewesen wären. Weiterhin fällt auf, dass die Messwerte der Leistungsdaten während der Vereisungsereignisse nicht den Wert „Null“, sondern keine Werte liefern. Bei der Leistungswertüberwachung wurde durch die „Supervisory Control and Data Acquisition“ (SCADA) offenbar ein Leistungsausfall erkannt. Bei den dargestellten Vereisungsereignissen sind die Leistungsausfälle offensichtlich auf Vereisung zurückzuführen.

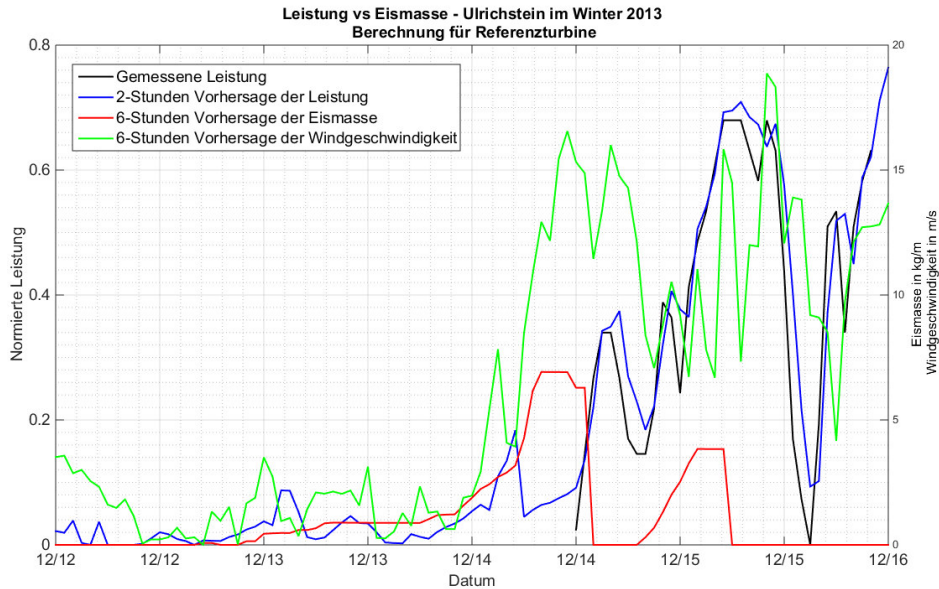


Abbildung 79: Gemessene Leistung und Windleistungsprognose für den Windpark Ulrichstein im Winter 2013. Rot dargestellt ist die 6-Stunden Vorhersage der Vereisung nach dem entwickelten Vereisungsmodell, grün die Windgeschwindigkeit gemäß COSMO-DE Wettermodell.

