energiewerkstatt
VEREIN & TECHNISCHES BÜRO FÜR ERNEUERBARE ENERGIE

Bericht

Evaluierung
Vestas Rotorblattheizung

Erstellt im Zuge der österreichischen Beteiligung beim

Task 19 der IEA-Wind

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)
im Rahmen des Projektes „IEA Wind Energy Systems, Task 19, Windenergie in kalten Klimazonen (5th Term)“
FFG-Projektnummer: 845-184

Dieses Projekt wird im Rahmen der IEA Forschungskooperation im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie durchgeführt.

Auftragnehmer: Energiewerkstatt
Technisches Büro und Verein zur Förderung erneuerbarer Energie
Heiligenstatt 24
5211 Friedburg/Austria
Tel.: +43 7746 28212
office@energiewerkstatt.org

Bearbeitung: Dr. Alexander Stökl
DI Andreas Krenn, MBA

Prüfung: Mag. Hans Winkelmeier

Revision Nr. 00:

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung und Fazit 4
2. Einleitung 5
2.1. Aufgabenstellung 5
3. Datenbasis 6
4. Beschreibung der Anlagen 9
4.1. Eiserkennungssystem 11
4.2. Beschreibung der Blattheizungsanlage 12
5. Betriebsverhalten 14
6. Auswertung und Ergebnisse 18
6.1. Blattheizung 18
6.2. Leistungskurven 18
6.3. Ertragsverluste 22
7. Diskussion und Unsicherheiten 24
7.1. Unsicherheiten und Einflussfaktoren auf das Ergebnis 25

1. Zusammenfassung und Fazit

Inhalt dieses Dokument ist die Auswertung und die Beurteilung des Betriebsverhaltens der Vestas Rotorblattheizung anhand von Betriebsdaten von zwei WKA vom Typ Vestas V112 – 3.3 MW an einem Standort mit hoher Vereisungsanfälligkeit (IEA Vereisungsklasse 3) im nördlichen Mühlviertel in Oberösterreich auf etwa 1000 m Seehöhe. Als Vergleichsbasis dienen sechs Anlagen vom Typ V90 – 2 MW ohne Rotorblattheizung.

Die Auswertung der Betriebsdaten ergibt, dass sich an diesem Standort durch die Rotorblattheizung die vereisungsbedingte Stillstandsdauer pro Jahr von durchschnittlich 908 Stunden um 57% auf knapp 387 Stunden verringert. Auch ist die durchschnittliche Dauer pro Vereisungsstillstand bei den beheizten Anlagen mit 3,6 Stunden sehr viel kürzer als bei den WKA ohne Enteisungssystem. Unter länger andauernden meteorologischen Vereisungsbedingungen kommt es teilweise zu einer sich wiederholenden Abfolge von Blattheizung und neuerlicher Vereisung. Dadurch ist bei den WKA mit Rotorblattheizung die Anzahl der vereisungsbedingten Stillstände mit 106 Abschaltungen pro Jahr deutlich höher als bei den Anlagen ohne Enteisungsanlage.

In Hinsicht auf den Energieertrag, ergibt sich am betrachteten Standort Sternwald durch den Einsatz der Rotorblattheizung eine Reduzierung der vereisungsbedingten Ertragsverluste um etwa 50%. Die für die Blattenteisung aufgewendete Heizenergie ist dabei schon mitberücksichtigt. An diesem Standort entspricht das einem Mehrertrag durch die Blattheizung von etwa 150 Volllaststunden.

2. Einleitung

Der Task 19 der IEA Wind befasst sich mit den Herausforderungen der Nutzung von Windenergie unter Vereisungsbedingungen und bietet durch globale Vernetzung und wechselseitigen Erfahrungsaustausch die Möglichkeit zur Sammlung und Generierung neuer Erkenntnisse. Die Mitwirkung der Energiewerkstatt in den Aktivitäten des Task 19 bzw. der IEA Forschungskooperation erfolgt im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie und enthält als einen der Forschungsschwerpunkte die Evaluierung der Funktionstüchtigkeit der seit einiger Zeit am Markt verfügbaren Vestas Rotorblattheizung anhand von Betriebsdaten aus den Windparks Sternwald II und III in OÖ.

2.1. Aufgabenstellung

Die Evaluierung der Vestas Rotorblattheizung ist als Arbeitspakets Nr.5 des Projektes „IEA Wind Energy Systems, Task 19, Windenergie in kalten Klimazonen“ mit folgenden Inhalten definiert.

Zielsetzung:

Evaluierung der Rotorblattheizung einer Vestas WKA anhand der Betriebsdaten eines Windparks in OÖ hinsichtlich Performance und Wirtschaftlichkeit.

Beschreibung:

Vestas als der seit Jahren weltweit größte Hersteller von Windkraftanlagen bietet seit 2014 ein Rotorblattheizungssystem an, welches auf der Zirkulation von Warmluft basiert. Jedoch liegen bislang nur wenige Betriebserfahrungen bzw. Evaluierungsergebnisse vor, die es den Planern und Betreibern ermöglichen würden, die Leistungsfähigkeit und Störungsanfälligkeit der Vestas-Rotorblattheizung bewerten zu können.

Im Zuge der gegenständlichen Studie analysiert die Energiewerkstatt die Betriebsdaten von Vestas WKA der Windparks Sternwald II und Sternwald III in OÖ, wobei sieben WKA ohne und zwei mit Rotorblattheizung ausgestattet sind. Bewertet werden dabei die an den Turbinen gemessenen Leistungs- und Windmessdaten sowie die Fehlercodes der Turbinen bei Betriebsausfällen für die beiden Winterhalbjahre 2016/17 und 2017/18.

Dies erfolgt durch einen Soll/Ist-Vergleich, bei welchem der theoretisch mögliche Energieertrag (errechnet anhand der Gondeldatenanemometer) dem realisierten Ertrag gegenüber gestellt wird. Diese Auswertung, sowohl für die älteren Vestas WKA (ohne Rotorblattheizung) als auch die neueren WKA (mit Rotorblattheizung) gibt dann Auskunft darüber, wie leistungsfähig die Technologie und wie hoch der Ertragsentgang infolge Vereisung bei Anlagen mit und ohne Rotorblattheizung ist.

3. Datenbasis

Die in dieser Studie betrachteten Windkraftanlagen bilden die Windparks Sternwald II und Sternwald III und befinden sich in Oberösterreich im nördlichen Mühlviertel in der Marktgemeinde Vorderweißenbach in unmittelbarer Nähe der Staatsgrenze zur Tschechischen Republik. Die Standorte der Anlagen erstrecken sich in grob ost-westlicher Richtung, parallel zum Verlauf der Staatsgrenze, auf einem bewaldeten Bergrücken in etwa 1000 m Seehöhe. Die Lage der Windparks ist in Abb 1 dargestellt, der Bildausschnitt liegt überwiegend im Gemeindegebiet der Marktgemeinde Vorderweißenbach.

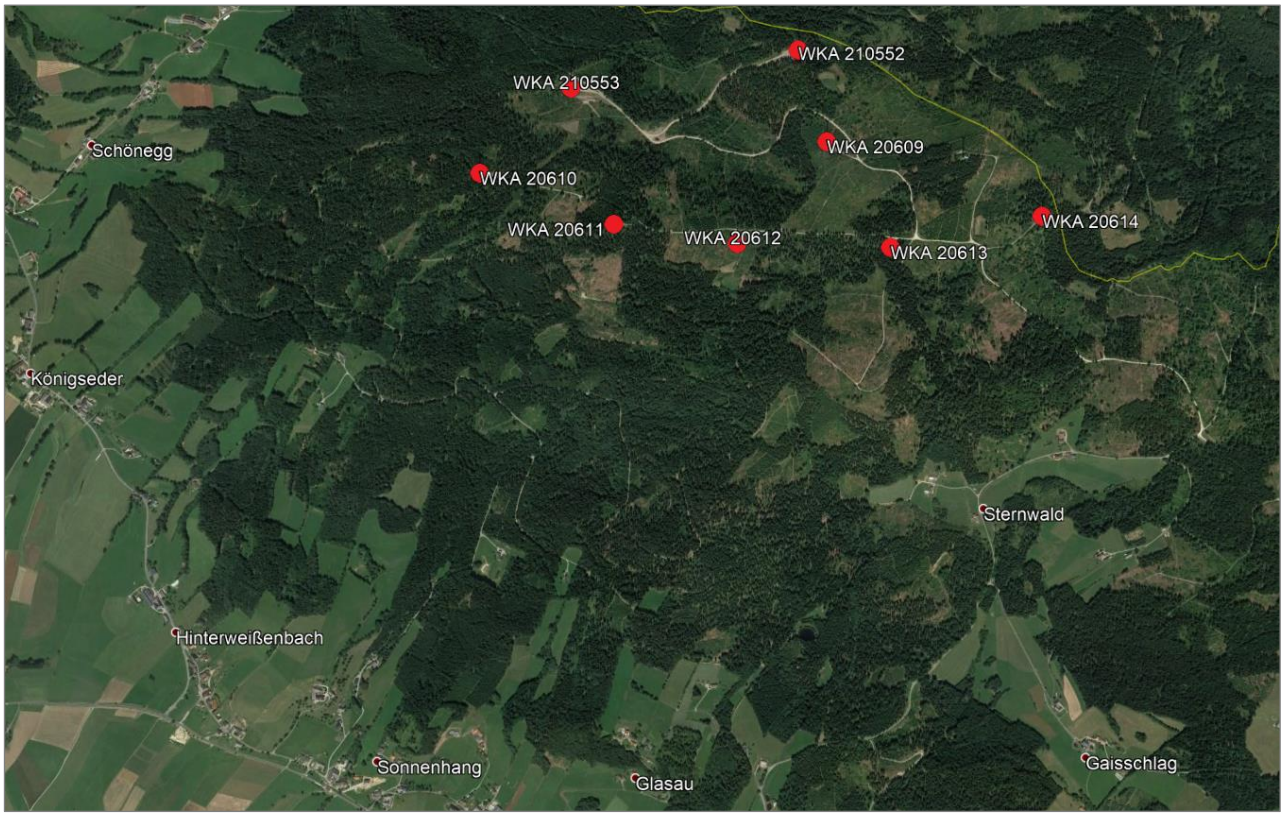

Abb 1: Lage der betrachteten WKA der Windparks Sternwald II und Sternwald III. Die Staatsgrenze zur tschechischen Republik ist als gelbe Linie dargestellt (Google Earth)

