

MASTER-ARBEIT

Studie zum Einfluss der Wetterdaten bei Vereisungsbedingungen auf das Ergebnis einer Risikobeurteilung von Eisabfall bei Windenergieanlagen



Erstellt für Leuphana Universität Lüneburg
Fakultät Nachhaltigkeit – Institut für Ökologie
TÜV NORD SysTec GmbH & Co.KG
Gruppe Wind Standortgutachten

Erstellt von Felix Albert Storck
Anschrift Waidmannstr. 39, 22769 Hamburg
E-Mail felix.storck@gmx.de
Matrikelnr. 3006960
Studiengang Nachhaltigkeitswissenschaften (M.Sc.)

Erstprüfer Prof. Dr. Henrik von Wehrden, Leuphana Universität Lüneburg
Zweitprüfer Dr. Jan Hauschild, TÜV NORD (Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg)

Zusammenfassung

Mit der immer größeren Bedeutung der Windenergie in Deutschland werden windreiche Standorte an Land immer knapper. Immer öfter finden sich deshalb Windenergieanlagen in unmittelbarer Umgebung von Straßen, Parkplätzen, auf Betriebsgeländen oder anderen genutzten Flächen. Im Winter erhöht sich dadurch die Gefahr, dass durch herabfallende Eisstücke Personen und Objekte geschädigt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Frage beantwortet, wie sich die Windbedingungen bei Eisansatz gegenüber den Ganzjahresdaten verändern. Zur Untersuchung dieser Frage wurden, über ganz Deutschland verteilt, Daten von 30 Wetterstationen ausgewertet. Die Analyse zeigt, dass die Windgeschwindigkeit unter Vereisungsbedingungen geringer ist als die mittlere Ganzjahreswindgeschwindigkeit und die Hauptwindrichtung unter Vereisungsbedingungen stark von der Ganzjahreshauptwindrichtung abweichen kann. Die Annahme der Ganzjahreswindbedingung erwies sich im Fallbeispiel als konservativ. Durch die Berücksichtigung der Windbedingungen unter Vereisungsbedingungen, bei der Risikobeurteilung eines Standortes, konnten jedoch wesentlich präzisere Ergebnisse erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	12
1.1	RELEVANZ DER ARBEIT	12
1.2	FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG.....	13
1.3	AUFBAU DER ARBEIT (GLIEDERUNG).....	14
2	GRUNDLAGEN UND THEORIE.....	15
2.1	DATENGRUNDLAGE	15
2.2	EISANSATZ AN WINDENERGIEANLAGEN	16
2.3	TEMPERATURGRADIENT	20
2.4	PARAMETERSCHÄTZUNG	20
2.4.1	<i>Weibull-Verteilung</i>	21
2.4.2	<i>Maximum-Likelihood-Methode (MLM)</i>	23
3	AUSWERTUNG DER DATEN FÜR EINEN BEISPIELSTANDORT	24
3.1	BESCHREIBUNG DES BEISPIELSTANDORTS BERLIN SCHÖNEFELD	25
3.1.1	<i>Beschreibung der Wetterstation Berlin Schönefeld</i>	26
3.2	DARSTELLUNG DER AUSWERTUNG FÜR DEN STANDORT BERLIN-SCHÖNEFELD	27
3.2.1	<i>Beschreibung der Daten</i>	27
3.2.2	<i>Szenario 1: Auswertung der Ganzjahresdaten</i>	29
3.2.3	<i>Szenario 2: Auswertung der Daten bei möglicher Vereisung</i>	35
3.2.4	<i>Szenario 3: Auswertung der Daten bei konkreten Vereisungsbedingungen und möglichem Eisnebel</i>	42
3.2.5	<i>Szenario 4: Auswertung der Daten bei konkreten Vereisungsbedingungen</i>	50
3.2.6	<i>Szenario 5: Auswertung der Daten bei Wetterbedingungen, unter denen konkrete Vereisung festgestellt wurde (Szenario 4)</i>	57
3.3	VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN SZENARIEN	64
3.4	DISKUSSION DER ERGEBNISSE AM BEISPIELSTANDORT.....	72
4	DARSTELLUNG DER GESAMTERGEBNISSE.....	77
5	FALLBEISPIEL ZUR RISIKOBEURTEILUNG	91
5.1	BESCHREIBUNG DES FALLBEISPIELS	91
5.2	BERECHNUNG DER GEFÄHRDUNG UNTER ANNAHME DER GANZJAHRESSTATISTIK (SZENARIO 1)	95

5.3	BERECHNUNG DER GEFÄHRDUNG UNTER ANNAHME DER WINDVERHÄLTNISSE DER MÖGLICHEN VEREISUNG AUF NABENHÖHE (SZENARIO 2.1)	96
5.4	BERECHNUNG DER GEFÄHRDUNG UNTER ANNAHME DER WINDVERHÄLTNISSE BEI KONKRETER VEREISUNG UND NEBELFROSTABLAGERUNGEN (SZENARIO 3)	98
5.5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	100
6	FAZIT	102
7	LITERATURANGABEN	105
8	ANHANG	108
8.1	ÜBERSICHTSLISTE DER WETTERERSCHENUNGEN.....	108
8.2	ERKLÄRUNG DES DWD ZUM BEREITGESTELLTEN DATENSATZ.....	110
8.3	BEISPIELHAFTER DATENSATZ DES DWD FÜR DEN STANDORT BERLIN SCHÖNEFELD VOM 08.01.2002 00:00H BIS ZUM 10.01.2002 23:00H.....	110
9	ÜBERSICHTSTABELLE DER ERGEBNISSE AN ALLEN STANDORTEN FÜR SZENARIO 1,2 UND 3	112
10	DANKSAGUNG	119
11	ERKLÄRUNG	120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Quelle Titelbild: <i>iea (2009): Wind Energy Projects In Cold Climates (Photo: Kent Larsson) I</i>	
Abbildung 2:	Beispiele für Raueis (links) und Glatteis (rechts) (Seifert & Tammelin 1996)	18
Abbildung 3:	Meteorologische und instrumentelle Vereisung (Meteotest: Cattin & Koller 2011).....	18
Abbildung 4:	Meteorologische (blau) und instrumentelle Vereisung (rot), Temperatur (gelb), rel. Luftfeuchtigkeit (orange) und Windgeschwindigkeit (grün) über 72 Stunden am Standort Berlin-Schönefeld.....	19
Abbildung 5:	Summen- und relative Häufigkeit sowie Median und Erwartungswert einer beispielhaften Weibull-Verteilung	23
Abbildung 6:	Östliches Halbpanorama am Standort (DWD 2008)	26
Abbildung 7:	Westliches Halbpanorama am Standort (DWD 2008)	26
Abbildung 8:	Ausschnitt der näheren Umgebung des Standorts (roter Punkt) (DWD 2008)	27
Abbildung 9:	Windrose der Gesamtjahresdaten	29
Abbildung 10:	Weibull-Verteilung der Gesamtjahresdaten über alle Sektoren	30
Abbildung 11:	Mittlere Windgeschwindigkeiten je Sektor	30

Abbildung 12:	Relative Häufigkeit der verschiedenen Temperaturen der Gesamtjahresdaten	32
Abbildung 13:	Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit der Gesamtjahresdaten.....	32
Abbildung 14:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur	33
Abbildung 15:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit	34
Abbildung 16:	Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit	34
Abbildung 17:	Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit	35
Abbildung 18:	Windrose bei möglicher Vereisung.....	36
Abbildung 19:	Weibull-Verteilung bei möglicher Vereisung.....	37
Abbildung 20:	Mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren bei möglicher Vereisung	37
Abbildung 21:	Relative Häufigkeit der Temperaturen bei möglicher Vereisung	39
Abbildung 22:	Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei möglicher Vereisung.....	39
Abbildung 23:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei möglicher Vereisung	40
Abbildung 24:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit	40
Abbildung 25:	Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit	41
Abbildung 26:	Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei möglicher Vereisung	41
Abbildung 27:	Windrose bei konkreter Vereisung mit Eisnebel	43
Abbildung 28:	Weibull-Verteilung bei konkreter Vereisung mit Eisnebel	44
Abbildung 29:	Mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren bei konkreter Vereisung mit Eisnebel.....	44
Abbildung 30:	Relative Häufigkeit der Temperaturen bei konkreter Vereisung mit Eisnebel.....	46
Abbildung 31:	Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung mit Eisnebel	46
Abbildung 32:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei konkreter Vereisung mit Eisnebel.....	47
Abbildung 33:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit	48
Abbildung 34:	Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit	48
Abbildung 35:	Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung mit Eisnebel	49
Abbildung 36:	Windrose bei konkreter Vereisung	51
Abbildung 37:	Weibull-Verteilung bei konkreter Vereisung	51

