

Ergebnisbericht

Transferfunktion Anemometer- und Windkraftanlagen-Vereisung

IEA Wind Task 54 (2022-2024) Arbeitspaket 5


Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Projektes der Forschungskooperation Internationale Energieagentur Ausschreibung 2021 zur Teilnahme am IEA Wind Task 54 wurde als Arbeitspaket 5 des Antrags die Erarbeitung einer „Transferfunktion Anemometer-Vereisung vs. WKA-Vereisung“ definiert, mit dem Ziel der Publikation eines Evaluierungsberichtes zum Vergleich der Vereisung an einem unbeheizten Schalenstern-Anemometer (1st Class) und an den Rotorblättern einer Windkraftanlage (WKA) ohne Rotorblattheizungssystem. Dazu wurden in einem ersten Schritt mehrere Standorte identifiziert, für die zeitgleiche Zeitreihen von Betriebsdaten entsprechender WKA und Messdaten entsprechender 1st-Class-Anemometern vorliegen. Anschließend wurden mit den Eigentümern dieser Daten (i.e. WKA-Betreibern) die Möglichkeit einer Datennutzung diskutiert und Vertraulichkeitsvereinbarungen unterzeichnet. Für die identifizierten Standorte (mindestens drei Standorte in für die Windenergieerzeugung relevanten Regionen) wurden die Windmessdaten hinsichtlich der aus ihnen ableitbaren Vereisungszeiträume (i.e. Startzeitpunkt und Dauer) evaluiert. Dies erfolgte anhand einer Auswertung der Perioden mit Anemometer-Vereisung und unter Berücksichtigung von Lufttemperatur und -feuchtigkeit. Die Vereisungsperioden an den WKA werden anhand der Abschaltzeitpunkte durch die Eiserkennungssysteme sowie der Dauer der Abschaltungen (über die SCADA-Daten) hergeleitet. Durch die Gegenüberstellung dieser beiden Datenreihen kann eine erste Aussage zur Vergleichbarkeit hinsichtlich Häufigkeiten und Dauer von Vereisungsperioden getroffen werden.

Auftraggeber: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
als Bestandteil des Projekts „IEA Wind Task 54: Windenergie in kalten Klimazonen Siebte Arbeitsperiode (2022 – 2024)“
FFG-Antragsnummer: 40960419

Dieses Projekt wird im Rahmen des IEA Wind Technology Collaboration Programme (TCP) im Auftrag des BMK 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: DI Rafael Krenn

Prüfung: Dipl.-Phys. Claas Rittinghaus

Revision: 00

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Methodik.....	6
2.1.	Standortauswahl Windkraftanlagen.....	6
2.2.	Vereisung von Windkraftanlagen.....	6
2.3.	Vereisung von Schalenanemometer.....	7
2.4.	Statistische Auswertung.....	9
3.	Ergebnisse.....	11
3.1.	Vereisungsverhalten von Schalenanemometer.....	11
3.2.	Vergleich Anemometer- und WKA-Vereisung.....	13
4.	Zusammenfassung und Fazit.....	19
5.	Anhang.....	21
6.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	22

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. Die beim Betrieb einer Anlage auftretenden Vereisungsverluste sind im Vorfeld im Rahmen von Ertragsberechnungen nur schwer abschätzbar bzw. modellierbar. Andererseits können sie an gewissen Standorten eine Hauptursache für Stillstandzeiten und damit einhergehende Ertragsverluste darstellen.

Vereisungen an WKA bringen mehrere Risiken mit sich. Grundsätzlich kann dabei zwischen gesundheitlichen Risiken für Personen in der näheren Umgebung und den Risiken für Sachwerte unterschieden werden. Ersteres betrifft insbesondere die durch Eisfall und Eiswurf entstehende Gefährdung für Leib und Leben im Umfeld der Windkraftanlage. Letztere entstehen durch die mit Vereisungsereignissen einhergehenden Abnützungen an den Rotorblättern oder Ermüdungs-/Extremlasten im Bereich der gesamten Anlage aufgrund von Unwuchten durch die zusätzlichen Eismassen. Zudem birgt Eiswurf auch eine potenzielle Gefährdung für etwaige in der Nähe befindliche anlageneigene oder fremde Infrastruktur.

Darüber hinaus können durch Beeinträchtigungen der aerodynamischen Eigenschaften der Rotorblätter Ertragsverluste entstehen, wenn die WKA im Falle von Eisansatz weiterbetrieben wird.

Die Eisansatzerkennung der WKAs erfolgt typischerweise mittels zweier Methoden. Einerseits gibt es Anlagen, bei denen über ein zertifiziertes Leistungskurvenverfahren die Eingangsparameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Rotordrehzahl, Blattwinkel und erzeugte Leistung überwacht werden, sodass im Vergleich mit Langzeit-Mittelwerten Abweichungen erkannt und bei entsprechenden Grenzwertüberschreitungen die Anlagen aufgrund von Eisansatz automatisch gestoppt werden können. Andererseits gibt es WKA-Typen, bei denen zusätzliche Sensoren für die Eiserkennung angebracht werden, die in Verbindung mit der Anlagensteuerung das Stoppen der WKA bzw. deren Wiederinbetriebnahme kontrollieren können. Die in dieser Untersuchung betrachteten Anlagen sind mit dem Eisdetektionssystem der Fa. Labkotec ausgestattet. Die Sensoren des Systems basieren auf der Beobachtung der Ultraschallschwingung eines Hohlrahtes. Dieser schwingt ohne Eisansatz mit einer vorgegebenen Frequenz. Sobald sich am Sensordraht Eis ansetzt, wird die Frequenz des Ultraschallsignals beeinflusst. Wird ein vorgegebener Schwellenwert erreicht, meldet der Sensor Eisansatz. Die Sensoren sind beheizbar, sodass nach einer Eisdetektion das angesammelte Eis wieder zum Abschmelzen gebracht werden kann. Nach dem Abschmelzvorgang ist der Sensor für die nächste Detektion verfügbar. Diese kann unmittelbar nach dem Abschmelzen erfolgen, z. B. dann, wenn die Vereisungsbedingungen andauern.

