

IEA Wind Task 54 – Windenergie in kalten Klimazonen

Arbeitsperiode 2022 - 2025

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 63/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Kontakt zu „IEA Forschungsk Kooperation“: Mag.^a Sabine Mitter

Autorinnen und Autoren:

Dipl.-Ing. Andreas Krenn, MBA, Dipl.-Phys. Claas Rittinghaus, Dr. Alexander Stökl
(Energiewerkstatt Verein)

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Friedburg, März 2025

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
iii3@bmimi.gv.at.

Disclaimer:

Dieser Ergebnisbericht wurde von der Fördernehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die Fördernehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die Fördernehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die Fördernehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts im Rahmen der IEA Forschungsk Kooperation. Es wurde vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) initiiert, um österreichische Forschungsbeiträge zu den Kooperationsprojekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu unterstützen.

Die IEA Forschungsk Kooperationen umfassen eine breite Palette an Energiethemen mit dem Ziel Energiesysteme, Städte, Mobilitäts- und Industriesysteme fit für eine nachhaltige Zukunft bis 2050 zu machen. Auch Themen wie Gendergerechtigkeit oder Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsaspekte werden berücksichtigt.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch die vielen IEA-Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und neue internationale Standards. Auch in der Marktumsetzung konnten richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher werden alle Berichte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht.

Inhalt

1 Kurzfassung	8
2 Abstract	10
3 Ausgangslage.....	12
4 Projektinhalt	15
5 Ergebnisse	17
5.1 Allgemeine Ergebnisse aus dem Task 54	17
5.2 Forschungsschwerpunkt „Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen“	18
5.2.1 Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse	19
5.2.2 Modellierung des Performance Envelopes	22
5.2.3 Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld	26
5.3 Forschungsschwerpunkt „Transferfunktion Anemometer- und Windkraftanlagen-Vereisung“	29
5.3.1 Vereisungsverhalten von Schalenanemometern	30
5.3.2 Vergleich Anemometer- und WKA-Vereisung.....	33
5.3.3 Statistische Auswertung.....	36
6 Vernetzung und Ergebnistransfer	39
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....	41
Tabellenverzeichnis	43
Abbildungsverzeichnis	43
Literaturverzeichnis.....	44
Abkürzungen.....	45

1 Kurzfassung

Der European Green Deal der Europäischen Kommission zur Bekämpfung des Klimawandels und Erreichung der Klimaneutralität erfordert einen massiven Ausbau der erneuerbaren Energien in allen Mitgliedsstaaten. Auch weltweit werden die Klimaziele ambitionierter und damit verbunden die Ausbauziele für die Windenergie. In vielen Staaten mit ausgeprägtem Winterklima bedeutet dies die Planung und den Betrieb von Windkraftanlagen (WKA) an Standorten mit erheblichem Vereisungspotenzial.

Etwa 15% der derzeitigen Anlagenstandorte in Österreich können als sogenannte "Cold Climate" Standorte mit häufiger und intensiver Vereisung eingestuft werden. Hier stellt die Vereisung eine große Herausforderung sowohl während der Projektierung als auch während des Betriebs der Anlagen dar. Selbst an Standorten in jenen Regionen Ost-Österreichs, in denen heute ein Großteil der österreichischen WKA in Betrieb ist, treten mehrmals pro Jahr Vereisungsereignisse auf. Das beträchtlich erhöhte Ausbauziel des Erneuerbaren Ausbau Gesetzes für die Windenergie von 10 TWh bis 2030 führt dazu, dass ein erheblicher Teil des Ausbaus auch an Standorten im alpinen und semialpinen Gelände mit einerseits großem Windpotenzial, aber andererseits auch erhöhtem Vereisungsrisiko stattfinden wird. Die Untersuchung von Technologien und Strategien zum sicheren und effizienten Umgang mit Vereisung hat daher nicht zuletzt eine hohe Priorität im Zuge des weiteren Ausbaus der Windenergie auch für Österreich.

Der Task 54 des IEA Wind TCP (ehemals Task 19) setzt sich seit mehr als 20 Jahren mit den vielfältigen Herausforderungen der Planung und des Betriebs von WKA unter Vereisungsbedingungen auseinander. Das primäre Ziel dieser internationalen Forschungskooperation ist die Sammlung und das Generieren neuer Erkenntnisse durch wechselseitigen Erfahrungsaustausch sowie globale Vernetzung. Die Energiewerkstatt fungierte hierbei als nationale Schnittstelle zu den IEA-Aktivitäten im Task 54, um für einen reibungslosen Knowhow-Transfer der internationalen Expertise nach Österreich zu sorgen. Dieser Bericht behandelt die Ergebnisse und die Teilnahme der Energiewerkstatt in der ersten Periode des Task 54. Im Zuge dessen wurden von der Energiewerkstatt die folgenden zwei Forschungsschwerpunkte bearbeitet und in die Kooperation eingebracht:

(1) In Bezug auf die Kernkomponente beim Betrieb heutiger WKA unter Vereisungsbedingungen übernahm die Energiewerkstatt die Leitung eines Subtasks, der sich mit dem Performance Envelope von Rotorblattheizungssystemen auseinandersetzte. Im Mittelpunkt der Arbeiten stand dabei die Entwicklung einer Modellierung des Performance Envelopes unter Berücksichtigung der Rotorblattdimensionen, der Heizleistung des Rotorblattheizungssystems und den meteorologischen Umgebungsbedingungen in Form von Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit sowie dem Wassergehalt der Luft (Liquid Water Content, LWC). Das Modell berechnet eine Grenzkurve bis zu derer die Heizleistung ausreicht, um die beheizte Fläche des Rotorblatts auf eine konstante Tem-

peratur zu erwärmen, z. B. 0°C. Diese Grenzkurve stellt den sog. Performance Envelope des Rotorblattheizungssystems 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 regionalen 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 Infrarotkamera-basierten 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, die es zukünftig ermöglicht, die eingesetzten Systeme unterschiedlicher Hersteller in den verschiedenen Phasen der Projektentwicklung und des Betriebs besser bewerten und vergleichen zu können.

(2) Die Energiewerkstatt erarbeitete des Weiteren eine Transferfunktion zur Übertragung der standortspezifischen instrumentellen Vereisungsdauer auf potentielle Vereisungszeiträume einer räumlich nahegelegenen WKA. Für eine Auswahl an Standorten, für die zeitgleiche Zeitreihen von Betriebsdaten unbeheizter WKA und Messdaten von unbeheizten 1st-Class-Anemometern vorlagen, wurden die Windmessdaten sowie die WKA-Betriebsdaten hinsichtlich der aus ihnen jeweils ableitbaren Vereisungszeiträume evaluiert. Für die Korrelation, Gegenüberstellung und statistische Auswertung in Hinblick auf eine mögliche Transferfunktion zwischen Anemometer- und WKA-Vereisung wurde u. a. ein logistisches Regressionsmodell zur qualitativen Bewertung der identifizierten Zusammenhänge genutzt. Die Ergebnisse belegen, dass eine direkte Anwendung der ermittelten Verhältniszahlen auf einzelnen Vereisungsperioden und auf spezifische Anlagen nicht möglich ist. Das statistische Gesamtergebnis ist jedoch von großer Relevanz, da es die bisher gängig in der Praxis verwendete und intuitive Annahme, dass die Vereisungszeiträume der Rotoren einer WKA ohne Rotorblattheizung in einer ähnlichen Größenordnung, wie die der instrumentellen Vereisung einer nahegelegenen Windmessung mit Schalenanemometer liegen, bestätigt.

2 Abstract

The European Commission's European Green Deal to combat climate change and achieve climate neutrality requires a massive expansion of renewable energies in all member states. Climate targets are also becoming more ambitious worldwide, and with them the expansion targets for wind energy. In many countries with a pronounced winter climate, this means planning and operating wind turbines at locations with considerable icing potential.

Around 15% of current turbine locations in Austria can be classified as so-called “cold climate” locations with frequent and intensive icing. Here, icing poses a major challenge both during project planning and during operation of the systems. Even at locations in those regions of eastern Austria where the majority of Austrian wind turbines are currently in operation, icing events occur several times a year. The considerably increased expansion target of 10 TWh for wind energy by 2030 under the Renewable Energy Expansion Act means that a significant part of the expansion will also take place at locations in alpine and semi-alpine terrain with high wind potential on the one hand, but also an increased risk of icing on the other. The investigation of technologies and strategies for the safe and efficient handling of icing is therefore also a high priority for Austria in the course of the further expansion of wind energy.

For more than 20 years, Task 54 of the IEA Wind TCP (formerly Task 19) has been dealing with the many challenges of planning and operating wind turbines under icing conditions. The primary goal of this international research cooperation is to collect and generate new knowledge through the mutual exchange of experience and global networking. Energiewerkstatt acted as a national interface to the IEA activities in Task 54 in order to ensure a smooth transfer of international expertise to Austria. This report deals with the results and participation of Energiewerkstatt in the first period of Task 54. In the course of this, Energiewerkstatt worked on the following two research priorities and contributed to the cooperation:

(1) With regard to the core component in the operation of today's wind turbines under icing conditions, Energiewerkstatt took over the management of a subtask that dealt with the performance envelope of rotor blade heating systems. The work focused on developing a model of the performance envelope, taking into account the rotor blade dimensions, the heat output of the rotor blade heating system and the meteorological ambient conditions in the form of ambient temperature, wind speed and the water content of the air (liquid water content, LWC). The model calculates a limit curve up to which the heating power is sufficient to heat the heated surface of the rotor blade to a constant temperature, e.g. 0°C. This limit curve represents the so-called performance envelope of the rotor blade heating system. In addition to this, a database was created that contains exemplary time series of icing events from different regions of the world, which in turn can be fed into the model. This allows the regional differences in icing events as well as the resulting performance of rotor blade heating systems in specific regions to be represented. Secondly, a

methodology for the validation of rotor blade heating systems was developed, enabling the demonstration of the performance of the system in the field using infrared camera-based temperature measurements of the blade surface in combination with the model of the performance envelope. The aim of the tools and processes developed is to promote standardization, which in future will make it possible to better evaluate and compare the systems developed by different manufacturers in the various phases of project development and operation.

(2) Energiewerkstatt furthermore developed a transfer function for transferring the site-specific instrumental icing duration to potential icing periods of a nearby wind turbine. For a selection of locations for which simultaneous time series of operating data from unheated wind turbines and measurement data from unheated 1st-class anemometers were available, the wind measurement data and the wind turbine operating data were evaluated with regard to the icing periods that could be derived from them. For the correlation, comparison and statistical evaluation with regard to a possible transfer function between anemometer and wind turbine icing, a logistic regression model was used for the qualitative evaluation of the identified correlations. The results show that a direct application of the determined ratios to individual icing periods and to specific turbines is not possible. However, the overall statistical result is of great relevance, as it confirms the intuitive assumption commonly used in practice to date that the icing periods of the rotors of a wind turbine without rotor blade heating are of a similar order of magnitude to those of the instrumental icing of a nearby wind measurement with cup anemometer.