Abbildung 38:	Mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren bei konkreter Vereisung	52
Abbildung 39:	Relative Häufigkeit der Temperaturen bei konkreter Vereisung.....	54
Abbildung 40:	Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung	54
Abbildung 41:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei konkreter Vereisung.....	55
Abbildung 42:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit	55
Abbildung 43:	Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit	56
Abbildung 44:	Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung	56
Abbildung 45:	Windrose Wetterbedingungen bei konkreter Vereisung	58
Abbildung 46:	Weibull-Verteilung bei Wetterbedingungen bei konkreter Vereisung.....	59
Abbildung 47:	Mittlere Windgeschwindigkeit pro Sektor bei konkreter Vereisung	59
Abbildung 48:	Relative Häufigkeit der Temperatur bei konkreter Vereisung.....	61
Abbildung 49:	Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung	61
Abbildung 50:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei Wetterbedingungen der konkreter Vereisung	62
Abbildung 51:	Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit	62
Abbildung 52:	Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit	63
Abbildung 53:	Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei Wetterbedingungen bei konkreter Vereisung.....	63
Abbildung 54:	Windrosen aller Szenarien im Vergleich (Szenario 1 (grün); 2 (blau); 3 (rot); 4 (orange); 5 (türkis)	65
Abbildung 55:	Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 1	67
Abbildung 56:	Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 2	67
Abbildung 57:	Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 3	67
Abbildung 58:	Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 4	67
Abbildung 59:	Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 5	67
Abbildung 60:	Weibull-Verteilungen aller Szenarien (Szenario 1 (grün); 2 (blau); 3 (rot); 4 (orange); 5 (türkis)	69
Abbildung 61:	Windgeschwindigkeiten aller Szenarien in den einzelnen Sektoren (Szenario 1 (grün); 2 (blau); 3 (rot); 4 (orange); 5 (türkis)	70

Abbildung 62:	Windrose Szenario 1 (grün), 2 (blau), 3 (rot)	75
Abbildung 63:	Vektorielle mittlere Windgeschwindigkeit Szenario 1 (grün), 2 (blau), 3 (rot)	75
Abbildung 64:	Weibull-Verteilungen der Szenarien 1 (grün), 2 (blau), 3 (rot)	75
Abbildung 65:	Hauptwindrichtungen an allen Standorten	89
Abbildung 66:	Vereisungstage und Tage durchgehender Vereisung an allen Standorten	90
Abbildung 67:	Lageplan des Standorts Schönbetrieb (Hauschild et al. 2014)	92
Abbildung 68:	Simulierte Treffer für Szenario 1	95
Abbildung 69:	Gefährdungsbereiche für Szenario 1	96
Abbildung 70:	Simulierte Treffer für Szenario 2.1	97
Abbildung 71:	Gefährdungsbereiche für Szenario 2.1	98
Abbildung 72:	Simulierte Treffer für Szenario 3	99
Abbildung 73:	Gefährdungsbereiche für Szenario 3	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl der ausgewerteten Daten	28
Tabelle 2:	Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren	31
Tabelle 3:	Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren	38
Tabelle 4:	Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren	42
Tabelle 5:	Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren	45
Tabelle 6:	Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren	50
Tabelle 7:	Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren	53
Tabelle 8:	Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren bei konkreter Vereisung	57
Tabelle 9:	Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren	60
Tabelle 10:	Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren	64
Tabelle 11:	Übersicht der Hauptwindrichtung und der 1. und 2. Nebenwindrichtung für alle Szenarien	66

<i>Tabelle 12:</i>	<i>Weibullwerte, mittlere Windgeschwindigkeit und 99,9%-Quantil aller Szenarien</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 13:</i>	<i>Häufigkeiten mit denen Werte in einem bestimmten Sektor liegen für alle Szenarien</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 14:</i>	<i>Übersicht der maximalen und minimalen Temperatur und Luftfeuchtigkeit für alle Szenarien</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 15:</i>	<i>Vergleich aller Parameter von Szenario 1, 2, 3</i>	<i>74</i>
<i>Tabelle 16:</i>	<i>Auswertungstabelle aller ausgewählten Standorte.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabelle 17:</i>	<i>Windbedingungen und Vereisungstage sowie Tage mit durchgehender Vereisung am Beispielstandort für Szenario 1 (grün), Szenario 2.1 (violett) und Szenario 3 (rot)</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 18:</i>	<i>Mittlere Trefferhäufigkeit pro m² und Eisabfallereignis.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 19:</i>	<i>Treffer der Gefährdungsobjekte in den unterschiedlichen Szenarien</i>	<i>102</i>

Abkürzungsverzeichnis

Kurzform.....	Bedeutung (Einheit)
A.....	Skalierungsparameter der Weibullverteilung (m/s)
BOKU-Met	Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur in Wien
BWE	Bundesverband Windenergie e.V.
DEWI.....	Deutsches Windenergie Institut
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIBt.....	Deutsches Institut für Bautechnik
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWIA	Danish Wind Industry Association
<i>e</i>	Eulersche Zahl
$F(v)$	Verteilungsfunktion der Weibullverteilung
$f(v)$	Dichtefunktion der Weibullverteilung
FMI.....	Finnish Meteorological Institute
<i>g</i>	Gravitationskonstante (m/s^2)
H	Häufigkeit
h.....	Relative Häufigkeit (%)
IEC.....	International Electrotechnical Commission
K.....	Kelvin
k	Formparameter der Weibullverteilung
L	Likelihood-Funktion
MLM	Maximum-Likelihood-Methode
r.F.....	Relative Feuchte (relative Luftfeuchtigkeit) (%)
S	Szenario
T	Temperatur (°C)
V.....	Windgeschwindigkeit (m/s)

$V_{(\text{mean})}$ mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)
WASP Wind Atlas Analysis and Application Programm
WEA Windenergieanlage(n)
WECO Wind Energy Production in Cold Climate
WMO World Meteorological Organisation
 θ Unbekannter Parameter
 $\hat{\theta}$ Schätzwert

N Nord
E Ost
S Süd
W West

1 Einleitung

1.1 Relevanz der Arbeit

Vor dem Hintergrund, dass Windenergieanlagen (WEA) zunehmend im Binnenland geplant werden, werden auch Standorte in der Nähe zu bebauten Flächen oder Waldgebieten immer interessanter und somit Anlagen verstärkt auch in Bereichen gebaut werden, in denen es zu Gefährdungen durch die WEA kommen kann. Um potentielle Gefahren einschätzen und bewerten zu können, wird daher vermehrt eine Risikobeurteilung des Standortes notwendig. So kann es durch Brand, Abbruch von Rotorblattteilen, Umkippen oder Eisansatz an der Anlage zu Gefährdungen für die Umgebung (Menschen, Tiere, Verkehr, Bauwerke, Schutzgebiete und der Anlage selbst) kommen (REpower Systems 2011).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem speziellen Fall von Eisansatz – insbesondere mit dem Ereignis Eisabfall – da Eisstücke, die aus großer Höhe mit entsprechend hoher Beschleunigung herunterfallen, für Personen oder Schutzobjekte ein ernst zu nehmendes Risiko darstellen können.

Bei einer Windenergieanlage, bei der es im Betrieb zum Eisansatz kommt, kann dies zu Eisabwurf führen – d.h., dass Schnee oder Eis von den drehenden Rotorblättern abgeworfen und durch die drehende Rotorbewegung in eine bestimmte Richtung beschleunigt wird. Der Stillstand einer vereisten Anlage kann wiederum den Eisabfall zur Folge haben. Wenn der Radius des Rotorblatts auf die Fläche um die Anlage herum projiziert wird, entsteht in diesem Radius eine Gefährdung durch Eisabfall. Bestimmte Windverhältnisse haben jedoch zur Folge, dass herabfallende Eisstücke in einem weitaus größeren Radius zu einer Gefährdung führen können. Denn herabfallende Eisstücke von stehenden bzw. trudelnden Rotorblättern können bei starkem Wind aus entsprechender Höhe weit von der WEA abgetrieben werden. Im Bezug auf Eisabfall unterscheiden sich abgeschaltete WEA, an denen es nach jeder Vereisungswetterlage mit einsetzendem Tauwetter oder durch Beheizung der Rotorblätter zu Eisabfall kommt, nicht wesentlich von anderen hohen Objekten, wie z.B. Strommasten, Telekommunikationsmasten oder Brücken.

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit sollen die Bedingungen für Eisabfall und dessen Auswirkungen auf eine Risikobeurteilung näher untersucht werden. Hierzu muss zunächst geklärt werden, wann Vereisungsbedingungen vorliegen, wie diese definiert werden können und auf welche Art und Weise Vereisungsereignisse aus den zur Verfügung stehenden Daten abgeleitet werden können. Des Weiteren muss ermittelt werden, welche Wetterbedingungen Einfluss auf die Vereisung haben und welche sich auf das Risiko bei Eisabfall auswirken, um anschließend bestimmen zu können, wie diese unterschiedlichen Wetterbedingungen zusammenhängen und sich auf das Ergebnis einer Risikobeurteilung von Eisabfall bei Windenergieanlagen auswirken.

Bei einer Risikobeurteilung für das Ereignis Eisabfall, werden die Flugweiten von Eisobjekten auf Grundlage der mittleren Ganzjahreswindbedingungen simuliert. Unter der Annahme, dass sich die Windbedingungen unter Eisansatz von den über das ganze Jahr gemittelten Windbedingungen unterscheiden, soll der Einfluss der Windverhältnisse unter Eisansatzbedingungen untersucht werden. Hierfür sollen zunächst Auswahlkriterien für Windverhältnisse unter Vereisungsbedingungen definiert werden. Weiter werden im Rahmen dieser Analyse die Windbedingungen verschiedener, über Deutschland verteilter Wetterstationen untersucht und der Unterschied zwischen den Ganzjahreswindbedingungen und den Windbedingungen unter Vereisungsbedingungen bewertet.