Der ausgewählte Standort eignet sich in mehrerlei Hinsicht für die Evaluierung der Vestas-Rotorblattheizung. Zum einen bietet er eine vergleichsweise hohe Anzahl von Vereisungsereignissen was eine aussagekräftige Statistik ermöglicht und höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Blattheizung stellt. Zum anderen befinden sich in den Windparks auch eine Reihe von unbeheizten Windkraftanlagen. Somit ergibt sich durch den Vergleich einer größeren Anzahl von Anlagen – zwei beheizten und sechs unbeheizten, an Standorten in unmittelbarere Nachbarschaft – eine breite Datenbasis, welche die Ableitung von möglichst belastbaren Schlussfolgerungen ermöglichen soll.

Die Betriebsdaten für die Auswertung stammen aus den sechs Anlagen des Windparks Sternwald II sowie den zwei Anlagen von Sternwald III. Eine Übersicht der WKA mit den wichtigsten Anlagenparametern ist Tab 1 zusammengestellt.

Windpark	IdentNr	Anlagentyp	Koordinaten (Geographisch WGS84)		Naben-höhe	Blatt-heizung	Errich-tung
			X (Ost)	Y (Nord)	[m]		
STERN II	20609	Vestas V90 – 2 MW	14° 14' 1,3"	48° 34' 53,7"	105	Nein	2005
STERN II	20610	Vestas V90 – 2 MW	14° 13' 37,5"	48° 34' 55,6"	105	Nein	2005
STERN II	20611	Vestas V90 – 2 MW	14° 12' 36,7"	48° 34' 51,9"	105	Nein	2005
STERN II	20612	Vestas V90 – 2 MW	14° 13' 0,2"	48° 34' 46,0"	105	Nein	2005
STERN II	20613	Vestas V90 – 2 MW	14° 13' 21,7"	48° 34' 43,8"	105	Nein	2005
STERN II	20614	Vestas V90 – 2 MW	14° 13' 48,5"	48° 34' 43,3"	105	Nein	2005
STERN III	210552	Vestas V112 – 3.3 MW	14° 14' 15,0"	48° 34' 46,9"	140	Ja	2016
STERN III	210553	Vestas V112 – 3.3 MW	14° 13' 32,7"	48° 35' 6,6"	140	Ja	2016

Tab 1: Liste der Anlagen mit Windkraftanlagenbezeichnung und geographische Daten.

Der Beobachtungszeitraum für die Evaluierung der Blattheizung umfasste die Perioden 01.01.2017 bis 01.05.2017 und 01.10.2017 bis 01.05.2018. Für diesen Zeitraum wurden vom Betreiber folgende Informationen zur Verfügung gestellt:

- 10-Minuten gemittelte Zeitserien für Windgeschwindigkeit, Richtung, Leistung, Gondelposition
- Liste der vereisungsbedingten Anlagenstillstände.
- Logfile Daten zum Betrieb der Blattheizung in den 3 Rotorblättern (keine Daten für den Zeitraum 01.01.2017 bis 28.02.2017)
- Informationen zur Betriebserfahrung über persönliche Kommunikation

Für die einfachere Interpretation werden die Ergebnisse in der Auswertung, wo sinnvoll, auf den Zeitraum von einem Winter bezogen. Da die Messserien keine zwei ganzen Winter, und teilweise auch unterschiedliche zeitliche Perioden, abdecken, wurde für die Auswertung eine Standard-Winterperiode von Anfang Oktober bis Ende April (d.h. 7 Monate) herangezogen. Diese Annahme lässt sich sehr gut mit den Jahrestemperaturverläufen im langjährigen Mittel (1981–2010) (Auer, Chimani, & Türk, 2012) für die drei nächstgelegenen ZAMG Messstationen (Abb 2) argumentieren, die in guter Näherung einen symmetrischen Temperaturverlauf von Anfang Oktober bis Ende April erkennen lassen.

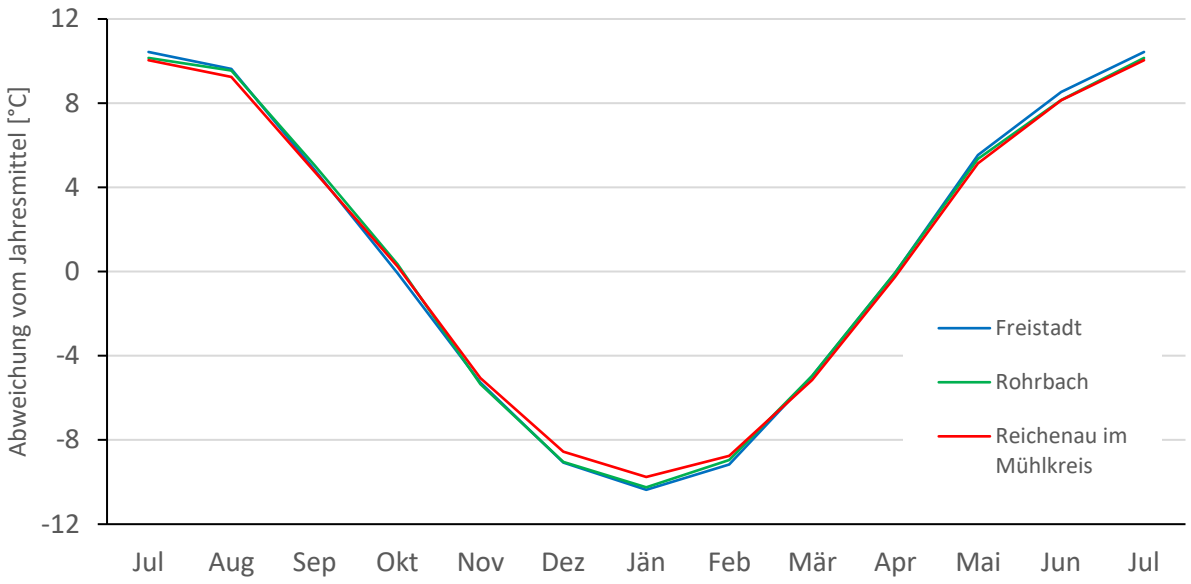

Abb 2: Langjährige Temperaturabweichung (1981-2010) vom Jahresmittel für die Messstationen Freistadt, Rohrbach und Reichenau im Mühlkreis

Für die Luftdichte auf Nabenhöhe der Anlage, etwa 1100 m über Normalnull, wurden die Werte der ISO Standardatmosphäre (International Organization for Standardization, 1975) übernommen (1,1 kg/m^3 für eine entsprechende Standardtemperatur 7,85°C)

4. Beschreibung der Anlagen

Bei den betrachteten Windkraftanlagen vom Typ Vestas V90 – 2 MW und Vestas V112 – 3.3 MW handelt es sich um pitch-geregelte Luvläufer mit aktiver Windnachführung und dreiblättrigem Rotor. Die wichtigsten Anlagenkenndaten sind in Tab 2 zusammengefasst. Ansichten der Anlagen (im selben Maßstab) finden sich in Abb 3 und Abb 4.

Windkraftanlagentyp		**VESTAS V90 – 2 MW**	**VESTAS V112 – 3.3 MW**
Bauart	[-]	Luvläufer mit verstellbaren Rotorblättern	
Rotortype	[-]	Dreiblattrotor, horizontale Achse	
Rotordurchmesser	[m]	90,0	112,0
Rotorkreisfläche	[m²]	6.362	9.852
Nennleistung	[kW]	2.000	2.975[1]
Drehzahl Rotor	[U/min]	Variabel: 8,2 bis 17,3	Variabel: 6,2 bis 17,7
Einschaltgeschwindigkeit	[m/s]	3	3
Abschaltgeschwindigkeit	[m/s]	23	25
Nabenhöhe	[m]	105	140
Schrägstellung	[°]	6	6
Blattkonus	[°]	2	4
Blattmaterial	[-]	Glasfaserverstärktes Epoxidharz und Kohlefasern	
Blattlänge	[m]	44	54,65
Rotorblattheizung	[-]	keine	Heißluft

Tab 2: Haupt-Anlagenparameter der betrachteten Anlagen Vestas V90 – 2 MW und Vestas V112 – 3.3 MW.

[1] Von 3,3 MW auf 2.975 kW dauerhaft gedrosselt.

