

Ergebnisbericht

Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen

IEA Wind Task 54 (2022-2025) Arbeitspaket 4

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Projektes der Forschungskooperation Internationale Energieagentur Ausschreibung 2021 zur Teilnahme am IEA Wind Task 54 wurde als Arbeitspaket 4 des Antrags die Leitung eines Subtasks durch die Energiewerkstatt übernommen, der sich mit dem Performance Envelope von Rotorblattheizungssystemen, der Kernkomponente beim Betrieb heutiger Windkraftanlagen unter Vereisungsbedingungen, auseinandersetzt. Im Mittelpunkt der Arbeiten stand dabei die Entwicklung einer Modellierung des Performance Envelopes unter Berücksichtigung der Rotorblattdimensionen, der Heizleistung des Systems und den meteorologischen Umgebungsbedingungen in Form von Temperatur, Windgeschwindigkeit sowie dem Gehalt an flüssigem Wasser in der Luft. Das Modell berechnet eine Grenzkurve bis zu derer die Heizleistung ausreicht um die beheizte Fläche des Rotorblatts auf eine konstante Temperatur zu erwärmen. Diese Grenzkurve stellt den sog. Performance Envelope des Systems dar. Daran anknüpfend wurde zum einen eine Datenbank erstellt, die beispielhafte Zeitreihen von Vereisungsereignissen unterschiedlicher Weltregionen beinhaltet, die wiederum in das Modell eingespeist werden können. So lassen sich die Unterschiede im Vereisungsgeschehen, wie auch die resultierende Leistungsfähigkeit von Rotorblattheizungssystemen in spezifischen Regionen darstellen. Zum anderen wurde eine Methodik zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen entwickelt, die es anhand von Temperaturmessungen der Blattoberfläche unter Hinzunahme der Modellierung des Performance Envelopes ermöglichen soll, die Leistungsfähigkeit des Systems im Feld nachzuweisen. Zielsetzung der erarbeiteten Tools und Prozesse ist die Beförderung einer Standardisierung, um unterschiedliche Systeme in den verschiedenen Phasen der Projektentwicklung und des Betriebs besser bewerten und vergleichen zu können.

Auftraggeber: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
als Bestandteil des Projekts „IEA Wind Task 54: Windenergie in kalten Klimazonen Erste Arbeitsperiode (2022 – 2025)“
FFG-Antragsnummer: 40960419

Dieses Projekt wurde im Rahmen des IEA Wind Technology Collaboration Programme (TCP) durchgeführt.

IEA FORSCHUNGS
KOOPERATION

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Auftragnehmer: Energiewerkstatt
Technisches Büro und Verein zur Förderung erneuerbarer Energie
Heiligenstatt 23
5211 Friedburg/Austria
Tel.: +43 7746 28212
office@energiewerkstatt.org

Bearbeitung: Dipl.-Phys. Claas Rittinghaus

Prüfung: Mag. Florian Pfannhofer, BSc

Revision: 00

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Methodik.....	6
2.1.	Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse.....	6
2.2.	Modellierung des Performance Envelopes	9
2.3.	Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld.....	12
3.	Ergebnisse	13
3.1.	Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse.....	13
3.2.	Modellierung des Performance Envelopes	19
3.3.	Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld.....	21
4.	Zusammenfassung und Fazit.....	24
5.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	26

1. Einleitung

Vereisungsereignisse können zu deutlichen Ertragseinbußen beim Betrieb von Windkraftanlagen (WKA) führen. Besonders häufig betrifft dies WKA, die in kalten Klimazonen bzw. im alpinen Raum betrieben werden. In letzterem bedingt vor allem die große Seehöhe das Vorliegen niedriger Temperaturen, die in Verbindung mit moderater bis hoher Luftfeuchtigkeit bzw. Niederschlag bei entsprechenden Wetterlagen die meteorologischen Voraussetzungen für instrumentelle Vereisung bzw. die Vereisung der Rotorblätter einer WKA bilden. Stillstandzeiten aufgrund von Vereisung können über das Winterhalbjahr bei vorgeschriebener Abschaltung, wie in Österreich und Deutschland üblich, teilweise bis zu 20% der potenziellen Betriebsstunden betragen. Neben Produktionsausfällen kann die Vereisung der Rotorblätter auch zu Sicherheitsrisiken und einer verkürzten Lebensdauer der Anlagen führen. Um die Auswirkungen der Vereisung zu mindern, können die Anlagen mit Eisschutzsystemen (Ice Protection System, IPS), wie z. B. Rotorblattheizungen, ausgestattet werden. Die Effizienz solcher Systeme hängt stark von den meteorologischen Bedingungen ab, die die Eisbildung und den Eisabtrag bestimmen, den sog. Vereisungsbedingungen. Derzeit ist keines der modernen Rotorblattheizungssysteme in der Lage, die Vereisung unter allen Bedingungen zu verhindern. Sie alle haben einen begrenzten Leistungsbereich, den sog. Performance Envelope. Die Definition, Interpretation und Anwendung dieses Performance Envelopes ist in vielen Phasen der Entwicklung und des Betriebs einer WKA bzw. eines Windparks mit Rotorblattheizungssystemen an einem Standort mit potentiell Vereisungsgeschehen entscheidend. Von der Standortbewertung über den kontrollierten Betrieb bis hin zur Vorhersage der Stromerzeugung beeinflusst der Performance Envelope die Wahl der Anlagen, die Steuerungsstrategien, und letztendlich den verbleibenden Gewinn aus dem Verkauf des erzeugten Stroms und dem Kauf von benötigter Ausgleichskapazität.

Der erste Schritt besteht darin, ein geeignetes Rotorblattheizungssystem auszuwählen und es anschließend mit optimalen Einstellungen für den jeweiligen Standort zu betreiben. Dies setzt Kenntnisse über die typischen Merkmale der lokal auftretenden Vereisungsereignisse voraus. Die größte Herausforderung in dieser Hinsicht ist die große Variabilität und Vielfalt von Vereisungsereignissen in Bezug auf Eistyp (von Klareis bis Raueis/-reif), Vereisungsintensität (Masse und Dicke des Eises) und zeitliche Entwicklung (Dauer, Wachstumsraten, Schmelzphasen). Die Vereisungsbedingungen können zwischen verschiedenen Regionen der Welt, aber auch zwischen verschiedenen Ereignissen am selben Ort oder sogar im Verlauf eines einzigen Vereisungsereignisses stark variieren. Eines der Ziele des Subtasks war es daher, konkrete Erkenntnisse über die große Vielfalt von Vereisungsereignissen zu gewinnen, indem entsprechende Daten aus verschiedenen Teilen der Welt gesammelt und in Form einer Datenbank für die interessierte Öffentlichkeit verfügbar gemacht werden. Die zeitliche Entwicklung von beispielhaften Einzelereignissen ist dabei in Form von Zeitreihendaten zugänglich.

Im zweiten Schritt ist ein Zusammenhang zwischen dem erwarteten bzw. vorliegenden Vereisungsgeschehen und der Leistungsfähigkeit eines spezifischen Rotorblattheizungssystems unter diesen Bedingungen herzustellen. Die Hersteller von Windkraftanlagen, die häufig entsprechende Systeme direkt mit ihren Anlagen verkaufen, halten sich diesbezüglich eher bedeckt. In der Regel werden nur Aus- bzw. Zusagen zur Verfügbarkeit der Systeme sowie zu einem (garantierten) Produktionsanteil bei Vereisung, dem sog. Ice Production Ratio (IPR) getroffen. Dies ist das Verhältnis zwischen tatsächlich produzierter Energie und der potentiell möglichen Energieproduktion anhand der gemessenen Windgeschwindigkeit in Verbindung mit der Leistungskurve der WKA. Über die tatsächlichen Umgebungsbedingungen, unter denen ein System erfolgreich die Vereisung verhindern kann, wird in der Regel keine Aussage getroffen. Dies erschwert es zum einen im Zuge der Projektentwicklung eine fundierte Entscheidung in Bezug auf die Anlagen- und ggf. Systemauswahl zu treffen und zum anderen nach

Errichtung eine Bewertung der tatsächlichen Leistungsfähigkeit des Systems unter spezifischen Umgebungsbedingungen anzustellen. Ein weiteres Ziel des Subtasks war daher die Entwicklung eines Modells, das anhand meteorologischer und systemtechnischer Parameter einen Bereich definiert, in dem ein Rotorblattheizungssystem effizient Vereisung verhindern bzw. abtauen kann, der sog. Performance Envelope.