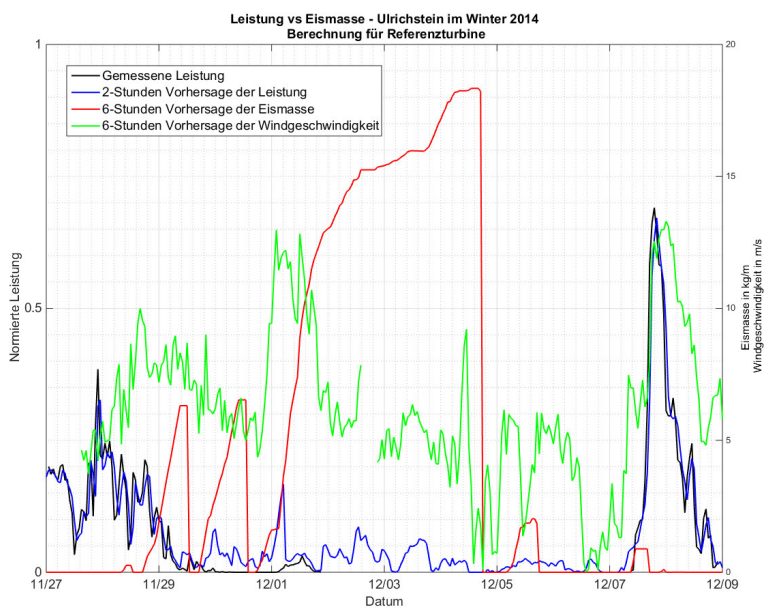


Abbildung 80: Gemessene Leistung und Windleistungsprognose für den Windpark Ulrichstein im Winter 2014. Rot dargestellt ist die 6-Stunden Vorhersage der Vereisung nach dem entwickelten Vereisungsmodell, grün die Windgeschwindigkeit gemäß COSMO-DE Wettermodell.

2.5.1.5.5 Windleistungsprognose in den analysierten fünf Monaten

Die vorliegende Windleistungsprognose (Kurzfristprognose) basiert auf einem statistischen Modell (neuronales Netz). Als Eingangsparameter dienen neben den

Wetterprognosedaten auch die aktuellen Leistungsmesswerte. In folgender Analyse wird die 2-Stunden Vorhersage der Leistung genutzt. Abbildung 81 zeigt die Leistungskurven für verschiedene prognostizierte Eismassen. Für die Darstellung wurden vier verschiedene massenabhängige Eisklassen definiert. Es ist zu beobachten, dass im Fall von keiner und leichter Vereisung die Prognose die Leistung leicht überschätzt. Im Fall starker Vereisung (cyan) ist aber eine deutliche Unterschätzung durch die Prognose zu erkennen. Diese Beobachtungen spiegeln sich auch im RMSE (root mean square error) wider. Für eine aussagekräftige Korrekturfunktion, mit der die Windleistungsprognose aus den ermittelten Fehlerwerten verbessert werden kann, müssten aber wesentlich größere Zeiträume untersucht werden.

Es kann festgehalten werden, dass die Windleistungsprognose gute Werte liefert, solange die Anlagen im Betrieb sind. Nicht berücksichtigt in den Untersuchungen wurden die Ausfallzeiten des Windparks, bei denen zwar eine Windleistungsprognose vorliegt, allerdings keine Leistung gemessen werden kann. Hier kann eine Vereisungsprognose die Windleistungsprognose unterstützen.

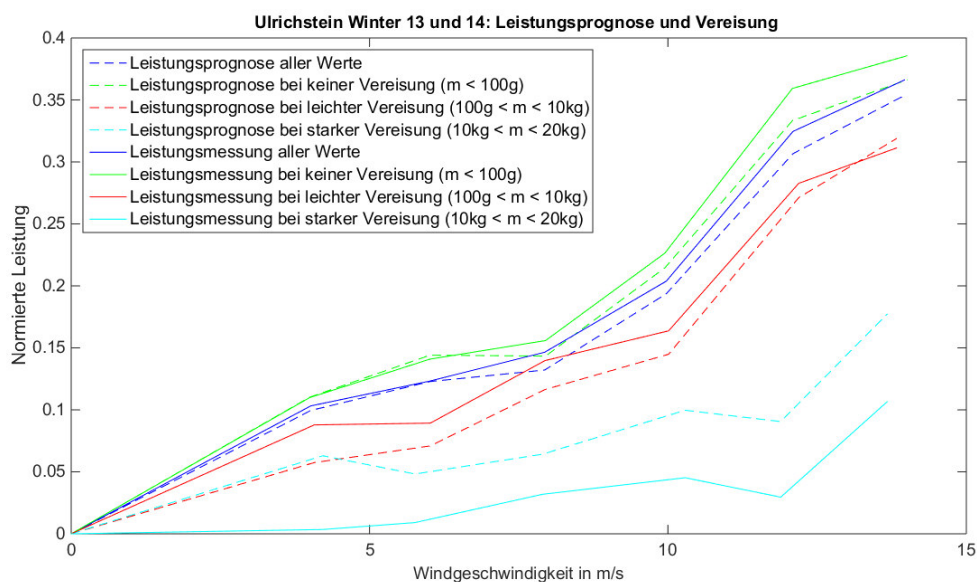


Abbildung 81: Leistungskurven für verschiedene prognostizierte Vereisungsmassen. Durchgezogene Linien sind Messungen, gestrichelt 2-Stunden Prognosen. Vereisungsprognosen sind 1-Stunden Vorhersagen. (Anzahl der Leistungspunkte: blau, 2268, grün, 1824, rot, 440, cyan, 22)