3 Ausgangslage

Das Technologiekollaborationsprogramm (TCP) der IEA Wind wurde im Jahr 1977 mit dem Ziel gegründet, die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Windenergieforschung zu stimulieren sowie den Mitgliedsstaaten und der Industrie hochwertige Informationen und Analysen zur Verfügung zu stellen. Dahingehend werden unter den Partner:innen des IEA Wind TCP wechselseitig Informationen zur Planung und Durchführung von nationalen Windenergieprojekten ausgetauscht sowie kooperative Forschungs- und Entwicklungsprojekte (sog. Tasks) durchgeführt. Jeder dieser Tasks wird von einer Operating-Agent-Organisation aus den Mitgliedsstaaten gemanagt. Nur die Vertragspartner:innen jener Länder, die an den Ergebnissen der Tasks interessiert sind, entscheiden sich zu einer Teilnahme und inhaltlichen Mitarbeit. Die technischen Ergebnisse der Tasks werden unter diesen Mitgliedsstaaten verbreitet. Aktuell sind im IEA Wind TCP Teilnehmende aus 21 Nationen vertreten sowie dem Chinesischen Windenergieverband, dem europäischen Windenergieverband und der Europäischen Kommission. Diese Partner:innen bilden ein globales Netzwerk aus Forschenden und Policy-Expert:innen, die sich auf den Knowhow-Transfer aus der aktuellen Technologieforschung und der praktischen Anwendung fokussieren, um die Hemmnisse des Windenergieausbaues zu überwinden. Im Jahr 2020 fielen etwa 85 % der weltweiten Windenergiekapazität - und fast die gesamte Offshore-Kapazität - auf die teilnehmenden Länder zurück. (IEA Wind TCP, 2025)

Weltweit wird eine stetig wachsende Anzahl von Windenergieanlagen an Standorten installiert, bei denen aufgrund der meteorologischen Voraussetzungen Vereisungsereignisse und sehr niedrige Temperaturen auftreten. Diese Einflüsse stellen große Herausforderungen sowohl während der Erhebung der Standortqualität als auch während des Betriebs der Anlagen dar. Dennoch ist das Interesse an Windenergie in diesen Klimazonen über die letzten Jahre stark angestiegen, zum einen da die Ausbaupkapazitäten in anderen Regionen teils bereits ausgeschöpft sind und zum anderen da die Akzeptanz in diesen Regionen sinkt bzw. zu sinken droht, aufgrund des Kontrasts zwischen immer geringer werdenden Abständen zu besiedeltem Gebiet und immer größer werdenden Anlagen. In Österreich soll laut Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz und integriertem österreichischen Netzinfrasturkturplan (ÖNIP) (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024) bis zum Ende des laufenden Jahrzehnts eine Erzeugungskapazität in der Größenordnung von 17 bis 21 TWh/a durch Windenergie abgedeckt werden. Ein nicht unerheblicher Teil dieses Ausbaus wird auf Regionen fallen, in denen ein relevantes Vereisungsgeschehen in den Wintermonaten auftritt, wie z. B. den alpinen und subalpinen Gebieten in der Steiermark und Kärnten, in denen zusammengekommen laut ÖNIP bis 2030 Erzeugungskapazität für knapp 4 TWh/a errichtet sein soll. Es ist daher von großer Bedeutung, auch in diesen Regionen einen sicheren und effizienten Betrieb von Windkraftanlagen zu gewährleisten und die dafür notwendigen Technologien, Prozesse und Standards zu entwickeln bzw. zu optimieren.

Der Task 54 des IEA Wind TCP (mit dem englischen Titel „Cold Climate Wind Power“) – vormals Task 19 – wurde im Jahr 2002 mit dem Ziel gegründet, sich mit den oben erwähnten Herausforderungen der Windenergienutzung unter Vereisungsbedingungen und sehr niedrigen Temperaturen zu befassen, Best-Practice Beispiele zu sammeln und darauf aufbauend Empfehlungen für die Industrie zu erarbeiten. Die Aktivitäten fokussieren sich auf Fragestellungen in Zusammenhang mit der Anwendung von speziellen „Cold Climate“-Technologien und Dienstleistungen, die für diese Standorte entwickelt wurden. Im Fokus standen in der vergangenen Arbeitsperiode u. a. Rotorblattheizungen als Technologie, die inzwischen an den meisten vereisungsgefährdeten Standorten zum Einsatz kommt, sowie Vereisungswindtunnel als wichtige Technologie zur Bewerkstellung der praktischen Forschungs- und Entwicklungsarbeit im „Cold Climate“-Bereich.

Das Hauptaugenmerk der österreichischen Beteiligung lag auf der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Rotorblattheizungssystemen in den unterschiedlichen Phasen der Projektentwicklung von Windenergieprojekten. Bei der Planung solcher Projekte an Standorten mit signifikanter Vereisungsgefährdung ist es bereits in einem frühen Stadium wichtig, das potentielle Vereisungsgeschehen abzuschätzen und ein etwaiges Rotorblattheizungssystem sowie dessen Leistungsfähigkeit in der Planung zu berücksichtigen. Im Zuge der Errichtung und des Betriebs ist es wiederum wichtig, die Funktion und Leistungsfähigkeit des verbauten Systems zu überprüfen bzw. zu validieren. Zu diesen Zwecken sollte im von der Energiewerkstatt geleiteten Subtask „Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen“ ein Modell entwickelt werden, dass anhand meteorologischer und systemtechnischer Parameter einen Bereich definiert, in dem das System effizient Vereisung verhindern bzw. abtauen kann, der sog. „Performance Envelope“. Ein solches Modell kann zum einen für die Vorhersage und den Vergleich der standortspezifischen Leistungsfähigkeit einzelner Systeme genutzt werden und zum anderen für die Extrapolation von Messdaten der Oberflächentemperatur des Rotorblatts bei aktivem Betrieb eines verbauten Systems unter gegebenen meteorologischen Bedingungen auf die gesamte standortspezifische Bandbreite. Letzteres sollte ein Baustein für die Standardisierung einer Methodik zur Validierung der Leistungsfähigkeit von Rotorblattheizungssystemen im Feld sein. Darüber hinaus wurde die Anlage einer Datenbank mit beispielhaften Zeitreihen vereisungsmeteorologischer Parameter aus verschiedenen Regionen der Welt angestrebt um einem Mangel an öffentlich verfügbaren Daten in diese Bereiche entgegenzuwirken. Für die Schwere der Vereisung wie auch für die Verhinderung von Eisansatz bzw. dessen Abtauen ist der zeitliche Verlauf des jeweiligen Vereisungsereignisses von maßgeblicher Bedeutung. Die beispielhaften Zeitreihen ermöglichen es zusammen mit dem Modell des Performance Envelopes darüber hinaus einfache Vorhersagen zur Leistungsfähigkeit bzw. der notwendigen Leistung eines Rotorblattheizungssystems an Standorten mit vergleichbaren Vereisungsbedingungen zu treffen.

Ein weiterer Fokus der spezifisch österreichischen Projektarbeit lag auf der Untersuchung einer Transferfunktion zur Übertragbarkeit der Vereisungshäufigkeit und -dauer an einem unbeheizten 1st-Class-Schalensternanemometer auf eine unbeheizte WKA anhand der zeitgleichen Mess- bzw. Betriebsdaten von zueinander nahegelegenen Windmessungen und WKA an relevanten Standorten. Zur Erstellung von Ertragsgutachten im Zuge der Projektierung von Windparks sind mindestens

einjährige Windmessungen am jeweiligen Projektstandort vonnöten. Die Detektion instrumenteller Vereisung an hierbei eingesetzten unbeheizten Schalensternanemometern erlaubt einen Rückschluss auf das standortspezifische Vereisungsgeschehen. Dem aktuellen Stand der Technik entspricht es von einer statistischen Vergleichbarkeit zwischen Vereisung des Anemometers und der geplanten WKA auszugehen. Diese gängige Praxis sollte durch die Untersuchungen zu einer Transfer-Funktion bestätigt und ggf. verbessert werden.

4 Projekthalt

Der Task 54 des IEA Wind TCP (mit dem englischen Titel „Cold Climate Wind Power“) – vormals Task 19 – wurde 2002 eingerichtet und hat seitdem sieben erfolgreiche Perioden mit jeweils 3 Jahren durchlaufen. In dieser Periode (erste des Task 54) haben sich neun Nationen am Task 54 beteiligt, der Operating Agent wurde von Finnland gestellt. Eine Zusammenstellung der teilnehmenden Nationen sowie deren Vertretungen im Task 54 findet sich in folgender Tabelle.

Tab. 1: Teilnehmende Nationen in der ersten Periode des Task 54.

Nation	Vertreten durch	Beschreibung
Dänemark	DTU, Technical University of Denmark	Technische Universität und weltweit eines der größten Institute im Bereich der Windenergie
Deutschland	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung	Eine der größten Europäischen Forschungseinrichtungen im Bereich der Materialforschung, u. a. bzgl. Oberflächenbearbeitung und -beschichtungen
Finnland (Operating Agent)	VTT Technical Research Centre of Finland	Großes Forschungsinstitut das an einem breiten Spektrum angewandter technischer Forschungsthemen arbeitet
Japan	NEDO, New Energy and Industrial Technology Development Organization Komaihaltec	Nationale Agentur für Forschung und Entwicklung Hersteller von Kleinwindkraftanlagen
Kanada	Nergica	Zentrum für angewandte Forschung im Bereich der erneuerbaren Energien
Norwegen	Kjeller Vindteknikk	Unternehmen für Windmessung und -auswertung
Österreich	Energiewerkstatt	Technisches Büro für erneuerbare Energie
Schweden	WindREN Vattenfall	Windenergie Beratungsunternehmen Großes internationales Energieversorgungsunternehmen
Schweiz	Meteotest	Anbieter von Dienstleistungen zu Wetter, Klima, Umwelt und Informatik

Der Schwerpunkt der Tätigkeiten im Task 54 lag in seiner ersten Periode auf einer Fortführung der Anstrengungen hin zu einer Standardisierung von „Cold Climate“-Themen. Dieser Schwerpunkt geht dabei ursprünglich auf eine Umfrage bei der Winterwind Konferenz 2015 zurück, die den Mangel an Empfehlungen, Richtlinien und Normen als eine der größten Herausforderungen und Hindernisse bei der Umsetzung von Windenergieprojekten an Standorten in kalten Klimazonen identifizierte. Bereits die letzten Arbeitsperioden des Task 19 widmeten sich daher verstärkt diesem Themenfeld.

Nachdem es dabei zuletzt vermehrt um die Standardisierung von Prozessen ging, standen in dieser Periode technologische Aspekte vermehrt im Vordergrund. Zum einen in Form des von der Energiewerkstatt geleiteten Subtask zu „Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen“ in dessen Zuge u. a. eine Modellierung des Performance Envelopes und ein Prozess zur Validierung der Leistungsfähigkeit von Rotorblattheizungssystemen im Feld erarbeitet wurden. Zum anderen in Form von Vergleichsuntersuchungen in verschiedenen Vereisungswindkanälen mit dem Ziel, trotz unterschiedlicher Bauweisen und Einstellungsparameter der Kanäle zu einheitlichen Vereisungsbedingungen für Experimente zu gelangen. Darüber hinaus wurde in Bezug auf die Vereisung von Rotorblättern ein Software-Tool entwickelt, das die Simulation von Eisfall und -wurf unter Berücksichtigung der Anlagendimensionen und Windbedingungen ermöglicht und dessen Ergebnisse unter anderem für eine standardisierte Risikoanalyse des Weiterbetriebs bei Vereisung dienen können.

Weitere Aspekte, die vom Task bearbeitet wurden, waren die Auswirkungen der Nutzung von Windenergie unter Vereisungsbedingungen auf den Elektrizitätsmarkt sowie der Einfluss von Vereisung auf die Geräuschemissionen von Windkraftanlagen.