Die Validierung der Leistungsfähigkeit eines Systems im Feld stellt den letzten Schritt in Bezug auf die Projektentwicklung von WKA bzw. Windparks mit Rotorblattheizungssystemen dar. Hierbei ist es notwendig Temperaturmessungen der Rotorblattoberfläche im Betrieb des Systems vorzunehmen und diese mit Herstellerangaben bzw. in Ermangelung solcher mit einem möglichst genauen Modell des Performance Envelopes des Systems zu vergleichen. Der Subtask hat sich in dieser Hinsicht mit Methoden der Temperaturmessung, insbesondere per Infrarotkamera, sowie mit den Möglichkeiten einer daran anschließenden Übertragung der Messergebnisse auf die Leistungsfähigkeit des Rotorblattheizungssystems beschäftigt, u. a. anhand des im vorangegangenen Absatz beschriebenen Modells. Ziel war die Beschreibung eines Prozesses zur Validierung der Leistungsfähigkeit eines Rotorblattheizungssystems als Ausgangspunkt für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

2. Methodik

Der Subtask zu Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen des IEA Wind Task 54 setzte sich aus Teilnehmern der folgenden Länder zusammen:

Nation	Vertreten durch	Beschreibung
Finnland	Wicetec	Anbieter von Systemen und Technologien zur Verhinderung der Vereisung von Rotorblättern
Kanada	Nergica	Zentrum für angewandte Forschung im Bereich der erneuerbaren Energien
	Icetek	Anbieter von Systemen und Technologien zur Erkennung von atmosphärischer Vereisung
	FabricAir / Borealis Wind	Anbieter von Systemen und Technologien zur Verhinderung der Vereisung von Rotorblättern
Österreich	Energiewerkstatt	Technisches Büro für erneuerbare Energie
Schweden	Vattenfall	Internationales Energieversorgungsunternehmen
Schweiz	Meteotest	Anbieter von Dienstleistungen zu Wetter, Klima, Umwelt und Informatik

Tab. 1: Am Subtask zu Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen teilnehmende Länder

In den einzelnen Aufgabenbereichen kam je nach Notwendigkeit unterschiedliche Methodik zum Einsatz. Im Wesentlichen umfassten diese das Zusammentragen und Auswerten von meteorologischen Daten, das Einrichten und Dokumentieren von Datenbanken, das Programmieren und Dokumentieren von Python-Skripten/UIs sowie das Testen und Auswerten von Messequipment bzw. Messungen. Die vorangegangenen Tätigkeiten wurden dabei zu großen Teilen in Eigenregie durch die einzelnen Teilnehmer im Zuge ihrer Taskmitgliedschaft bzw. Arbeiten/Projekten ihrer eigentlichen Institute/Unternehmen erbracht. Die vornehmliche Arbeit des Subtasks bestand, wie im Zuge der IEA Wind Forschungskoooperation vorgehesehen, im Zusammentragen und Diskutieren der Ergebnisse der einzelnen Bereiche sowie der Dissemination dieser im Task und im Zuge einschlägiger Konferenzen/Veranstaltungen.

2.1. Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse

Für die Erstellung einer Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse war es zunächst notwendig die Struktur der Datenbank sowie einen Prozess zu deren Verwaltung zu entwickeln. Die Zeitreihen meteorologischer Daten sollten für eine möglichst universelle Nutzbarkeit als einfache Comma-Separated-Value-Dateien (CSV) abgelegt werden. Für eine Übersicht zu den jeweiligen Datensätzen einzelner Vereisungsereignisse wurde ein Verzeichnis in tabellarischer Form entwickelt, das Metainformation zu den einzelnen Datensätzen auflistet, u. a. zur geografischen Einordnung und Differenzierung der Art der meteorologischen Daten, im speziellen zur verwendeten Sensorik bei der Vereisungsbestimmung

(Eisdetektoren, Kamerabilder, Widerstandsmessung etc.). Um Beiträge aus sämtlichen Bereichen der Branche zu ermöglichen, ist die Angabe von Metainformationen, die zur Identifikation der spezifischen Messeinrichtung bzw. WKA dienen könnten, freiwillig. D. h. Datensätze können auch ohne entsprechende Angaben eingebracht werden, lediglich die Angaben zur Art der Messung und der verwendeten Sensorik sind zwingend erforderlich. Eine zumindest ungefähre (regionale) Angabe des Standorts wird allerdings dringend empfohlen, um den mit dieser Datenbank angestrebten Vergleich von Vereisungsereignissen in verschiedenen Weltregionen zu ermöglichen.

Folgende Metainformationen zu Art, Ursprung und Umfang der Datensätze werden im Verzeichnis abgebildet:

Provider	Freiwillige Angabe zum Bereitsteller des Datensatzes
Region	Regionale Verortung des Standorts der Messung, z. B. „Eastern Canada“
Location	Genaue Angabe zum Standort der Messung
Name of dataset	Name des Datensatzes
Altitude	Höhe über NN des Standorts der Messung
Number of events	Anzahl der einzelnen Vereisungsereignisse im Datensatz
Total duration	Gesamtdauer der Zeitreihendaten
Resolution of time series	Zeitliche Auflösung der Zeitreihendaten

Tab. 2: Metainformationen im Datenbankverzeichnis

Folgende Informationen zur verwendeten Sensorik und den Inhalten der Datensätze werden im Verzeichnis abgebildet:

Meteorological data relevant for icing	Vereisungsrelevante meteorologische Daten
Instrumental icing	Sensorik und Datenreihen zur instrumentellen Vereisung
Rotor Icing	Sensorik und Datenreihen zur Rotorblattvereisung
Turbine Data	Datenreihen zu WKA-Status und ggf. Leistungs- und Betriebsdaten
Additional information	Weitere Datenreihen zu meteorologischen oder betrieblichen Parametern
Comments	Zusätzliche Informationen zum Datensatz und seiner Nutzung

Tab. 3: Informationen zu den vereisungsrelevanten Datenreihen sowie zusätzliche Angaben im Datenbankverzeichnis

Zur Veranschaulichung der Inhalte einzelner Datensätze wurden die Datenreihen der Vereisungsereignisse teils in einer grafisch aggregierten Darstellung aufbereitet. Folgendes Beispiel zeigt einen Datensatz aus Deutschland:



Abb. 2: Grafisch aggregierte Darstellung der Zeitreihendaten eines beispielhaften Vereisungsereignisses aus Kanada

Hierbei handelt es sich um Daten eines meteorologischen Messgeräts, das den Luftdruck, den Gehalt an flüssigem Wasser in der Luft (Liquid Water Content, LWC), die Solareinstrahlung, die relative Feuchte, die Temperatur sowie die Windgeschwindigkeit erfasst. Hinzu kommt die aus im Datensatz vorhandenen Bildern abgeleitete Eisdicke.

2.2. Modellierung des Performance Envelopes

Die Modellierung des Performance Envelopes basiert auf der Lösung einer vereinfachten Wärmebilanzgleichung. Das Rotorblatt soll eisfrei gehalten werden, indem die Oberflächentemperatur durch die Heizleistung bei vorgegebener Umgebungstemperatur auf einen Wert oberhalb des Gefrierpunkts bzw. einen vorgegebenen Wert geheizt wird, um die Bildung von Eis durch Gefrieren von auftreffenden Wasserpartikeln zu verhindern.

Die vereinfachte Wärmebilanz wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$T_R - T_U = f(v_W, LWC, C_{WKA}) \times P_H$$

- mit T_R ... Oberflächentemperatur des Rotorblatts
 T_U ... Umgebungstemperatur
 v_W ... Windgeschwindigkeit
 LWC ... Liquid Water Content
 C_{WKA} ... Parameter der WKA und des Rotorblattheizungssystems
 P_H ... Heizleistung des Rotorblattheizungssystems

Der erste Schritt des Modells besteht darin, die Gleichungen eines thermischen Kreislaufs zu lösen, der die Erwärmung des Rotorblatts darstellt, wobei angenommen wird, dass die Oberflächentemperatur des

Rotorblatts entlang des Blatts konstant ist. Da das Rotorblatt im Trudelbetrieb oder entsprechend der Drehzahlkurve rotiert, variiert die relative Windgeschwindigkeit entlang des Blatts. Das Rotorblatt wird daher in Abschnitte unterteilt, für die die relative Windgeschwindigkeit pro Abschnitt berechnet wird. Für jeden Abschnitt wird auch ein Wärmeübergangskoeffizient berechnet, der u. a. den Einfluss des LWC abbildet. Daraus wird für jeden Abschnitt ein thermischer Widerstand berechnet. Unter Berücksichtigung der Heizleistung des Rotorblattheizungssystems werden die Gleichungen des thermischen Kreislaufs dann für die Differenz zwischen der vorgegebenen, als konstant angenommenen Oberflächentemperatur des Rotorblatts (0°C oder höher) und der Umgebungstemperatur gelöst. Die folgende Abbildung zeigt ein thermisches Ersatzschaltbild, das den Berechnungen des Modells entspricht.

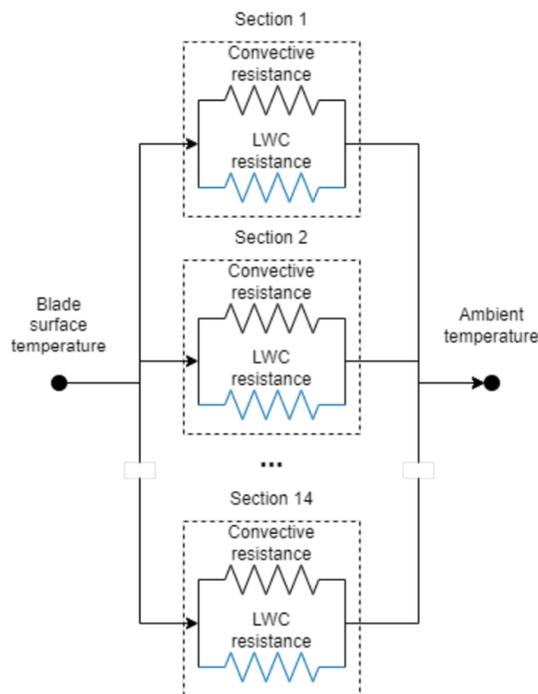


Abb. 3: Thermisches Ersatzschaltbild der Modellberechnung

Folgende Annahmen liegen der vereinfachten Berechnung zugrunde:

- Eine konstante Oberflächentemperatur entlang des Rotorblatts. Für die meisten Rotorblattheizungssysteme ist die Verteilung der Heizleistung entlang der Blattspanne konstant bzw. zumindest in wenigen festen Abschnitten jeweils konstant. Da die relative Windgeschwindigkeit für jeden Bereich des Blatts mit der Rotationsgeschwindigkeit des Rotors variiert, variiert auch die Oberflächentemperatur entsprechend entlang des Rotorblatts.
- Eine lineare Skalierung der Blattabmessungen. Die Geometrie eines Rotorblatts ist im Regelfall sehr komplex sodass die genaue Abbildung jedes Blatts im Modell nur mit großem Aufwand möglich wäre. Hinzu kommt, dass die Geometrien sich zum einen zwischen einzelnen Herstellern unterscheiden und zum anderen je nach Rotorblattlänge variieren können. Der Einfluss der genauen Geometrie auf die Modellierung kann hingegen als untergeordnet eingestuft werden, sodass für die Modellierung eine beispielhafte Blattgeometrie mit 50 m Länge zugrunde gelegt wurde, die für andere Blattlängen linear skaliert wird.