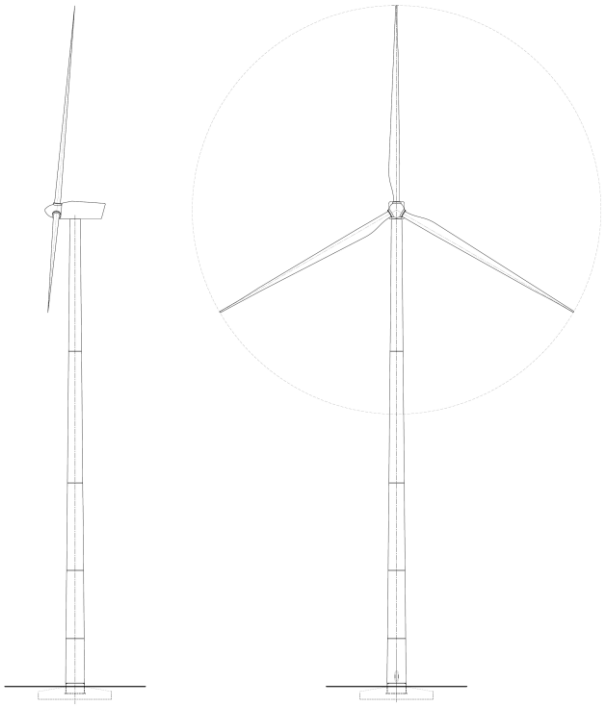

Abb 3: Darstellung der WKA Vestas V90 – 2 MW mit 105 m Nabenhöhe.

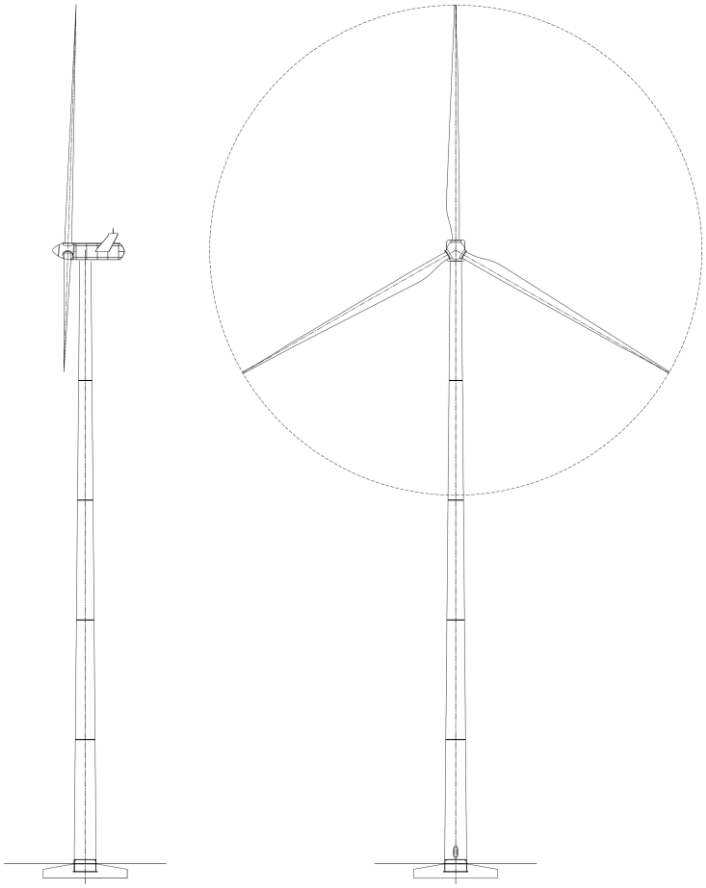

Abb 4: Darstellung der WKA Vestas V112 – 3.3 MW mit 140 m Nabenhöhe.

4.1. Eiserkennungssystem

Die Eiserkennung erfolgt bei beiden Anlagentypen (V90 und V112), unabhängig vom Vorhandensein einer Blattbeheizung, durch einen Leistungskurvenvergleich und zusätzlich durch ein BLADEControl Eiserkennungssystem (auf jeder WKA).

Der Leistungskurvenvergleich beruht darauf, dass Eisansatz an den Rotorblättern eine starke Auswirkung auf die aerodynamische Effizienz des Rotorblattprofils hat. Für eine festgelegte Windgeschwindigkeit führt daher Eisansatz zu einer reduzierten Leistung, bzw. wenn diese Windgeschwindigkeit über der Nennwindgeschwindigkeit liegt, zu einem kleineren Pitch-Winkel der Rotorblätter. Basierend auf der Gondelanemometer-Messung wird daher laufend das Verhältnis Windgeschwindigkeit/Leistung, bzw. Windgeschwindigkeit/Pitch-Winkel mit, unter eisfreien Bedingungen aufgezeichneten, Referenz-Kennlinien verglichen. Abweichungen über einem gewissen Schwellenwert (parametrisierbar in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur) werden dann als Vereisung interpretiert und erlauben so eine sehr sensible Erkennung von Rotorblattvereisung.

BLADEcontrol Eisensoren messen mittels Sensoren im Wurzelbereich des Rotorblattes dessen Eigenschwingungen. Bei Eisansatz kommt es durch die anhaftende Eismasse zu einer leichten Veränderung der Eigenfrequenzen der Blattschwingungen die dann vom System detektiert wird. Dieses Messprinzip funktioniert im Leistungsbetrieb als auch im Trudelbetrieb.

4.2. Beschreibung der Blattheizungsanlage

Die Anlagen vom Typ Vestas V112 – 3.3 MW verfügen über eine optional erhältliche Blattbeheizungsanlage. Die folgende Beschreibung der Blattbeheizungsanlagen beruht, neben anlagenspezifischen Informationen, auf dem Dokument „Allgemeine Spezifikation Vestas Enteisungssystem V112-3.3 MW 50/60 Hz“ (Vestas Wind Systems A/S, 2015).

Das Vestas Enteisungssystem (Vestas De-icing System, VDS) ist ein Heißluft-System zur aktiven Entfernung von Eis von der Rotorblattoberfläche. Das System besteht pro Rotorblatt aus je einer Heißlufteinheit (Hot Air Installation, HAI) die im Wurzelbereich des Blattes untergebracht ist, sowie aus einem System von Luftkanälen welche die heiße Luft in die zu heizenden Blattbereiche leitet und die abgekühlte Luft anschließend wieder zu der Heißlufteinheit zurückführt. Die Blattheizung ist dafür ausgelegt, das Rotorblatt in dem äußeren Drittel des Blattes über die gesamte Blatttiefe zu enteisen. Im dem weiter innen liegenden Teil des Rotors wirkt die Heizung vor allem im Bereich der Profilvorderkante. Jede Heißlufteinheit HAI besteht aus zwei Heizelementen und drei Axialgebläsen und ist für Wartungszwecken von der Nabe aus zugänglich. Die Maximalleistung pro Blatt beträgt 50 kW, die Nennleistung 35 kW. Für das gesamte System (3 Blätter) ergibt sich so eine Maximalleistung von 150 kW und eine Nennleistung von 105 kW. Der Anschluss an die Luftkanäle im Rotorblatt wird über flexible Leitungen bewerkstelligt. Die Energieversorgung der Heizung erfolgt über das standardmäßige Hilfssystem (AUX) der WKA. Für die elektrische Verbindung von der Gondel in die Nabe gibt es ein eigenes Stromübertragungssystem. Für die Aktvierung des Systems muss der Rotor durch die Bremse gestoppt und arretiert werden. Die Steuerung und Überwachung der Rotorblattheizung ist vollständig in die WKA Steuerung integriert und so kann das Enteisungssystem automatisch vom Eiserkennungssystem aktiviert werden. Durch die Integration des Enteisungssystems wird, abgesehen vom Beheizungszyklus, die standardmäßige Betriebsstrategie der Windenergieanlage nicht verändert.

Betriebsmodus der Blattheizungsanlage

Eine Blattenteisung kann entweder automatisch vom Eiserkennungssystem oder durch manuellen Eingriff ausgelöst werden. Ein voller Beheizungszyklus dauert insgesamt 2 Stunden und besteht aus einem Zeitraum von 90 Minuten in dem die Blattheizung betrieben wird, gefolgt von einer 30-Minütigen Wartezeit bevor die WKA wieder in Betreib genommen wird. Diese Wartezeit dient der Schonung des Materials des Rotorblatts indem erst gewartet wird bis die höchsten Temperaturspitzen abgeklungen sind, bevor wieder die dynamischen Betriebslasten auf das Blatt wirken. Wie oben beschrieben wird der Rotor für die Phase der Blattbeheizung gestoppt. Die Beheizung aller alle drei Blätter erfolgt im prinzipiell gleichzeitig, das Ein- und Ausschalten der Heißlufteinheiten erfolgt jedoch um einige Sekunden gestaffelt.

Laut Informationen vom Betreiber ist die WKA nach einem Beheizungszyklus in den meisten Fällen eisfrei. Sofern die meteorologischen Vereisungsbedingungen anhalten, kann es jedoch in Folge zu einer erneuten Vereisung der Rotorblätter und damit erneuten Abschaltung der WKA kommen. Bei einer automatischen Aktivierung der Blattheizung sind maximal drei solche Vereisungs-/Enteisungszyklen innerhalb von 24 Stunden möglich. Bei manueller Aktivierung können Rotorblattenteisung auch öfter vorgenommen werden.

5. Betriebsverhalten

In diesem Abschnitt werden anhand von beispielhaften Abbildungen einzelne Aspekte des Vereisungsverhaltens und der Rotorblattheizung diskutiert.