5 Ergebnisse

5.1 Allgemeine Ergebnisse aus dem Task 54

In der ersten Periode des IEA Wind Task 54 (2022 bis 2025), der die Aktivitäten des ehemaligen Task 19 fortführt, ist die internationale Bedeutung des Tasks weiterhin sehr hoch. Dies zeigt sich u. a. durch die Vielzahl an Präsentationen und Aktivitäten im Zuge weltweit renommierter Konferenzen und Veranstaltungen. Die wichtigsten Meilensteine und Ereignisse während dieser Periode waren:

- Veranstaltung eines Disseminations-Workshops gemeinsam mit den Tasks 32, 36 und 41 im Zuge der *IGW Branchenplattform* im Oktober 2022
- Durchführung eines Workshops im Zuge der *Winterwind Konferenz 2023* zum Subtask *Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen* (Rittinghaus et al., 2023)
- Präsentation der Ergebnisse des österreichischen Forschungsprojekts *NICE - Verminderung der Eisbildung durch Nanostrukturierung von Oberflächen mit einem Ultrakurzpuls laser* im Zuge der *Winterwind Konferenz 2023* (Rittinghaus, Index of Winterwind 2023, 2023)
- Vorstellung der Arbeiten des Tasks 54 im Allgemeinen sowie des Subtasks zu *Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen* im Speziellen in Form einer Präsentation mit anschließender Podiumsdiskussion im Zuge der Konferenz *Electricity Transformation Canada 2023*
- Durchführung eines Follow-Up-Workshops im Zuge der *Winterwind Konferenz 2024* zum Subtask *Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen* (Rittinghaus et al., 2024)
- Präsentation zu den Auswirkungen von Windenergieproduktion unter Vereisungsbedingungen auf den Elektrizitätsmarkt im Zuge der *Winterwind Konferenz 2024* (Karlsson, 2024)
- Präsentation der Ergebnisse zu Vergleichsmessungen in Vereisungswindkanälen im Zuge des *International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) 2024*
- Präsentation der Ergebnisse zum Software-Tool zur Modellierung von Eisfall und -wurf im Zuge des *IWAIS 2024*
- Veröffentlichung des Ergebnisberichts zum österreichischen Forschungsschwerpunkt *Transferfunktion Anemometer- und Windkraftanlagen-Vereisung* (Krenn & Rittinghaus, 2024)
- Veröffentlichung der *Task 54 Icing Event Database* als Ergebnis des österreichischen Forschungsschwerpunkts *Performance Envelope von Rotorblattheizungssystemen* (Froidevaux et al., 2024)
- Veröffentlichung der Modellierung des *Performance Envelopes* als Ergebnis des österreichischen Forschungsschwerpunkts *Performance Envelope von Rotorblattheizungssystemen* (Roberge et al., 2024)

- Präsentation zur *Task 54 Icing Event Database* im Zuge der *Winterwind Konferenz 2025* (Kopp et al., 2025)
- Präsentation zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld im Zuge der *Winterwind Konferenz 2025* (Roeper, Wallenius, & Heinonen, 2025)
- Präsentation der gesammelten Erkenntnisse zum Einfluss von Vereisung auf die Geräuschemissionen von Windkraftanlagen im Zuge der *Winterwind Konferenz 2025* (Karlsson, 2025)
- Veröffentlichung des Ergebnisberichts zum österreichischen Forschungsschwerpunkt *Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen* (Rittinghaus & Pfannhofer, 2025)
- Beisteuern von fachlicher Expertise zur Berücksichtigung von Vereisung bei der Verlustmodellierung für den geplanten Standard *IEC 61400-15-2 ED1 Framework for Assessment and Reporting of the Wind Resource and Energy Yield* (Veröffentlichungszeitpunkt noch nicht festgelegt)

Durch die breite Außenwirkung hat sich der ehemalige Task 19 und nahtlos daran anschließend der Task 54 international als zentrale Informationsstelle beim Thema Windenergie in kalten Klimazonen etabliert.

5.2 Forschungsschwerpunkt „Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen“

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 potentielltem 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,

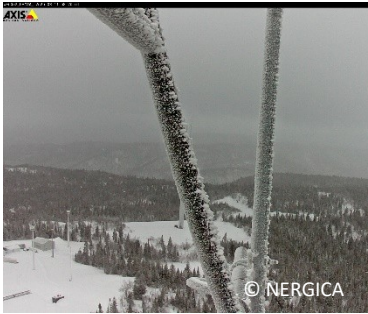
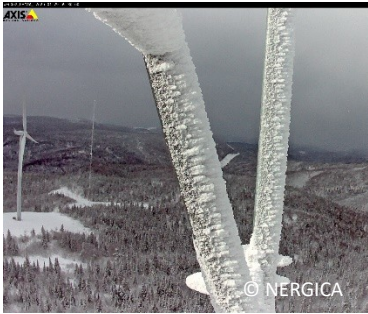
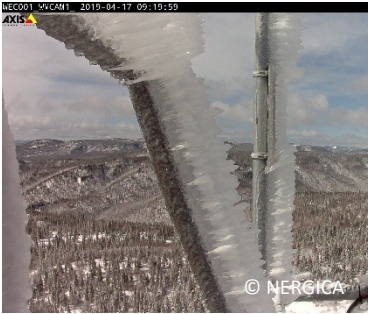
und letztendlich den verbleibenden Gewinn aus dem Verkauf des erzeugten Stroms und dem Kauf von benötigter Ausgleichskapazität.

5.2.1 Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse

Die Auswahl eines geeigneten Rotorblattheizungssystems und der optimalen Einstellungen für den Betrieb an einem spezifischen Standort 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 Rau-eis/-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.

Folgend einige Beispiele für unterschiedliche Eistypen und Entstehungsbedingungen anhand der Datensätze eines Standorts im Osten Kanadas:

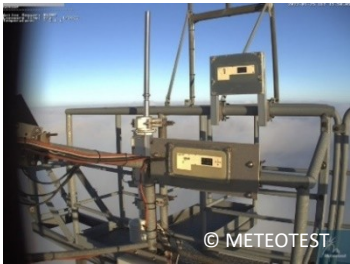
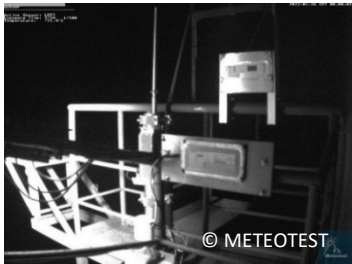
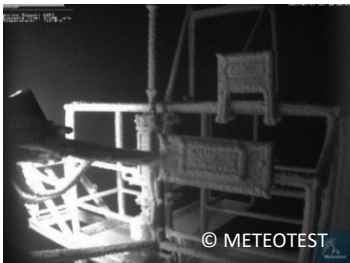
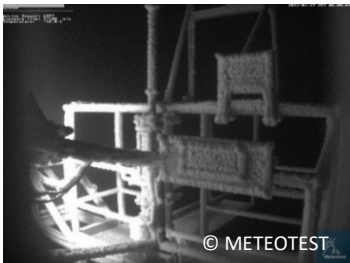
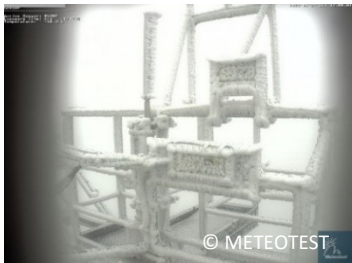
Abb. 1: Webcam-Aufnahmen aus den Datensätzen eines Standorts im Osten Kanadas mit unterschiedlichen Eistypen im zeitlichen Verlauf einzelner Vereisungsereignisse. © NERGICA

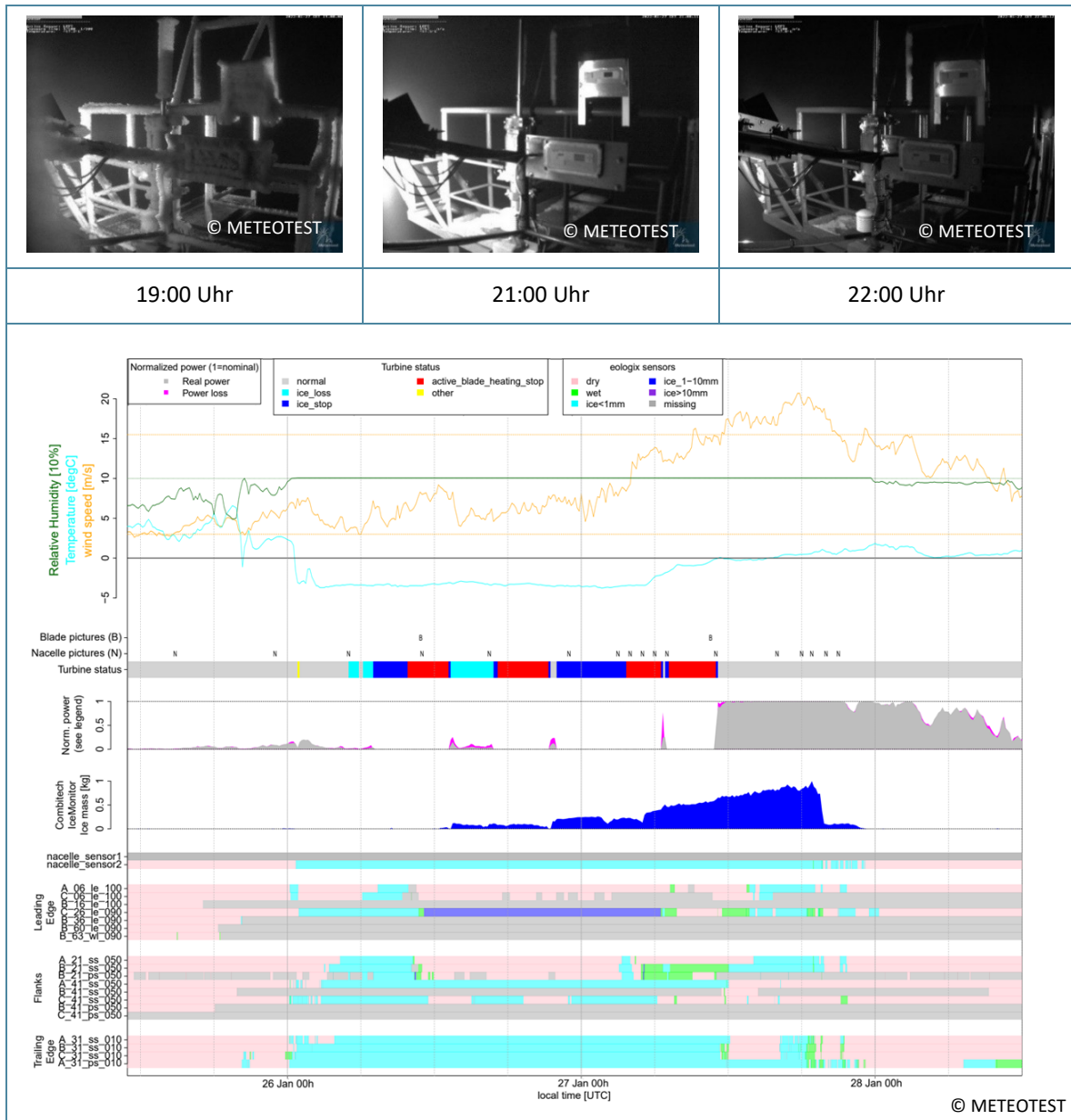
11.03.2020 08:20 Uhr	29.01.2020 09:30 Uhr	17.04.2019 09:20 Uhr
		
Weicher Reif Temperatur: – 10,5°C Windgeschwindigkeit: ~ 6,5 m/s	Harter Reif Temperatur: – 11,5°C Windgeschwindigkeit: ~ 10,2 m/s	Klareis / harter Reif Temperatur: – 3,9°C Windgeschwindigkeit: ~ 9,6 m/s

Im linken Bild lässt sich eine dünne Schicht flockigen Eises erkennen, die gut zur Bildung von weichem Reif passt. Beim mittleren Bild lässt sich gut die spitze, dem Wind entgegenstehende Struktur von hartem Reif erkennen. 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 ($-1,7^{\circ}\text{C}$ bis -3°C) während die Windgeschwindigkeit höher war (15 bis 20 m/s), was gut zur anfänglichen Bildung von Klareis passt.

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

Abb. 2: Webcam-Aufnahmen und grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort in Deutschland. © METEOTEST

25.-27.01.2022		
		
16:00 Uhr	00:00 Uhr	06:00 Uhr
		
12:00 Uhr	17:30 Uhr	00:00 Uhr
		
06:00 Uhr	12:00 Uhr	17:00 Uhr



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 von 5 bis 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. Heizstopps 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 bis 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 nominalen 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.