- Ein eisfreies Rotorblatt als Ausgangsbedingung. Eis kann eine isolierende Wirkung auf die innere Eisschicht und Grenzschicht zur Rotorblattoberfläche haben, was sich wiederum positiv auf den Schmelzprozess auswirken kann. Andererseits kann durch Eis die Oberflächenrauigkeit erhöht werden, was wiederum den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten erhöht und sich somit negativ auf den Schmelzprozess auswirken kann.
- Konstante Lufteigenschaften für eine Umgebungstemperatur von -5°C . Da die Modellberechnung auf Basis der Differenz zur Umgebungstemperatur stattfinden, müssen die Lufteigenschaften fixiert werden.
- Eine Wahrscheinlichkeit für das Anfrieren von Wassertropfen in der Luft bei Kollision mit der Rotorblattoberfläche von 1. In der Realität können sich Wassertropfen, die auf den sich drehenden Rotor treffen, nach kurzer Bewegung entlang der Oberfläche wieder ablösen, noch bevor ein Anfrieren stattfindet.

Folgende Parameter der WKA und des Rotorblattheizungssystems werden in die Modellierung mit einbezogen:

- Rotorblattlänge in Metern. Voreinstellung 50 m.
- De-Icing oder Anti-Icing. Die Einstellung legt fest, ob die WKA während des Heizvorgangs in Betrieb oder im Leerlauf ist und bestimmt dementsprechend die verwendete Drehzahl-Windgeschwindigkeitskurve. Voreinstellung Anti-Icing.
- Prozentualer Wärmeverlust in Prozent. Abhängig von der Ausgestaltung des Rotorblattheizungssystems und den verschiedenen eingesetzten Heiztechnologien wird ein Teil der Wärme über andere Oberflächen als den beheizten Teil der Vorderkante des Rotorblatts abgeführt. Voreinstellung 20%.
- Beheizter Anteil des Rotorblattumfangs ab dem Stagnationspunkt. Dabei wird angenommen, dass der beheizte Anteil auf der Ober- und Unterseite (Druck- und Saugseite) gleichmäßig verteilt ist. Voreinstellung 0,125.
- Heizleistung des Rotorblattheizungssystems in Kilowatt pro Blatt. Voreinstellung 25 kW.

Die Modellierung wurde in Form eines Python-Skripts programmiert, das in beliebiger Form eingebunden und angepasst werden kann. Die Ausgabe erfolgt als Grenzkurve in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur, die den sog. Performance Envelope darstellt. Zusätzlich wurde auch ein User Interface programmiert, das die manuelle Eingabe der Berechnungsparameter ermöglicht und auf Basis der Modellierung einen Plot des Performance Envelopes erstellt. Die folgende Grafik zeigt das User Interface sowie die Plots einiger Performance Envelopes anhand unterschiedlicher Parametrierung.

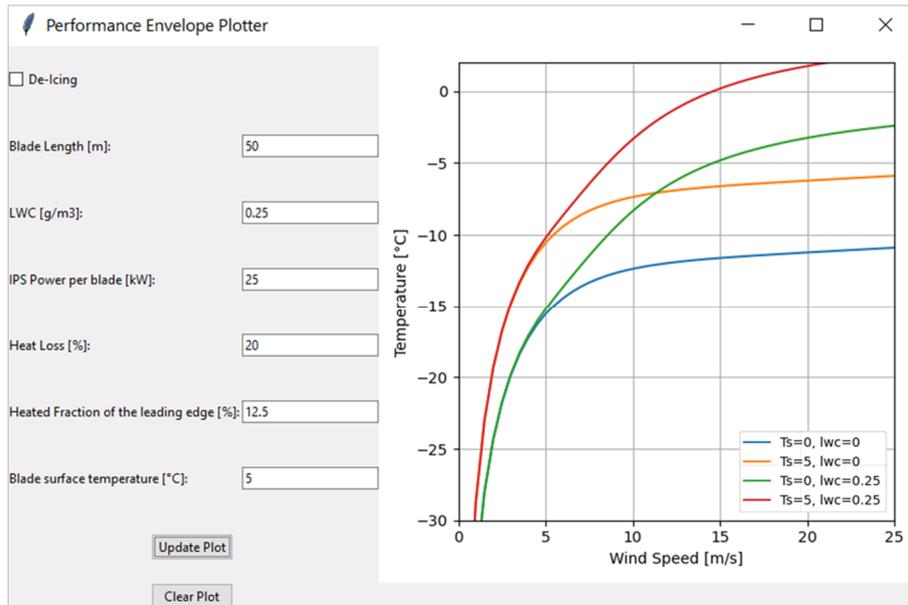


Abb. 4: User-Interface zur Modellierung des Performance Envelopes

2.3. Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Rotorblattheizungssystems kann die Steigerung des Stromertrags im Vergleich zu einer Anlage ohne ein solches System unter gleichen Bedingungen herangezogen werden. Eine solche Vergleichssituation ist allerdings zum einen nur selten verfügbar, zum anderen wird der Stromertrag einer WKA auch von vielen anderen (Steuerungs-)Systemen abseits der Rotorblattheizung beeinflusst, sodass ein solcher Vergleich allenfalls eine indirekte Aussage über die Leistungsfähigkeit des Rotorblattheizungssystems erlauben würde. Die Teilnehmer des Subtasks haben sich daher mit der Fragestellung beschäftigt, wie ein Prozess zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld definiert werden könnte, der zum einen einen möglichst direkten Rückschluss auf die Leistungsfähigkeit des Systems ermöglicht und zum anderen mit vertretbarem Aufwand innerhalb der Entwicklung und Umsetzung von Windenergieprojekten realisierbar ist. Die Erarbeitung dieses Prozesses fand im Zuge von vom Subtask veranstalteten Workshops im Programm der Winterwindkonferenzen 2023 und 2024 sowie durch das Zusammenbringen und Diskutieren von einschlägigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten einzelner Teilnehmerländer des Subtasks statt. Die Workshops waren dabei neben einer Vorstellung des jeweiligen aktuellen Arbeitsstands des Subtasks u. a. darauf fokussiert, in direktem Austausch mit den Teilnehmern aus der Windbranche die einzelnen Schritte des Prozesses zu diskutieren und Lösungsmöglichkeiten bzw. Alternativen bzgl. der Problemstellungen zu erörtern. In Einklang mit den Zielsetzungen der IEA Wind Forschungskoooperation wurde darauf aufbauend weiterer Forschungsbedarf identifiziert um den erarbeiteten Prozess selbst bzw. einzelne Teile davon zu validieren.

3. Ergebnisse

Die Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse und die Modellierung des Performance Envelopes wurden samt Dokumentation auf der Zenodo-Plattform des Task 54 veröffentlicht und sind dort für die interessierte Öffentlichkeit zur freien Verwendung verfügbar.

<https://zenodo.org/communities/coldclimatewind/>

Die Ergebnisse zum Prozess für Validierungen von Rotorblattheizungssystemen im Feld wurden in einem Vortrag auf der Winterwindkonferenz 2025 in Skellefteå präsentiert.

https://windren.se/WW2025/15_1_07_Wallenius_Blade_heating_system_performance_envelope_field_validation_-_practical_experiences_Pub_v1.pdf

3.1. Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse

Das Vereisungsgeschehen in unterschiedlichen Weltregionen variiert teils erheblich aufgrund der verschiedenen vorherrschenden klimatischen Bedingungen. Die IEA Ice Classification stellt eine erste Klassifizierung des Vereisungsgeschehens an einem Standort dar, die sich vor allem an den Zeiträumen meteorologischer bzw. instrumenteller Vereisung orientiert:

IEA Ice class	Meteorologische Vereisung	Instrumentelle Vereisung	Vereisungsverlust
	[% des Jahres]	[% des Jahres]	[% des jährlichen Bruttoertrags]
5	> 10	> 20	> 20
4	5...10	10...30	10...25
3	3...5	6...15	3...12
2	0,5...3	1...9	0,5...5
1	0...0,5	< 1,5	0...0,5

Tab. 4: IEA Ice Classification¹

Bereits bei dieser Klassifizierung zeigt sich, dass je nach Datengrundlage ein und derselbe Standort in zwei oder sogar drei verschiedene Vereisungsklassen eingeordnet werden kann. Die Betrachtung zweier Standorte gleicher Vereisungsklasse in unterschiedlichen Weltregionen kann darüber hinaus ergeben, dass trotz der gleichen Einordnung ein gänzlich unterschiedliches Vereisungsgeschehen auftritt, im speziellen wenn der zeitliche Verlauf und die Intensität einzelner Vereisungsereignisse betrachtet wird. Beide Perspektiven zeigen auf, dass zur Beurteilung des Vereisungsgeschehens standortspezifische bzw. zumindest mit den am Standort vorherrschenden klimatischen Bedingungen vergleichbare meteorologische Daten in entsprechender zeitlicher Auflösung vorliegen sollten. Diesem Ansatz folgend wurde die Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse aufgesetzt. Die Datensätze aus unterschiedlichen Weltregionen erlauben eine detaillierte Analyse des zeitlichen Verlaufs der Vereisungsereignisse und der Einflüsse der unterschiedlichen meteorologischen Parameter dabei.