In Abb 5 ist der Idealfall für die Wirkung einer Blattheizung illustriert. In diesem Fall gibt es nach einer Phase mit geringen Windgeschwindigkeiten und Vereisungsbedingungen einen Heizungszyklus am 18. Nov. etwa bis 12:00 Uhr (mittleres Bild). Nach dieser Blattenteisung befindet sich die Anlage 60 Stunden lang im Leistungsbetrieb. Die Lufttemperatur (oberes Bild) liegt während dieser Periode meist leicht unter dem Gefrierpunkt. Die zum Vergleich geplottete Anlage 20609 (unteres Bild) verbleibt daher durchgehend in der Eisabschaltung. Erst nachdem die Temperaturen am 21. November wieder deutlich gestiegen sind und dadurch das Eis abschmelzen konnte, gehen auch die unbeheizten Anlagen wieder in Betrieb. Durch insgesamt zweimaligen Betrieb der Blattheizung konnten daher in diesem Fall drei Tage mit sehr guten Windbedingungen ausgenutzt werden. Am 17. November sind hingegen zwei Blattbeheizungszyklen ersichtlich, die zwar den Vereisungsstatus beheben konnten, auf den Energieertrag aber aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten keine positiven Auswirkungen hatten.

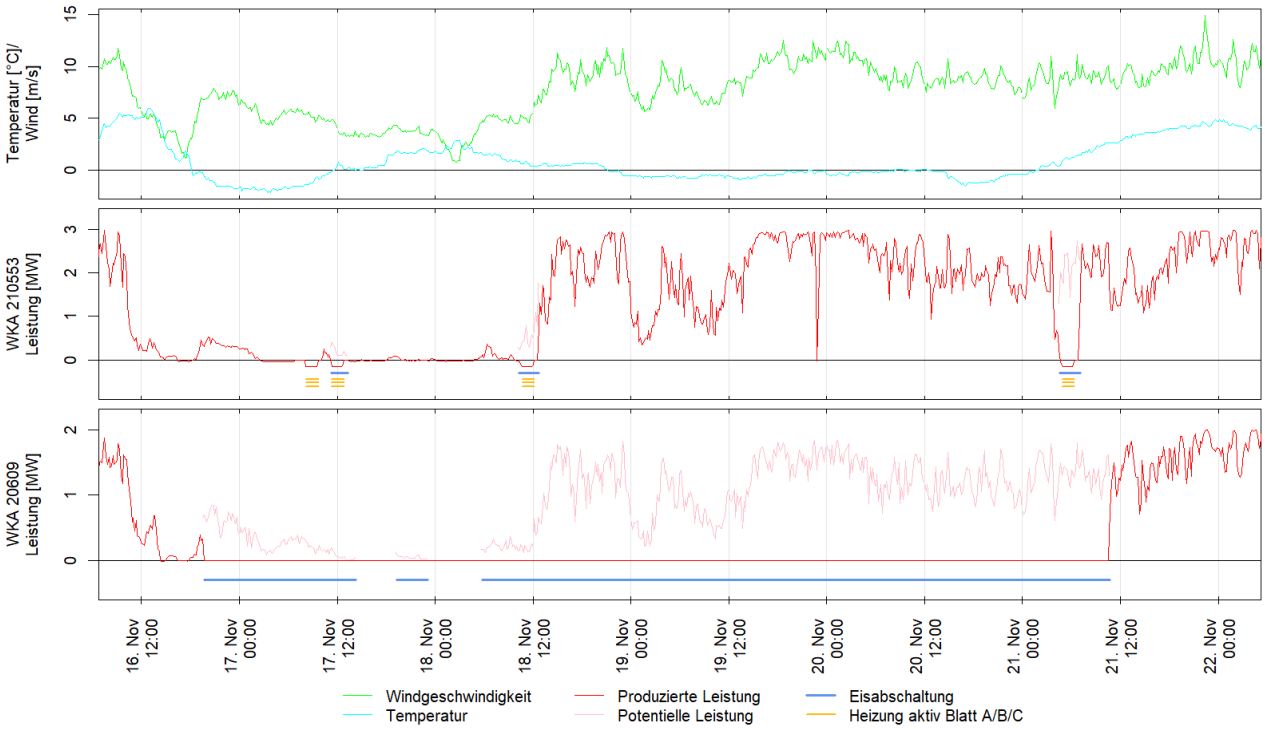

Abb 5: Meteorologische Bedingungen (oben) sowie produzierte Leistung und Vereisungsstatus für die beheizte WKA 21553 (mitte) und die unbeheizte WKA 20609 (unten) im Zeitraum vom 16. bis 22. November 2017. Eisabschaltungen und aktive Blattheizung sind durch horizontale Linien gekennzeichnet. Es sind die Heizungen aller drei Blätter (A/B/C, von oben nach unten) eingezeichnet, aber nicht farblich differenziert.

Bei dem in Abb 5 dargestellten Vereisungsereignis haben alle unbeheizten (V90) und alle beheizten (V112) Anlagen jeweils ein sehr ähnliches Vereisungsverhalten gezeigt. Abb 6 zeigt, dass das jedoch nicht immer der Fall ist. Bei den vier in Abb 6 dargestellten WKA handelt es sich um denselben (unbeheizten) Anlagentyp, dennoch zeigen diese ein sehr unterschiedliches Vereisungsverhalten. Während WKA 20610 nahezu ununterbrochen produziert, führt die Vereisung bei WKA 20612 zu einer durchge-

henden Abschaltung für einen Zeitraum von 66 Stunden. Der Grund dafür liegt vermutlich in den leicht unterschiedlichen WKA-Positionen in den Windparks und an der damit ebenfalls leicht unterschiedlichen meteorologischen Exposition. Bezüglich der Windgeschwindigkeit können die leicht unterschiedlichen Bedingungen an den Anlagenstandorten aus der unterschiedlichen Produktionsleistung der Anlagen abgelesen werden. Bis zu einem gewissen Grad spielt bei der Vereisung und der Eiserkennung aber auch eine Zufallskomponente eine Rolle. Insbesondere erscheint das bei beim Abtauen von Eis von der Rotorblattoberfläche plausibel. So gibt es laut Betreiber für WKA an diesem Standort Beobachtungen, dass ein Blatt der Anlagen bereits abgetaut ist, während die anderen beiden noch deutliche Eisanhaftung aufweisen.

Abb 6: Betriebsverlauf der Anlagen 20609, 20610, 20611 und 20612 für den Zeitraum vom 01. bis 05. Februar 2018. Diese Darstellung ist ein Beispiel für ein stark unterschiedliches Vereisungsverhalten bei ansonsten gleichartigen Anlagen.

Den wesentlichen Schluss, den man allerdings aus dem Vergleich in Abb 6 ziehen kann, ist der, dass sich aussagekräftige Beurteilungen von Betriebsstrategien, wie z.B. der Rotorblattheizung, auf langfristige Auswertungen beziehen müssen. Das Studium einzelner Ereignisse kann zwar helfen, Mechanismen

aufzudecken, die damit verbundene Unsicherheit muss aber, ohne Kenntnis aller relevanten Einflussgrößen, immer mitbeachtet werden. Das gilt auch für die in Abb 5, Abb 7 und Abb 8 gezeigten Beispiele, in denen jeweils einzelne WKA verglichen werden. Aus dem Abgleich mit den anderen, nicht dargestellten Anlagen, kann man aber relativ sicher sein, dass in diesen Abbildungen ein systematisches und typisches Betriebsverhalten dargestellt wird.

Die Aktivierung der Rotorblattheizung hat nicht in jedem Fall die beabsichtige Wirkung des Abtauens der Rotorblätter und der Ermöglichung des Weiterbetriebs. In Abb 7 wird wieder der Betriebsverlauf einer beheizten und eine unbeheizten Anlage gegenübergestellt. Die unter den Gefrierpunkt fallenden Temperaturen (oberes Bild) bewirken eine Anlagenvereisung, die nahezu zeitgleich an beiden Anlagen detektiert wird. Auf der WKA 210552 startet daraufhin ein Beheizungszyklus, der aber offensichtlich keinen Erfolg hat. Da die Lufttemperatur auch danach stetig fällt und gleichzeitig hohe Windgeschwindigkeiten herrschen, wird kein weiterer Enteisungsversuch unternommen. Unter solchen Bedingungen, kann die große Wärmeabfuhr durch den Wind die verfügbare Heizleistung weit übersteigen und so eine Blattenteisung unmöglich machen. Laut dem spezifizierten Betriebsbereich in (Vestas Wind Systems A/S, 2015), liegt bei Windgeschwindigkeiten von über 10 m/s die Minimaltemperatur, bei der eine Blattenteisung noch möglich ist, bei etwa -5°C. Erst mit den steigenden Temperaturen gegen Mittag des nächsten Tages werden beide Anlagen auf natürlichem Weg (möglicherweise unter der Wirkung von Sonneneinstrahlung) wieder eisfrei und setzen den Produktionsbetrieb fort. Für diese konkrete Episode hatte also das Vorhandensein und der Betrieb der Rotorblattheizung keine positive Auswirkung auf den Energieertrag. Im Gegenteil wurde sogar der Gesamtertrag durch die Energieaufwendung für die Blattbeheizung gemindert. Die Heizleistung ist in der Kurve für die Anlagenleistung als Periode mit negativer Leistung klar erkennbar.