Die Datenbank beispielhafter Vereisungsereignisse wurde samt Dokumentation auf der Zenodo-Plattform des Task 54 veröffentlicht und ist dort für die interessierte Öffentlichkeit zur freien Verwendung verfügbar. (Froidevaux et al., 2024)

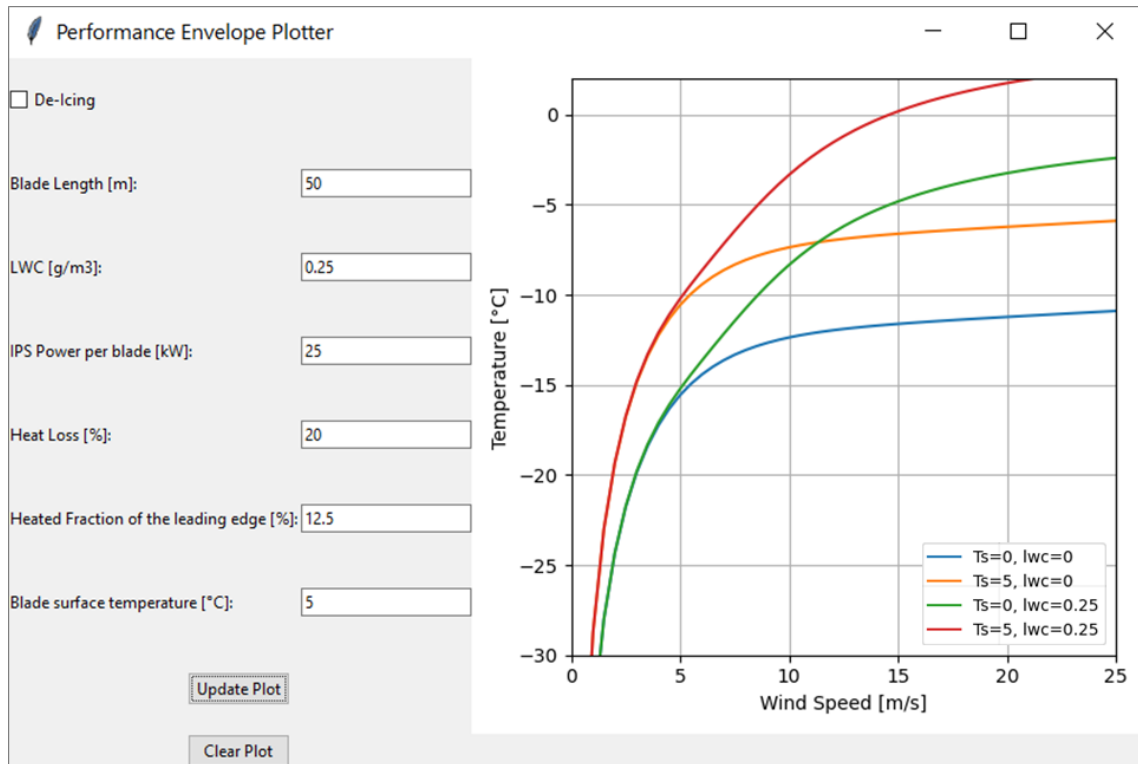
5.2.2 Modellierung des Performance Envelopes

Ist das spezifische Vereisungsgeschehen eines Standorts hinlänglich bekannt, so ist im nächsten Schritt einen Zusammenhang zwischen den erwarteten bzw. vorliegenden Daten zur Vereisung und der Leistungsfähigkeit eines gewählten Rotorblattheizungssystems unter diesen Bedingungen herzustellen. Die Hersteller:innen 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 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 Programmierung fand in Form eines Python-Skripts statt, 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.

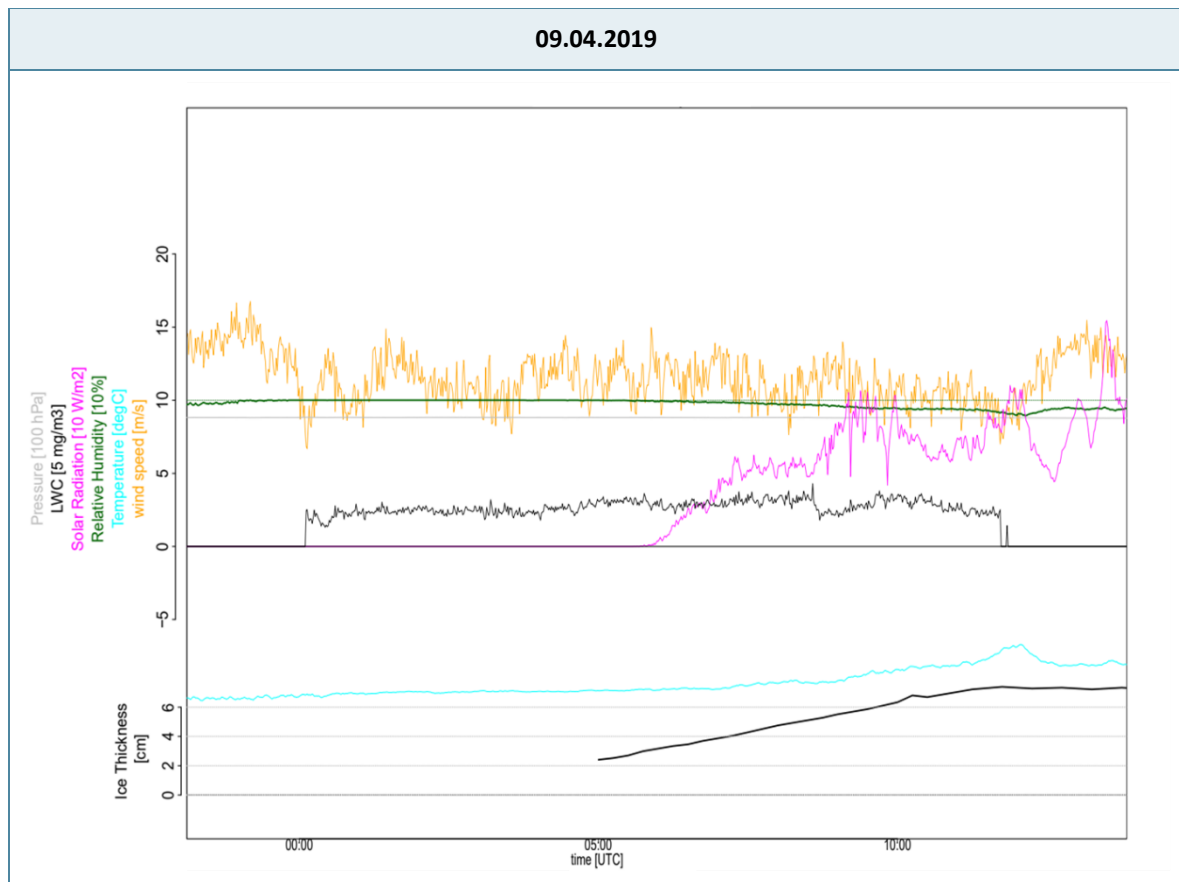
Abb. 3: User-Interface zur Modellierung des Performance Envelopes. © Patrice Roberge



Die Kurven zeigen deutlich den Einfluss des Liquid Water Content (LWC, Gehalt an flüssigem Wasser in der Luft) und der gewählten Oberflächentemperatur des Rotorblatts, die vom Heizsystem erreicht bzw. gehalten werden soll.

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:

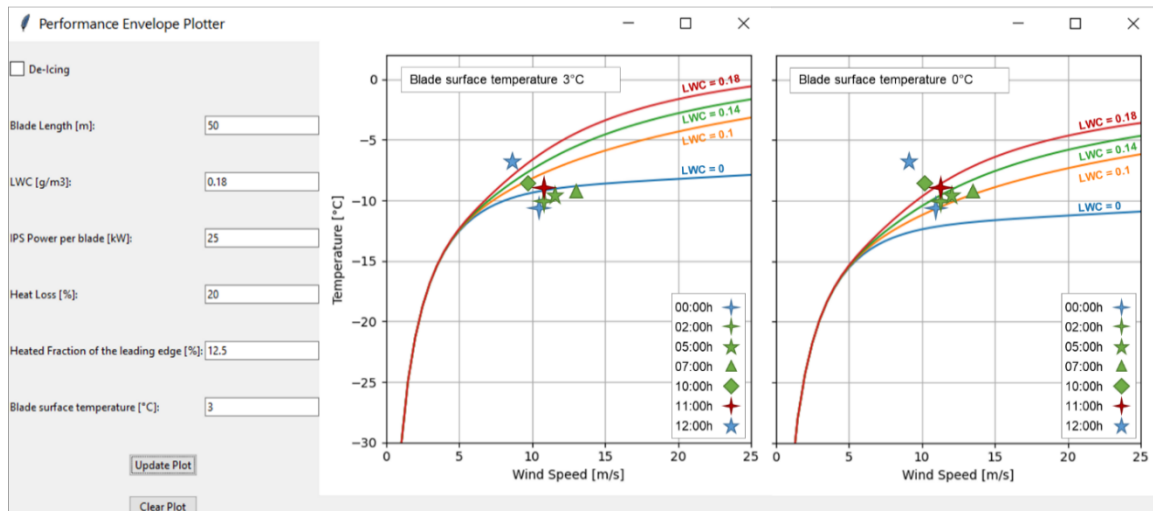
Abb. 4: Grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort im Osten Kanadas. © Patrice Roberge



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 bis 15 m/s. 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/Temperaturen.

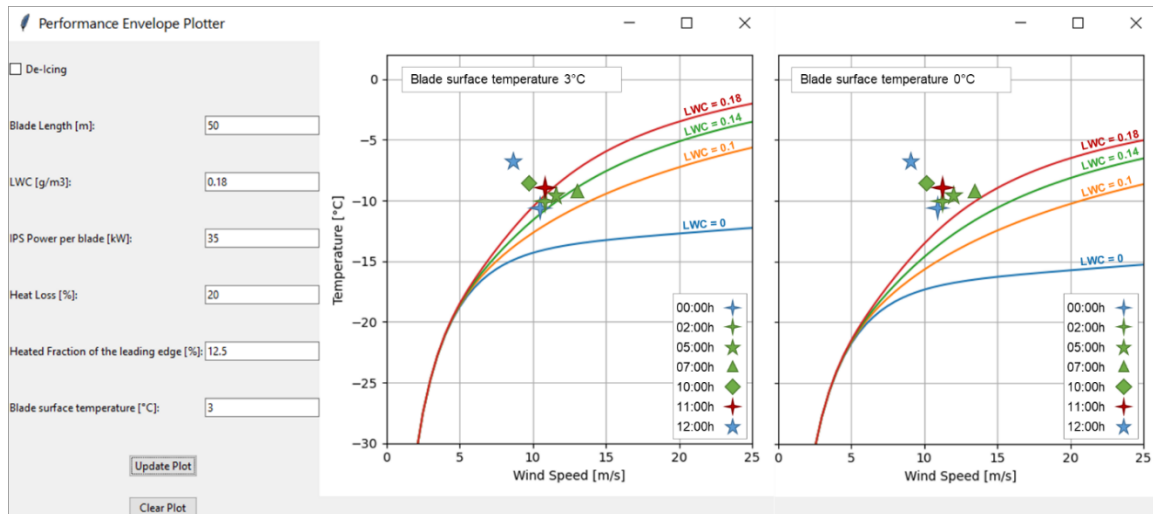
Abb. 5: Modellierung des Performance Envelopes für zwei Oberflächentemperaturen (3°C und 0°C) bei einer Heizleistung von 25 kW pro Rotorblatt sowie Messdaten von Temperatur, Windgeschwindigkeit und LWC. © ENERGIEWERKSTATT



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. 6: 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. © ENERGIEWERKSTATT



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.

Die Modellierung des Performance Envelopes wurde samt Dokumentation auf der Zenodo-Plattform des Task 54 veröffentlicht und ist dort für die interessierte Öffentlichkeit zur freien Verwendung verfügbar. (Roberge et al., 2024)

5.2.3 Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld

Die Validierung der Leistungsfähigkeit eines Systems im Feld stellt den letzten Schritt in Bezug auf die Projektentwicklung von WKA bzw. Windparks mit Rotorblattheizungssystemen dar. 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 Teilnehmenden 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. Hierfür ist es u. a. 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.

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.