¹ Quelle: <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/12/RP-13.2-Cold-Climates.pdf>

Der ISO Standard 12494:2017 *Atmospheric icing of structures* beschreibt u. a. die Eigenschaften und Entstehungsbedingungen unterschiedlicher Eistypen die bei der Vereisung von der Atmosphäre ausgesetzten Strukturen auftreten.

Eistyp	Dichte	Adhäsion / Kohäsion	Erscheinung	
	[kg/m ³]		Farbe	Form
Klareis	900	stark	transparent	gleichmäßig verteilt / Eiszapfen
Nassschnee	300...600	schwach (entstehend) stark (gefroren)	weiß	gleichmäßig verteilt / exzentrisch
Harter Reif	600...900	stark	opak	exzentrisch, dem Wind entgegen
Weicher Reif	200...600	schwach bis mittel	weiß	exzentrisch, dem Wind entgegen

Tab. 5: Typische Eigenschaften gewachsenen atmosphärischen Eises [Quelle: ISO 12494:2017]

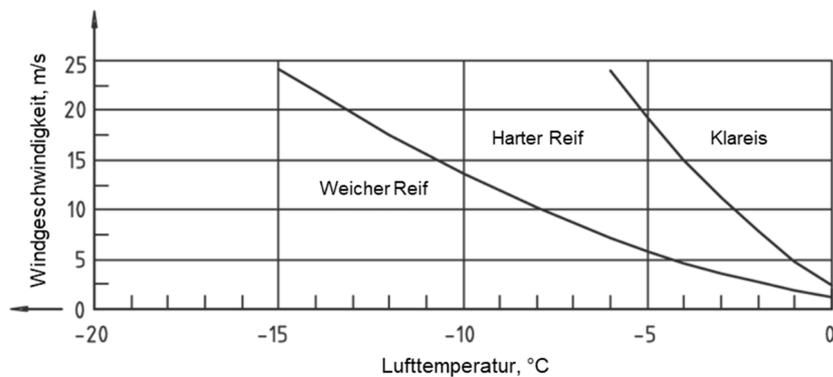


Abb. 5: Typ des gewachsenen Eises als Funktion der Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur. Die Kurven verlagern sich in Richtung niedrigerer Temperaturen bei ansteigendem LWC und geringerer Objektgröße. [Quelle: ISO 12494:2017]

Diese Eigenschaften und Bedingungen eignen sich sehr gut für die Analyse des zeitlichen Verlaufs und der Intensität der in den Datensätzen enthaltenen Vereisungsereignisse. Folgend einige Beispiele für unterschiedliche Eistypen und Entstehungsbedingungen anhand der Datensätze eines Standorts im Osten Kanadas:

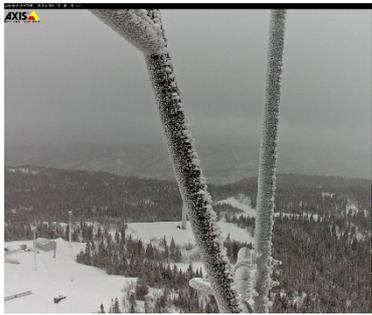
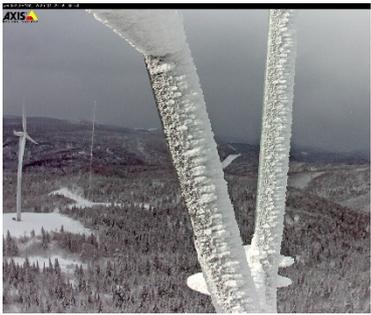
11.03.2020 08:20 Uhr	29.01.2020 09:30 Uhr	17.04.2019 09:20 Uhr
		
<p>Weicher Reif</p> <p>Temperatur: - 10,5°C</p> <p>Windgeschwindigkeit: ~ 6,5 m/s</p>	<p>Harter Reif</p> <p>Temperatur: - 11,5°C</p> <p>Windgeschwindigkeit: ~ 10,2 m/s</p>	<p>Klareis / harter Reif</p> <p>Temperatur: - 3,9°C</p> <p>Windgeschwindigkeit: ~ 9,6 m/s</p>

Abb. 6: Webcam-Aufnahmen aus den Datensätzen eines Standorts im Osten Kanadas mit unterschiedlichen Eistypen im zeitlichen Verlauf einzelner Vereisungsereignisse

Im linken Bild lässt sich eine dünne Schicht flockigen Eises erkennen, die gut zur Bildung von weichem Reif passt. Der Vergleich mit den Bedingungen zur Eisbildung in Abb. 5 ergibt, dass auch Temperatur und Windgeschwindigkeit der Bildung dieses Eistyps entsprechen. Beim mittleren Bild hingegen passen Temperatur und Windgeschwindigkeit auf den ersten Blick nicht zur Bildung des Eistyps. Jedoch ist für die Bildung von hartem Reif ein höherer LWC vonnöten, der die in Abb. 5 eingezeichneten Grenzkurven zwischen den Eistypen in Richtung niedrigerer Temperaturen verschiebt, sodass auch hier die Bedingungen zur Bildung des Eistyps passen. Der zu erkennende Wechsel im rechten Bild von Klareis unmittelbar an den Oberflächen der Strukturen hin zu hartem Reif deutet auf einen Wechsel der Vereisungsbedingungen im zeitlichen Verlauf des Vereisungsereignisses hin. Zum Aufnahmezeitpunkt des Bildes passen die Bedingungen zur Bildung von hartem Reif. In den Nacht- und frühen Morgenstunden zuvor waren die Temperaturen jedoch milder (- 1,7°C...- 3°C) während die Windgeschwindigkeit höher war (15...20 m/s), was gut zur anfänglichen Bildung von Klareis passt.

Ein weiteres Beispiel eines anderen Standorts im Osten Kanadas illustriert wiederum wechselnde Bedingungen während eines einzelnen Vereisungsereignisses, die zwischenzeitlich u. a. zu einem teilweisen Abwurf der Vereisung führen:

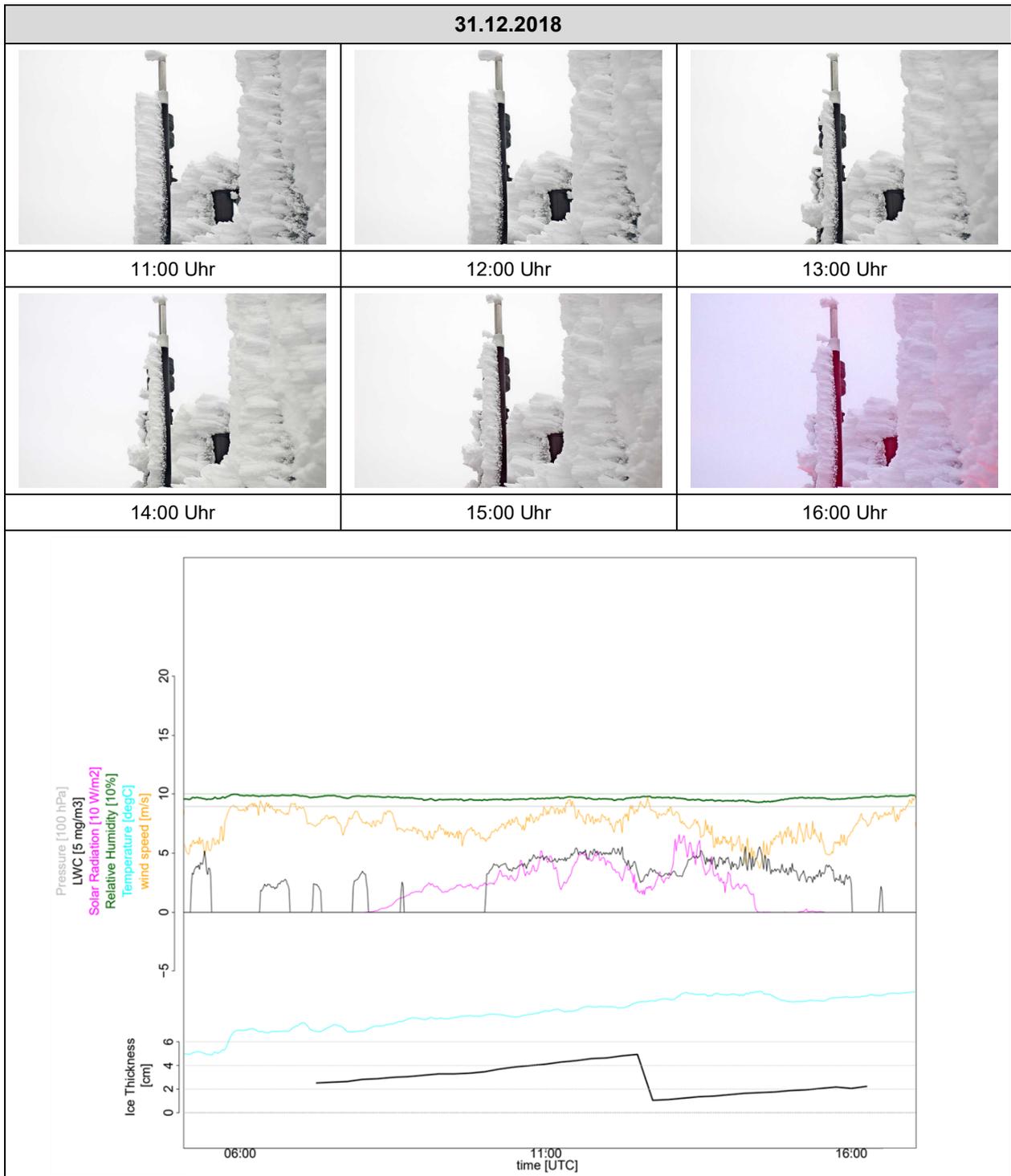


Abb. 7: Webcam-Aufnahmen und grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort im Osten Kanadas