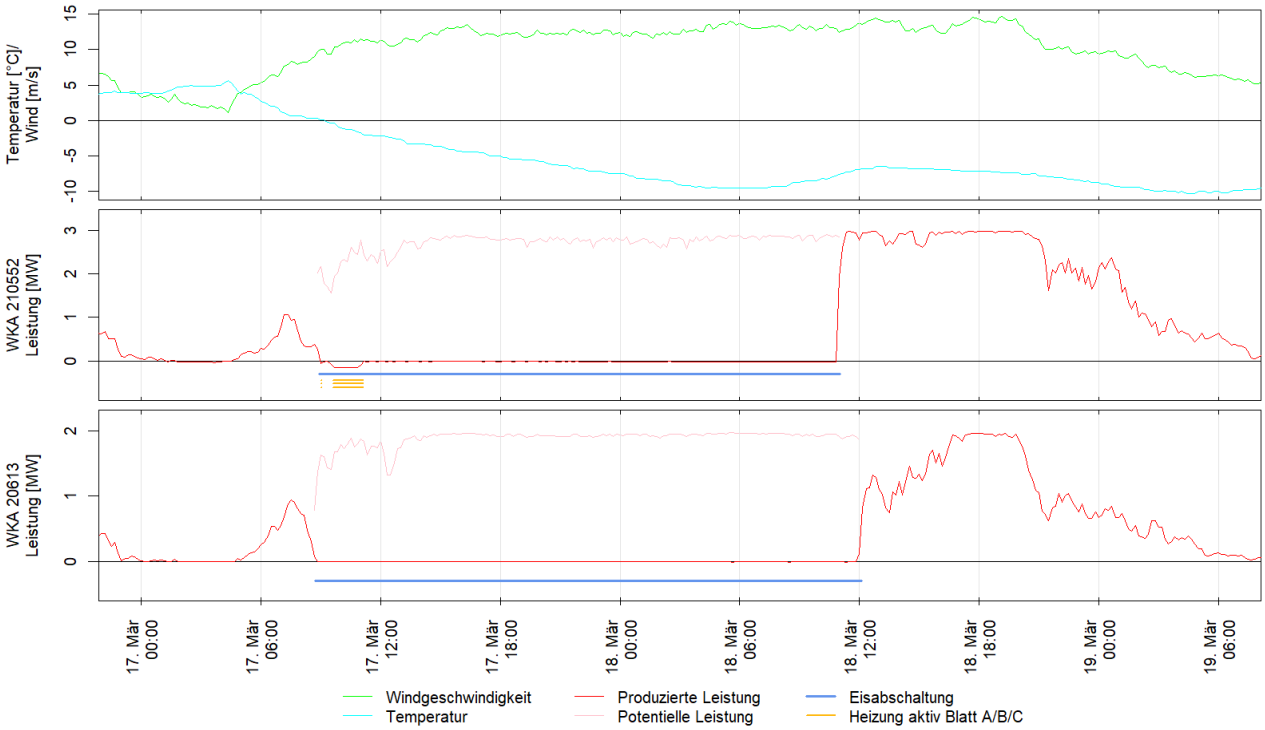

Abb 7: Vergleich des Anlagenbetriebs einer beheizten und einer unbeheizten WKA für einen Zeitraum mit stark unter den Gefrierpunkt fallenden Temperaturen.

Insgesamt sind für den untersuchten Standort solche Episoden, in denen die Leistungsfähigkeit der Rotorblattheizung ein limitierender Faktor ist, jedoch seltene Ereignisse. Für etwa 87% der Vereisungsperioden liegen Wind und Temperatur innerhalb des spezifizierten Betriebsbereichs des Enteisungssystems.

Für die Betrachtung der Heizenergie stellt der Verlauf in Abb 8 einen Extremfall dar. Insgesamt kommt es in dem dargestellten Zeitraum von zweieinhalb Tagen bei der WKA 210552 zu 10 Beheizungszyklen. Obwohl die Beheizung in jedem Fall zur Eisfreiheit des Rotors führt und der Weiterbetrieb der Anlage ermöglicht wird, kommt es in den meisten Fällen bald zu einer neuerlichen Vereisung. Die zum Vergleich dargestellte Anlage 20612 ist in diesem Zeitraum durchgehend gestoppt, entweder aufgrund von Vereisung oder am Nachmittag des 29. Novembers aufgrund von Windmangel.

Eine Bilanzierung der produzierten Energie versus der für die Heizung aufgewendeten Energie für die WKA 210552 über diese Vereisungsepisode ergibt trotz des vielfachen Heizens und der moderaten Windgeschwindigkeiten ein ganz klar positives Ergebnis. Die über diese Periode von zweieinhalb Tagen produzierte Energie beträgt 11025 kWh, unter Berücksichtigung der Heizungsenergie bleiben davon 9193 kWh übrig. Die positive Gesamtbilanz ist auch unmittelbar aus der graphischen Darstellung des Leistungsverlaufs in Abb 8 ablesbar, in der die Fläche unter der roten Kurve der produzierten bzw. der für die Heizung aufgewendeten Energie entspricht.

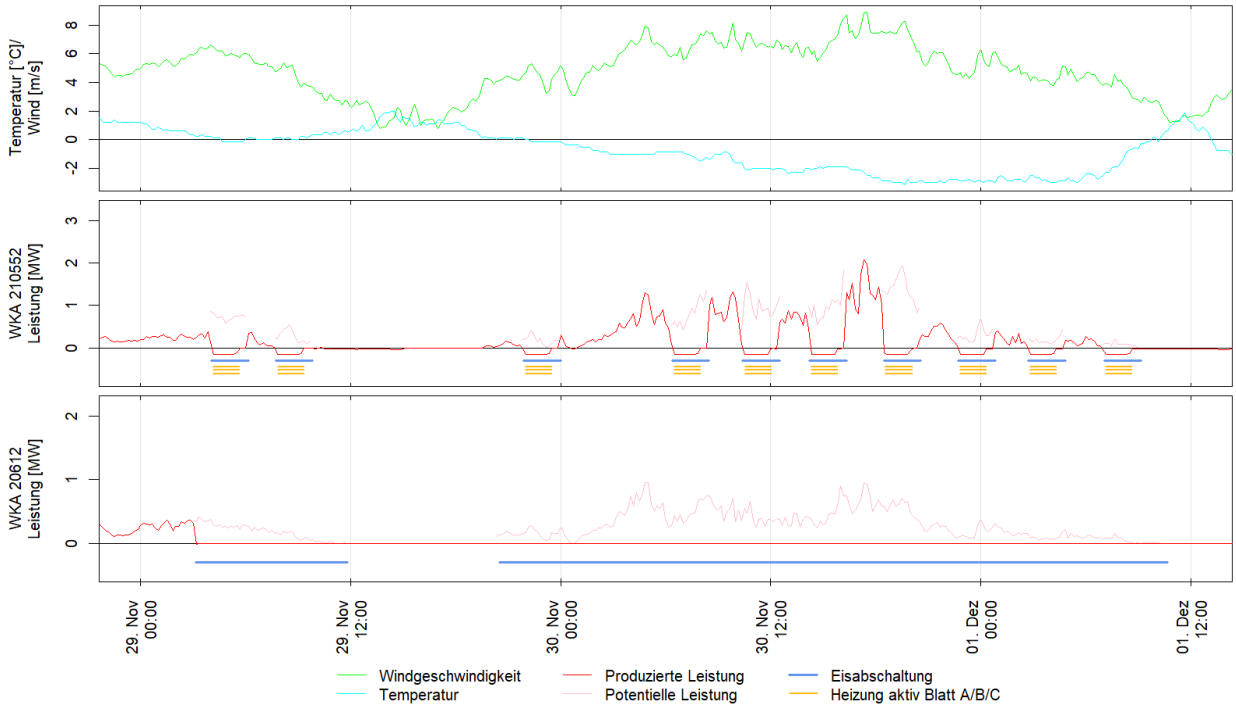

Abb 8: Beispiel für eine Vereisungsepisode mit mehrfachen Beheizungszyklen bei der V112 Anlage.

6. Auswertung und Ergebnisse

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde, soweit möglich, jeweils über alle gleichartigen Anlagen (d.h. 6 Stück ohne Blattheizung und 2 Stück mit Blattheizung) gemittelt, um mit einer breiteren Datenbasis möglichst belastbarere Ergebnisse und Schlussfolgerung abzuleiten.

6.1. Blattheizung

Eine Zusammenfassung des Betriebs der Rotorblattheizungen findet sich in Tab 3. Die für die Heizung aufgewendete Energie ist aus dem Leistungszähler der WKA für die Zeiten, in denen die Rotorblattheizung in Betrieb war, abgeleitet. Die mittlere Leistungsaufnahme der Rotorblattheizungen war bei beiden Anlagen etwa 142 kW (bzw. 47 kW pro Blatt) und liegt damit nahe der Maximalleistung der Heizung von 50 kW pro Blatt. Abhängig vom Betriebsverlauf und insbesondere von manuellen Eingriffen in die Steuerung wird nicht bei jeder Aktivierung die Heizung tatsächlich über eine ganze Periode von 90 Minuten betrieben. Dadurch ergibt sich auch die leicht unterschiedliche Anzahl und Dauer der Blattbeheizung für die drei Rotorblätter der Anlagen. Abweichend von den übrigen Betriebsdaten, die ab 1. Jänner 2017 vorliegen, beginnen die Zeitserien für den Betrieb der Rotorblattheizung erst mit Anfang März 2017. Der insgesamt betrachtete Zeitraum ist daher für die Blattheizung um zwei Monate kürzer.

Rotorblatt	Aktivierungen der Heizung insgesamt	Aktivierungen der Heizung pro Winter	Heizdauer insgesamt [h]	Heizdauer pro Winter [h]	Heizenergie insgesamt [MWh]	Heizenergie pro Winter [MWh]
210552A	126	98	143	112	-20,8	-16,2
210552B	129	100	148	115		
210552C	129	100	148	115		
210553A	108	84	128	100	-18,2	-14,2
210553B	106	82	128	99		
210553C	106	82	128	99		

Tab 3: Anzahl und Dauer der Heizzyklen der Rotorblätter und die dafür aufgewendete Heizenergie.