Diese Arbeit beschäftigt sich folglich mit der Frage, **welchen Einfluss die Wetterdaten bei Vereisungsbedingungen auf das Ergebnis einer Risikobeurteilung von Eisabfall bei Windenergieanlagen haben**. Dazu werden Ganzjahreswetterdaten und Wetterdaten unter Vereisungsbedingungen ausgewertet und verglichen.

Es soll somit zur Analyse folgender Forschungsfragen beigetragen werden:

1. Welche Kriterien müssen für Vereisungsereignisse definiert werden, um sie aus den zur Verfügung stehenden Daten abzuleiten?
2. Wie unterscheiden sich die Windverhältnisse unter Vereisungsbedingungen von den Ganzjahreswindbedingungen?
3. Wie wirken sich unterschiedliche Windbedingungen auf das Ergebnis einer Risikobeurteilung aus?

1.3 Aufbau der Arbeit (Gliederung)

Zur Bearbeitung der vorliegenden Fragestellung wird die Arbeit in fünf Schwerpunkte unterteilt (Grundlagen und Theorie; Auswertung der Wetterdaten an einem Beispielstandort; Gesamtauswertung; Risikobeurteilung für einen Beispielstandort; Zusammenfassung der Ergebnisse).

In Kapitel 2 wird zunächst der zugrundeliegende Datensatz beschrieben. Des Weiteren werden der theoretische Rahmen und dahingehend die wichtigsten Grundlagen von Eisansatz sowie der Parameterschätzung erläutert.

Kapitel 3 ist der praktischen Arbeit gewidmet. Darin werden die analysierten Daten, anhand eines Beispielstandortes, vorgestellt sowie verschiedene Parameter ausgewertet und dargelegt. Hierzu wird zunächst die Auswahl des Beispielstandortes sowie dieser selbst beschrieben. Weiter werden unterschiedliche Szenarien für verschiedene Möglichkeiten von Eisansatz, anhand der vorliegenden Daten, gebildet und die Wetter- sowie insbesondere die Windverhältnisse für die entsprechenden Szenarien beleuchtet. Anschließend werden die Windbedingungen der unterschiedlichen Szenarien verglichen und die Ergebnisse der Analyse diskutiert.

Der darauf folgende Abschnitt (Kapitel 4) konzentriert sich auf die Auswertung aller Standorte. Hierfür werden die wichtigsten Ergebnisse anschaulich dargestellt und zusammengefasst. Anschließend werden die relevantesten Aspekte verglichen und diskutiert sowie Zusammenhänge zwischen den Gesamtergebnissen und denen am Beispielstandort beleuchtet. Es werden Gemeinsamkeiten und Gegensätze der Ergebnisse am Beispielstandort und der Gesamtauswertung präsentiert und mögliche Schlussfolgerungen abgeleitet.

Kapitel 5 befasst sich mit einer beispielhaften Risikobeurteilung für unterschiedliche Szenarien. Zunächst wird dabei summarisch das Vorgehen der Risikobeurteilung erläutert und anschließend eine Risikobeurteilung für unterschiedliche Szenarien durchgeführt sowie die Ergebnisse verglichen und Auswirkungen beschrieben.

Abschließend werden im Fazit (Kapitel 6) weitere Ansatzpunkte aufgezeigt und die Ergebnisse, unter Berücksichtigung der Grenzen der Arbeit, zusammengefasst.

2 Grundlagen und Theorie

2.1 Datengrundlage

Zur Auswertung der Wetterdaten wurden Daten aus dem hauptamtlichen Stationsnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) angefordert. Dabei war es wichtig, dass die Stationen durchgehend stündliche Wetterdaten melden und ebenfalls Augenbeobachtungen zu Wettererscheinungen (WW-Erscheinungen)¹ vorliegen, da hierbei auch Eisbildung erfasst wird. Es wurden stündliche Daten der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und der WW-Erscheinungen über einen Zeitraum von 2002 bis 2012 von insgesamt 42 Wetterwarten in ganz Deutschland bestellt – vornehmlich von Flugwetterwarten und Klimareferenzstationen, da dort mit 24-stündigen Aufzeichnungen der Augenbeobachtungen zu rechnen ist (mündliche Aussage des DWD).

Insgesamt kamen so über 3,5 Mio. Datensätze zusammen (stündliche Aufzeichnungen von 42 Wetterstationen über maximal 11 Jahre). Diese Daten wurden analysiert und zur Weiterverarbeitung und Auswertung aufbereitet (Daten in ein verarbeitbares Format gebracht, nach Wetterstationen getrennt sowie Fehlerwerte und Zeiträume vollständiger Aufzeichnungen analysiert).

Im Anhang (Nummer 8.3) sind exemplarisch die Eingangsdaten an der Wetterwarte Berlin-Schönefeld für 72 Stunden (vom 8. Januar 2002 bis zum 10. Januar 2002), die zugehörige Erklärung des DWD (Nummer 8.2), sowie eine Übersicht über alle erfassten Wettererscheinungen (Nummer 8.1) dargestellt.

Aus den vorliegenden Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten wurden Windrichtungsverteilungen und windrichtungsabhängige Windgeschwindigkeitsverteilungen ermittelt und zu Windstatistiken für die einzelnen Wetterstationen zusammengefasst.

Die Wetterdaten wurden hinsichtlich der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ausgewertet und die Wettererscheinungen, nach für Eisansatz relevanten Kriterien, analysiert.

¹ In der Meteorologie werden alle in der Atmosphäre oder auf der Erdoberfläche auftretenden, beobachtbaren Wetterphänomene als Wettererscheinung bezeichnet (DWD o.J.)

2.2 Eisansatz an Windenergieanlagen

Eisansatz ist definiert als Vereisung von Strukturen durch Eis- oder Schneeablagerungen an Objekten, die der Atmosphäre ungeschützt ausgesetzt sind. Dies können z.B. Windenergieanlagen, Stromleitungen, meteorologische Instrumente oder Telekommunikationsmasten sein (Meteotest: Cattin & Koller 2011). Dabei gibt es unterschiedliche Formen von Vereisung an Strukturen, die durch verschiedene physikalische Bedingungen auftreten. Vor allem die Temperatur, der Wassergehalt und die Tropfengröße des Wassers in der Luft sind relevante Faktoren für den Eisansatz. Außerdem ist die Dauer der Bedingungen für Eisansatz eine entscheidende Größe (MeteoSchweiz: Fikke et al. 2006).

Prinzipiell kann zwischen zwei unterschiedlichen Formen des Eisansatzes unterschieden werden. Zum einen Eisbildung aus Wolken und Nebel, den sog. Nebelfrostablagerungen (Raureif, Raueis und Klareis), die sich meist beim Gefrieren von Nebel- oder Wolkentröpfchen an vorwiegend vertikalen Flächen mit einer Oberflächentemperatur unter dem Gefrierpunkt bilden. Dabei enthalten Wolken Eiskristalle oder unterkühlte Wassertropfen, welche an kalten Oberflächen sofort gefrieren. Temperatur und Windgeschwindigkeit bedingen, in Abhängigkeit von Tropfengröße und Wassergehalt der Luft, die Art des Eisansatzes (DWD o.J.; Warnecke 1997).

Zur zweiten Form des Eisansatzes kommt es durch Eisbildung aus Niederschlag, wobei es sich vorwiegend um unterkühlten Niederschlag handelt, der beim Auftreffen auf feste Gegenstände sofort gefriert (Nassschnee und Eisregen) (DWD o.J.). Dazu kommt es meistens, wenn die Temperatur der Luft zwischen -10°C und 0°C liegt und die Tropfengröße des unterkühlten Wassers in der Luft groß ist. Die unterschiedlichen Eisansatzarten haben unterschiedliche physikalische Eigenschaften. So unterscheiden sie sich in Farbe, Form und Dichte und entstehen unter unterschiedlichen Bedingungen. Diese werden im Folgenden beschrieben (DWD o.J.; MeteoSchweiz: Fikke et al. 2006; Meteotest: Cattin & Koller 2011):

- Raureif: Raureif oder auch weicher Reif genannt, besteht meist aus kleinen, dünnen Eisnadeln und Eisflocken, welche eine locker haftende und zerbrechliche Schicht auf freiangeströmten Oberflächen bilden. Voraussetzungen sind schwacher Wind, Temperaturen unter -8°C und eine Luftfeuchtigkeit von mehr

als 95%. Die Dichte von Raureif ist abhängig von der Windgeschwindigkeit und beträgt $200\text{-}600\text{ kg/m}^3$.