Die Temperatur liegt im dargestellten Zeitbereich zwischen $-10 \dots -6^{\circ}\text{C}$, die Windgeschwindigkeit im Bereich von $5 \dots 10 \text{ m/s}$. Unter Einbezug des LWC sind damit die Bedingungen für die Bildung von hartem Reif gegeben, wie er in den Webcam-Aufnahmen zu erkennen ist. Aus der grafisch aggregierten Darstellung der Messdaten lässt sich ein kontinuierlicher Anstieg der Temperatur wie auch der Solareinstrahlung mit beginnendem Tageslicht erkennen. Aufgrund dessen kommt es zur Mittagszeit trotz der vorherrschenden Bedingung für das weitere Anwachsen von hartem Reif, wie vermutlich auch aufgrund

der mit dem Anwachsen zunehmenden strukturellen Instabilität des Reifs, zu einem signifikanten Eisabwurf.

Ein weiterer Datensatz eines Standorts in Deutschland illustriert den zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses hoher Intensität über die Dauer von gut zwei Tagen:

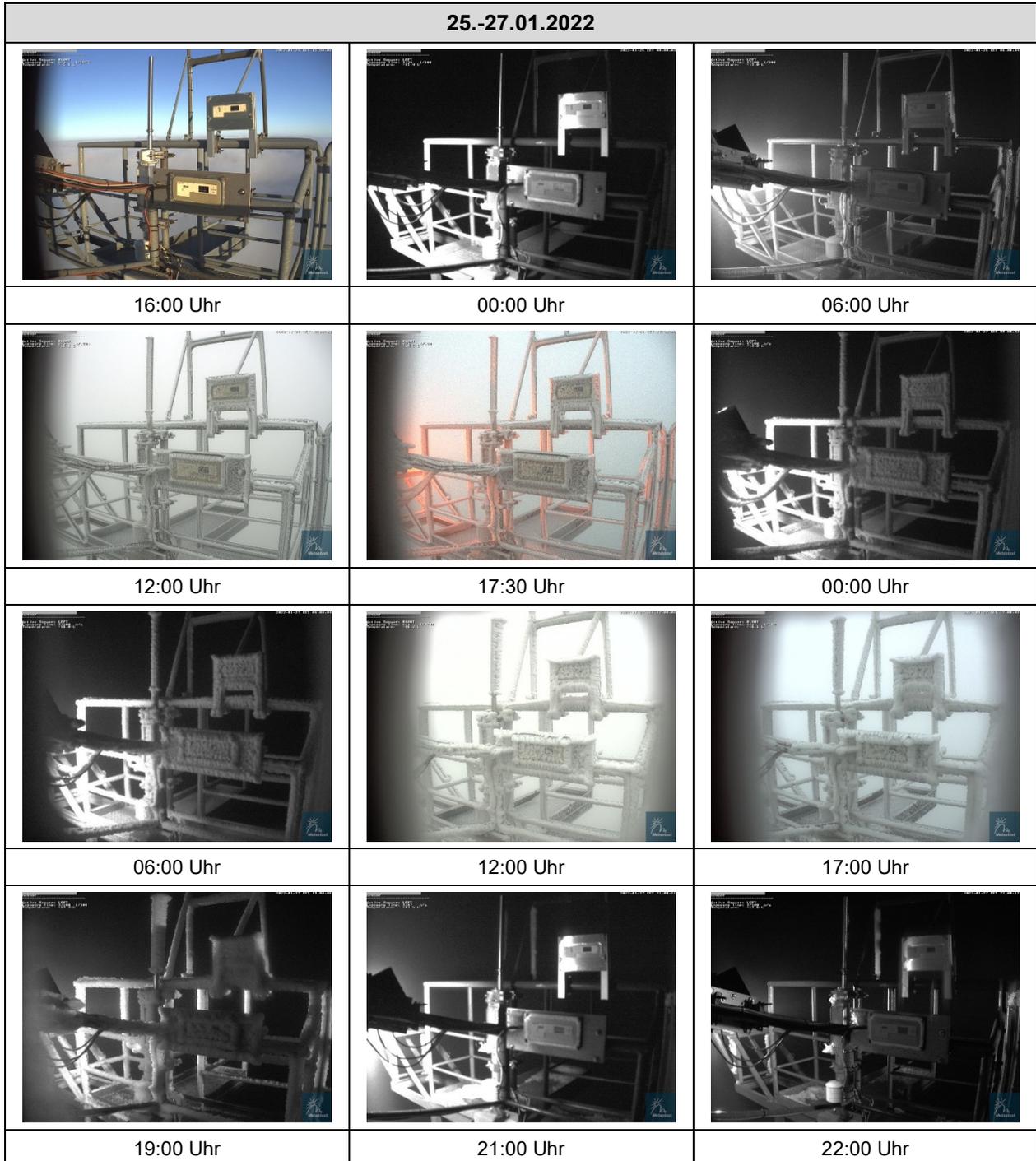




Abb. 8: Webcam-Aufnahmen und grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort in Deutschland

Zum Tageswechsel vom ersten auf den zweiten Tag fällt die Temperatur unter den Gefrierpunkt und die relative Luftfeuchtigkeit steigt auf 100%. Bei noch geringen Windgeschwindigkeiten zwischen 5...10 m/s setzt die Vereisung langsam ein, wie z. B. am Signal des „nacelle_sensor_2“ abzulesen ist. Am Turbinenstatus sowie an der nominellen Leistung lassen sich in der Folge Vereisungsverluste und Vereisungs- bzw. Heizstops erkennen. Anhand der Webcam-Aufnahmen im Laufe des zweiten Tages lässt sich die Bildung von hartem Reif erkennen, passend zu den Umgebungsbedingungen. Mit Auffrischen des Windes in den frühen Morgenstunden des dritten Tages auf Geschwindigkeiten von 10...20 m/s bei Temperaturen weiterhin um den Gefrierpunkt nimmt die Vereisungsintensität stark zu, wie sich am kontinuierlichen Wachstum der Eismasse (siehe Signal des „Combitech IceMonitor“) sowie an den Webcam-Aufnahmen erkennen lässt. Mit Ansteigen der Temperatur über den Gefrierpunkt zur Tagesmitte erreicht das Rotorblattheizungssystem eine ausreichende Eisfreiheit für den Wiederanlauf, was wiederum am Turbinenstatus und der nominellen Leistung zu erkennen ist. Zu dieser Zeit lässt sich an den Webcam-Aufnahmen der nicht-beheizten Aufbauten auf dem Dach des Maschinenhauses noch eine deutliche Vereisung erkennen, die laut Signal des „Combitech IceMonitor“ noch bis in die Abendstunden weiter anwächst. Der Eistyp hat dabei deutlich erkennbar zu Klareis gewechselt, wie aufgrund der höheren Temperatur und Windgeschwindigkeit zu erwarten. Erst mit weiter steigender Temperatur und leicht nachlassendem Wind taut die Vereisung in den späten Abendstunden vollständig ab.

3.2. Modellierung des Performance Envelopes

Die Modellierung des Performance Envelopes kann zum einen dafür genutzt werden, die Leistungsfähigkeit eines oder mehrerer vorgesehener Rotorblattheizungssysteme unter standortspezifischen Bedingungen zu bewerten. Die vom Modell ausgegebene Grenzkurve, der Performance Envelope, ist dabei mit vorhandenen Messdaten der vereisungsrelevanten meteorologischen Parameter des Standorts zu vergleichen. Folgendes Beispiel verdeutlicht dabei, anhand eines Datensatzes der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Datenbank zu einem Standort im Osten Kanadas, den Einfluss der unterschiedlichen Parameter:

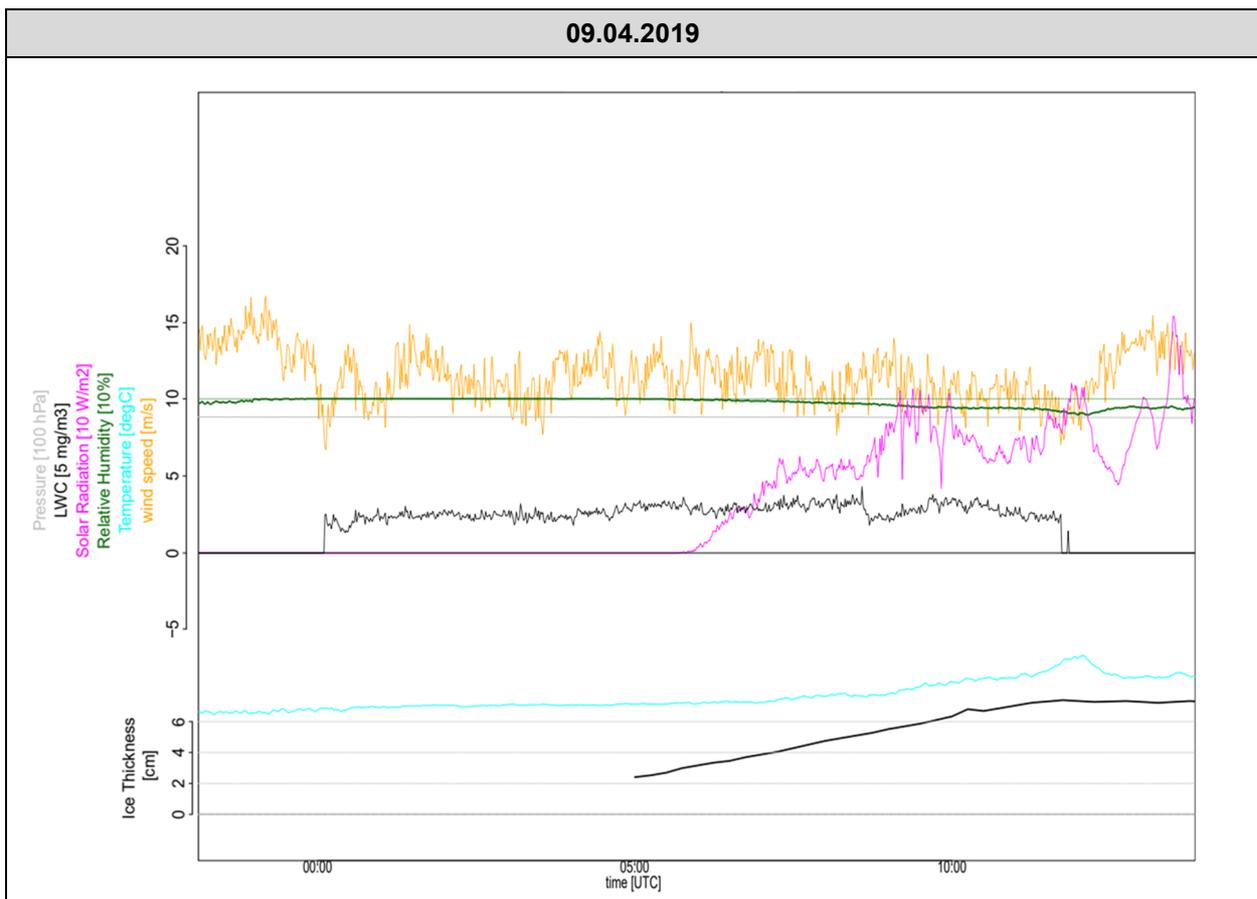


Abb. 9: Grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort im Osten Kanadas

Gegen ca. 00:00 Uhr steigt der LWC auf einen relevanten Wert von $> 0,1 \text{ g/m}^3$ bei einer Temperatur von ca. -10°C und einer Windgeschwindigkeit von $10 \dots 15 \text{ m/s}$. Anhand von Abb. 5 spricht dies für die Bildung von hartem Reif. Die aus zugehörigen Webcam-Aufnahmen abgeleitete Eisdicke lässt vermuten, dass die Vereisung zum Zeitpunkt des Anstiegs des LWC begonnen hat, da sie bei Einsetzen des Tageslichts bereits $> 2 \text{ cm}$ betrug. Die Eisdicke wächst im Laufe des Tages stetig bis auf über 6 cm an, bis zum Absinken des LWC auf 0.

Setzt man die Modellierung eines Rotorblattheizungssystems im Anti-Icing Modus zu einzelnen Messzeitpunkten des vorangegangenen beschriebenen Vereisungsereignisses in Vergleich, so lässt sich ablesen, ob sich die Umgebungsparameter zum jeweiligen Zeitpunkt inner- oder außerhalb des Performance Envelopes befinden. Innerhalb bedeutet dabei oberhalb der dargestellten Grenzkurve im Bereich niedrigerer Windgeschwindigkeiten bzw. höherer Temperaturen.

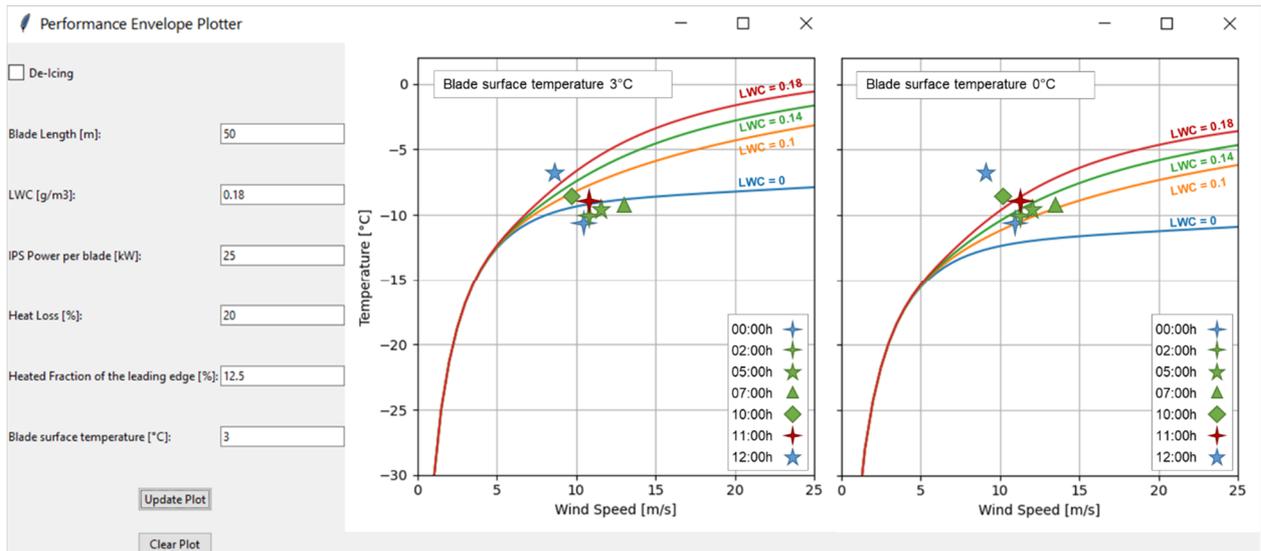


Abb. 10: Modellierung des Performance Envelopes für zwei Oberflächentemperaturen (3°C und 0°C) bei einer Heizleistung von 25 kW pro Rotorblatt sowie Messdaten von Temperatur, Windgeschwindigkeit und LWC

Bei den eingestellten Angaben zu Rotorblatt und Heizsystem sowie Parametrierung auf eine Oberflächentemperatur von 3°C liegen die Umgebungsbedingungen zu sämtlichen Zeitpunkten des Vereisungsereignisses außerhalb des Performance Envelopes. Erst nach Ende des Ereignisses um 12:00 Uhr liegen die Bedingungen wieder innerhalb des Performance Envelopes. Dies bedeutet, dass das modellierte System nicht in der Lage ist unter den Bedingungen des Vereisungsereignisses die Oberflächentemperatur des Rotorblatts konstant auf 3°C zu halten. Parametriert man die Oberflächentemperatur hingegen auf 0°C, so liegen die Bedingungen jeweils näher an der Grenzkurve des Performance Envelopes. Da bei einer zu haltenden Oberflächentemperatur von 0°C nicht gewährleistet ist, dass keinerlei Vereisung auftritt, kann insgesamt konstatiert werden, dass die eingestellte Heizleistung von 25 kW pro Rotorblatt in Bezug auf dieses Vereisungsereignis nicht ausreichend ist.

Erhöht man die Heizleistung auf 35 kW pro Rotorblatt, ergibt sich folgendes Bild:

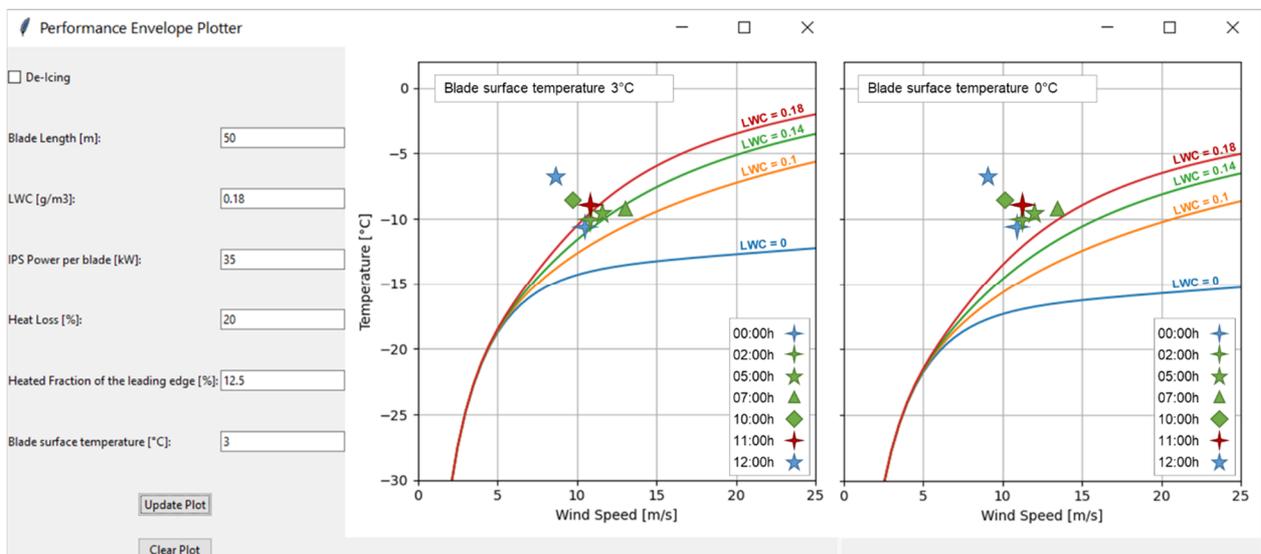


Abb. 11: Modellierung des Performance Envelopes für zwei Oberflächentemperaturen (3°C und 0°C) bei einer Heizleistung von 35 kW pro Rotorblatt sowie Messdaten von Temperatur, Windgeschwindigkeit und LWC

Bei Parametrierung auf 0°C Oberflächentemperatur liegen die Umgebungsbedingungen zu sämtlichen Zeitpunkten deutlich innerhalb des Performance Envelopes, bei 3°C Oberflächentemperatur liegen sie ebenfalls größtenteils innerhalb bzw. in Einzelfällen nahe an der Grenzkurve inner- bzw. außerhalb des Performance Envelopes. Für dieses Szenario kann also konstatiert werden, dass die eingestellte Heizleistung von 35 kW pro Rotorblatt in Bezug auf das Vereisungsereignis ausreichend sein sollte.