2.5.1.5.6 Ausfallrate des Windparks Ulrichstein

Die Windleistungsprognose liefert gute Werte, wenn sich der Windpark im Betrieb befindet. In der Fehlerbewertung durch den RMSE gehen die Ausfallzeiten des Windparks nicht mit ein. Die SCADA-Daten liegen nicht vor, sodass der Grund der Ausfälle nicht eindeutig bestimmt werden kann. Wenn die Ausfallzeiten in der Berechnung des RMSE berücksichtigt werden, ergibt sich eine Abweichung zwischen dem Normalbetrieb und dem Vereisungsfall. In diesen fünf Monaten liegt der RMSE bei 11,24 % im Normalbetrieb und im Vereisungsfall (Eismasse $> 100g$) bei 12,3 %. Die Differenz im RMSE lässt sich somit auf die Ausfallzeiten der Windparks zurückführen. Tabelle 10 zeigt die massenabhängigen Ausfallzeiten der analysierten fünf Monate. Für die Erstellung der Tabelle wurden alle Stunden der fünf Monate in vier verschiedene Eisklassen eingeteilt. Sie sind in der Tabelle als Gesamtzeit dargestellt.

Prognostizierte Eismasse auf Rotorblatt nach 1- Stunden Vorhersage in kg	0 – 0,1	0,1 – 10	10 – 20	>20
Ausfallzeit in h	407	143	29	40
Gesamtzeit in h	2231	583	51	40
Ausfallzeit/Gesamtzeit	18,24%	24,53 %	56,86 %	100 %

Tabelle 10: Ausfallzeiten sowie Gesamtzeiten (Stunden der fünf Monate, die einer Vereisungsklassen zugeordnet werden können) der Leistungsmessung für vier verschiedene massenabhängige Vereisungsklassen

Mithilfe der Vereisungsprognose lässt sich ein Ausfallrisiko bei verschiedenen, prognostizierten Eismassen angeben. Zu beachten ist, dass ein Windpark über fünf Monate analysiert wurde. Daher ist Tabelle 10 nicht allgemein gültig, sondern lediglich repräsentativ für den Windpark Ulrichstein. Durch die Analyse weiterer Windparks oder größerer Zeiträume, kann die Vereisungsprognose genutzt werden, um Windparkbetreibern ein Ausfallrisiko zu prognostizieren. Das Ausfallrisiko kann in modernen Windleistungsprognosen berücksichtigt werden. Die vorliegende Windleistungsprognose nutzt zwar eine Anpassung der Prognose durch die Einbindung aktueller Leistungsmesswerte – eine komplette Abschaltung der Windparks wird in der Leistungsprognose allerdings nicht berücksichtigt.