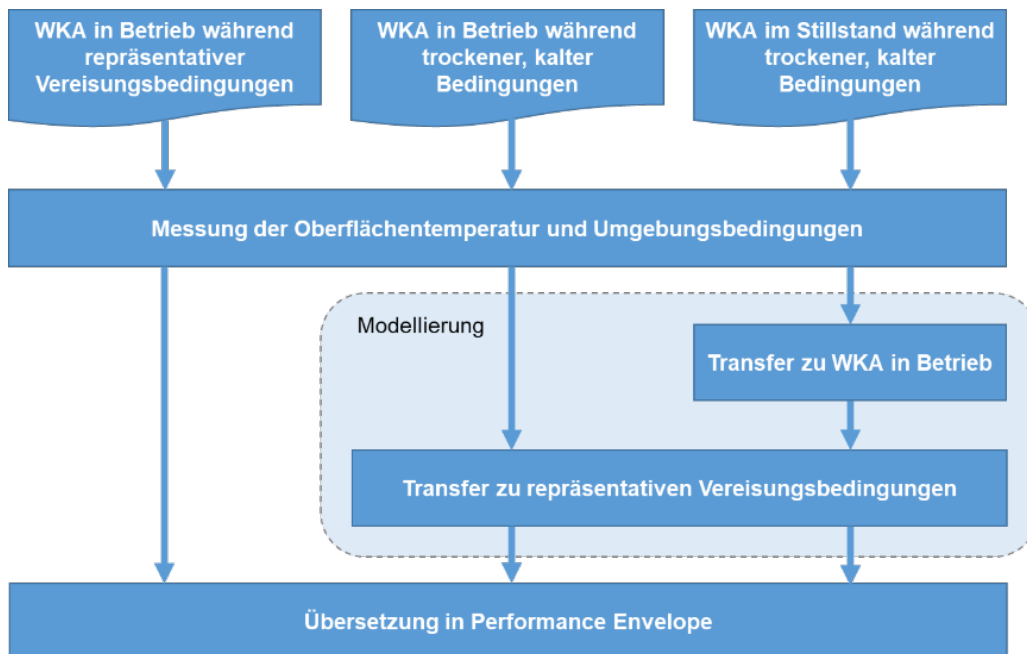
Für den Validierungsprozess ist u. a. die Art der Messung der Oberflächentemperatur von entscheidender Bedeutung. Je nach Messgerät kann die Messung während des Anlagenbetriebs erfolgen, also bei sich drehendem Rotor, wie z. B. bei Einsatz bzw. Vorhandensein von Temperatursensoren direkt auf der Rotorblattoberfläche 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 Vereisungseignisse 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. 7: Prozessdiagramm zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld. © Daniela Roeper



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.

Um den erarbeiteten Prozess selbst bzw. einzelne Teile davon zu validieren, ist weitere Forschungsarbeit auf Ebene der Mitgliedsländer des Tasks notwendig, u.a. für die Entwicklung und Validierung der angeführten Modellierungen. Als Ausgangspunkt dafür kann z. B. die im vorangehenden Kapitel 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.

5.3 Forschungsschwerpunkt „Transferfunktion Anemometer- und Windkraftanlagen-Vereisung“

Mittels der Statusmeldungen von WKA (bzw. deren Eisdetektoren) und der Auswertung der Betriebsdaten können Rückschlüsse auf den durch Vereisung entgangenen Ertrag gezogen werden. Eine Abschätzung dieser Verluste im Vorfeld, z. B. im Zuge von Ertragsberechnungen, ist bislang nur bedingt möglich. Zur Beurteilung der potenziellen Vereisungsverluste werden zumeist Daten aus ggf. im Vorfeld angestellten Windmessungen herangezogen. Die Zeiträume instrumenteller Vereisung, also z. B. der Vereisung eines Schalenanemometers, werden dabei entweder mit den zu erwartenden Vereisungszeiträumen einer geplanten WKA gleichgesetzt oder über Erfahrungswerte aus vergangenen Projekten bzw. bereits in Betrieb befindlicher WKA an vergleichbaren Standorten entsprechend skaliert.

Im Zuge dieses Forschungsschwerpunkts beschäftigte sich die Energiewerkstatt mit der Fragestellung, ob eine solche Skalierung auch allgemeingültiger für den Zusammenhang zwischen der Vereisung eines unbeheizten Schalenanemometers und der Vereisung der Rotorblätter einer WKA ohne Rotorblattheizungssystem definiert werden kann, sodass die im Zuge von Windpotenzialmessungen auftretenden Vereisungen von Schalenanemometern bereits genauere Rückschlüsse auf die zukünftige Vereisungshäufigkeit der WKA ermöglichen würden.

Üblicherweise werden bei Mast-Windmessungen Schalenanemometer sowie Ultraschallanemometer in mehreren Masthöhen parallel eingesetzt. Im Gegensatz zu den beheizten Ultraschallanemometern sind Schalenanemometer typischerweise unbeheizt und können bei entsprechenden Wetterbedingungen vereisen. Während in den wärmeren Monaten die Messdaten der beiden Anemometer meist nicht mehr als zwei Prozent voneinander abweichen, liegen bei Vereisungsbedingungen die vom Schalenanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten deutlich unter jenen des Ultraschallanemometers.

Finden zeitgleich zum Betrieb einer WKA Windmessungen in der Nähe des WKA-Standortes statt, besteht die Möglichkeit die Häufigkeit und Dauer von Vereisungsereignissen an Schalenanemometern und WKA zu vergleichen. Zeigen sich dabei signifikante Zusammenhänge, kann dies hilfreich sein zur Abschätzung zukünftiger Ertragspotenziale bzw. zukünftiger Verluste durch Vereisungen. Diese These wurde anhand von vier ausgewählten Standorten (drei Flachland- und ein Gebirgsstandort), an denen Windmessdaten zeitgleich zum Betrieb einer WKA gesammelt wurden, überprüft.

Die Gegenüberstellung von Vereisungsereignissen an Schalenanemometern in Vergleich zum Vereisungsgeschehen an Windkraftanlagen erfolgte dabei in vier grundlegenden Schritten:

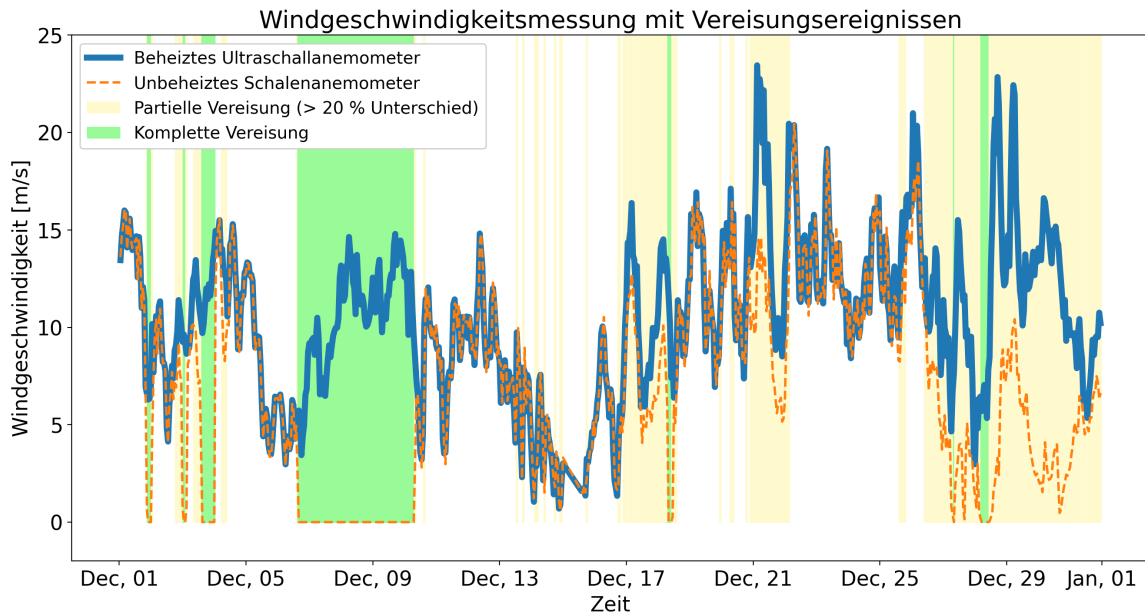
- Identifizierung geeigneter WKA, in deren unmittelbarer Nähe zeitgleich eine von der Energiewerkstatt durchgeführte Mast-Windmessung durchgeführt wurde

- Auswertung der Betriebsdaten der betrachteten WKA im Hinblick auf Vereisungsereignisse bzw. daraus resultierende Stillstandzeiten
- Analyse der Windmessdaten zur Feststellung von Vereisungsereignissen an Schallenanemometern
- Korrelation, Gegenüberstellung und statistische Auswertung in Hinblick auf eine mögliche Transferfunktion zwischen Anemometer- und WKA-Vereisung

5.3.1 Vereisungsverhalten von Schallenanemometern

Die Vereisungsereignisse am unbeheizten Schallenanemometer können nicht unmittelbar aus dem Datensatz ausgelesen werden. Stattdessen müssen die Messwerte des Schallenanemometers mit jenen des beheizten Ultraschallanemometers im Kontext von Lufttemperatur und -feuchtigkeit verglichen werden. In den wärmeren Monaten weichen die Messwerte der beiden Anemometer üblicherweise nicht mehr als zwei Prozent voneinander ab. Bei Vereisungsbedingungen liegen die vom Schallenanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten deutlich unter jenen des Ultraschallanemometers. Das Vereisungsgeschehen am Schallenanemometer folgt dabei einem bestimmten typischen Muster: Während bei günstigen Bedingungen beide Anemometertypen ähnliche Windgeschwindigkeiten messen, fallen die vom Schallenanemometer angezeigten Messwerte mit einsetzender Vereisung immer mehr unter jene des Ultraschallanemometers. In Folge kann das Schallenanemometer vollständig vereisen zum Stillstand kommen, was sich in den Messdaten mit einem Absinken auf 0 m/s ausdrückt. Häufig auftretend sind allerdings auch Zustände partieller Vereisung, während derer das Schallenanemometer zwar Windgeschwindigkeiten anzeigt, welche jedoch signifikant unterhalb jener des beheizten Ultraschallanemometers liegen. Die Unterscheidung zwischen partieller und kompletter Vereisung ist für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Datenauswertungen essenziell. Beispielsweise kann der Ansatz gewählt werden, alle Zeiträume, in denen die Werte des Schallenanemometers mehr als einen gewissen Prozentsatz von jenen des Ultraschallanemometers abweichen, als Vereisungsereignis zu identifizieren. In diesem Fall erhält man eine sehr große Anzahl an Zeitpunkten als Resultat. Je größer der gewählte Prozentsatz ist, desto weniger Zeitpunkte gelten als „vereist“. Werden stattdessen nur jene Zeitpunkte mit kompletter Vereisung als „vereist“ identifiziert, sinkt die Anzahl auf ein Minimum. Dieser Ansatz vernachlässigt allerdings, dass es auch während Vereisungsbedingungen, die zu Zeiträumen partieller Vereisung des Anemometers führen, potentiell zu einem ausreichenden Eisansatz an den Rotoren einer WKA kommen kann, der zur Abschaltung bzw. zu Ertragseinbußen führt und damit relevant für die Betrachtung wäre. Dennoch wurde dieser Ansatz für die durchgeführten Untersuchungen gewählt.