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.

Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich 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. Im Folgenden wird diese These anhand von vier ausgewählten Standorten (drei Flachland- und ein Gebirgsstandort), an denen Windmessdaten zeitgleich zum Betrieb einer WKA gesammelt wurden, überprüft.

Eine weitere Fragestellung, auf die im Rahmen der gegenständlichen Untersuchung allerdings nicht eingegangen wird, ist die Bewertung der Wirkung von Rotorblattheizungssystemen in Hinsicht auf Ertragsverluste und Eisfallgefährdung. Die abtauende Wirkung von Rotorblattheizungen (bzw. vereisungsverhindernde Wirkung im Falle von anti-icing Systemen) hängt stark vom Arbeitsprinzip und der technischen Ausgestaltung der Systeme ab. Daher spielt für die Bewertung des Gesamteffekts neben der Dauer und der Häufigkeit auch die Intensität der einzelnen Vereisungsereignisse eine große Rolle. Die instrumentelle Vereisung eines Schalenanemometers bietet hier nur eine unzureichende Information, die durch zusätzliche meteorologische Messdaten entsprechend ergänzt werden müsste, um Vereisungsereignisse an WKA und Windmessung in dieser Hinsicht zu vergleichen.

2. Methodik

Die Gegenüberstellung von Vereisungsereignissen an Schalenanemometern in Vergleich zum Vereisungsgeschehen an Windkraftanlagen erfolgte 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 Schalenanemometern
- Korrelation, Gegenüberstellung und statistische Auswertung in Hinblick auf eine mögliche Transferfunktion zwischen Anemometer- und WKA-Vereisung

2.1. Standortauswahl Windkraftanlagen

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 mitaufgenommen werden konnten, erlaubte die geringe Datenverfügbarkeit in einigen Monaten am Standort 4 die Miteinbeziehung von nur insgesamt 10 ausgewählten Wintermonaten.

2.2. Vereisung von Windkraftanlagen

Für die drei WKA im Flachland wurden die festgestellten Vereisungs- bzw. Stillstandzeiten von den Anlagenbetreibern in zusammengefasster Form an den Verein Energiewerkstatt übermittelt. Beim vierten Standort übernahm die Energiewerkstatt die Auswertung der SCADA-Daten bzw. Statusmeldungen von WKA und Eissensor. Um den anderen Standorten zu entsprechen, wurde nur im Hinblick auf tatsächliche Stillstandzeiten evaluiert. Jene Zeiträume, in denen zwar der Eisdetektor einen Eisansatz erkannte, die WKA, geregelt durch das Leistungskurvenverfahren, jedoch noch nicht gestoppt wurde, wurden nicht in die Datenauswertung aufgenommen.

Zu beachten ist dabei, dass das Ende einer Stillstandperiode (aufgrund von Vereisung) nicht automatisch mit der Wiederinbetriebnahme der WKA einhergeht. Fällt beispielsweise das Ende der Vereisung mit einer Phase nicht ausreichender Windstärke zusammen, dürfen die zusätzlichen Stillstandzeiten nicht der Ursache Vereisung zugeschrieben werden. Zusätzlich können sich Vereisungsstillstände auch mit gleichzeitig auftretenden Perioden von Windmangel überschneiden. Hier zeigt sich in den Aufzeichnungsdaten zwar ein WKA-Stopp aufgrund von Vereisung, der Ertragsverlust dieses Zeitraums ist aber auch hier nicht vollständig der Vereisung zurechenbar, da die Windverhältnisse ohnehin keinen

durchgehenden Betrieb während des Ausfalls erlaubt hätten. Um diesen Umständen Rechnung zu tragen, wurde der Datensatz nur auf Vereisungsstillstände bei Windgeschwindigkeiten von über 4 m/s untersucht. Zwar können Windkraftanlagen häufig auch bei darunterliegenden Windgeschwindigkeiten betrieben werden, bei darüber liegenden Werten ist aber mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit von zum Betrieb geeigneten Bedingungen auszugehen. Dadurch kann weitestgehend ausgeschlossen werden, dass die Ausfallzeiten Perioden beinhalten, in denen ohnehin nicht oder nur eingeschränkt hätte produziert werden können. Es ist notwendig, darauf hinzuweisen, dass bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Filter stets mitbedacht werden muss.

Wartungsarbeiten, während oder anschließend an Vereisungsstillstände wurden ebenfalls nicht in die Ausfallzeiten miteinberechnet. Diese können zwar in direktem Zusammenhang zur Vereisung stehen, die Ursachen sind aber aus den Betriebsdaten nicht eindeutig ablesbar.

2.3. Vereisung von Schalenanemometer

Zur Analyse der Vereisungsereignisse an Schalenanemometern wurden Daten von Windmessungen herangezogen, die von der Energiewerkstatt zeitgleich zum Betrieb der betrachteten WKA durchgeführt wurden. Die Distanz zwischen dem Standort der Windkraftanlagen und der jeweiligen Windmessung betrug dabei in allen Fällen weniger als fünf Kilometer. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Topographie des Windmessstandortes jener der dazugehörigen WKA entspricht.

Jeder der für die Windmessungen verwendeten Masten war sowohl mit unbeheizten Schalenanemometern als auch mit beheizten Ultraschallanemometern ausgestattet, was prinzipiell die Detektion der instrumentellen Vereisung des Schalenanemometers ermöglicht. Betrachtet wurden die Daten jener Schalenanemometer mit einer Messhöhe von 80 Metern. Die Messhöhe der zum Vergleich herangezogenen beheizten Ultraschallanemometer betrug 76 Meter. Die Windmessdaten wurden in 10-Minuten-Intervallen aufgezeichnet. Neben den beiden Windgeschwindigkeitsmessungen von Schalen- und Ultraschallanemometer wurden auch Messwerte zu Luftfeuchte und Lufttemperatur am Standort aufgezeichnet. In allen Fällen war das unbeheizte Schalenanemometer vom Typ „Thies 1st class advanced“ und das beheizte Ultraschallanemometer vom Typ „Thies 3D Ultrasonic“.