Eine Veränderung der weiteren Parameter des Rotorblatts bzw. des Heizsystems bewirkt ebenfalls mehr oder weniger große Veränderungen/Verschiebungen der Grenzkurve des Performance Envelopes. Es ist daher wichtig, bei der Bewertung verschiedener Systeme diese möglichst genau anhand der Parameter nachzubilden. Der Anlagenhersteller Nordex hat das Modell des Performance Envelopes mit Felddaten zur Oberflächentemperatur einer WKA mit dem eigens entwickelten Rotorblattheizungssystem im Anti-Icing Modus verglichen und die Ergebnisse im Zuge einer Präsentation bei der Winterwindkonferenz 2024 vorgestellt:

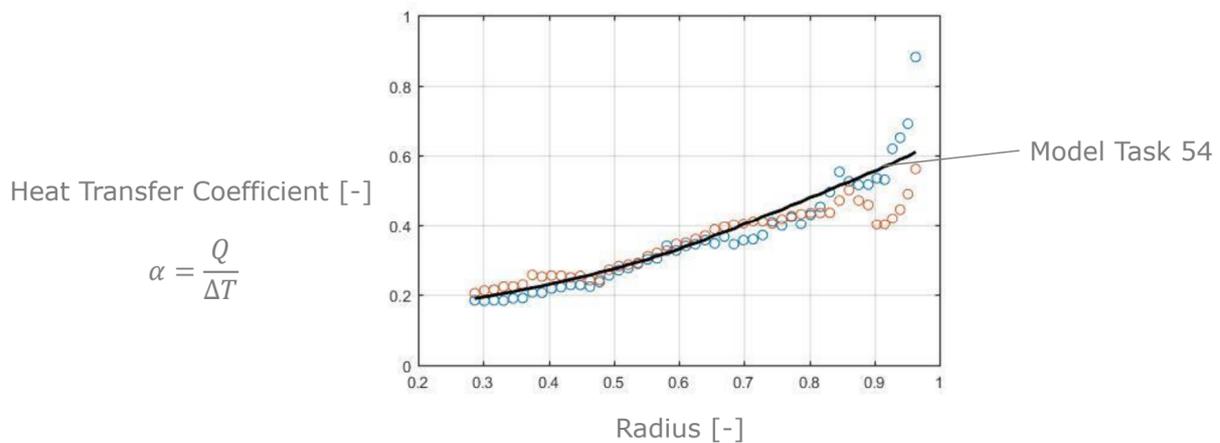


Abb. 12: Vom Hersteller Nordex durchgeführter Vergleich der aus Messdaten der Oberflächentemperatur errechneten Wärmeübergangskoeffizienten entlang des Rotorblatts mit der Vorhersage anhand der Modellierung des Performance Envelopes²

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, stimmt die Vorhersage des Modells gut mit den Messdaten überein. Aufgrund der notwendigen Vereinfachungen, die dem Modell zugrunde liegen, bedürfen die Ergebnisse der Modellierung dennoch einer entsprechenden Einordnung je nach Anwendungsfall.

3.3. Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld

Für viele Betreiber von Windkraftanlagen mit Rotorblattheizungssystemen stellt sich die Frage, wie die Leistungsfähigkeit des Systems bei Inbetriebnahme oder während des Betriebs validiert bzw. überprüft werden kann. Der Subtask zu Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen hat daher die Grundzüge eines Prozesses ausgearbeitet, der Messdaten zur Oberflächentemperatur der Rotorblätter unter verschiedenen Umgebungsbedingungen in einen Performance Envelope des Systems übersetzt, der dann wiederum mit Herstellerangaben oder Ergebnissen von Modellierungen verglichen werden kann.

² Quelle: https://windren.se/WW2024/04_2_12_Runge_Performance%20of%20ice%20protection%20systems_Pub_v1.pdf

Die Messung der Oberflächentemperatur kann auf unterschiedliche Weise stattfinden, u. a. mittels Wärmebild-Kameratechnik oder Temperatur-Sensoren direkt auf der Rotorblattoberfläche. Wärmebild-Kameras ermöglichen je nach Modell sehr gute Temperaturmessungen. Hier bedarf es einer Abwägung zwischen Messgenauigkeit und Kosten sowie technischem Aufwand für die Messung. Bei einfacheren Modellen reicht die Auflösung je nach Messbedingungen u. U. nicht aus für eine hinreichend genaue Temperaturerfassung aus der Ferne. Modelle mit höherer Auflösung sind mit teils erheblich höheren Kosten für Miete oder Anschaffung verbunden. Höchste Auflösungen werden darüber hinaus nur mit gekühlten Kameras erreicht, deren Einsatz wiederum zusätzlich zu den Kosten einen höheren technischen Aufwand für die Messung mit sich bringt.

Für den Validierungsprozess ist u. a. die Art der Messung der Oberflächentemperatur von entscheidender Bedeutung. Je nach Messgerät kann die Messung während des Anlagenbetriebs erfolgen, also bei sich drehendem Rotor, wie z. B. bei Einsatz bzw. Vorhandensein von Temperatursensoren direkt auf der Rotorblattoberfläche oder einer Drohnen-montierten Wärmebildkamera, die der Bewegung des Rotorblatts folgen kann. Boden-stationäre Wärmebildkameras erfordern dahingegen je nach Modell entweder ein ruhendes Aufnahmeobjekt oder mehrere unterschiedliche Aufnahmepositionen um zu starke Reflexionen in Abhängigkeit des Sichtwinkels zu vermeiden und die notwendigen Belichtungszeiten zu gewährleisten.

Zusätzlich zur Messung der Oberflächentemperatur werden die meteorologischen Daten der Umgebungsbedingungen benötigt, allen voran Temperatur und Windgeschwindigkeit, welche in der Regel den SCADA-Daten der betrachteten Anlage entnommen werden können. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, hat der LWC einen wesentlichen Einfluss auf Art und Intensität der Vereisung und damit auch auf die benötigte Energie zur Verhinderung von Vereisung. Bei Fehlen entsprechender Daten zum LWC müssen daher Modellierungen entwickelt werden, auf die für den Validierungsprozess zurückgegriffen werden kann.

Eine weitere wichtige Ausgangsbedingung für den Validierungsprozess hängt wiederum mit den Bedingungen während der Messungen zusammen. Besteht die Möglichkeit vollständige Messungen und Daten der Umgebungsbedingungen unmittelbar während repräsentativer Vereisungsereignisse aufzunehmen, so kann daraus direkt ein entsprechender Performance Envelope abgeleitet werden. Die Möglichkeit zur Durchführung solcher Messungen bestehen allerdings in den seltensten Fällen. Der Validierungsprozess beschreibt daher auch Möglichkeiten die Messungen in Zeiträumen ohne akute Vereisung durchzuführen. Für die Auswertung und Übersetzung in einen Performance Envelope müssen dann wiederum entsprechende Modellierungen entwickelt werden.

Folgendes Prozessdiagramm beschreibt den Validierungsprozess für verschiedene Ausgangsbedingungen:

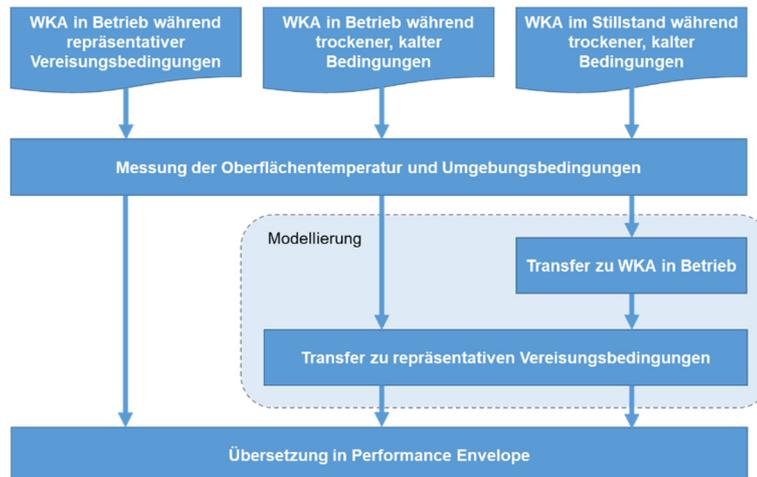


Abb. 13: Prozessdiagramm zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld

Für die Entwicklung der angesprochenen Modellierungen zum Transfer der Messergebnisse bei kalten, trockenen Bedingungen auf repräsentative Vereisungsbedingungen mit entsprechendem LWC und/oder vom Stillstand auf Drehzahlen entsprechend der Leistungskurve und repräsentativen Windbedingungen bedarf es weiterer Forschungsarbeit auf Ebene der Mitgliedsländer. In Bezug auf den Transfer zwischen trockenen Bedingungen hin zu einem höheren Gehalt an flüssigem Wasser in der Luft bieten sich entsprechende Vergleichsmessungen in Vereisungswindkanälen an, anhand derer die Modellierungen in dieser Hinsicht validiert werden können. Bezüglich der Übertragung vom Stillstand auf Betriebsbedingungen bedarf es Daten von WKA mit Rotorblattheizsystemen im Feld in entsprechenden Betriebszuständen, mit denen die Modellierungen abgeglichen werden können.