Abb. 8: Vergleich der vom Schalen- und Ultraschallanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten im Winter (N = 744 Stundenmittelwerte). © ENERGIEWERKSTATT



Die Vereisungsereignisse am unbeheizten Schalenanemometer können nicht unmittelbar aus dem Datensatz ausgelesen werden. Stattdessen müssen die Messwerte des Schalenanemometers mit jenen des beheizten Ultraschallanemometers im Kontext von Lufttemperatur und -feuchtigkeit verglichen werden. In den wärmeren Monaten weichen die Messwerte der beiden Anemometer üblicherweise nicht mehr als zwei Prozent voneinander ab. Bei Vereisungsbedingungen liegen die vom Schalenanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten deutlich unter jenen des Ultraschallanemometers. Das Vereisungsgeschehen am Schalenanemometer folgt dabei einem bestimmten typischen Muster: Während bei günstigen Bedingungen beide Anemometertypen ähnliche Windgeschwindigkeiten messen, fallen die vom Schalenanemometer angezeigten Messwerte mit einsetzender Vereisung immer mehr unter jene des Ultraschallanemometers. In Folge kann das Schalenanemometer vollständig vereisen zum Stillstand kommen, was sich in den Messdaten mit einem Absinken auf 0 m/s ausdrückt. Häufig auftretend sind allerdings auch Zustände partieller Vereisung, während derer das Schalenanemometer zwar Windgeschwindigkeiten anzeigt, welche jedoch signifikant unterhalb jener des beheizten Ultraschallanemometers liegen. Die Unterscheidung zwischen partieller und kompletter Vereisung ist für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Datenauswertungen essenziell. Beispielsweise kann der Ansatz gewählt werden, alle Zeiträume, in denen die Werte des Schalenanemometers mehr als einen gewissen Prozentsatz von jenen des Ultraschallanemometers abweichen, als Vereisungsereignis zu identifizieren. In diesem Fall erhält man eine sehr große Anzahl an Zeitpunkten als Resultat. Je größer der gewählte Prozentsatz ist, desto weniger Zeitpunkte gelten als „vereist“. Werden stattdessen nur jene Zeitpunkte mit kompletter Vereisung als „vereist“ identifiziert, sinkt die Anzahl auf ein Minimum. Dieser Ansatz vernachlässigt allerdings, dass es auch während Vereisungsbedingungen, die zu Zeiträumen partieller Vereisung des Anemometers führen, potentiell zu einem ausreichenden Eisansatz

an den Rotoren einer WKA kommen kann, der zur Abschaltung bzw. zu Ertragseinbußen führt und damit relevant für die Betrachtung wäre. Dennoch wurde dieser Ansatz für die durchgeführten Untersuchungen gewählt. Die Vereisungsereignisse am unbeheizten Schalenanemometer können nicht unmittelbar aus dem Datensatz ausgelesen werden. Stattdessen müssen die Messwerte des Schalenanemometers mit jenen des beheizten Ultraschallanemometers im Kontext von Lufttemperatur und -feuchtigkeit verglichen werden. In den wärmeren Monaten weichen die Messwerte der beiden Anemometer üblicherweise nicht mehr als zwei Prozent voneinander ab. Bei Vereisungsbedingungen liegen die vom Schalenanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten deutlich unter jenen des Ultraschallanemometers. Das Vereisungsgeschehen am Schalenanemometer folgt dabei einem bestimmten typischen Muster: Während bei günstigen Bedingungen beide Anemometertypen ähnliche Windgeschwindigkeiten messen, fallen die vom Schalenanemometer angezeigten Messwerte mit einsetzender Vereisung immer mehr unter jene des Ultraschallanemometers. In Folge kann das Schalenanemometer vollständig vereisen zum Stillstand kommen, was sich in den Messdaten mit einem Absinken auf 0 m/s ausdrückt. Häufig auftretend sind allerdings auch Zustände partieller Vereisung, während derer das Schalenanemometer zwar Windgeschwindigkeiten anzeigt, welche jedoch signifikant unterhalb jener des beheizten Ultraschallanemometers liegen. Die Unterscheidung zwischen partieller und kompletter Vereisung ist für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Datenauswertungen essenziell. Beispielsweise kann der Ansatz gewählt werden, alle Zeiträume, in denen die Werte des Schalenanemometers mehr als einen gewissen Prozentsatz von jenen des Ultraschallanemometers abweichen, als Vereisungsereignis zu identifizieren. In diesem Fall erhält man eine sehr große Anzahl an Zeitpunkten als Resultat. Je größer der gewählte Prozentsatz ist, desto weniger Zeitpunkte gelten als „vereist“. Werden stattdessen nur jene Zeitpunkte mit kompletter Vereisung als „vereist“ identifiziert, sinkt die Anzahl auf ein Minimum. Dieser Ansatz vernachlässigt allerdings, dass es auch während Vereisungsbedingungen, die zu Zeiträumen partieller Vereisung des Anemometers führen, potentiell zu einem ausreichenden Eisansatz an den Rotoren einer WKA kommen kann, der zur Abschaltung bzw. zu Ertragseinbußen führt und damit relevant für die Betrachtung wäre. Dennoch wurde dieser Ansatz für die durchgeführten Untersuchungen gewählt.

Abb. 8 stellt die Vereisungssituation anhand der von beiden Anemometern gemessenen Windgeschwindigkeiten im Winter dar. Darin sind jene Zeiträume, in denen der vom unbeheizten Schalenanemometer gemessene Stundenmittelwert mehr als 20% unterhalb jenes des beheizten Ultraschallanemometers lag, gelb hinterlegt. Sanken die Messwerte des Schalenanemometers auf 0 m/s wurde das Anemometer als komplett vereist definiert. Die entsprechenden Zeitpunkte sind grün hinterlegt. Über den gesamten Monat betrachtet ergab sich eine mittlere Abweichung zwischen den Anemometer-Messwerten von 35% bezogen auf das Ultraschallanemometer. Das Schalenanemometer war über insgesamt 337 Stunden vereist, 113 Stunden davon komplett. Dies verdeutlicht, wie stark eine Transferfunktion davon abhängt, mittels welcher Methode die Anemometer-Vereisung eingangsmäßig definiert wird.

5.3.2 Vergleich Anemometer- und WKA-Vereisung

In Kooperation mit den Betreibern der Windkraftanlagen wurden vier Anlagen ausgewählt, deren Vereisungsgeschehen analysiert wurde. Hauptkriterium dabei war, dass sich die WKA in nicht mehr als fünf Kilometer Entfernung zu einer von der Energiewerkstatt durchgeführten Mast-Windmessung befanden. Zudem sollte insbesondere die topografische Charakteristik des WKA-Standorts jener des Standorts der Windmessungen entsprechen. Drei dieser Standorte liegen im ostösterreichischen Tiefland, der vierte im subalpinen Gelände der Südsteiermark. Das Vereisungsgeschehen von einer der im Flachland befindlichen WKA wurde dabei über einen Zeitraum von zwei Wintern betrachtet („Standort 1“), jenes der anderen beiden Flachstandorte („Standort 2 bzw. 3“) über jeweils eine Winterperiode. Der Betrachtungszeitraum der WKA am Gebirgsstandort („Standort 4“) erstreckte sich über drei aufeinander folgende Winter. Während bei den Flachlandstandorten alle Monate einer Winterperiode von jeweils November bis März in den Datensatz mit aufgenommen werden konnten, erlaubte die geringe Datenverfügbarkeit in einigen Monaten am Standort 4 die Miteinbeziehung von nur insgesamt 10 ausgewählten Wintermonaten.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Vereisungsgeschehen an den unterschiedlichen Standorten:

Abb. 9: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 1.
Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT

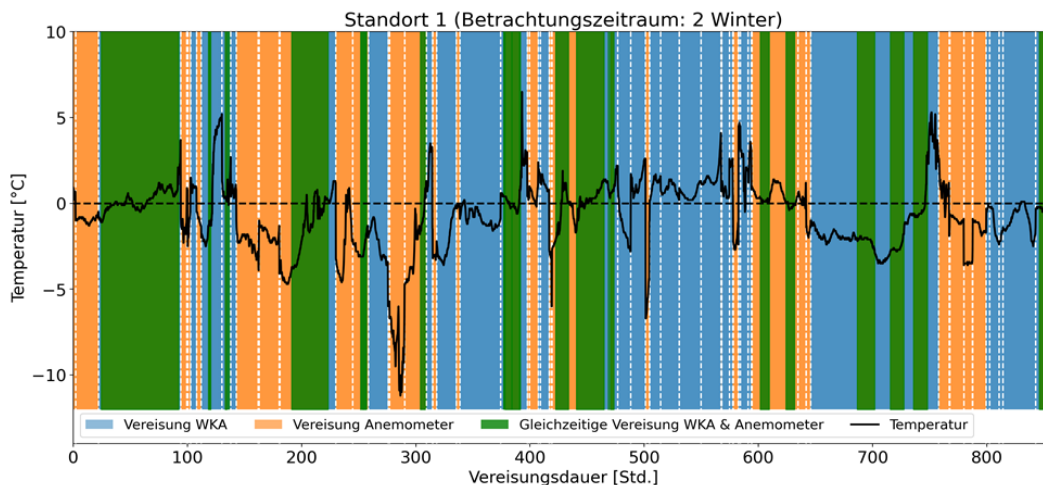


Abb. 10: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 2.
Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT

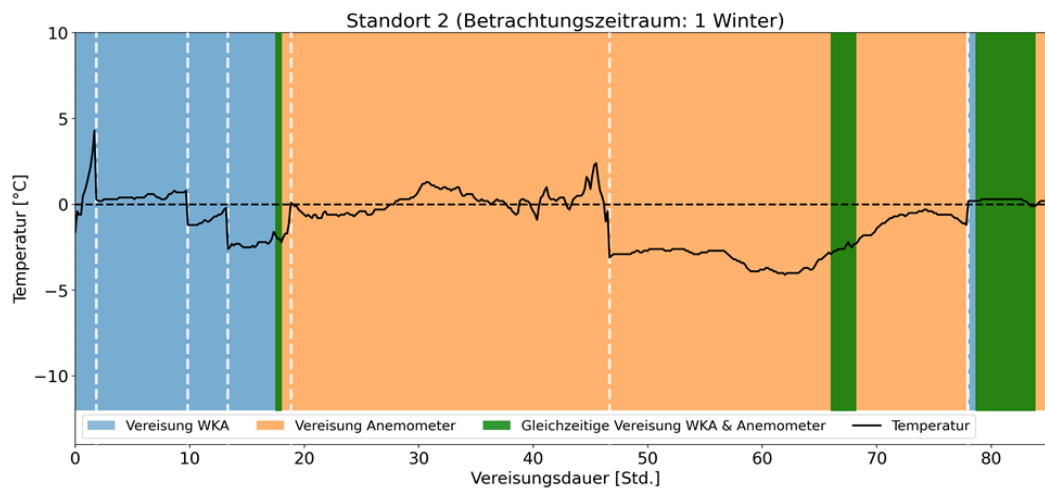


Abb. 11: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 3.
Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT

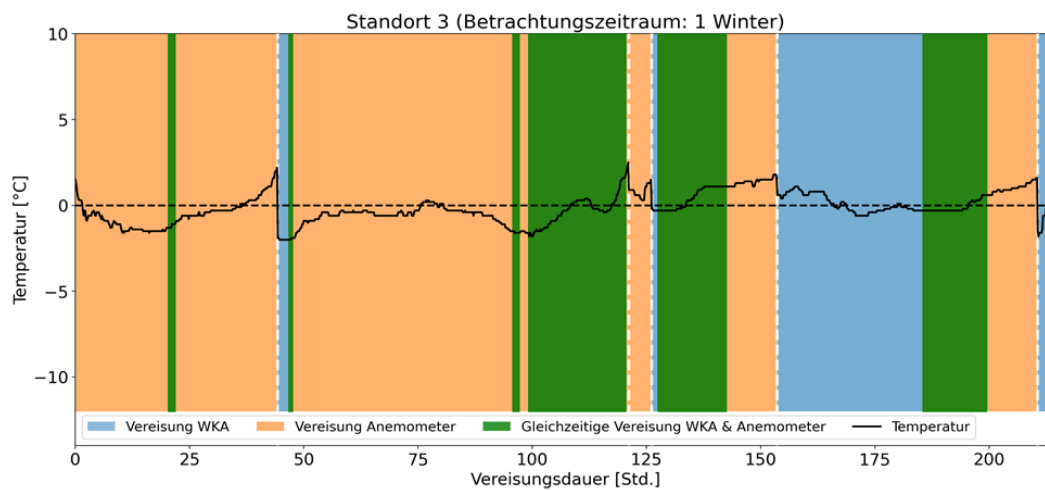
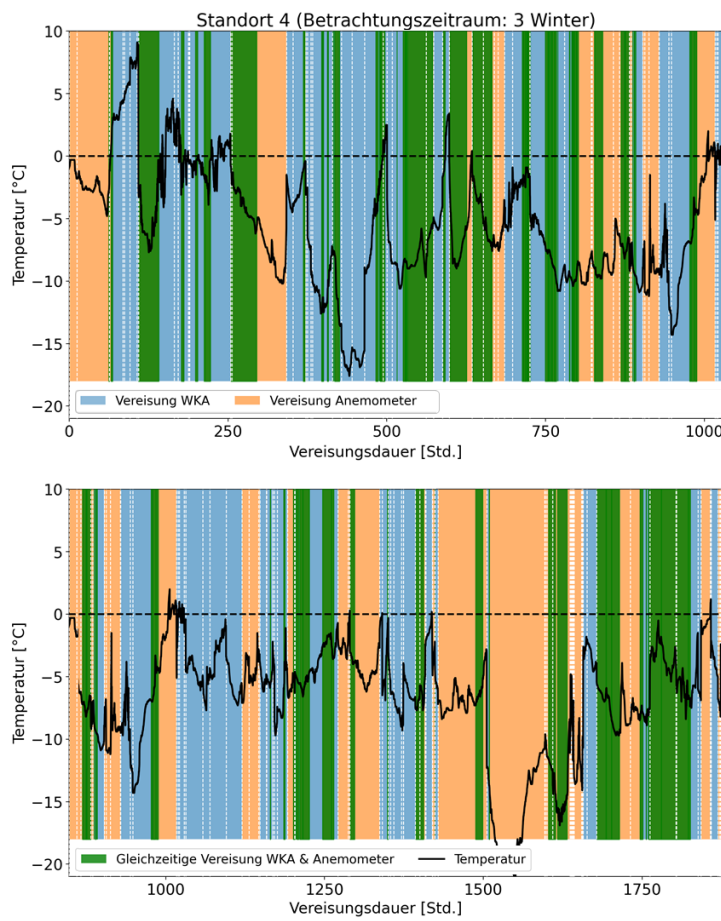