Wie bereits erwähnt, wurden die Vereisungszeiträume der Windkraftanlagen an den Standorten 1, 2 und 3 im Hinblick auf Anfangs- und Endzeitpunkte von den jeweiligen Betreibern ausgewertet und an die Energiewerkstatt übermittelt. Bei den betrachteten Zeiträumen handelt es sich je nach Standort um die Vereisungsdaten von einer bzw. zwei vollständigen Winterperioden (Zeitraum von Anfang November bis Ende März). Um die Vereisungen an Windkraftanlagen mit den Vereisungen an Schalenanemometern vergleichen zu können, muss der Betrachtungszeitraum identisch sein. Dementsprechend wurden für die Gegenüberstellung nur die Windmessdaten aus den Winterperioden als Vergleichsbasis herangezogen und auf Vereisungsereignisse überprüft.

Für den Standort 4 wurde die gegensätzliche Vorgangsweise gewählt. Hier lagen die Betriebsdaten zur Windkraftanlage über den Zeitraum von insgesamt drei Winterperioden vor. Für einige Wintermonate dieses Betrachtungszeitraums war die Verfügbarkeit der Windmessdaten allerdings nicht ausreichend. Diese wurden aus dem Datensatz ausgeschlossen, ausgewertet wurden nur jene Wintermonate mit ausreichender Verfügbarkeit. Dementsprechend wurden auch die Betriebsdaten nur auf Vereisungsereignisse in denselben Monaten überprüft. Zusammengefasst wurden zehn Monate, verteilt über die drei Winterperioden, in der Datenanalyse berücksichtigt.

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.

Die Wahl eines Abweichungsprozentsatzes ist zwar grundsätzlich möglich, muss jedoch klar definiert sein, um bei späterer Anwendung der Transferfunktion dieselbe Ausgangslage zu schaffen. Nur so können verlässliche Abschätzungen von Ertragspotentialen vorgenommen werden. Für zukünftige Anwendungen sollte daher die Etablierung eines Standardwertes in Abhängigkeit des Anemometertyps, der Messhöhe sowie der Montagebedingungen (Mast-Wakes etc.) angestrebt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Ansatz gewählt, nur Zeitpunkte kompletter Vereisung als Eingangsparameter für die Transferfunktion heranzuziehen. Um den Vereisungskriterien der WKA zu entsprechen, wurden auch bei der Windmessung nur jene Perioden in die Endauswertung mit aufgenommen in denen mit einem tatsächlichen Betrieb der Anlage zu rechnen ist. Zeitpunkte kompletter Vereisung bei Windgeschwindigkeiten (vom beheizten Ultraschallanemometer gemessen) unterhalb von 4 m/s wurden nicht betrachtet. Auch dies vereinfacht zukünftige Gegenüberstellungen von WKA- und Anemometer-Vereisungen.

2.4. Statistische Auswertung

Das Ziel der Anemometer-WKA-Transferfunktion ist die Abschätzung von an WKA auftretenden Ertragsverlusten aufgrund von Vereisungen. Ein Ansatz dafür ist eine Gegenüberstellung von am Schalenanemometer auftretenden Vereisungszeiträumen und im gleichen Betrachtungszeitraum auftretenden Stillstandperioden nahegelegener Windkraftanlagen. Zuerst wurde dazu für alle vier der analysierten WKA-Standorte der Konversionsfaktor/Transferfaktor f_T berechnet. Wie Eq. 1 zeigt, hängt f_T davon ab, wie die Anemometervereisung definiert wird (vgl. 2.3). Im Zuge dieser Arbeit wurde der Ansatz gewählt, dass nur Perioden kompletter Vereisung für $\Delta t_{V,Anem}$ betrachtet wurden:

$$f_T = \frac{\Delta t_{V,WKA}}{\Delta t_{V,Anem}} \quad \text{Eq. 1}$$

f_T = Transferfaktor

$\Delta t_{V,WKA}$ = Vereisungsdauer an der WKA

$\Delta t_{V,Anem}$ = Vereisungsdauer (Summe der Perioden kompletter Vereisung) am Schalenanemometers

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 $> 4\text{m/s}$). Zur Berechnung des Odds Ratio wurden davon nur jene Zeiträume mit einer Temperatur unter $2\text{ }^\circ\text{C}$ verwendet. In diesem Zusammenhang handelt es sich bei der Temperatur um eine konfundierende Variable (Störvariable), deren Einfluss durch die Beschränkung verringert werden kann.

Als abschließender Teil der Analyse wurde ein logistisches Regressionsmodell verwendet, um die Vereisung von Windkraftanlagen vorherzusagen. Die Daten wurden in Trainings- und Testsets aufgeteilt und die unabhängigen Variablen „Anemometer-Vereisung“, „Temperatur“ und „Feuchte“ als Eingangsparameter verwendet, um die abhängige Variable „WKA-Vereisung“ vorherzusagen. Das logistische Regressionsmodell wurde mit dem Trainings-Set angelernt und anschließend am Test-Set angewendet. Um die Leistung des Modells zu bewerten wurden mehrere Metriken berechnet:

- Accuracy
- Precision
- Recall (TPR)
- F1 Score

Hierbei sind die Metriken Accuracy, Precision, Recall (TPR) und F1-Score (FPR) wie folgt definiert¹:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{correct classifications}}{\text{total classifications}} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

¹ Quelle: <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/accuracy-precision-recall>

$$\text{Precision} = \frac{\text{correctly classified actual positives}}{\text{everything classified as positive}} = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$\text{Recall (or TPR)} = \frac{\text{correctly classified actual positives}}{\text{all actual positives}} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{FPR} = \frac{\text{incorrectly classified actual negatives}}{\text{all actual negatives}} = \frac{FP}{FP + TN}$$

Mit TP = True Positive, TN = True Negative, FP = False Positive FN = False Negative.