3 Literaturverzeichnis

- Battisti, L. (2015). *Wind Turbines in Cold Climates*. a, m: {Springer International Publishing}.
- Børkjedal, Ø., & Vindteknikk, K. (2009). Estimating wind power production loss due to icing. *13th Int. Workshop on Atmospheric Icing, Andermatt, Switzerland*. Andermatt, Switzerland.
- Børkjedal, Ø., Hansson, J., & van der Velde, H. (2015). Development of operational forecasting for icing and wind power at cold climate sites. *IWAIS 2015–16th International Workshop on Atmospheric Icing*.
- Burton, T. (2011). *Wind energy handbook* (2nd ed. Ausg.). Chichester, West, Sussex: Wiley.
- claytex. (2010). claytex. Von http://www.claytex.com/products/dymola/?gclid=CjwKEAiAw4e1BRDfi7vghaWUgJESJACz09juxL0nDJB1h4GW5DWeHCZL_S-CwpqTmnkbtB3jEF4gVhoC1Kzw_wcB abgerufen
- Dairo, A. O.-X. (2001). Prediction of Ice Accretion on Wind Turbine Blades: a User-Friendly Software. *39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (S. AIAA Paper No. 2001-0033).
- Davis, N., Hahmann, A. N., Clausen, N.-E., & Zagar, M. (2014). *Icing Impacts on Wind Energy Production*. Ph.D. dissertation, {Vestas Wind Systems A/S/Vestas Wind Systems A/S}.
- DIBt. (März 2012). *Richtlinie für Windenergieanlagen*. Deutsches Institut für Bautechnik.
- Dobesch, H., Makkonen, L., & Nikolov, D. (2005). *Physical processes, modelling and measuring of icing effects in Europe*. {Zentralanst. für Meteorologie und Geodynamik}.
- Eliasson, A. J., Agustsson, A., Hannesson, G. M., & Thorsteins, E. (kein Datum). Modeling wet-snow accretion.
- Fayçal Lamraoui, G. F. (2013). Atmospheric icing impact on wind turbine production. *Elsevier*, 36–49.
- FENSAP-ICE. (kein Datum). In-flight Icing Simulation System, <http://www.newmerical.com/index.php/products/fensap-ice-cfd-software>.
- Finstad, K. J., Lozowski, E. P., & Gates, E. M. (1988). A computational investigation of water droplet trajectories. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 5(1), 160-170.
- Foder, M. H. (2001). ISO 12494: Atmospheric icing of structures. *The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*. Geneva: International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Fraunhofer. (2015). *onewind*. Von <http://www.onewind.de/owsla.html> abgerufen
- Freudenbach, K., Steiniger, M., Khadiri-Yazami, Z., Tang, T., & Säger, T. (2016). Site assessment for a type certification icing class. *WindEurope summit*. Hamburg, Deutschland.
- GL. (2010). *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Germanischer Lloyd.
- GL, G. L. (2010). *The latest edition of the General Terms and Conditions*. Hamburg: Germanischer Lloyd, Hamburg.
- Heinrich, A., Ross, R., Zumwalt, G., Provorse, J., & Padmanabhan, V. (01.01.1991). Aircraft Icing Handbook. Volume 1. *Aircraft Icing Handbook. Volume 1*.
- Ian Baring-Gould, E. G. (2009). *WIND ENERGY PROJECTS IN COLD CLIMATES*. Colorado, USA: NREL.
- (2010). *IEC 61400-1, International Standard "Wind turbines – Part 1: Design requirements", Edition 3, IEC, 2005 + Amendment A1*.
- (2016). *IEC 61400-1, International Standard "Wind turbines – Part 1: Design requirements", Edition 4*. (draft, publication planned for 2016).
- Khadiri-Yazami, Z., Durstewitz, M., Klaas, T., Peterson, L., & Baier, A. (2014). Performance of LiDAR in icing conditions. Comparison to a zoom mast in complex terrain. *Winterwind Konferenz*. Sundsvall, Schweden.