Abb. 12: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 4.
Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT



Dargestellt sind alle Vereisungsperioden an den Windkraftanlagen und den entsprechenden Schalenanemometern in chronologischer Reihenfolge. Zeitpunkte ohne Vereisung sowie Zeitpunkte mit Windgeschwindigkeiten $< 4 \text{ m/s}$ wurden ausgeschlossen. Die vertikalen weiß-strichlierten Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsevents. Der Anfang eines neuen Events wurde so definiert, dass zwischen dem betrachteten Zeitpunkt auftretender Vereisung und dem letzten Vereisungszeitpunkt mehr als eine Stunde vergangen sein musste. Dies war nötig, da insbesondere bei den Vereisungen von Windkraftanlagen die Stillstandperioden oftmals nicht komplett durchgehend, sondern von kurzen Startversuchen unterbrochen sind. Jeder erneute Abschaltvorgang in diesem Zeitraum würde andernfalls den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses darstellen, obwohl zwischenzeitlich keine komplette Enteisung stattgefunden hat. Gleichzeitig kann es bei vollständig vereisten Schalenanemometern dennoch vorkommen, dass diese kurzzeitig wieder Messwerte anzeigen. Waren über eine Dauer von mindestens einer Stunde sowohl Anemometer als auch Windkraftanlage gleichzeitig eisbefreit stellte dies das Ende eines Vereisungsereignisses dar. Innerhalb eines Ereignisses/Events kann dabei entweder nur das Anemometer bzw. nur die WKA (auch mehrmals) vereisen, oder es kommt zwischenzeitlich zu Perioden mit einem gleichzeitigen Ausfall beider. Die jeweiligen Ereignisse stellen somit näherungsweise einen Zeitraum mit durchgehend potenziellen Vereisungsbedingungen dar.

Während an den Flachlandstandorten 2 und 3 die Vereisungszeiträume am Schalenanemometer überwiegen, war die Windkraftanlage am Standort 1 länger vereist. Am Standort 1 kam in nur 11 der insgesamt 80 Vereisungsevents eine teilweise simultane Vereisung von Anemometer und WKA vor. An den Standorten 2 und 3 war die Anzahl der Vereisungsereignisse mit jeweils 7 deutlich geringer, allerdings traten davon in 3 bzw. 4 Fällen zumindest kurzzeitig Vereisungen an Anemometer und WKA gleichzeitig auf.

5.3.3 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung von am Schalenanemometer auftretenden Vereisungszeiträumen und im gleichen Betrachtungszeitraum auftretenden Stillstandperioden nahegelegener Windkraftanlagen wurde zunächst für alle vier der analysierten WKA-Standorte der Konversionsfaktor/Transferfaktor f_T berechnet. Wie die unten stehende Gleichung zeigt, hängt f_T davon ab, wie die Anemometervereisung definiert wird. Im Zuge dieser Arbeit wurde der Ansatz gewählt, dass nur Perioden kompletter Vereisung für $\Delta t_{V,Anem}$ betrachtet wurden:

$$f_T = \frac{\Delta t_{V,WKA}}{\Delta t_{V,Anem}}$$

mit f_T ... Transferfaktor
 $\Delta t_{V,WKA}$... Vereisungsdauer an der WKA
 $\Delta t_{V,Anem}$... Vereisungsdauer am Schalenanemometer (Summe der Perioden kompletter Vereisung)

Des Weiteren wurden für die über den Zeitverlauf hinweg binären (wahr/falsch) Variablen „Anemometer-Vereisung“ und „WKA-Vereisung“ ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt und das „Odds Ratio“ (dt.: Chancenverhältnis) berechnet. Dies ist ein Maß für die Stärke des Zusammenhangs zwischen den beiden Variablen. Als Datensatz für den Chi-Quadrat-Test dienten alle 10-Minuten-Intervalle der betrachteten Winterperioden (mit Windgeschwindigkeiten > 4 m/s). Zur Berechnung des Odds Ratio wurden davon nur jene Zeiträume mit einer Temperatur unter 2°C verwendet. In diesem Zusammenhang handelt es sich bei der Temperatur um eine konfundierende Variable (Störvariable), deren Einfluss durch die Beschränkung verringert werden kann.

Die Schalenanemometer der drei Flachlandstandorte waren insgesamt über einen Zeitraum von 734 Stunden vereist, die Windkraftanlagen 729 Stunden. Für die Flachlandstandorte ergibt sich daraus ein Transferfaktor f_T von 0,99. War das Anemometer vereist, lag zu 40% der Zeit eine gleichzeitige Vereisung an der WKA vor. Der Chi-Quadrat-Test ergibt für jeden der Flachlandstandorte einzeln, als auch für alle drei in Summe einen p-Wert unter 0,01. Wie zu erwarten, belegt dies, dass ein Zusammenhang zwischen an Schalenanemometern und an WKA auftretenden Vereisungen besteht und kein voneinander unabhängiges Vereisungsverhalten auftritt.

Ein ähnliches Bild zeigt sich am Alpinstandort. Über den gesamten Betrachtungszeitraum vereiste das Anemometer für insgesamt 1116 Stunden, die WKA fiel über einen Zeitraum von 1270 Stunden aus. Für den Alpinstandort würde dies einen Transferfaktor f_T von 1,13 bedeuten. Eine zeitgleiche Vereisung der Windkraftanlage fand an 45% der Vereisungszeitpunkte des Anemometers statt. Beide Werte ähneln somit den für die Flachlandstandorte berechneten Resultaten (0,99 vs. 1,13 bzw. 40% vs. 45%). Eine definitive Aussage über die Anwendbarkeit bzw. die Höhe des Transferfaktors lässt sich daraus allerdings nicht ableiten, da diese Werte das standortspezifische Verhalten nur schlecht abbilden. Bei alleinstehender Betrachtung der Standorte 2 bzw. 3 wäre ein Faktor zwischen 0,99 und 1,13 deutlich zu hoch angesetzt. Aufgrund der jeweils nur sehr kurzen Betrachtungsperioden wäre es hier allerdings nötig, das Verhalten über längere Zeiträume zu beobachten. Die von den WKA-Betreibern ausgewerteten Stillstandzeiten für diese beiden Standorte beinhalteten zudem ausschließlich längere Ausfälle von mindestens 30 Minuten. Kürzer andauernde Vereisungsstopps sind im Gegensatz zu den anderen beiden WKA nicht in den zur Verfügung gestellten Datensätzen enthalten. Über das Ausmaß eventueller zusätzlich aufgetretener Stillstände kann somit keine Aussage getroffen werden.

Der Chi-Quadrat-Test ergab sowohl für den Alpinstandort allein betrachtet als auch für alle vier Standorte zusammengefasst ein eindeutig signifikantes Ergebnis mit p-Werten deutlich unter 0,01. Zusätzlich wurde basierend auf dem gesamten Datensatz aller Standorte das Chancenverhältnis bzw. die Stärke des Zusammenhangs („Odds Ratio“) zwischen den binären Variablen „Anemometer-Vereisung“ und „WKA-Vereisung“ getestet. Mit einem „Odds Ratio“ von 4,5 zeigt auch dieser Test einen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen. Ausgedrückt wird dadurch, dass die Wahrscheinlichkeit einer vereisten WKA 4,5-mal höher ist, wenn das Anemometer vereist ist, als wenn das Anemometer nicht vereist ist.

Wie zu erwarten, sind beide Variablen miteinander verbunden und das Vorhandensein der Variable „Anemometer-Vereisung“ kann als prädiktiv für das Auftreten der Variable „WKA-Vereisung“ angesehen werden. Es bleibt allerdings unklar, ob sich dieser Zusammenhang ausreichend genau quantifizieren lässt, um daraus eine verlässliche Transferfunktion für Zeitreihen ableiten zu können. So erlaubt der Chi-Quadrat-Test nur eine prinzipielle Aussage über die gegenseitige Abhängigkeit der beiden Testvariablen, jedoch keine über die Stärke des Zusammenhangs. Das „Odds-Ratio“ hingegen kann zwar eine Aussage darüber treffen, wie wahrscheinlich zum Zeitpunkt der Anemometer-Vereisung eine gleichzeitige Vereisung der WKA ist, jedoch nicht darüber, ob die gesamte Vereisungsdauer eines Anemometers Rückschlüsse auf WKA-Ausfallszeiten erlaubt.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Das Hauptziel des Task 54 ist es, die kommerzielle Nutzung von Windenergie unter Vereisungsbedingungen zu erleichtern und zu optimieren. Aus diesem Grund sind nationale und internationale Planer:innen und Betreiber:innen von Windenergieprojekten in vereisungsgefährdeten Regionen eine wesentliche Zielgruppe für die Ergebnisse des Task 54. Die beiden österreichischen Forschungsschwerpunkte wurden mit Ausrichtung auf diese Zielgruppe gewählt und durchgeführt.

Im Verlauf der Arbeiten des Subtask zu *Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen* wurden u. a. Workshops im Programm der *Winterwind Konferenzen 2023 und 2024* veranstaltet. Die Workshops waren dabei neben einer Vorstellung des jeweiligen aktuellen Arbeitsstands des Subtasks u. a. darauf fokussiert, in direktem Austausch mit den Teilnehmenden die Einzelheiten der erarbeiteten Prozesse und Tools zu diskutieren und Lösungsmöglichkeiten bzw. Alternativen bzgl. Problemstellungen zu erörtern. Der Teilnehmerkreis umfasste dabei neben Projektentwickler:innen und Betreiber:innen auch Hersteller:innen von Anlagen und Equipment, Forschende, Berater:innen und sogar Stromhändler:innen. Dies zeigt das große Interesse, aber auch die Relevanz der Thematik für sämtliche Bereiche der Windbranche. Von der Standortbewertung über den kontrollierten Betrieb bis hin zur Vorhersage der Stromerzeugung beeinflusst die Leistungsfähigkeit von Rotorblattheizungssystemen die Wahl der Anlagen, die Steuerungsstrategien, und letztendlich den verbleibenden Gewinn aus dem Verkauf des erzeugten Stroms und dem Kauf von benötigter Ausgleichskapazität. Im weiteren Verlauf wurden die Ergebnisse aus den Teilbereichen des Subtasks auch in eigenständigen Vorträgen auf der Konferenz *Electricity Transformation Canada 2023* sowie der *Winterwind Konferenz 2025* einem breiten Publikum aus der Windbranche präsentiert. Um die nationale Verbreitung der Ergebnisse darüber hinaus zu fokussieren, wurde ein eigenständiger Ergebnisbericht zu den Aktivitäten und Ergebnissen des Subtasks erstellt, der auf nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht wurde.