- Raueis: Raueis oder auch harter Reif genannt, ist in der Regel weiß bis grau und bildet meist kegelförmige Formationen unter Einschluss von Luftbläschen, welche sehr fest anhaften (Abbildung 2). Raueis bildet sich hauptsächlich bei starkem Wind, Temperaturen zwischen -2 und -10°C und Nebel (relative Luftfeuchtigkeit nahe 100%). Die Dichte von Raueis ist abhängig von der Windgeschwindigkeit und beträgt $600\text{-}900\text{ kg/m}^3$.
- Klareis: Klareis entsteht vorwiegend, wenn sich die Oberflächentemperatur einer Struktur nahe 0°C befindet. Dann werden die auftreffenden Wassertropfen aus Wolken oder Nebel auf der Fläche verteilt und gefrieren erst nach und nach. Dabei entstehen sehr fest anhaftende, transparente Eisablagerungen. Klareis bildet sich gewöhnlich bei Temperaturen zwischen 0 und -3°C durch das Anfrieren von Nebeltröpfchen (relative Luftfeuchtigkeit nahe 100%). Die Dichte von Klareis beträgt 900 kg/m^3 .
- Nassschnee: Nasser Schnee fällt bei Temperaturen bis $0,5^\circ\text{C}$ und besteht aus teilweise geschmolzenen Schneeflocken. Diese bleiben an Strukturen haften und können so zu Eisbildung führen, welche eine weiße Farbe aufweist. Die Dichte und Haftkraft ist abhängig von der Geschwindigkeit, mit der der Schnee auf die Oberfläche trifft. Die Dichte von Nassschnee kann zwischen $300\text{-}600\text{ kg/m}^3$ betragen.
- Eisregen: Bei Eisregen handelt es sich um überwiegend aus Eiskörnern bestehendem, fallendem Niederschlag oder unterkühltem Regen. Dieser entsteht typischerweise, wenn Schnee durch eine wärmere Inversionsschicht fällt und dabei auftauht. Diese Art von Niederschlag gefriert beim Auftreffen auf eine Struktur, die eine Oberflächentemperatur unter dem Gefrierpunkt aufweist. Die Dichte von Eisregen beträgt 900 kg/m^3 . Eisregen und Klareis werden oft auch unter dem Begriff Glatteis zusammengefasst, sie sind zwar in ihrer Entstehung unterschiedlich, von der Art aber gleich. Glatteis weist eine transparente Färbung auf, besitzt eine sehr hohe Dichte (900 kg/m^3) und haftet sehr stark an (Abbildung 2).



Abbildung 2: Beispiele für Raueis (links) und Glatteis (rechts) (Seifert & Tammelin 1996)

Auch die Dauer der zu Eisansatz führenden Bedingungen ist ausschlaggebend für den Eisansatz. So kann zwischen der meteorologischen Vereisung und der instrumentellen Vereisung unterschieden werden. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt. Zunächst liegt keine Vereisung vor, ab einem bestimmten Zeitpunkt treten jedoch meteorologische Bedingungen für Eisansatz auf. In diesem Zeitraum sind die oben beschriebenen meteorologischen Bedingungen für Eisansatz gegeben. Nach einer gewissen Verzögerung, der sog. Inkubationszeit, beginnt die instrumentelle Vereisung. Zu diesem Zeitpunkt beginnt das Eiswachstum an den Messinstrumenten oder anderen Strukturen. Die Inkubationszeit ist abhängig von der Oberfläche, Form und Temperatur der Strukturen. Ab einem gewissen Zeitpunkt sind die meteorologischen Bedingungen für Eisansatz nicht mehr gegeben, die Struktur bleibt jedoch weiterhin vereist, bis das Eis vollständig abgetaut oder abgefallen ist. Dies ist die sog. Regenerationszeit (Meteotest: Cattin & Koller 2011).

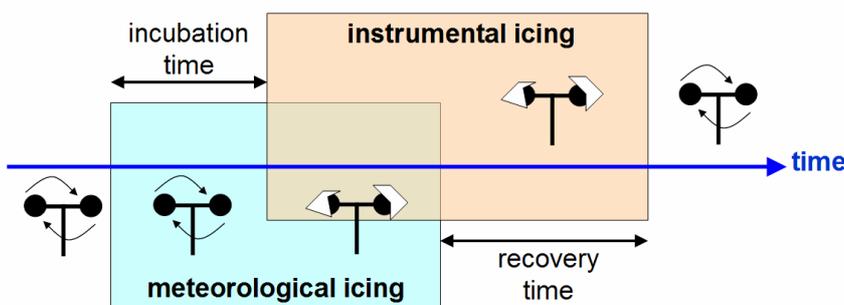


Abbildung 3: Meteorologische und instrumentelle Vereisung (Meteotest: Cattin & Koller 2011)

Als Beispiel, wie die vorliegenden Datensätze des DWD ausgewertet werden können, wurden die Daten bezüglich der meteorologischen und instrumentellen Vereisung exemplarisch für die im Anhang aufgeführten Beispieldaten des Standortes Berlin-Schönefeld (vom 8. Januar 2002 bis zum 10. Januar 2002, 72 Stunden) analysiert. Abbildung 4 zeigt den oben beschriebenen Zusammenhang besonders deutlich. Zunächst liegen Bedingungen für Vereisung (blau) bei einer Temperatur von $0,5^{\circ}\text{C}$ (gelb) und einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 95% (orange) vor (abgeleitet aus Kapitel 2.2). Nach einiger Zeit (Inkubationszeit) kommt es dann zu instrumenteller Vereisung (detektierte Vereisungsereignisse, rot). Diese verschwindet nochmals kurzzeitig (z.B. ein eventuelles Abtauen durch mögliche Sonneneinstrahlung), liegt jedoch insgesamt etwas länger vor als die Bedingungen für Vereisung vorliegen (Regenerationszeit). Die in diesem Zeitraum vorherrschende Windgeschwindigkeit ist grün gekennzeichnet, lässt aber keinen Rückschluss auf die Vereisung zu. Die vorliegenden Daten bestätigen die erläuterte Aussage, bezüglich meteorologischer und instrumenteller Vereisung, für den ausgewerteten Datensatz.

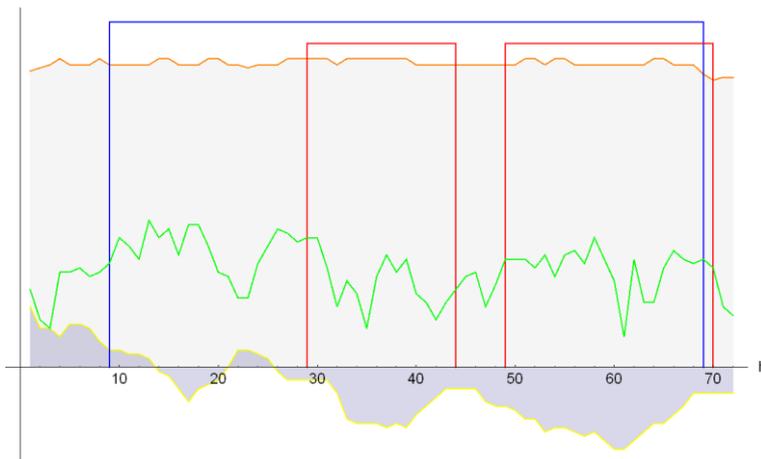


Abbildung 4: Meteorologische (blau) und instrumentelle Vereisung (rot), Temperatur (gelb), rel. Luftfeuchtigkeit (orange) und Windgeschwindigkeit (grün) über 72 Stunden am Standort Berlin-Schönefeld

2.3 Temperaturgradient

Um eine an einer Messstation gemessene Temperatur auf eine bestimmte Höhe (z.B. Nabenhöhe einer WEA) übertragen zu können, wird ein meteorologisches Hilfsmittel benötigt, der sog. Temperaturgradient.

Da es sich bei Luft um ein komprimiertes Medium handelt, ändert sich das Volumen bei einer Druckänderung. Zu einer Volumenexpansion bei sinkendem Druck ist Arbeit erforderlich. Die dazu benötigte Energie wird aus der vorhandenen inneren (thermischen) Energie der Luft genommen und führt dazu, dass sich die Luft abkühlt. Bei einer Kompression durch steigenden Druck wird die dafür aufgewendete Arbeit in innere Energie umgewandelt und die Luft erwärmt sich. In der Atmosphäre steigt mit zunehmender Höhe auch der Druck. Wenn sich Luft nun vertikal bewegt, ändert sich somit ebenfalls die Temperatur. Unter der Voraussetzung, dass zwischen einem bestimmten Luftpaket und der Umgebung kein Wärmeaustausch erfolgt, wird dieser Vorgang adiabatisch genannt (Warnecke 1997).

Unter Berücksichtigung der vertikalen Druckänderung kann die Temperaturänderung eines vertikal bewegten Luftvolumens mit dem trockenadiabatischen Temperaturgradienten beschrieben werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass evtl. Wasserdampf in der Luft vorhanden ist, es aber nicht zu einer Phasenänderung kommt.

Kommt es zu einer Änderung der Höhe des Luftpakets mit Phasenänderung, wird die Temperaturänderung durch den feuchtadiabatischen Temperaturgradienten beschrieben. Dieser ändert sich je nach Ausgangstemperatur. Gewiss kann eine Phasenänderung nicht ausgeschlossen werden, doch der feuchtadiabatische Temperaturgradient liegt mit einer Änderung von maximal $0,965\text{K}/100\text{ m}$ (bei einer Ausgangstemperatur von -50°C) stets unter dem trockenadiabatischen Temperaturgradienten, der immer bei $0,976\text{K}/100\text{ m}$ und demzufolge bei $0,976^\circ\text{C}/100\text{ m}$ liegt (Warnecke 1997).