6.2. Leistungskurven

Die wichtigste Größe für die Beurteilung der Blattheizung ist der Mehrertrag, der durch die Verringerung der Dauer der Eisabschaltungen erzielt werden kann. In der gegenständlichen Studie werden die Ertragsverluste aus der Windgeschwindigkeit und den Leistungskurven der Anlagen berechnet. Als ersten Schritt wurden daher Leistungskurven für jede der acht WKA aus den aufgezeichneten 10-Minuten Daten für Windgeschwindigkeit und Leistung ermittelt. Dafür wurden ausschließlich Zeiträume betrachtet in denen die Anlagen sich im Produktionsstatus befanden und keine Störungsmeldungen, wie z.B. Eiserkennung, vorlagen. Abb 9 illustriert die so erhaltenen Leistungskurven für alle acht Anlagen. Zusätzlich sind in Abb 9 die theoretischen Leistungskurven laut Herstellerangaben (umgerechnet auf die standortspezifische Dichte von 1,1 kg/m^3) als dicke, hellgraue Linien eingezeichnet.

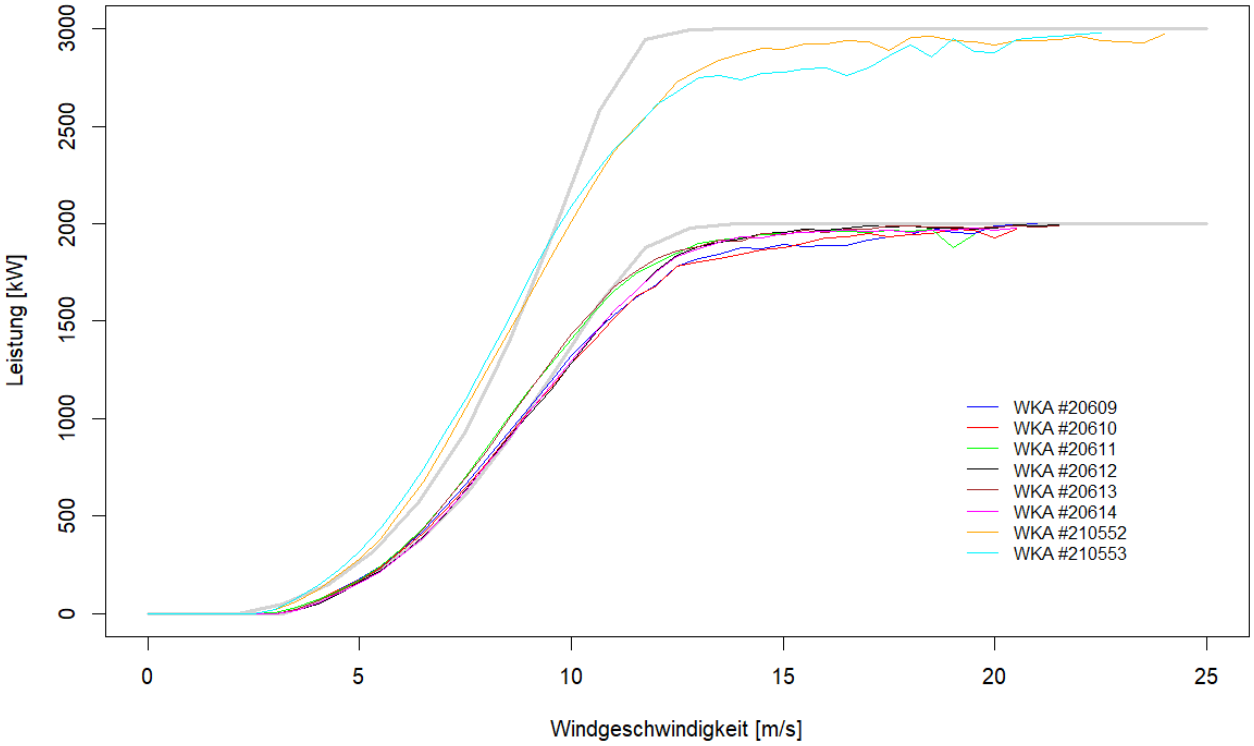

Abb 9: Leistungskurven der WKA aus Sternwald II und Sternwald III wie sie sich aus den 10-Minuten Mittelwerten des Messzeitraums ergeben (Winder 16/17 und Winter 17/18). Die Windgeschwindigkeit ist dabei der vom Gondelanemomenter aufgezeichnete Wert. Die theoretischen Leistungskurven laut Hersteller (umgerechnet auf die standortspezifische Dichte von 1,1 kg/m^3) sind als dicke, hellgraue Linien eingezeichnet.

Bei der Diskussion dieser Leistungskurven, gilt es zuerst zu beachten, dass dafür die von den Gondelanemometern der WKA gemessenen Windgeschwindigkeiten verwendet wurden. Aufgrund der lokalen Umströmungsbedingungen der Gondel, und noch mehr wegen der Verringerung der Windgeschwindigkeit indem die arbeitende WKA der Strömung Energie entzieht, müssen Gondelanemometer-Messungen mit einer Korrekturfunktion versehen werden. Diese Korrektur wird vom Anlagenhersteller spezifisch für einen WKA-Typ festgelegt. Aufgrund der Komplexität der Korrektur, und da unkorrigierte Daten weder vorhanden sind, noch sinnvoll interpretierbar wären, muss in der vorliegenden Betrachtung die Korrektur als „Black Box“ angenommen werden, deren Effekt als konsistent (d.h. ähnlicher Effekt bei ähnlichen Bedingungen) angenommen wird, aber ansonsten unbekannt ist.

In den Leistungskurven in Abb 9 wurden die Daten für alle Windrichtungen zusammengefasst. Bei einer Auswertung mit nach Windrichtungssektoren getrennten Leistungskurven ergibt sich ein nahezu identes Endergebnis (Abweichung kleiner als ein Prozent). Da die Häufigkeitsverteilung der Winddaten in einigen Windrichtungen für die betrachteten Zeiträume im Winterhalbjahr teilweise recht lückenhaft ist, erscheinen die über alle Richtungen summierten Leistungskurven aus Abb 9 als der statistisch robusterer Ansatz.

Eine weitere mögliche Herangehensweise wäre die Mittelung der Leistungskurven für alle gleichartige Anlagen, also die Berechnung von einer gemeinsamen Leistungskurve für alle V90 Anlagen, und einer für die beiden V112 Anlagen. Es ist allerdings unklar ob sich die Ergebnisse dadurch verbessern lassen: Einerseits hätten solche Leistungskurven eine breitere Datenbasis, andererseits gehen auf diese Weise möglicherweise vorhandene, individuelle Eigenschaften der WKA verloren. Für die folgende Berechnung der Ertragsverluste wurden daher die acht einzelnen in Abb 9 dargestellten Leistungskurven verwendet.

Eine Korrektur der 10-Minuten Daten für die Windgeschwindigkeit um die Variation der Luftdichte mit den auf den Anlagen gemessenen Temperaturen führt zu nur minimal homogeneren Leistungskurven. Da die Gondelanemometer-Korrekturfunktion, wie oben beschrieben, im Detail unbekannt ist, und daher nicht klar ist, welche Effekte wie weit berücksichtigt sind, wurde die explizite Korrektur um die Temperatur-/Dichtevariation in der folgenden Auswertung nicht mitgenommen.

Für die Errechnung der Ertragsverluste spielen grundsätzlich systematische Abweichungen in der Geschwindigkeitsmessung (wie die Gondelanemometer-Korrekturfunktion) keine Rolle, da für den Ertrag in die Leistungskurve wieder eine Windgeschwindigkeit laut Gondelanemometer eingesetzt wird. Solange für die Leistungskurve und die darauf basierende Ertragsberechnung dieselbe Referenzgeschwindigkeit verwendet wird, spielen systematische Fehler in der Windgeschwindigkeitsmessung keine Rolle. Unabhängig davon, ob es sich um instrumentelle Fehler oder Effekte aus der Anlagen- oder Gondel-Umströmung handelt.

Auch wenn auf diese Weise viele mögliche Fehlerursachen bei der Berechnung der Ertragsverluste vermieden werden können, verbleibt ein wichtiger Punkt, den es genau zu betrachten gilt: Und zwar, ob es abhängig davon, ob die Anlage abgeschaltet oder in Betrieb ist, zu einer systematischen Abweichung in den Gondelanemometer-Messungen kommt. Als Ursachen für solche Abweichungen kommen insbesondere die Wind-Abschattung des Anemometers durch ein stehendes Rotorblatt und die Korrekturfunktion für die Abbremsung der Strömung durch die WKA in Frage. Als erste Abschätzung der Größe dieses Effekts, dient eine Statistik der Abweichungen der Windmessungen auf unterschiedlichen Anlagen. Die Abweichung der Anemometer-Messungen zweier Anlagen zu Zeitpunkten an denen sich beide im normalen Produktionsbetrieb befinden beträgt im Mittel 0,346 m/s (für alle Paarungen aus den acht WKA). Der Unterschied zwischen zwei Anlagen, wobei eine in Betrieb ist und die andere wegen Vereisung gestoppt, beträgt hingegen im Mittel 0,506 m/s. Das ist somit ein Hinweis, dass man in der Tat, abhängig vom Betriebsstatus, mit systematischen Abweichungen in den gemessenen Windgeschwindigkeiten rechnen muss.