Für den zweiten österreichischen Forschungsschwerpunkt wurde ebenfalls ein eigenständiger Ergebnisbericht erstellt, der auf nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht wurde. Die Untersuchungen zu einer *Transferfunktion Anemometer- und Windkraftanlagen-Vereisung* haben bei einer detaillierten Betrachtung einzelne Vereisungsereignisse gezeigt, dass in den meisten Fällen die WKA-Stillstandzeiten nur teilweise mit der Anemometer-Vereisung überlappen. Eine direkte Anwendung der berechneten Verhältniszahlen auf einzelnen Vereisungsperioden und auf spezifische Anlagen wäre daher eine Überinterpretation. Unabhängig von diesen Einschränkungen, ist das statistische Gesamtergebnis der gegenständlichen Untersuchungen von großer Relevanz, da es die bisher gängig in der Praxis verwendete und intuitive Annahme, dass die Vereisungszeiträume der Rotoren einer WKA ohne Rotorblattheizung in einer ähnlichen Größenordnung, wie die der instrumentellen Vereisung einer nahegelegenen Windmessung mit Schalenanemometer liegen, bestätigt. Für eine Ertragsabschätzung eines geplanten Windparks kann der Umfang der Vereisungsverluste in der Energieproduktion in erster Näherung anhand der Zeiträume mit Anemometervereisung an der lokalen Windmessung abgeschätzt werden. Dasselbe gilt für Bewertungen der Verei-

sungsintensität für die Erstellung von Eisfall-Risikogutachten. Die Ergebnisse dieses Forschungsschwerpunkts stellen daher eine wichtige Erkenntnis für den bisherigen und zukünftigen Umgang mit Vereisung im Zuge der Planung und Genehmigung von Windparks dar.

In Bezug auf die weiteren Themenschwerpunkte der vergangenen Task-Periode wurden ebenfalls Vorträge zu den Ergebnissen und gesammelten Erkenntnissen im Zuge einschlägiger und renommierter internationaler Veranstaltungen gehalten, wie den *Winterwind Konferenzen 2024 und 2025* oder dem *International Workshop on Atmospheric Icing of Structures 2024*.

Die Ergebnisse zu Vergleichsmessungen in Vereisungswindkanälen leisten einen wichtigen Beitrag auf dem Weg zu standardisierten Untersuchungsbedingungen für angewandte Forschung und die Produktentwicklung in der Windbranche. Technologien, die zur Erfassung und Bekämpfung/Vermeidung von Vereisung entwickelt werden müssen unter repräsentativen Vereisungsbedingungen getestet werden. Da Untersuchungen im Feld oft mit großem Aufwand verbunden sind und die dortige Vereisungsbedingen nur schwer vorhersagbar, sind Vereisungswindkanäle in dieser Hinsicht von zentraler Bedeutung.

Die im Task gesammelten Erkenntnisse zum Einfluss von Vereisung auf die Geräuschemissionen von Windkraftanlagen sind ein wichtiger Startpunkt für weitere Forschungsarbeit auf diesem Gebiet. Aufgrund eines stetig wachsenden Anteils an Windenergieerzeugung in vereisungsgefährdeten Regionen rücken die Projektstandorte kontinuierlich näher an besiedelte Gebiete heran. Ein zentrales Beurteilungskriterium für die Umweltverträglichkeit eines Projekts in Bezug auf sich in der Umgebung befindliche Siedlungen ist die von den Anlagen dort einlangende Geräuschemission. Neben der unmittelbaren Entfernung und der ebenfalls stetig wachsenden Größe der zum Einsatz kommenden Anlagen, kann auch der Veränderung der Geräuschemissionen durch Vereisung der Rotorblätter in dieser Hinsicht zukünftig eine größere Bedeutung zukommen.

Nicht zuletzt wurden innerhalb des Tasks auch die Auswirkungen der Windenergieproduktion unter Vereisungsbedingungen auf den Elektrizitätsmarkt diskutiert und Erkenntnisse dazu präsentiert. Der stetig wachsende Anteil an Erzeugungskapazität an Standorten mit relevanten Vereisungsintensitäten in Verbindung mit den immer volatiler werdenden Verhältnissen am (europäischen) Strommarkt führen zu einem großen Bedarf an Strategien zur vorausschauenden Betriebsführung von Windparks in Bezug auf Anlagenvereisung. In einem Land wie Finnland – dort ist der Weiterbetrieb von WKA bei Vereisung grundsätzlich erlaubt – würde eine mit Österreich vergleichbare Vorgehensweise der pauschalen Abschaltung im Falle von Anlagenvereisung aufgrund des höheren Windenergieanteils an der Stromerzeugung sowie der begrenzten Verfügbarkeit von Regelkapazität im Vergleich zum stärker im europäischen Verbundsystem eingebundenen österreichischen Netz bereits heute potentiell zum Zusammenbruch der Stromversorgung führen. Doch auch im Fall von Weiterbetrieb unter Vereisungsbedingungen gilt es die Steuerung der Anlagen und die Vorhersage der Verfügbarkeit und Leistungsausbeute zu verbessern. Nicht zuletzt, da die Kosten für Regel- und Ausgleichsenergie in den vergangenen Jahren extrem angestiegen und einer großen Volatilität unterlegen sind, sodass die Aufwände für den Ausgleich fehlender Produktion die entgangenen Einnahmen teils um ein Vielfaches übersteigen.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Der European Green Deal der EU-Kommission zur Bekämpfung des Klimawandels und Erreichung der Klimaneutralität erfordert einen massiven Ausbau der Erneuerbaren in allen Mitgliedsstaaten. Auch weltweit werden die Klimaziele ambitionierter und damit verbunden die Ausbauziele für die Windenergie. In vielen Staaten mit ausgeprägtem Winterklima bedeutet dies die Planung und den Betrieb von Windkraftanlagen (WKA) an Standorten mit erheblichem Vereisungspotenzial. Da dies aufgrund der geographischen Gegebenheiten auch auf viele Windparkprojekte in Österreich zutrifft, hat die österreichische Beteiligung am Task 54 eine hohe Relevanz für die Österreichische Windenergie. Allein in der Steiermark und in Kärnten ist auf Basis des ÖNIP ein Ausbau der Stromerzeugung durch Windkraft auf ca. 4 TWh/a bis 2030 notwendig, viele der dortigen Potenzialflächen befinden sich im alpinen und semialpinen Gelände mit großer Vereisungsgefahr.

Die Vereisung von WKA stellt wiederum eine große Herausforderung im Betrieb 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. Die Untersuchungen des Subtasks zu diesem Thema haben 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.

Ein zukünftiger österreichischer Forschungsschwerpunkt sollte auf der Untersuchung der Auswirkungen des Weiterbetriebs von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen auf die Eisfall- bzw. Eiswurfgefährdung für Personen im Bereich von Windparks liegen. Die Vorgabe von Abschaltung bei dem Auftreten von Anlagenvereisungen ist eine im europäischen Umfeld auf Österreich und Deutschland beschränkte Anforderung. In anderen Ländern ist ein – technisch ohnehin durchaus möglicher – Weiterbetrieb unter Vereisungsbedingungen erlaubt. Eine pauschale Abschaltung bei Eiserkennung führt in vielen Fällen dazu, dass auch bei Vereisungsereignissen, während derer mit hoher Wahrscheinlichkeit keine relevante Gefährdung für Personen im Umfeld der Anlage besteht, abgeschaltet wird. Die damit verbundenen Stillstandzeiten bedeuten neben wirtschaftlichen Verlusten auch das Risiko einer Instabilität des Stromnetzes. Ein solches, zu großen

Teilen vermeidbares Risiko sollte bei der ohnehin steigenden Volatilität der Erzeugung durch 100% erneuerbare Energien in Zukunft soweit als möglich vermieden werden.

Ein zukünftig fortgesetzte österreichische Task-Beteiligung sollte auf eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für eine Abänderung der bislang gängigen Praxis der pauschalen Abschaltung bei Vereisung abzielen. Abgestimmte Empfehlungen zu Risikobeurteilung, -minderung und -vorhersage in Bezug auf potentiellen Eiswurf sollten im Fokus der österreichischen FTI-Politik stehen und in enger Abstimmung mit den Behörden und Sachverständigen, die mit dem Thema Eisfall, Sicherheitstechnik sowie Arbeitssicherheit befasst sind, entwickelt werden.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Teilnehmende Nationen in der ersten Periode des Task 54.	15
---	----

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Webcam-Aufnahmen aus den Datensätzen eines Standorts im Osten Kanadas mit unterschiedlichen Eistypen im zeitlichen Verlauf einzelner Vereisungsereignisse. © NERGICA.....	19
Abb. 2: Webcam-Aufnahmen und grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort in Deutschland. © METEOTEST.....	20
Abb. 3: User-Interface zur Modellierung des Performance Envelopes. © Patrice Roberge.....	23
Abb. 4: Grafisch aggregierte Übersicht der Messdaten zum zeitlichen Verlauf eines Vereisungsereignisses an einem Standort im Osten Kanadas. © Patrice Roberge	24
Abb. 5: 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. © ENERGIEWERKSTATT.....	25
Abb. 6: 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. © ENERGIEWERKSTATT.....	26
Abb. 7: Prozessdiagramm zur Validierung von Rotorblattheizungssystemen im Feld. © Daniela Roeper	28
Abb. 8: Vergleich der vom Schalen- und Ultraschallanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten im Winter (N = 744 Stundenmittelwerte). © ENERGIEWERKSTATT.....	31
Abb. 9: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 1. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT	33
Abb. 10: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 2. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT	34
Abb. 11: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 3. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT	34
Abb. 12: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 4. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses. © ENERGIEWERKSTATT	35

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
(2024). Integrierter österreichischer Netzinfrastukturplan. Wien.

Froidevaux et al. (2024). Abgerufen am 19. März 2025 von IEA Wind T54 Public Icing Event
Database: <https://zenodo.org/records/14447171>

IEA Wind TCP. (2025). Abgerufen am 29. Januar 2025 von About IEA Wind TCP | IEA Wind TCP:
<https://iea-wind.org/about-iea-wind-tcp/>

Karlsson, T. (18. März 2024). Abgerufen am 19. März 2025 von Index of Winterwind 2024:
https://windren.se/WW2024/03_3_17_Karlsson_IEA_Wind_Task_54_Icing_impacts_on_electricity_grids_and_markets_Pub_v1.pdf

Karlsson, T. (05. Februar 2025). Abgerufen am 19. März 2025 von Index of Winterwind 2025:
https://windren.se/WW2025/17_1_19_Karlsson_IEA_Wind_Task_54_Ice_noise_and_impact_on_acceptance_Pub_v1.pdf

Kopp et al. (04. Februar 2025). Abgerufen am 19. März 2025 von Index of Winterwind 2025:
https://windren.se/WW2025/11_3_05_Kopp_Illustrating_icing_events_complexity_using_the_IEA_Task54_public_database_Pub_v2.pdf

Krenn, R., & Rittinghaus, C. (2024). *Transferfunktion Anemometer- und Windkraftanlagen-Vereisung*. Friedburg: Energiewerkstatt.

Rittinghaus et al. (29. März 2023). Abgerufen am 19. März 2025 von Index of Winterwind 2023:
https://windren.se/WW2023/10_1_13_Rittinghaus_Winterwind_Workshop-Performance_envelopes_of_blade_heating_systems_v2.pdf

Rittinghaus et al. (18. März 2024). Abgerufen am 19. März 2025 von Index of Winterwind 2024:
https://windren.se/WW2024/00_8_40_Rittinghaus_Performance_envelopes_of_blade_heating_systems-A_subtask_of_IEA_Wind_TCP_Task_54_Cold_climate_wind_power_Pub_v2.pdf

Rittinghaus, C. (28. März 2023). Abgerufen am 19. März 2025 von Index of Winterwind 2023:
https://windren.se/WW2023/12_1_11_Rittinghaus_NICE-Reduction_of_ice_formation_by_nanostructuring_of_surfaces_with_an_ultrashort_pulse_laser_Pub_v1.pdf

Rittinghaus, C., & Pfannhofer, F. (2025). *Performance Envelopes von Rotorblattheizungssystemen*. Friedburg: Energiewerkstatt.

Roberge et al. (2024). Abgerufen am 19. März 2025 von WP3 Performance Envelopes Model:
<https://zenodo.org/records/14447171/files/WP3%20Performance%20Envelopes%20Model.zip?download=1>

Roeper, D., Wallenius, T., & Heinonen, M. (05. Februar 2025). Abgerufen am 19. März 2025 von Index of Winterwind 2025:
https://windren.se/WW2025/15_1_07_Wallenius_Blade_heating_system_performance_envelope_field_validation_-_practical_experiences_Pub_v1.pdf

Abkürzungen

WKA	Windkraftanlage
LWC	Liquid Water Content, Gehalt an flüssigem Wasser in der Luft
IWAIS	International Workshop on Atmospheric Icing of Structures