2.4 Parameterschätzung

Zur Aufstellung eines möglichst adäquaten mathematischen Modells eines realen physischen Systems oder Prozesses kommt den sog. parametrischen Modellen eine besondere Bedeutung zu. Diese werden durch ein System von Gleichungen mit einer Anzahl

unbekannter, zu bestimmender Parameter, die auf Grundlage bekannter Eingangsparmeter des realen Systems ermittelt werden, beschrieben (Diesing & Tischer o.J.).

Um die Verteilung von Messwerten beschreiben zu können, wird in dieser Arbeit eine theoretische Verteilungsfunktion angepasst. Die Verteilungsfunktion ist durch ihre Funktionsparameter eindeutig charakterisiert. Für die Berechnung der Parameter gibt es unterschiedliche Schätzverfahren. Da sich im Bereich der Windmessung die Anpassung einer Weibull-Verteilung als sinnvolle Methode etabliert hat, wird diese auch in dieser Arbeit angewendet und im Folgenden beschrieben.

2.4.1 Weibull-Verteilung

Die Weibull-Verteilung wurde erstmals 1939 zur Beschreibung von Materialermüdung angewendet und erwies sich schnell als gutes Mittel, um Ausfälle von Komponenten zu beschreiben. Überdies erwies sie sich als geeignet, zur Beschreibung von Windverhältnissen (Hartung et al. 2002).

Bei der Planung von WEA ist sehr wichtig die Windverhältnisse vor Ort zu kennen um Anlagen zu optimieren und zu erwartende Energieerträge bestimmen zu können. Aus diesem Grund werden z.B. die Windgeschwindigkeiten über einen gewissen Zeitraum herangezogen. Die statistische Verteilung der Windgeschwindigkeiten ändert sich von Ort zu Ort und hängt von lokalen Klimabedingungen, der Landschaft und der Bodenoberfläche ab. Dabei ist es für die Bewertung eines Standortes nicht ausreichend, nur die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit zu betrachten, da höhere Windgeschwindigkeiten einen größeren Einfluss auf die Energie, die dem Wind entzogen werden kann, haben als niedrige. Daher ist eine gute Kenntnis der Windverteilung an einem Standort die Grundlage für ein erfolgreiches Windenergieprojekt (Hau 2008). Die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit wird mit der Weibull-Verteilung beschrieben, d.h., die tatsächliche Windverteilung wird an eine mathematische Verteilungsfunktion angepasst. Diese zeigt eine Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte. Die Weibull-Verteilung kann sowohl in ihrer Form als auch in ihrem Mittelwert variieren (DWIA o.J.).

Die Summenhäufigkeit der Weibull-Verteilung ergibt sich aus der Formel

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}.$$

Sie gibt an, wie groß der Anteil der Werte ist, die unter einer bestimmten Grenze (Quantil) liegen. Als Beispiel sei hier das 99,9%-Quantil angeführt, welches eine relative Summenhäufigkeit von 99,9% beschreibt und somit aussagt, wie hoch ein Wert x (hier die Windgeschwindigkeit) ist, unter dem 99,9% aller Werte liegen (Hartung et al. 2002).

Durch die Ableitung der Funktion der Summenhäufigkeit nach der Windgeschwindigkeit v ergibt sich die Funktion für die relative Häufigkeit – auch Dichtefunktion genannt zu

$$f(v) = \frac{k}{A} \times \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}.$$

Die Fläche unter der Kurve der Dichtefunktion der Weibull-Verteilung beträgt immer genau 1, d.h., der Wind kann eine beliebige Geschwindigkeit ≥ 0 annehmen (BWE 2013).

Der Formparameter k beschreibt die Breite der Verteilung bzw. wie „spitz“ die Kurve ist. Wenn sich die Windgeschwindigkeiten z.B. immer um einen Wert bewegen, ist k sehr hoch – in diesem Falle liegen relativ konstante Windverhältnisse vor. Schwanken die Windverhältnisse stärker um den Mittelwert, wird dieses durch einen kleineren Wert für k beschrieben. A (m/s) ist der Skalierungsparameter, welcher das gesamte Windniveau beschreibt und proportional zur mittleren Windgeschwindigkeit ist. Ist der A -Parameter gering, ist ebenso die mittlere Windgeschwindigkeit gering. Ist der A -Parameter hoch, liegt auch eine relativ hohe mittlere Windgeschwindigkeit vor (BWE 2013; Hau 2008).

Eine Besonderheit der Weibull-Verteilung ist die Rayleigh-Verteilung. Diese entspricht einer Weibull-Verteilung mit dem Formparameter $k = 2$ (Meyna & Pauli 2010), sie kann als Häufigkeitsverteilung angesetzt werden, wenn nur die mittlere Windgeschwindigkeit bekannt ist. So wird eine „übliche“ Häufigkeitsverteilung unterstellt (Hau 2008).

In Abbildung 5 sind exemplarisch die Summenhäufigkeitsfunktion und Weibull-Funktion für einen k -Parameter von 2,2 und einem A -Parameter von 7,0 m/s sowie der Median und der Erwartungswert der Weibull-Funktion dargestellt.

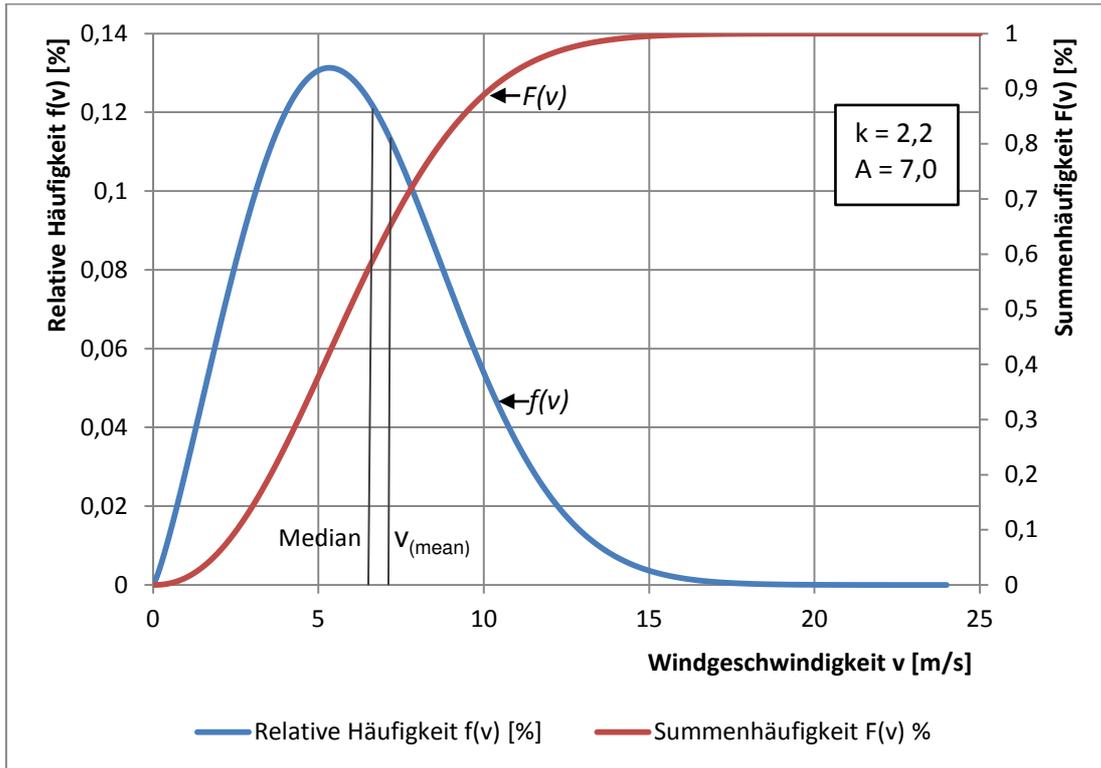


Abbildung 5: Summen- und relative Häufigkeit sowie Median und Erwartungswert einer beispielhaften Weibull-Verteilung

Der Median der Verteilung zeigt an, dass der Wind die Hälfte der Zeit mit weniger als 6,7 m/s wehte und die andere Hälfte der Zeit mit mehr als 6,7 m/s (Abbildung 5). Die mittlere Windgeschwindigkeit ($v_{(mean)}$) ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit am Standort und beträgt in diesem Fall 7 m/s (Abbildung 5). Das liegt daran, dass die Verteilung asymmetrisch ist. Hohe Windgeschwindigkeiten treten verhältnismäßig selten auf, Windgeschwindigkeiten mit ca. 5,5 m/s treten am häufigsten auf, dies ist der Modalwert der Verteilung, der Wert mit der größten Häufigkeit (Meyna & Pauli 2010). Um die mittlere Windgeschwindigkeit (Mittelwert oder auch Erwartungswert (Meyna & Pauli 2010)) zu bestimmen wird jedes Windgeschwindigkeitsintervall mit der Wahrscheinlichkeit, dass genau diese Geschwindigkeit vorliegt, multipliziert und dann aufsummiert (DWIA o.J.; Hau 2008).