- Khadiri-Yazami, Z., Scholz, C., Baier, A., Tang, T., & Durstewitz, M. (2016). Classification based approach for icing detection. *WinterWind Konferenz*. Are, Schweden.
- Krog, T. (2005). *Coordinate system*. Wind Energy Department risø national laboratory.
- Laakso, T. e. (2011). Wind Energy in Cold Climates IEA TASK 19. *Winterwind 2011 Conference*. Umeå, Sweden: WinterWind.
- Lasse Makkonen, T. L. (2001). Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines. *WIND ENGINEERING*, 3-21.
- Lehtomäki. (2014). *IEC TC88 MT1 5 – WORKING DOCUMENT, Cold Climate*. Standard and Certificate.
- LEWICE. (kein Datum). *Homepage*, <http://icebox.grc.nasa.gov/design/lewice.html>.
- M. Baldauf, J. F. (2014). Kurze Beschreibung des Lokal-Modells K\urzestfrist COSMO-DE (LMK) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD.
- Makkonen, L. (2000). Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1776), 2913-2939.
- Makkonen, L. L. (2001). Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines. *Wind Engineering*, Volume 25.
- Modelon. (2015). *Modelon*. Von <http://www.modelon.com/products/dymola/> abgerufen
- Nygaard, B. E. (2009). Evaluation of icing simulations for the "COST727 icing test sites" in Europe. *IWAIS XIII, Andermatt*, .
- Nygaard, B. E. (2009). Evaluation of icing simulations for the COST 727 icing test sites in Europe. *{IWAIS XIII, Andermatt, Switzerland}*.
- Paraschivoiu, I., Saeed, F. (2001). Ice Accretion Simulation Code CANICE. *International Aerospace Symposium*. Bucharest, Romania.
- Philipp Thomas, X. G. (2014). The OneWind Modelica Library for Wind Turbine Simulation with Flexible Structure — Modal Reduction Method in Modelica. *International ModelicaConference* (S. 939 - 948). Lund, Sweden: International ModelicaConference.
- Rickert, C. (2012). *Object-Oriented Modelling of a Wind Power Plant in Modelica and Analysis of Loads on Blade Bearings*. Stockholm: KTH School of Engineering and Management.
- Rindeskär, E. (2010). *Modelling of icing for wind farms in cold*. Von digitala vetenskapliga arkivet: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:365766/fulltext01.pdf> abgerufen
- Säger, T. (2016). *Modell zur Prognose vereisungsbedingter Leistungsverluste von Windenergieanlagen*. Kassel: Universität Kassel - Fraunhofer IWES.
- Schumann, U. (2012). *Atmospheric physics: Background - methods - trends*. Berl, i, n: Springer.
- Steiniger, M. (2015). *t Renewables Certification*. Hamburg: DNV.GL.
- Steiniger, M. (2016). *IcedBlades: DNV.GL Research Report*.
- Sundin, E., & Makkonen, L. (1998). Ice Loads on a Lattice Tower Estimated by Weather Station Data. *{Journal of Applied Meteorology}*, 37(5), 523-529.
- SWR. (10. 02 2015). *Die Durchblicker - Wissensreportage*. Abgerufen am 20. 02 2017 von Vereisungsvorhersage für Windräder: <http://www.swr.de/blog/diedurchblicker/2015/02/10/vereisungsvorhersage-fuer-windraeder/>
- Tammelin, B. C. (2000). Wind Energy Production in Cold Climate. *{Meteorological Publications No. 41, Finnish Meteorological Institute, Helsinki}*.
- Tang, T. (2015). *Development of an automatic icing detection and its contribution to wind energy*.
- Tang, T. (2015). *Development of an automatic icing detection and its contribution to wind energy*. Kassel: Universität Kassel - Fraunhofer IWES.
- Timo Laakso, I. B.-G. (2010). *State-of-the-art of wind energy in cold climates*. FI-02044 VTT, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland.

- Vilho Jussila, W. P. (2013). Interfacing of Ice Load Simulation Tools for Cylindrical and Conical Structure with OneWind simulation tool for offshore wind turbines . *International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. Espoo, Finland.
- Wang, X., Naterer, G. F., & Bibeau, E. (2007). Convective droplet impact and heat transfer from a NACA airfoil. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 21(3), 536-542.
- Wichura, B. (2013). The spatial Distribution of icing in Germany estimated by the analysis of weather station data and of direct measurements of icing. *15th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Newfoundland and Labrador, Kanada.
- WMO classification of clouds . (kein Datum). *{WMO} classification of clouds* .
- Xin Gu, P. T. (2015). *Performance of iced wind turbines*. Research Report, Bremerhaven.