Bei einem ausgewogenen Datensatz mit einer ähnlichen Anzahl von Werten in beiden Klassen kann Accuracy als ein grobes Maß für die Modellqualität dienen. Aus diesem Grund wird die Metrik häufig als Standard-Evaluierungsmaßstab für allgemeine oder unspezifizierte Modelle verwendet, die allgemeine oder unspezifizierte Aufgaben ausführen. Wenn der Datensatz jedoch unausgewogen ist oder wenn eine Art von Fehler (FN oder FP) eher vermieden werden soll, was in den meisten realen Anwendungen der Fall ist, ist es besser, das Modell stattdessen in Bezug auf eine der anderen Metriken zu optimieren.

Falsch-positive (FP) Ergebnisse sind tatsächliche negative Werte (TN), die fälschlicherweise als positiv klassifiziert wurden. Precision gibt damit den Anteil positiv klassifizierter Ergebnisse des Modells an, der tatsächlich positiven Werten entspricht. In einem unausgewogenen Datensatz, in dem die Zahl der tatsächlich positiven Werte sehr gering ist, ist diese Metrik nur wenig aussagekräftig.

Falsch-negative (FN) Ergebnisse sind tatsächliche positive Werte (TP), die fälschlicherweise als negativ klassifiziert wurden. Recall (TPR) gibt damit den Anteil tatsächlicher positiver Werten an, die vom Modell als positiv klassifiziert wurden und wird häufig als „Erkennungswahrscheinlichkeit“ bezeichnet. In einem unausgewogenen Datensatz, in dem die Anzahl der tatsächlich positiven Werte sehr gering ist, ist diese Metrik ebenfalls nur wenig aussagekräftig.

Precision verbessert sich, wenn die falsch-positiven Ergebnisse abnehmen, während sich Recall (TPR) verbessert, wenn die falsch-negativen Ergebnisse abnehmen. Infolgedessen stehen die beiden Metriken häufig in einem umgekehrten Verhältnis zueinander, d. h. eine Verbesserung der einen verschlechtert die andere.

F1-Score (FPR) gibt den Anteil der tatsächlich negativen Werte an, die vom Modell fälschlicherweise als positiv klassifiziert wurden und wird häufig als „Fehlalarmrate“ bezeichnet. In einem unausgewogenen Datensatz, in dem die Anzahl der tatsächlich negativen Werte sehr gering ist, ist diese Metrik nur wenig aussagekräftig.

Ziel bei der Erstellung und Anwendung des logistischen Regressionsmodells war es nicht, ein bereits exaktes Vorhersagemodell zu erstellen, sondern einen prinzipiellen Eindruck davon zu gewinnen, wie eine Transferfunktion die an WKA auftretenden Vereisungsereignisse prognostizieren kann. Der dazu betrachtete Datensatz umfasste alle 4 Standorte und alle in die Wintermonate fallenden 10-Minuten-Intervalle mit Windgeschwindigkeiten > 4 m/s. Das entsprechende Pythoncode-Snippet ist im Anhang zu finden.

3. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zuerst im Sommer durchgeführte Windmessungen mit Windmessungen im Winter verglichen, um die zu erwartende Datenqualität bei Nicht-Vereisungsbedingungen abzuschätzen und die Unterschiede zwischen partiellen und kompletten Vereisungsperioden darzustellen. In einem weiteren Schritt werden die am Schalenanemometer auftretenden Perioden kompletter Vereisung den Stillstandzeiten der jeweiligen Windkraftanlagen gegenübergestellt. Abschließend werden die Ergebnisse bezüglich der möglichen Eignung einer Anemometer-WKA-Vereisungs-Transferfunktion in Hinblick auf die Prognose von Ertragsverlusten bei Windkraftanlagen interpretiert.

3.1. Vereisungsverhalten von Schalenanemometer

Abbildung 1 zeigt den typischen Verlauf einer Windmessung in den Sommermonaten. Ohne Auftreten von Vereisung folgt die Messlinie des Schalenanemometers zu jedem Zeitpunkt der Messlinie des Ultraschallanemometers. Die in diesem Zeitraum auftretenden Abweichungen zu den Messwerten des Ultraschallanemometers betrug dabei im Durchschnitt 1,5 %, im 99. Quantil 7,7 %. In 669 der insgesamt 744 betrachteten Messstunden lag dabei die vom Schalenanemometer gemessene Windgeschwindigkeit über jener des Ultraschallanemometers. Bei der Suche nach einem Konversionsfaktor zur Abschätzung von WKA-Stillstandzeiten (aufgrund von Vereisung) basierend auf den an Schalenanemometern auftretenden Vereisungen ist es notwendig diese systembedingt auftretenden Unterschiede in den Windgeschwindigkeitsmessungen in die Betrachtungen miteinzubeziehen. Insbesondere wenn Zeitpunkte partieller statt kompletter Vereisung die Ausgangsbasis bilden (vgl. 2.3), muss der Abweichungsprozentsatz hoch genug gewählt werden, damit Perioden mit systembedingten Differenzen nicht fälschlicherweise als Vereisungszeiträume identifiziert werden.