2.4.2 Maximum-Likelihood-Methode (MLM)

Die Maximum-Likelihood-Methode ist ein Schätzverfahren für die Ermittlung der A- und k-Parameter der Weibull-Verteilung. Das von R.A. Fischer entwickelte Verfahren ist ein allgemeines Verfahren von Schätzfunktionen für die Parameter von Verteilungsfunktionen und berücksichtigt die relative Häufigkeit der einzelnen Messwerte. Die Wahr-

scheinlichkeit des Auftretens eines Messwertes wird als Bewertungskriterium zugrunde gelegt (Meyna & Pauli 2010). Auch im Windenergiebereich ist die Anpassung der Weibull-Verteilung durch die MLM ein etabliertes Vorgehen (Nielsen 2010).

Um einen Parameter θ einer diskreten Verteilung zu schätzen, wird die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der beobachteten Stichprobe v_1, \dots, v_n , unter der Annahme jeder in Frage kommenden Verteilung, bestimmt. Der Maximum-Likelihood-Schätzer ist dabei der Parameter derjenigen Verteilung, bei deren Vorliegen die beobachtete Stichprobe am ehesten zu erwarten ist (Hartung et al. 2002).

Nach (Meyna & Pauli 2010) seien v_1, \dots, v_n die Realisierung einer Stichprobe einer kontinuierlichen Zufallsgröße V_n , so ergibt sich die Likelihood-Funktion als Produkt der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Beobachtungen zu

$$L(v_1, \dots, v_n; \theta^k) = \prod_{i=1}^n f(v_i; \theta^k),$$

mit den unbekanntem Parametern

$$\theta^k = (\theta_1, \dots, \theta_n)$$

und den Schätzwerten

$$\hat{\theta}^k = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n).$$

Die Parameter für welche die Likelihood-Funktion maximal ist, werden ermittelt, in dem die Funktion nach allen unbekanntem Parametern partiell abgeleitet und gleich Null gesetzt wird. Damit kann durch die MLM, anhand einer Beobachtung, ein Schätzwert ($\hat{\theta}$) (oder mehrere $\hat{\theta}^k$) gefunden werden, sodass die Likelihood-Funktion und somit die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von $\hat{\theta}$ maximal wird (Meyna & Pauli 2010).

3 Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

Dieses Kapitel beschreibt den Vorgang der Auswertung exemplarisch für einen Standort. Die weiteren Ergebnisse aller Standorte finden sich in Kapitel 4. Es wurden insgesamt fünf verschiedene Szenarien erstellt, bei denen die zur Verfügung gestellten Wetterdaten des DWD nach unterschiedlichen Bedingungen ausgewertet wurden. Im ersten

Szenario wird der gesamte Datensatz ausgewertet, um die langjährigen Ganzjahreswindbedingungen und Wetterverhältnisse zu bestimmen. Diese Daten dienen dann als Vergleichsgrundlage für die anderen Szenarien. Das zweite Szenario beschreibt die Auswertung der Daten für mögliche Vereisungsbedingungen. Hier wurde der Datensatz nach bestimmten Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen ausgewertet und die Windbedingungen, die unter diesen Wetterbedingungen vorlagen, ermittelt. Für das dritte Szenario, welches konkrete Vereisungsbedingungen und Nebelfrostablagerungen analysiert, wurden bestimmte Wettererscheinungen und Temperaturbedingungen als Kriterien zur Berücksichtigung der Daten verwendet und die Windbedingungen und Wetterverhältnisse bei vorliegenden Wettererscheinungen bestimmt. Gleiches wurde im Szenario vier durchgeführt, allerdings wurde nur nach Wettererscheinungen für konkrete Vereisung selektiert. Im fünften Szenario wurden die Daten wiederum nach Wetterkriterien, die in Szenario vier (bei konkreter Vereisung) bestimmt wurden, ausgewertet, und auch hier wieder die Wind- und Wetterverhältnisse ermittelt. Die genauen Bedingungen für die einzelnen Szenarien sind in den jeweiligen Kapiteln ausführlich beschrieben.

3.1 Beschreibung des Beispielstandorts Berlin Schönefeld

Als Beispielstandort wurde der Standort Berlin Schönefeld ausgewählt. Für diesen Standort liegen alle Daten stündlich für 11 Jahre (2002 bis 2012) vor, die Anzahl an Fehlmessungen für die Windverhältnisse ist mit knapp 400 Fehlerwerten sehr gering. Sowohl die Anzahl an signifikanten Wettererscheinungen sowie die Anzahl an aufgezeichneten Vereisungsereignissen liegt im Mittelfeld aller ausgewerteten Stationen und bietet damit sowohl eine gute Grundlage zur Auswertung als auch eine gewisse Repräsentativität für die Datenverfügbarkeit der ausgewerteten Standorte. Entscheidend für die Auswahl dieses Standorts war, dass die Windmessungen eine überregionale Repräsentanz (DWD 2008) haben und bei der Erfassung der Wetterdaten und Windverhältnisse an einem internationalen Flughafen von einer besonderen Sorgfalt bei der Aufzeichnung ausgegangen werden kann. Außerdem handelt es sich um eine Wetterstation des Hauptamtlichen DWD-Stationsnetzes mit 24 Stunden Aufzeichnungen pro Tag (DWD 2012).

3.1.1 Beschreibung der Wetterstation Berlin Schönefeld

Die Flugwetterwarte Berlin-Schönefeld liegt am südöstlichen Stadtrand von Berlin, im Südosten des Flughafengeländes. Das bei Frost beheizte Anemometer ist auf 10 m Höhe angebracht, Wettererscheinungen werden direkt am Standort durch Augenbeobachtung bestimmt (mündliche Aussage des DWD-Beobachters vor Ort).



Abbildung 6: Östliches Halbpanorama am Standort (DWD 2008)

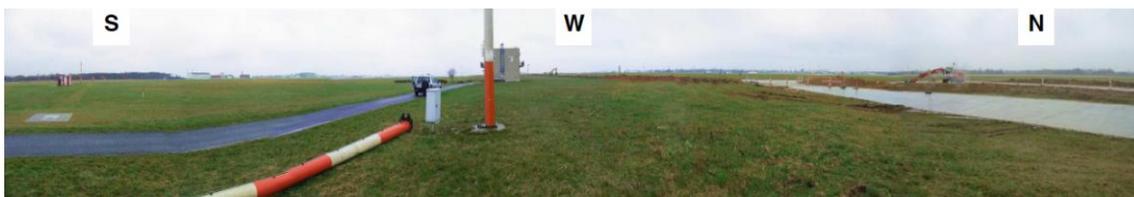


Abbildung 7: Westliches Halbpanorama am Standort (DWD 2008)

Im direkten Umfeld der Messgeräte liegen ebene Landebahnen. In östlicher Richtung befindet sich in ca. 60 m Entfernung eine kleine Baumgruppe, in westlicher Richtung befindet sich in ca. 70 m Entfernung das Stationsgebäude. Ansonsten ist der Standort frei von Hindernissen. Angrenzend an den Flughafen befinden sich in der Umgebung landwirtschaftliche Nutzflächen und kleinere Siedlungsgebiete der umliegenden Ortschaften. In ca. 2 km Entfernung in nordöstlicher bis westlicher Richtung beginnt das Stadtgebiet von Berlin. Die Landschaft des Messstandorts wird größtenteils landwirtschaftlich genutzt und das Relief der Region ist durch Ebenen und kleinere Hügel geprägt (DWD 2008).

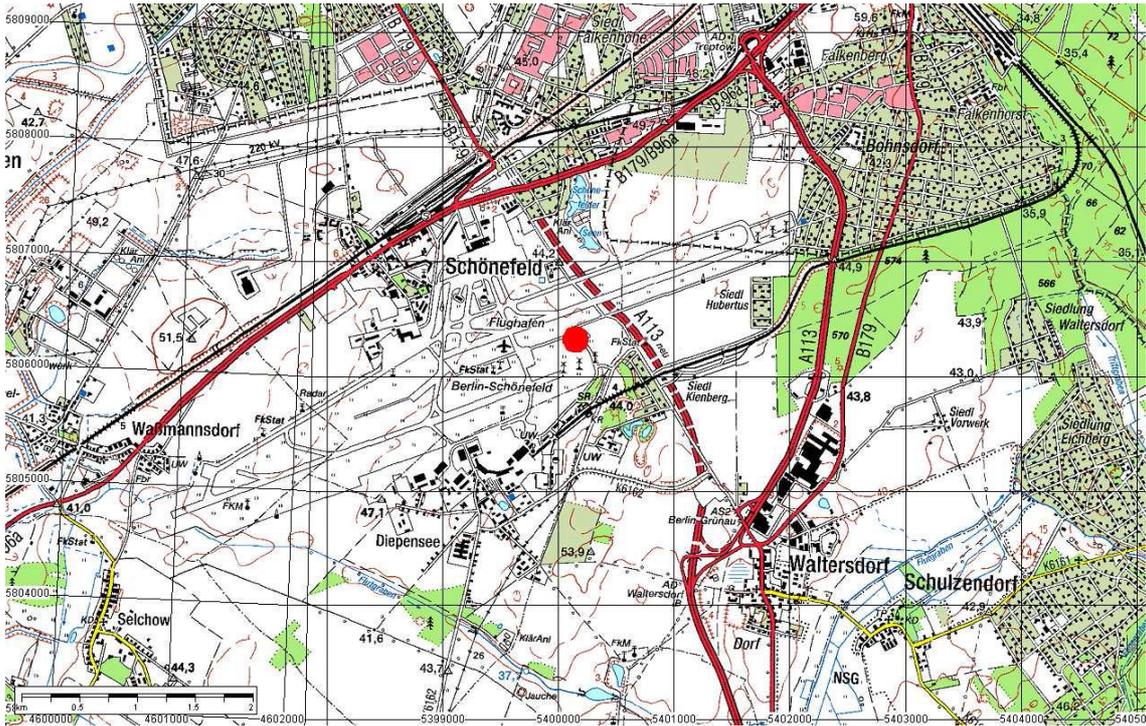


Abbildung 8: Ausschnitt der näheren Umgebung des Standorts (roter Punkt) (DWD 2008)