Für eine detaillierte Auswertung der Gondelanemometer-Daten sind in Tab 4 in jeder Zeile die Messungen zweier WKA gegenübergestellt, und zwar für Zeiten, in denen sich beide Anlagen im Produktionsbetreib befinden sowie für Zeiträume, in denen jeweils eine der Anlagen aufgrund von Vereisung abgeschaltet ist. Dadurch, dass in jeder Zeile immer dasselbe Anlagenpaar betrachtet wird, werden andere Einflüsse, z.B. des Windparklayouts, so weit als möglich ausgeschlossen. In der Summe über alle Kombinationsmöglichkeiten innerhalb der V90 Anlagen (#20609 bis #20614) zeigt sich, dass Windmessungen von WKA im Status der Eisabschaltung um im Mittel 0,40 m/s geringer Werte liefern als im Produktionsbetrieb (unterste Zeile in Tab 4). Interessanterweise scheint dieser Effekt ausschließlich bei den V90 Anlagen auf. Bei den beiden V112 Anlagen (#210552 und #210553) zeigt sich, wie aus Tab 5 ersichtlich, statistisch keine systematische Abweichung in den Anemometer-Messungen zwischen Produktionsbetrieb und Eisabschaltung.

Anlagen ID		Beide WKA in Betrieb	WKA 1 in Eisabschaltung		WKA 2 in Eisabschaltung	
WKA 1	WKA 2	Mittelwert $v_{\mathrm{WKA1}} - v_{\mathrm{WKA2}}$	Mittelwert $v_{\mathrm{WKA1}} - v_{\mathrm{WKA2}}$	Abweichung für vereiste WKA	Mittelwert $v_{\mathrm{WKA1}} - v_{\mathrm{WKA2}}$	Abweichung für vereiste WKA
20609	20610	0,67	0,25	-0,41	0,80	-0,14
20609	20611	0,63	0,24	-0,38	1,18	-0,56
20609	20612	-0,13	-0,66	-0,53	0,61	-0,74
20609	20613	0,29	0,00	-0,29	0,97	-0,68
20609	20614	0,33	-0,25	-0,58	0,98	-0,65
20610	20611	-0,05	-0,28	-0,23	0,50	-0,55
20610	20612	-0,81	-1,10	-0,28	-0,12	-0,70
20610	20613	-0,38	-0,94	-0,56	0,41	-0,79
20610	20614	-0,34	-0,79	-0,45	0,17	-0,51
20611	20612	-0,76	-1,04	-0,28	-0,49	-0,27
20611	20613	-0,34	-0,73	-0,38	-0,03	-0,31
20611	20614	-0,29	-0,48	-0,19	-0,13	-0,16
20612	20613	0,41	0,10	-0,30	0,48	-0,07
20612	20614	0,47	-0,03	-0,50	0,56	-0,09
20613	20614	0,06	-0,31	-0,37	0,25	-0,19
Mittelwert:				**-0,38**		**-0,43**

Tab 4: Vergleich der Anemometer-Messungen (in m/s) der V90 Anlagen für Leistungsbetrieb und während Eisabschaltung. Betrachtet wird jeweils der Mittelwert der Differenz der auf zwei Anlagen (als WKA1 und WKA2 bezeichnet) gemessenen Windgeschwindigkeit v für Zeiträume in denen beide Anlagen produzieren und für Zeiträume in denen eine der beiden Anlagen aufgrund von Vereisung gestoppt ist.

Anlagen ID		Beide WKA in Betrieb	WKA 1 in Eisabschaltung		WKA 2 in Eisabschaltung	
WKA 1	WKA 2	Mittelwert $v_{\mathrm{WKA1}} - v_{\mathrm{WKA2}}$	Mittelwert $v_{\mathrm{WKA1}} - v_{\mathrm{WKA2}}$	Abweichung für vereiste WKA	Mittelwert $v_{\mathrm{WKA1}} - v_{\mathrm{WKA2}}$	Abweichung für vereiste WKA
210552	210553	-0,04	-0,07	**-0,04**	-0,03	**-0,01**

Tab 5: Vergleich der Anemometer-Messungen für die V112 Anlagen in derselben Form wie in Tab 4.

Die Ursache für diese Abweichung bei den V90 Anlagen ist nicht abschließend geklärt. Sollte die Wind-Abschattung der Anemometer durch die Blattwurzel dafür verantwortlich sein, wäre der Effekt, je nach Drehwinkel des Rotorblattes, vorhanden oder nicht vorhanden. In den Messdaten würde sich das als größere Streuung (Standardabweichung) der Windgeschwindigkeitsdifferenzen niederschlagen, was jedoch klar nicht der Fall ist. Wahrscheinlichste Ursache ist daher die Korrekturfunktion für die Gondelanemometer-Messungen, die den Umströmungs- und Abbremsungseffekt berücksichtigen soll. Der Umstand, dass diese Abweichung nur bei den V90 Anlagen auftritt, könnte dann darin zu suchen sein, dass die V112 Anlagen, mit ihrem um etwa 10 Jahren jüngeren Errichtungsdatum, über eine verfeinerte Korrekturfunktion verfügen. Möglicherweise spielt aber auch die unterschiedliche Positionierung der Anemometer auf der Gondel eine Rolle. Unabhängig von dieser Analyse, ist jedoch festzuhalten, dass sich der eigentliche Punkt, auf den es im Kontext der Ertragsanalyse ankommt, nämlich den Unterschied

in der Windmessung zwischen Betrieb und bei Eisabschaltung für ein und dieselbe Anlage, aus den vorhandenen Daten relativ zuverlässig herauslesen lässt.

6.3. Ertragsverluste

Die folgende Auswertung konzentriert sich auf die primäre Fragestellung der gegenständlichen Studie: Dem Vergleich von Anlagen mit und ohne Rotorblattheizung unter nahezu identen Standortbedingungen in unmittelbar benachbarten Windparks, um die Effektivität und Effizienz der Rotorblattheizung – unter weitest möglicher Ausblendung aller anderen Einflussgrößen – zu bewerten.

Für den Vergleich zur Beurteilung der Rotorblattheizung wurden, entsprechend den Gegebenheiten in dem Windpark, zwei in mehreren Gesichtspunkten unterschiedliche Anlagentypen verwendet. Insbesondere handelt es sich (siehe Abschnitt 3) um Anlagen unterschiedlicher Nennleistung, Rotordurchmesser und Nabenhöhe. Zusätzlich sind die V112 Anlagen aus Sternwald III (2016 errichtet) um gute 10 Jahre jünger als die V90 Anlagen. Zwischen diesen beiden Gruppen von WKA gibt es daher auch in Hinsicht des technischen Entwicklungsstandes, aber auch in Hinsicht auf Verschleiß und Instandhaltung deutliche Unterschiede. Aus diesen Gründen ist es nicht sinnvoll, das Betriebsverhalten und den Störungsverlauf der beiden Anlagentypen – mit Ausnahme der vereisungsbezogenen Störungen – zu vergleichen. Auf eine detaillierte Analyse der Anlagenbetriebsdaten in Hinblick auf Art, Häufigkeit und Dauer von Anlagenstörungen wurde daher verzichtet.

Für die Auswertung des Ertragsentgangs infolge von vereisungsbedingten Abschaltungen wurden primär die Betriebsdaten aus den Vereisungsphasen herangezogen. Betriebsdaten für die Zeiträume, in denen die WKA nicht vereist sind, werden ausschließlich dazu benutzt, um die Leistungskurven der Anlagen zu bestimmen sowie um die Gondelanemometer-Windmessungen abzugleichen (Abschnitt 6.2). Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Einflüsse der Anlagenbetriebsführung, wie z.B. Stillstände aufgrund von Störungen oder für Wartungsarbeiten, das Ergebnis nicht beeinflussen.

In Tab 6 sind die Anzahl und die Dauer der Vereisungen sowie die Ertragsverluste für alle Anlagen zusammengefasst. Die Mittelwerte in den letzten beiden Zeilen erlauben dabei einen Überblick über das unterschiedliche Vereisungsverhalten mit und ohne Rotorblattheizung. Obwohl bei den Anlagen mit Rotorblattheizung nahezu dreimal so viele Vereisungsereignisse zu verzeichnen sind, ist die Gesamtdauer der Vereisung um mehr als die Hälfte kürzer als bei den unbeheizten Anlagen. Beim Energieertrag ist der Unterschied etwas kleiner, aber immerhin kann die Rotorblattheizung die Ertragsverluste durch Vereisung um 44% reduzieren. Die Angabe von Werten „pro Winter“ bezieht sich, wie in Abschnitt 3 beschrieben, auf den Referenzzeitraum von Anfang Oktober bis Ende April.

Anlagen ID	Anzahl Vereisungs-ereignisse insgesamt	Anzahl Vereisungs-ereignisse pro Winter	Vereisungs-dauer insgesamt. [h]	Vereisungsdauer pro Winter [h]	Ertrags-entgang insgesamt [MWh]	Ertrags-entgang pro Winter [MWh]	Ertragsentgang pro Winter und MW installierter Leistung [MWh]
20609	69	44	1343	855	916	583	291
20610	57	36	1226	780	702	447	223
20611	64	41	1479	941	775	493	247
20612	70	45	1625	1034	981	624	312
20613	41	26	1335	849	738	470	235
20614	55	35	1550	986	846	538	269
210552	171	109	570	363	611 (631)	389 (405)	130 (135)
210553	163	104	647	412	730 (749)	465 (479)	155 (160)
Mittel V90	59	38	1426	908	826	526	263
Mittel V112	167	106	609	387	670 (690)	427 (442)	142 (147)

Tab 6: Vereisungen und Ertragsverluste. Zahlen in Klammer beinhalten zusätzlich die für die Blattheizung aufgewendete Energie, siehe Tab 3. Man beachte, dass die Werte in der letzten Spalte Volllaststunden entsprechen.