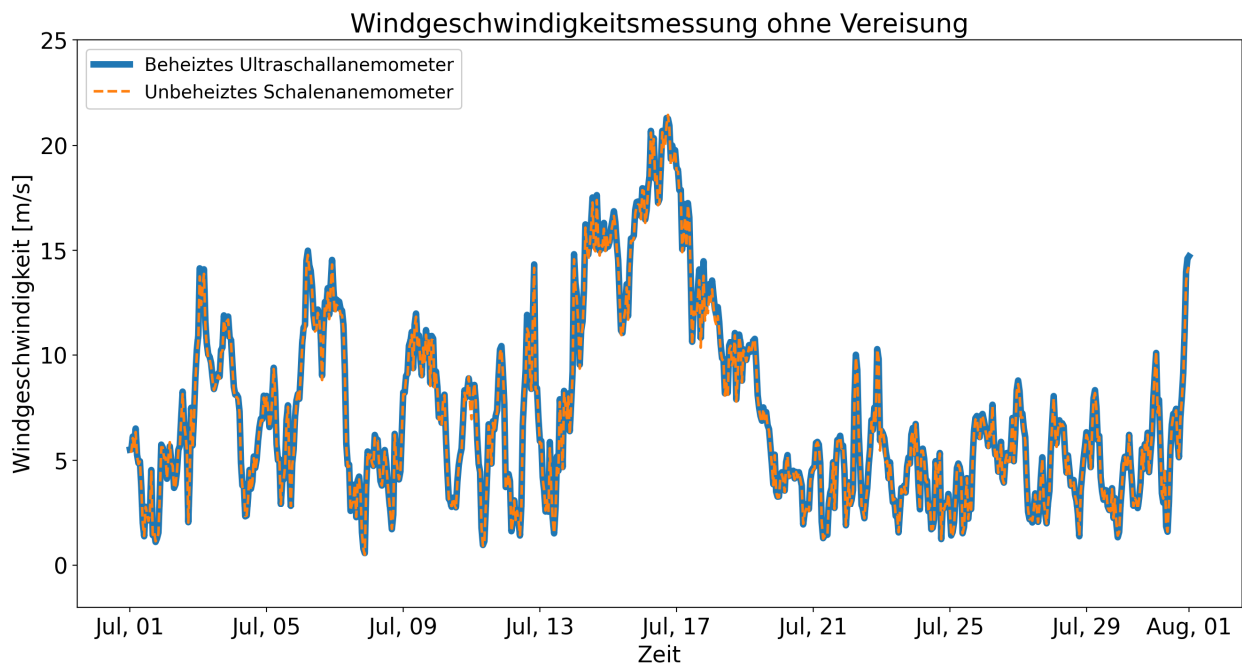


Abbildung 1: Vergleich der vom Schalen- und Ultraschallanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten im Sommer (N = 744 Stundenmittelwerte)

Im Vergleich stellt Abbildung 2 die Vereisungssituation bzw. die von den beiden Anemometer 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 abermals, wie stark eine Transferfunktion davon abhängt, mittels welcher Methode die Anemometer-Vereisung eingangsmäßig definiert wird.

Es sei dabei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellten Windgeschwindigkeitsdaten um Stundenmittelwerte handelt. Dementsprechend war das Schalenanemometer eine Stunde lang durchgehend komplett vereist bzw. unbeweglich um auch im Mittel aller sechs 10-Minuten-Intervalle noch 0 m/s ausweisen zu können. Zudem wurden die Zeitpunkte mit Windgeschwindigkeiten < 4 m/s in beiden Abbildungen noch nicht aus dem Datensatz entfernt. Für die in weiterer Folge durchgeführten Auswertungen wurde auf die 10-Minuten-Daten zurückgegriffen, um in höherer Auflösung zu arbeiten.

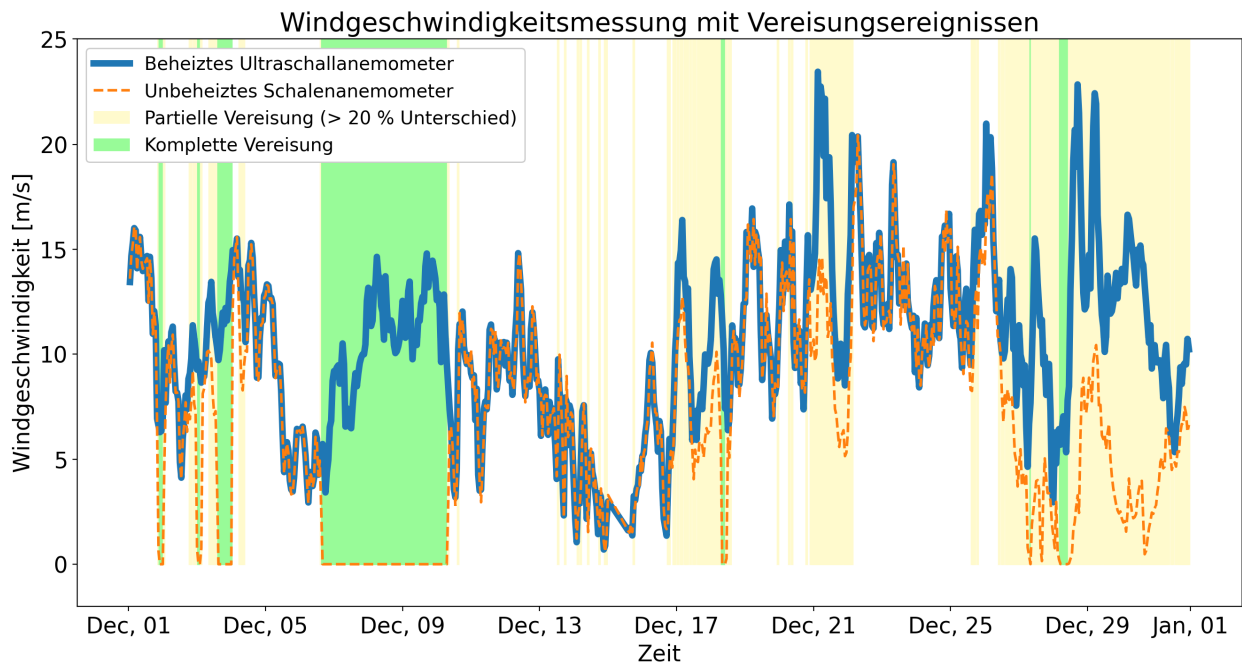


Abbildung 2: Vergleich der vom Schalen- und Ultraschallanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten im Winter (N = 744 Stundenmittelwerte)

3.2. Vergleich Anemometer- und WKA-Vereisung

Das Vereisungsgeschehen an den drei Flachlandstandorten ist in Abbildung 3 dargestellt, jenes am Standort 4 in Abbildung 4. Dargestellt sind alle Vereisungsperioden an den Windkraftanlagen und den entsprechenden Schalenanemometern in chronologischer Reihenfolge. Zeitpunkte ohne Vereisung sowie Zeitpunkte mit Windgeschwindigkeiten < 4 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 auf. 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.