3.2 Darstellung der Auswertung für den Standort Berlin-Schönefeld

3.2.1 Beschreibung der Daten

Tabelle 1 zeigt die Anzahl der ausgewerteten Daten der unterschiedlichen Szenarien für den Standort im Beobachtungszeitraum Januar 2002 bis Dezember 2012. Nach Bereini-gung² der Daten lagen insgesamt 96.271 Daten vor (stündliche Messdaten).

Nach einer Auswertung für mögliche Vereisung, nach den in Kapitel 2.2 beschriebenen Kriterien sowie den Kriterien des BOKU-Met Berichts (BOKU-Met: Pospichal & Formayer 2010) (maximale Temperatur bis zu 0,5°C) und der COST 727-Studie (MeteoSchweiz: Fikke et al. 2006) zur Luftfeuchtigkeit (relative Luftfeuchtigkeit größer als 95%), lagen 3.057 Werte vor (Szenario 2).

² Der Datensatz wurde um Fehlerwerte (Siehe Anhang Nummer 8.2) bereinigt. Darüber hinaus wurden Windgeschwindigkeiten unterhalb der sog. Kalmgrenze (0,2 m/s) gesondert betrachtet. Die Kalmgrenze ist definiert als Windgeschwindigkeitsgrenzwert, unter dem alle Windgeschwindigkeiten als Flaute eingeordnet werden, da eine genaue Messung in diesen Bereichen nicht mit allen Anemometern möglich ist. Eine Flaute kann aber keiner bestimmten Windrichtung zugeordnet werden, deshalb wurden aus allen Windgeschwindigkeiten kleiner als 0,2 m/s der Mittelwert gebildet und dieser auf alle Sektoren gleichverteilt (DWD: Sebecker et al. 2012).

Für Szenario 3 mit den WW-Ereignissen, die eine konkrete Vereisung beschreiben und den zusätzlichen WW-Erscheinungen für „Nebel oder Eisnebel“ (WW-Erscheinungen 10, 11, 12, 28, 40, 41,42, 43, 44, 45, 46, 47) bei gleichzeitiger Temperatur von weniger als 0°C (DWD 2012) konnten 2.689 Daten ausgewertet werden.

Für das Szenario 4, der konkreten Vereisung (WW-Erscheinungen 24, 48, 49, 56, 57, 66, 67), lagen 366 Werte vor.

Werden Temperatur und Luftfeuchtigkeitsbedingungen des Szenarios 5 als Auswahlkriterium herangezogen, erfüllen 20.234 Ereignisse diese Kriterien.

Zusätzlich wurde für die Risikobewertung noch ein spezielles Szenario 2.1 durchgeführt, welches eine Modifizierung des Szenarios 2 ist, indem die Bedingungen für die Temperatur, mithilfe des Temperaturgradienten, auf Nabenhöhe umgerechnet wurden. Dies ist ein spezielles Szenario zur Risikobeurteilung, welches in Kapitel 5.3 Eingang findet und dort ausführlich erläutert wird. In diesem Abschnitt wird das Szenario 2.1 nicht gesondert berücksichtigt.

Szenario	Anzahl der Werte
Szenario 1	96271
Szenario 2	3057
Szenario 3	2689
Szenario 4	366
Szenario 5	20234

Tabelle 1: Anzahl der ausgewerteten Daten

3.2.2 Szenario 1: Auswertung der Ganzjahresdaten

In diesem Szenario werden die Ganzjahresdaten aller vorliegenden Werte für den Standort, ohne Einschränkungen nach besonderen Kriterien, analysiert. Abbildung 9 zeigt die Windverteilung der Ganzjahresdaten über 12 Sektoren. Hieraus sind die Häufigkeiten, mit denen der Wind aus einem bestimmten Sektor kam, zu erkennen. Es lässt sich feststellen, dass die Hauptwindrichtung des Standorts (die Windrichtung aus der der Wind am häufigsten kam) Westsüdwest bis West ist.

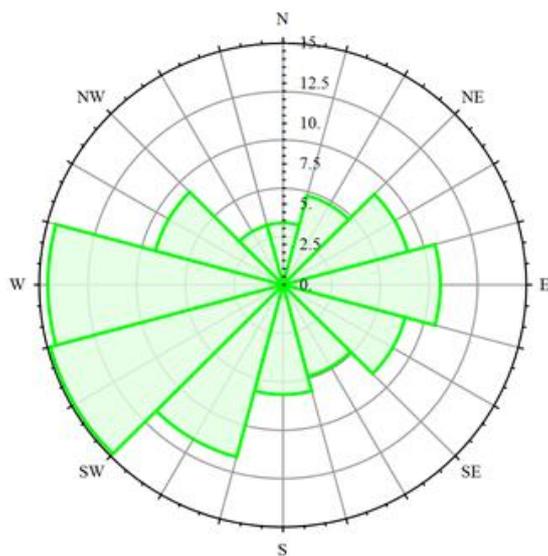


Abbildung 9: Windrose der Gesamtjahresdaten

Abbildung 10 zeigt die dazugehörige Weibull-Verteilung über alle Sektoren. Windgeschwindigkeiten um die 3,5 m/s treten hier am häufigsten auf, die durchschnittliche Windgeschwindigkeit, bzw. mittlere Windgeschwindigkeit am Standort beträgt 3,91 m/s.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

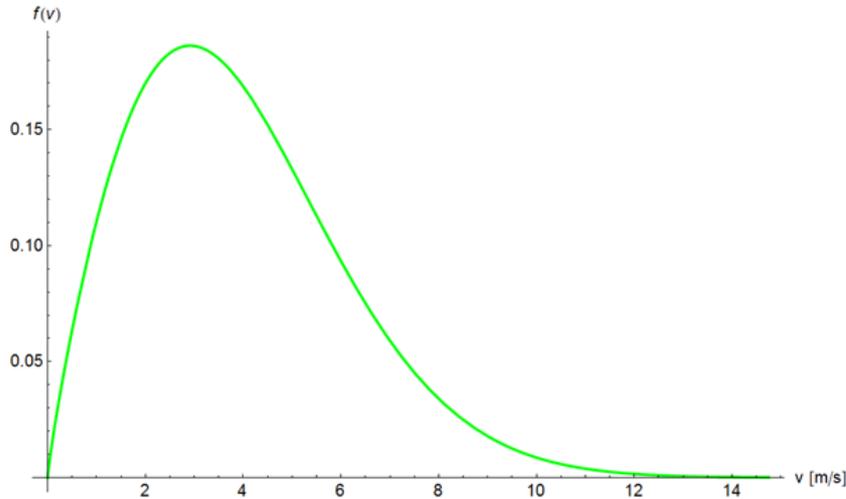


Abbildung 10: Weibull-Verteilung der Gesamtjahresdaten über alle Sektoren

Abbildung 11 stellt die mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren dar. Es ist zu erkennen, dass die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten mit 4,17 - 5,16 m/s in den Sektoren Südsüdwest bis Westnordwest liegen.