Als Ausgangspunkt für die Modellierungen kann in Bezug auf beide Fälle die in Kap. 2.2 und 3.2 beschriebene Modellierung des Performance Envelopes dienen. Für die Nutzung innerhalb des Validierungsprozesses ist es allerdings vonnöten, dass möglichst viele der angewendeten Vereinfachungen mit detaillierteren Parametrierungen und Berechnungen ersetzt werden. Dies bezieht sich sowohl auf die Spezifika des Rotorblattheizungssystems, als auch auf die einzelnen Faktoren der Wärmebilanzgleichung. Folgende Punkte stellen erste Ansätze für mögliche Verbesserungen der Methodik dar:

- Umstellung der Berechnung von einer konstanten Temperatur entlang des gesamten Rotorblatts auf eine repräsentative Temperaturverteilung entlang des Rotorblatts
- Variable Anpassung der Heizleistung für einzelne Rotorblattabschnitte
- Detaillierte Verlustbetrachtung des Heizsystems bzgl. abfließender Leistung abseits der beheizten Flächen
- Berücksichtigung der Eigenschaften verschiedener Eistypen in Bezug auf den Wärmetransfer, speziell im De-Icing Modus

4. Zusammenfassung und Fazit

Die Vereisung von Windkraftanlagen stellt eine große Herausforderung in kalten Klimazonen dar. Sie kann zu erheblichen Ertragsverlusten führen und das Sicherheitsrisiko erhöhen. Eine heutzutage bereits vielfach eingesetzte Lösung sind Rotorblattheizungssysteme, die die Vereisung durch gezielte Erwärmung von Teilen der Rotorblattoberfläche verhindern bzw. abtauen. Diese Systeme haben jedoch einen begrenzten Leistungsbereich, den sogenannten Performance Envelope, der durch die vorherrschenden Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. Ziel der Untersuchungen im Rahmen des Subtasks zum IEA Wind Task 54 war die Definition, Modellierung und Validierung des Performance Envelopes, um die Effizienz von Rotorblattheizungssystemen zukünftig besser bewerten zu können.

Die Arbeiten des Subtasks zur Untersuchung des Performance Envelopes waren in drei Bereiche unterteilt. Zum einen wurde eine Datenbank mit Zeitreihen beispielhafter Vereisungsereignisse erstellt, die meteorologische Daten sowie teils Betriebsparameter von WKA aus unterschiedlichen Weltregionen bereitstellt und eine detaillierte Analyse der jeweiligen Vereisungsbedingungen ermöglicht. Der Vergleich einzelner Ereignisse illustriert die große Varianz der Vereisungsbedingungen sowohl zwischen den verschiedenen Weltregionen, als auch zwischen einzelnen Ereignissen am gleichen Standort und sogar im Verlauf einzelner Ereignisse selbst. Die häufig angewandte IEA Icing Classification zur groben Unterscheidung von Standorten in Bezug auf die zu erwartende Vereisungsintensität anhand von Vereisungszeiträumen erweist sich in Bezug auf die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Rotorblattheizungssystemen als unzulänglich. Sowohl die verschiedenen vorherrschenden klimatischen Bedingungen der jeweiligen Weltregion, als auch die während eines einzelnen Ereignisses fortwährende Änderung einzelner meteorologischer Parameter, haben großen Einfluss auf die Art und Intensität der Vereisung sowie die benötigte Energie zur Verhinderung bzw. zum Abtauen der Vereisung. Zwei Standorte, die sich in dieselbe IEA Icing Class einsortieren lassen, können gänzlich unterschiedliche Vereisungsintensitäten aufweisen, insbesondere bei großen Unterschieden im typischerweise vorhandenen LWC bzw. dessen Entwicklung im Verlauf von Vereisungsereignissen.

Die zweite Methodik beruhte auf der computerbasierten Modellierung des Performance Envelopes eines Rotorblattheizungssystems anhand einer vereinfachten Wärmebilanzgleichung. Dabei werden sowohl Parameter zu den meteorologischen Umgebungsbedingungen, als auch zur Ausgestaltung des Heizsystems berücksichtigt, um den Bereich zu bestimmen, in dem das System effektiv arbeitet. Der Performance Envelope wird dabei als Grenzkurve von Temperatur und Windgeschwindigkeit definiert, die je nach eingestellten Parametern entsprechend variiert. Es zeigt sich u. a. eine starke Abhängigkeit vom LWC, der bei höheren Windgeschwindigkeiten zu einer teils deutlich reduzierten Leistung des Systems im Vergleich zu trockenen Bedingungen führen kann. Vom Hersteller Nordex durchgeführte Temperaturmessungen von beheizten Rotorblättern unter realen Betriebsbedingungen wurden bereits mit den Modellvorhersagen verglichen und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung bei entsprechend genauer Parametrierung des Modells.

Im dritten Bereich wurde im Austausch der Teilnehmer des Subtasks mit interessierten Experten aus der Windbranche ein Prozess zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld erarbeitet. Dieser soll eine unabhängige, standortspezifische Bewertung ermöglichen, die den Ertrags- und Verfügbarkeitsbasierten Aussagen der Hersteller gegenübergestellt werden kann. Der Prozess basiert auf der Messung der Oberflächentemperatur beheizter Rotorblätter und geht dabei auf verschiedene Ausgangsbedingungen ein, u. a. ob Messung im Stillstand oder während des Betriebs der WKA bzw. während repräsentativer Vereisungsbedingungen oder bei trockenen Umgebungsbedingungen erfolgt. Je nach Ausgangsbedingungen bedarf der Prozess unterschiedlicher Modellierungen zum Transfer der Messdaten

hin zu einem Performance Envelope, die in Zukunft zu entwickeln sind. U. a. zur Validierung dieser Modellierungen ist weitere Forschungsarbeit auf Ebene der Teilnehmerländer des Subtasks bzw. des Tasks notwendig.

Insgesamt haben die Untersuchungen des Subtasks gezeigt, dass eine systematische Analyse und Modellierung des Performance Envelopes notwendig ist, um die Leistungsfähigkeit von Rotorblattheizungssystemen zu bewerten. Die entwickelten Methoden und die Datenbank können als Basis für die Standardisierung von Bewertungskriterien dienen. Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, insbesondere zur Verbesserung der Modellpräzision und zur Berücksichtigung spezifischer Heiztechnologien und Betriebsmodi. Zukünftig könnte der Performance Envelope auch bei der Vorhersage des Ertrags von WKA unter Vereisungsbedingungen Anwendung finden. Hierzu ist allerdings zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit zum Einbezug der weiteren beteiligten Systeme, u. a. zur Eisdetektion und der allgemeinen Steuerung der WKA notwendig.

5. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1:	Grafisch aggregierte Darstellung der Zeitreihendaten eines beispielhaften Vereisungsereignisses aus Deutschland.....	8
Abb. 2:	Grafisch aggregierte Darstellung der Zeitreihendaten eines beispielhaften Vereisungsereignisses aus Kanada	9
Abb. 3:	Thermisches Ersatzschaltbild der Modellberechnung.....	10
Abb. 4:	User-Interface zur Modellierung des Performance Envelopes.....	12
Abb. 5:	Typ des gewachsenen Eises als Funktion der Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur. Die Kurven verlagern sich in Richtung niedrigerer Temperaturen bei ansteigendem LWC und geringerer Objektgröße. [Quelle: ISO 12494:2017].....	14
Abb. 6:	Webcam-Aufnahmen aus den Datensätzen eines Standorts im Osten Kanadas mit unterschiedlichen Eistypen im zeitlichen Verlauf einzelner Vereisungsereignisse	15
Abb. 7:	Webcam-Aufnahmen und grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort im Osten Kanadas	16
Abb. 8:	Webcam-Aufnahmen und grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort in Deutschland.....	18
Abb. 9:	Grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort im Osten Kanadas.....	19
Abb. 10:	Modellierung des Performance Envelopes für zwei Oberflächentemperaturen (3°C und 0°C) bei einer Heizleistung von 25 kW pro Rotorblatt sowie Messdaten von Temperatur, Windgeschwindigkeit und LWC	20
Abb. 11:	Modellierung des Performance Envelopes für zwei Oberflächentemperaturen (3°C und 0°C) bei einer Heizleistung von 35 kW pro Rotorblatt sowie Messdaten von Temperatur, Windgeschwindigkeit und LWC	20
Abb. 12:	Vom Hersteller Nordex durchgeführter Vergleich der aus Messdaten der Oberflächentemperatur errechneten Wärmeübergangskoeffizienten entlang des Rotorblatts mit der Vorhersage anhand der Modellierung des Performance Envelopes	21
Abb. 13:	Prozessdiagramm zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld	23
Tab. 1:	Am Subtask zu Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen teilnehmende Länder	6
Tab. 2:	Metainformationen im Datenbankverzeichnis	7
Tab. 3:	Informationen zu den vereisungsrelevanten Datenreihen sowie zusätzliche Angaben im Datenbankverzeichnis	7
Tab. 4:	IEA Ice Classification	13
Tab. 5:	Typische Eigenschaften gewachsenen atmosphärischen Eises [Quelle: ISO 12494:2017]	14