3.2.1. Statistische Auswertung

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 – 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. Um den Einfluss des Temperaturverlaufs auf diesen Wert zu verringern wurde der untersuchte Datensatz dafür nur auf jene Zeiträume mit Temperaturen unter 2 °C beschränkt. 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. Die ersten Ergebnisse lassen einen Transferfaktor zwischen 0.99 und 1.13 erwarten, was bedeutet, dass bei einer kompletten Vereisung des Schalenanemometers von 100 Stunden zwischen 99 und 113 Stunden Vereisungstillstände an der WKA auftreten. Wie beschrieben, können diese Werte allerdings nur als erste Orientierungshilfe dienen und benötigen genauere Validierung. Überblickshaft sind in Tabelle 1 die Vereisungszeiträume und Häufigkeiten zu sehen, während Tabelle 2 die Resultate der statistischen Auswertungen zeigt.

Standort	Nur Anemometer vereist		Nur WKA vereist		Anemometer & WKA vereist		Gesamt	
	Dauer [Std]	Eventanzahl	Dauer [Std]	Eventanzahl	Dauer [Std]	Eventanzahl	Dauer [Std]	Eventanzahl
1	251	45	377	24	231	11	859	80
2	69	1	18	3	8	3	95	7
3	120	1	40	2	55	4	215	7
$\sum_{\text{Flachland}}$	440	47	435	29	294	18	1169	94
4	611	45	765	43	505	46	1881	134
\sum_{gesamt}	1491	139	1635	101	1093	82	4219	322

Tabelle 1: Dauer & Häufigkeit von Anemometer- und WKA-Vereisungen. Die Eventanzahl beschreibt in wie vielen Eventperioden die Vereisungsart (nur Anemometer / nur WKA / beides vereist) mindestens einmal auftrat.

Standort	Transferfaktor f_T	χ^2 [p – Wert]	Odds Ratio
1	1.26	~ 0.0	4
2	0.34	~ 0.0	9
3	0.59	~ 0.0	11
$\sum_{\text{Flachland}}$	0.99	~ 0.0	6.2
4	1.13	~ 0.0	3.5
\sum_{gesamt}	1.08	~ 0.0	4.5

Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Auswertungen. Für die Chi-Quadrat-Tests wurden die Wintermonate in ihrer Gesamtheit betrachtet, für die Odds-Ratio wurden nur Zeitpunkte mit Temperaturen unter 2 °C betrachtet.

3.2.2. Logistisches Regressionsmodell

Tabelle 4 zeigt die durchschnittlichen Temperatur- und Luftfeuchtwerte bei Vereisungen am Schalenanemometer und an der Windkraftanlage. Tabelle 3 stellt die im Zuge der Evaluierung des logistischen Regressionsmodells berechneten Leistungsmetriken dar. Ein theoretisches, perfektes Vorhersagemodell würde bei allen Metriken den Wert 1 erzielen. Werte von 0.5 würden bedeuten, dass die Hälfte der Werte korrekt prognostiziert wurden. In unserem Fall liegen die Werte je nach Parameter zwischen 0.74 und 0.84, was als moderates Ergebnis interpretiert werden kann. Die Möglichkeit das Vereisungsgeschehen an WKA basierend auf den an Schalenanemometern auftretenden Vereisungsereignissen quantitativ präzise vorherzusagen kann somit auch anhand dieser Metriken nicht eindeutig bestätigt werden.

	Temperatur		Luftfeuchtigkeit	
	Flachland	Alpin	Flachland	Alpin
Nur Anemometer	- 1.3 °C	- 7.0 °C	89 %	98 %
Nur WKA	- 0.1 °C	- 4.7 °C	89 %	94 %
Beides vereist	- 0.4 °C	- 6.0 °C	97 %	99 %