Wenn man für die Perioden von Eisabschaltungen die Windgeschwindigkeiten der V90 Anlagen um die in Tab 4 ermittelte +0,40 m/s korrigiert, dann ändert sich das in Tab 6 gezeigte Ergebnisse geringfügig. Die entsprechenden Ertragsentgänge finden sich in Tab 7. Die Reduzierung des vereisungsbedingten Ertragsentgangs durch den Einsatz der Rotorblattheizung beträgt in diesem Fall 51%. Da der Hintergrund für die Geschwindigkeitskorrektur für die abgeschalteten Anlagen letztendlich im Unklaren bleibt, kann man die Ergebnisse aus Tab 6 als konservative Abschätzung ansehen, während es sich bei den Zahlen in Tab 7 um eine bestmögliche Abschätzung handelt.

Anlagen ID	Ertrags-entgang insgesamt [MWh]	Ertrags-entgang pro Winter [MWh]	Ertragsentgang pro Winter und MW installierter Leistung [MWh]
20609	1020	649	325
20610	792	504	252
20611	892	568	284
20612	1111	707	353
20613	847	539	270
20614	966	615	307
210552	611 (631)	389 (405)	130 (135)
210553	730 (749)	465 (479)	155 (160)
Mittel V90	938	597	298
Mittel V112	670 (690)	427 (442)	142 (147)

Tab 7: Ertragsverluste mit und ohne Rotorblattheizung. Die Windgeschwindigkeiten der V90 Anlagen wurden mit einer Korrektur von +0,4 m/s versehen, ansonsten entspricht die Tabelle den rechten drei Spalten von Tab 6.

7. Diskussion und Unsicherheiten

In folgender Auflistung sind die wesentlichen Aussagen zum Betrieb der Rotorblattheizung zusammengefasst. Naturgemäß hängen diese Ergebnisse vom WKA-Typ und insbesondere von den spezifischen Vereisungsbedingungen des untersuchten Standorts ab. Bei einer Übertragung dieser Aussagen auf anderen Standorte und WKA muss man daher die jeweiligen Rahmenbedingungen mit bedenken. Für die Einstufung der Vereisungsverhältnisse am Standort Sternwald kann man die Vereisungen der unbeheizten V90 Anlagen heranziehen, die entsprechenden Werte sind in Tab 6 angeführt. Demnach gibt es an dem Standort Sternwald 35 bis 45 Vereisungsereignisse pro Jahr und eine Vereisungsdauer von 9% bis 12% des Jahres. In der Kategorisierung aus (IEA Wind, 2011) entspricht das der IEA Vereisungsklasse 3.

Gesamtdauer der Vereisung: Die Gesamtdauer der vereisungsbedingten Stillstände ist bei Anlagen mit Rotorblattheizungen mit durchschnittlichen 387 Stunden pro Jahr um 57% kleiner als bei den unbeheizten Anlagen mit 908 Stunden pro Jahr.

Anzahl der Vereisungsereignisse: Die Anzahl der vereisungsbedingten Abschaltungen ist bei den Anlagen mit Rotorblattheizung mit 106 Ereignissen pro Jahr mehr als doppelt so hoch als bei den Anlagen ohne Enteisungsanlage. Die Ursache dafür ist ein sich wiederholender Zyklus von Blattenteisung gefolgt von neuerlicher Vereisung während eines einzelnen länger andauernden meteorologischen Vereisungsereignisses (siehe Abb 8). Die durchschnittliche Dauer der vereisungsbedingten Abschaltung beträgt bei den beheizten Anlagen nur 3,6 Stunden, wobei schon der Blattbeheizungszyklus alleine (der im Regelfall während der Eisabschaltung stattfindend) 2 Stunden dauert. Bei den unbeheizten Anlagen dauert hingegen eine durchschnittliche Vereisungsabschaltung etwa 24 Stunden.

Ertragsverluste: Die Ertragsverluste wurden in zwei Varianten berechnet, mit und ohne 0,4 m/s Korrektur. Je nachdem ergibt sich durch die Rotorblattheizung eine Verringerung der Ertragsverluste um 44% (konservativ) bis 51% (beste Schätzung). Für den untersuchten Standort entspricht das einem Mehrertrag durch die Blattheizung von 116 (konservativ), bzw. 151 (beste Schätzung) Volllaststunden.

Allgemeines: Der Betrieb der Rotorblattheizung führt im Regelfall zur Eisfreiheit des Rotors. Auch wenn es bei anhaltenden Vereisungsbedingungen bald zu einer neuerlichen Vereisung kommt, ist die Gesamtenergiebilanz von Produktion und notwendiger Heizenergie auch bei moderaten Windgeschwindigkeiten klar positiv (siehe Abb 8). Nur bei einem kleinen Teil der Heizungszyklen ist im Anschluss keine Produktion möglich; entweder weil die Leistungsfähigkeit der Heizung nicht ausreicht (siehe z.B. Abb 7), oder weil der Wind nachlässt. Die in solchen Fällen aufgewandte Energie zur Blattheizung ist damit zwar verloren, die dadurch verursacht Ertragsminderung ist jedoch vergleichsweise gering und mangels Vorhersehbarkeit kaum zu vermeiden. Insgesamt sind die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Rotorblattheizung an dem untersuchten Standort keine wesentliche Einschränkung. Für etwa 87% der Zeit in der Vereisung auftritt, liegen die Wind- und Temperaturverhältnisse innerhalb des spezifizierten Betriebsbereichs des Enteisungssystems.

Die Ergebnisse dieser Studie, d.h. konkret die Verringerung der Ertragsverluste um etwa 50%, können auch als Basis für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Amortisierung) der Rotorblattheizung dienen. Eine solche Bewertung ist jedoch nur projektspezifisch für eine konkrete Anlage und einen konkreten Standort sinnvoll.

7.1. Unsicherheiten und Einflussfaktoren auf das Ergebnis

Abschließend sollen die bekannten Unsicherheiten und Einflussfaktoren auf das Ergebnis diskutiert werden. Insgesamt ist jedoch nicht davon auszugehen, dass diese Unsicherheiten die oben in Abschnitt 7 getroffenen Kernaussagen grundsätzlich beeinträchtigen.

- Die für die Bewertung der Blattheizung verglichenen V90 und V112 Anlagen weisen unterschiedliche Nabenhöhen, Rotordurchmesser und damit auch unterschiedliche Blattspitzenhöhen auf. Das Anfrieren von unterkühlten Wassertropfen aus Wolken (bzw. Nebel) ist einer der Hauptmechanismen von Vereisung. Ob der Rotor in die Wolkendecke hineinragt oder nicht, kann daher einen ganz wesentlichen Unterschied bei der Vereisung von WKA machen.
- Die einzelnen WKA-Standorte innerhalb der Windparks, mit leicht unterschiedlicher Topographie und Seehöhe (990 bis 1025 m für die V90 und 950-960 m für die V112), können unterschiedliche Vereisungsbedingungen aufweisen. Die Temperaturmessungen (10-Minuten Mittel) der Anlagen weisen jedoch auf recht einheitliche meteorologische Bedingungen hin. Die systematischen Abweichungen in den gemessenen Temperaturen zwischen den einzelnen WKA sind kleiner als etwa ±1°C.
- Die Aufzeichnung von Vereisungsperioden hängt von dem Ansprechen von Eisdetektionssystemen ab. Abgesehen von der Mess-Streuung und der Parametrisierung können Eissensoren auf verschiedenen Anlagen auch grundsätzlich eine anderes Ansprechverhalten zeigen (z.B. BLADEControl Sensoren bei unterschiedlichen Blattgeometrien).
- Die Verwendung der Daten des Gondelanemometers birgt den vermutlich größten Unsicherheitsfaktor. Vergleiche zwischen den Anlagen, wie in Abschnitt 6.2 diskutiert, erlauben dabei jedoch eine gewisse Abschätzung der Unsicherheit und insbesondere des Einflusses des Betriebsstatus (Produktionsbetrieb versus Eisabschaltung).
- Die Repräsentativität des Beobachtungszeitraums für das langjährige Vereisungsverhalten ist nicht gesichert. Umgekehrt gibt es aber auch keine Hinweise auf ein untypisches Vereisungsgeschehen.
- Trotz dem sehr vereisungsanfälligen Standort sind Vereisungen relativ seltene Ereignisse und deren begrenzte Anzahl limitiert die Aussagekraft der Statistik. Eine Abschätzung für die Größe dieser Unsicherheit lässt sich aus dem Vergleich der einzelnen Anlagen ableiten. So liegt beispielsweise die Schwankungsbreite der Ertragsverluste für die sechs vergleichbaren V90 Anlagen bei etwa ±15%.
- Unterschiedlicher Oberflächenzustand auf den Rotorblättern. Dabei könnte insbesondere das frühere Errichtungsdatum der V90 Anlagen aus Sternwald II zu einer stärker verwitterten Oberfläche und damit zu anderen Eigenschaften der Eisanhaftung führen.

8. Literaturverzeichnis

Auer, I., Chimani, B., & Türk, K. (2012). Klimanormalperiode 1981–2010. *13. Österreichischer Klimatag 14.–15.06.2012.* Wien, Österreich.

IEA Wind. (2011). *Expert Group Study On Recommended Practices 13. Wind Energy Projects In Cold Climates, 1. Ed.*

International Organization for Standardization. (1975). ISO 2533. *Standard Atmosphere*.

Vestas Wind Systems A/S. (2015). *Allgemeine Spezifikation Vestas Enteisungssystem V112-3.3 MW 50/60 Hz.*