Tabelle 3: Durchschnittliche Klimabedingungen beim Auftreten von Vereisungen

Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
0.74	0.84	0.74	0.78

Tabelle 4: Leistungsmetriken des logistischen Regressionsmodells

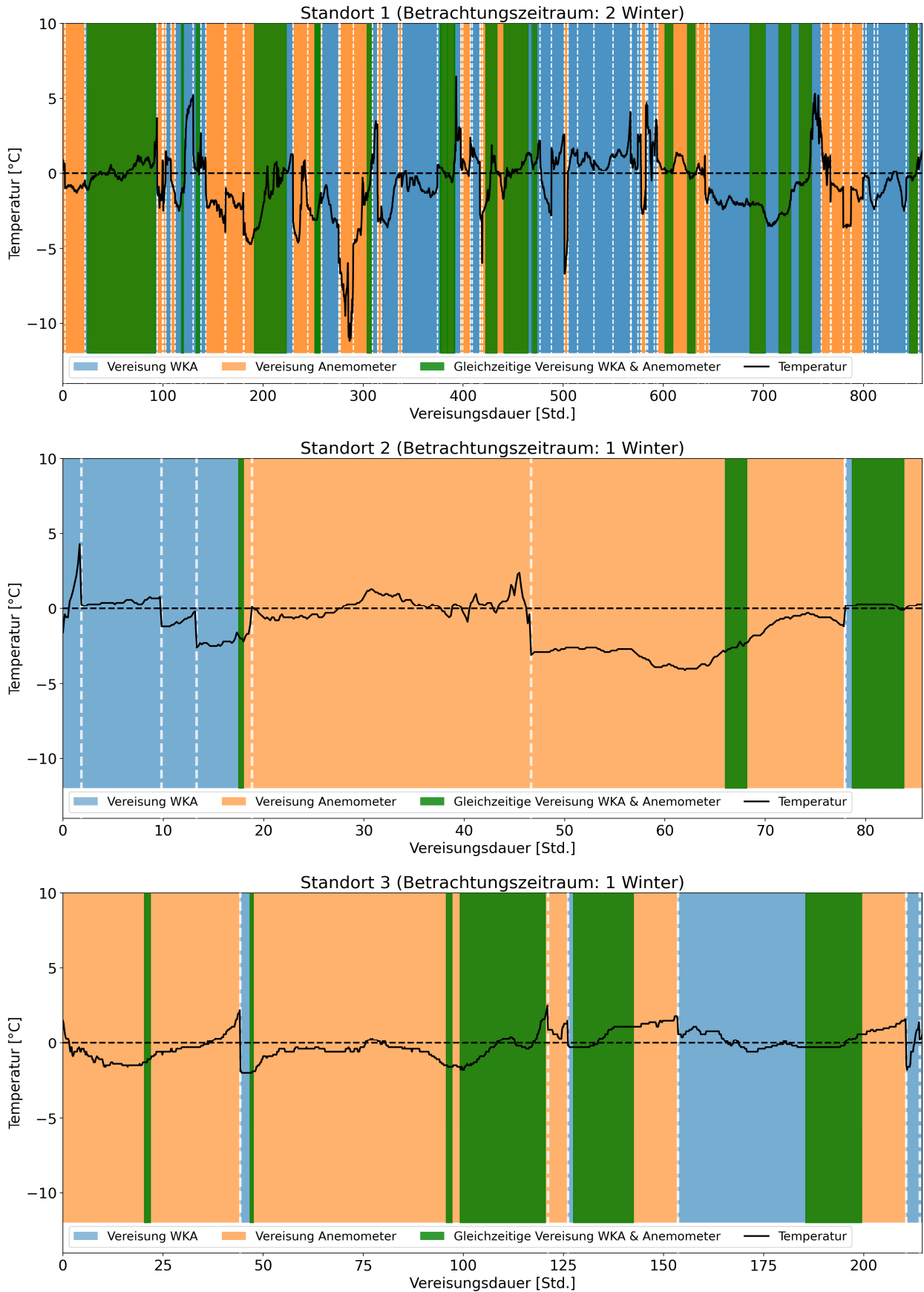


Abbildung 3: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen an den Standorten 1-3. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses.

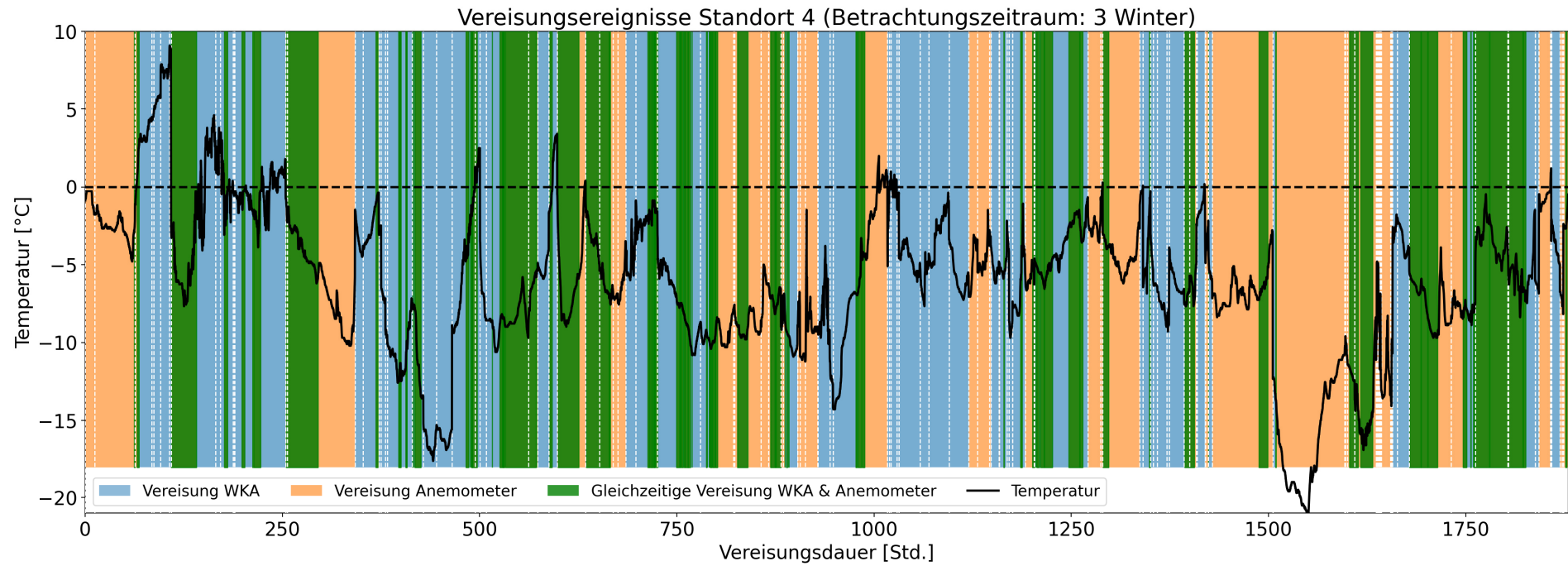


Abbildung 4: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 4. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsereignisses.

4. Zusammenfassung und Fazit

Auf den ersten Blick zeigen die drei Flachstandorte zusammengefasst ein ähnliches Verhalten wie der Alpinstandort. Die zeitlichen Gesamtumfänge von WKA-Stillstandzeiten und von Anemometer-Vereisungsdauern stimmen mit einem Verhältnis von 0.99, bzw. 1.13, sehr gut überein. Bei einer detaillierten Betrachtung der einzelnen Vereisungsereignisse wird allerdings klar, dass in vielen Fällen die WKA-Stillstandzeiten nur teilweise mit der Anemometer-Vereisung überlappen. Eine direkte Anwendung der ermittelten Verhältniszahlen auf einzelnen Vereisungsperioden und auf spezifische Anlagen wäre daher eine Überinterpretation der statistisch ermittelten Verhältnisse und würde zu irreführenden Ergebnissen führen.

In der statistischen Auswertung zeichnen alle verwendeten Analysemethoden ein ähnliches Bild: Es bestätigt sich zweifellos der vermutete und physikalisch intuitive Zusammenhang zwischen den Variablen „Anemometer-Vereisung“ und „WKA-Vereisung“. 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. Auch das logistische Regressionsmodell lässt über letzteres keine valide Aussage zu, ermöglicht es aber die Einflussparameter Temperatur und Feuchte besser miteinzubeziehen.

Für eine Umsetzung einer zeitaufgelösten Transferfunktion zwischen Anemometer- und WKA-Vereisung ist vermutlich eine engere und angepasste Konstellation von Windmessungen und WKA-Standorten notwendig. Die Betrachtung mehrerer WKA einer Region in Kombination mit der Betrachtung mehrerer in der Nähe befindlicher Schalenanemometer dahingehend wertvolle Informationen liefern. Dies würde es ermöglichen, Rückschlüsse darüber zu ziehen, ob mehrere Anemometer, bzw. WKA, bei einheitlichen Standortbedingungen ein ähnliches Vereisungsverhalten (eine niedrige Intravarianz) aufweisen. Zur Etablierung einer zuverlässigen zeitaufgelösten Transferfunktion wäre dies ein wesentlicher Schritt. Darauf aufbauend sollte dann geprüft werden, ob sich diese Schlussfolgerungen auch auf andere Standorte in anderen Regionen übertragen lassen.

Verbesserungen lassen sich darüber hinaus möglicherweise auch durch Anpassung und Optimierung der Definition von „vereisten“ Schalenanemometern erzielen. In der gegenständlichen Untersuchung wurden bspw. nur Zeiträume mit kompletter Vereisung als Vereisungsperioden des Anemometers gewertet. Es könnte aber auch sein, dass eine Definition basierend auf partiellen Vereisungszuständen besser geeignet ist. Auch der Umgang mit den Betriebsdaten der WKA sollte konsistent erfolgen, um jeweils gleichermaßen mit Wartungsarbeiten oder Windmangelperioden während Vereisungszeiträumen umzugehen. Ein weiterer ganz wesentlicher Punkt, ist die spezifische Sensitivität der auf den WKA verbauten Vereisungssensoren, die ja nach Messprinzip, stark unterschiedliche Charakteristiken aufweisen können.

Unabhängig von diesen Einschränkungen in Hinsicht auf eine zeitlich aufgelöste Transferfunktion, 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. Wenn, beispielsweise für eine Ertragsabschätzung eines geplanten Windparks, der Umfang der Vereisungsverluste in der Energieproduktion bewertet werden muss, dann geschieht das, mangels anderer Informationen, im

Regelfall anhand der Zeiträume mit Anemometervereisung an der lokalen Windmessung. Die sehr gute Übereinstimmung von Anemometer- und WKS-Vereisung im hier betrachteten Ensemble rechtfertigt diese Praxis. Die geringen Detailabweichungen und begrenzte Gleichzeitigkeit spielen hierbei keine Rolle, eine zuverlässige Abschätzung der Größenordnung der Vereisungszeiträume ist durchaus ausreichend. Dasselbe gilt für Bewertungen der Vereisungsintensität für die Erstellung von Eisfall-Risikogutachten.

Ungeachtet dessen, wäre eine breitere Datenbasis mit jeweils mehreren Windmessungen und WKA aus verschiedenen Regionen für die Angabe einer Bandbreite des Transferfaktors (als mittlere Verhältniszahl) erstrebenswert.

5. Anhang

Code-Snippet zur Berechnung und Validierung des logistischen Regressionsmodells:

1. Import der benötigten Funktionen

```
import pandas

from sklearn.model_selection import train_test_split

from sklearn.linear_model import LogisticRegression

from sklearn.metrics import accuracy_score, precision_score, recall_score,
f1_score
```

2. Aufteilung des Datensatzes (df) in Trainings- und Test-Set

```
X = df[['Anemometervereisung', 'Temperatur', 'Feuchte']].astype(float)
y = df['WKA-Vereisung'].astype(int)
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3,
random_state=42)
```

3. Trainieren des logistischen Regressionsmodell anhand des Trainings-Sets

```
model = LogisticRegression()
model.fit(X_train, y_train)
```

4. Evaluierung des Modells anhand des Test-Sets

```
y_pred = model.predict(X_test)
```

5. Berechnung von Accuracy, Precision, Recall & F1 Score

```
accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
precision = precision_score(y_test, y_pred)
recall = recall_score(y_test, y_pred)
f1 = f1_score(y_test, y_pred)
```

6. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der vom Schalen- und Ultraschallanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten im Sommer (N = 744 Stundenmittelwerte)	11
Abbildung 2: Vergleich der vom Schalen- und Ultraschallanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten im Winter (N = 744 Stundenmittelwerte).....	12
Abbildung 3: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen an den Standorten 1-3. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsevents.....	17
Abbildung 4: Vereisungsperioden von Schalenanemometern und Windkraftanlagen am Standort 4. Die weißen Linien zeigen den Beginn eines neuen Vereisungsevents.....	18
Tabelle 1: Dauer & Häufigkeit von Anemometer- und WKA-Vereisungen. Die Eventanzahl beschreibt in wie vielen Eventperioden die Vereisungsart (nur Anemometer / nur WKA / beides vereist) mindestens einmal auftrat.	15
Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Auswertungen. Für die Chi-Quadrat-Tests wurden die Wintermonate in ihrer Gesamtheit betrachtet, für die Odds-Ratio wurden nur Zeitpunkte mit Temperaturen unter 2 °C betrachtet.....	15
Tabelle 3: Durchschnittliche Klimabedingungen beim Auftreten von Vereisungen.....	16
Tabelle 4: Leistungsmetriken des logistischen Regressionsmodells.....	16