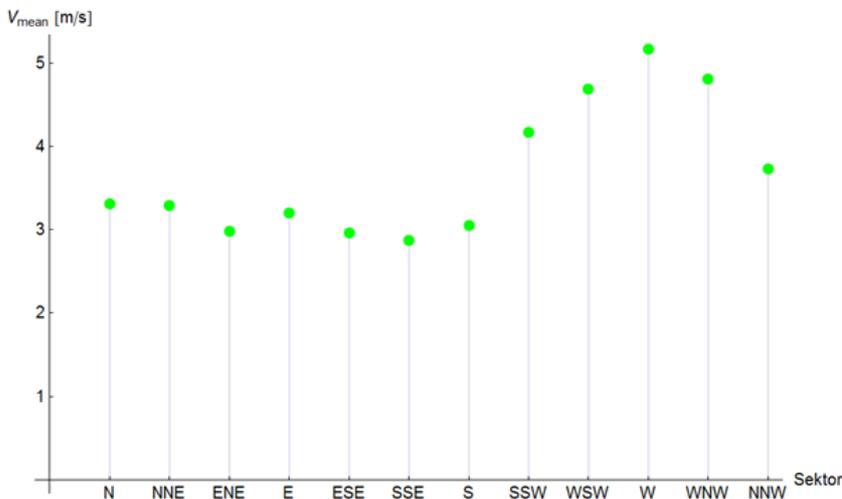


Abbildung 11: Mittlere Windgeschwindigkeiten je Sektor

Tabelle 2 zeigt die Windhäufigkeiten je Sektor, die Weibullparameter A und k für jeden Sektor, die mittlere Windgeschwindigkeit je Sektor, die Windgeschwindigkeit unter der 99,9% der Daten liegen (99,9% Quantil) sowie die Anzahl aller in dem Sektor gemessenen Werte. Nach Auswertung dieser Daten lässt sich die Aussage treffen, dass die Sektoren 9 (14,84%), 10 (14,49%) und 8 (11,05%) die am häufigsten angeströmten Sektoren waren. Außerdem wies der Sektor 10 mit 5,16 m/s die höchste mittlere

Windgeschwindigkeit auf. Des Weiteren lagen in Sektor 10 99,9% aller Werte unter einer Windgeschwindigkeit von 14,75 m/s. Über alle Sektoren ergibt sich ein Weibull A von 4,41 m/s und ein Weibull k von 1,86. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 3,91 m/s und 99,9% aller Werte lagen bei Betrachtung aller Sektoren unter einer Windgeschwindigkeit von 12,44 m/s.

Sektor	Häufigkeit (%)	A-Parameter (m/s)	k-Parameter	v (mean) (m/s)	99,9%-Quantil (m/s)	Anzahl der Werte
1 N	3,84	3,74	2,03	3,31	9,67	3695
2 NNE	5,72	3,72	2,06	3,29	9,52	5511
3 ENE	7,95	3,36	2,02	2,98	8,77	7650
4 E	9,69	3,61	2,04	3,20	9,30	9326
5 ESE	7,79	3,34	2,05	2,96	8,56	7501
6 SSE	5,87	3,25	2,23	2,87	7,73	5654
7 S	6,81	3,44	2,05	3,05	8,83	6553
8 SSW	11,05	4,70	2,02	4,17	12,27	10642
9 WSW	14,84	5,29	1,99	4,69	13,96	14287
10 W	14,49	5,83	2,08	5,16	14,75	13946
11 WNW	8,14	5,42	2,25	4,80	12,78	7836
12 NNW	3,81	4,21	2,03	3,73	10,92	3670
All	100,00	4,41	1,86	3,91	12,44	96271

Tabelle 2: Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die Häufigkeiten der unterschiedlichen Temperaturen, bzw. die Häufigkeiten, mit denen eine bestimmte relative Luftfeuchtigkeit am Standort vorlag. Die Temperatur liegt demnach zwischen ca. -20 und 37°C, die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 15 und 100%. Die Durchschnittstemperatur beträgt ca. 10°C.

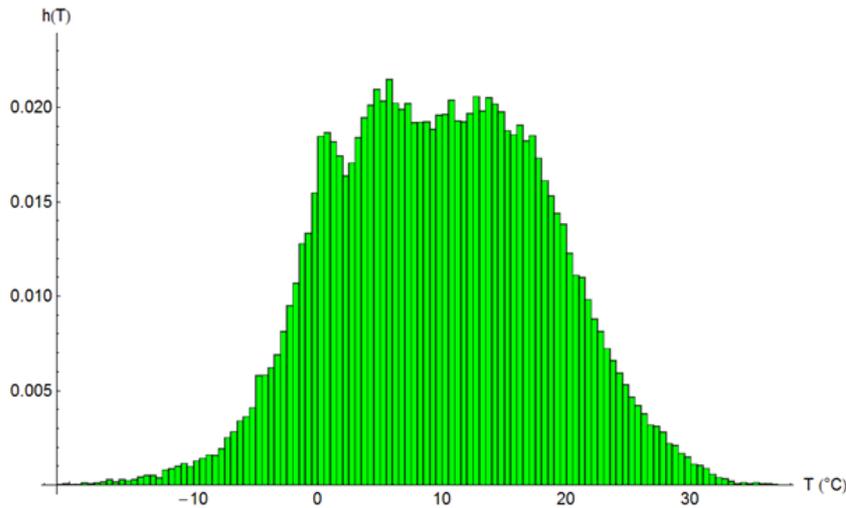


Abbildung 12: Relative Häufigkeit der verschiedenen Temperaturen der Gesamtjahresdaten

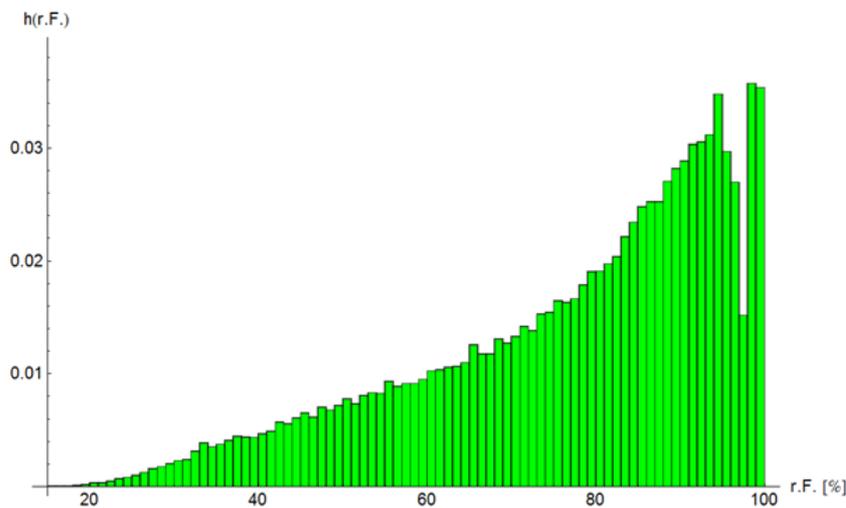


Abbildung 13: Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit der Gesamtjahresdaten

Abbildung 14 setzt die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur ins Verhältnis. Die relative Luftfeuchte beschreibt dabei das prozentuale Verhältnis zwischen dem vorliegenden Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck der Atmosphäre bei der vorliegenden Temperatur (Meteotest: Cattin 2008). Es ist zu sehen, dass ab einer Temperatur von ca. -10°C die maximale Luftfeuchtigkeit abnimmt und keine 100% mehr erreicht werden. Dies liegt daran, dass nach den Richtlinien der World Meteorological Organisation (WMO) zur Messung der relativen Feuchte immer der Sättigungsdampfdruck im Bezug auf Wasser herangezogen werden muss. Über Eis ist der Sättigungsdampfdruck aber geringer als über Wasser und es wird damit bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von einem zu hohen Sättigungsdampfdruck ausgegangen, deshalb ist dieses

Vorgehen bei Temperaturen unter 0°C nicht korrekt und es kann keine vollständige Sättigung der Luft und somit auch keine relative Feuchtigkeit von 100% mehr erreicht werden (Meteotest: Cattin & Koller 2011). Auch ab einer Temperatur von ca. 22°C ist zu erkennen, dass eine vollständige Sättigung der Luft nicht mehr auftritt, dies kann damit zusammenhängen, dass der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur zunimmt und dadurch für eine hohe Sättigung bei hohen Temperaturen weitaus mehr Wassermoleküle in der Luft sein müssen.

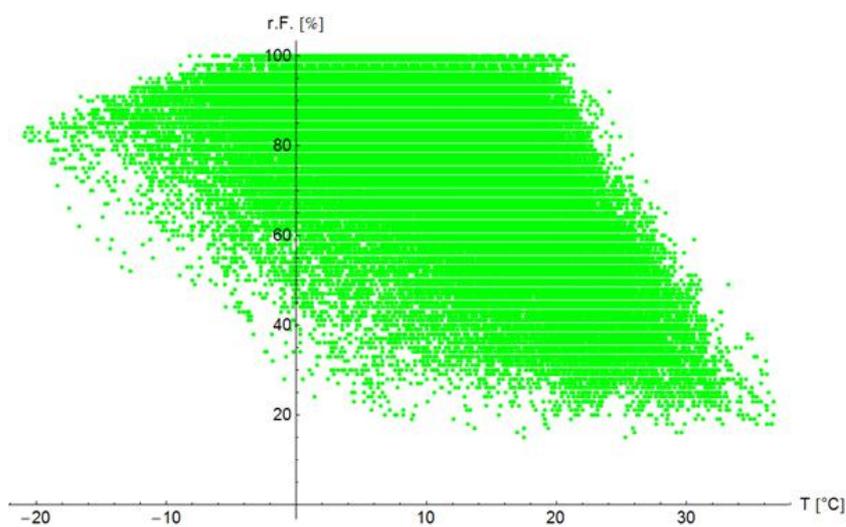


Abbildung 14: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur

Abbildung 15 zeigt die relative Luftfeuchtigkeit im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit und Abbildung 16 wiederum das Verhältnis von Temperatur zur Windgeschwindigkeit, woraufhin Abbildung 17 die beiden Faktoren, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur, gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit in einer Grafik aufplottet. Hier lässt sich kein Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und mittlerer Windgeschwindigkeit feststellen. Abbildung 16 lässt erkennen, dass bei Temperaturen um die Durchschnittstemperatur von 10°C in einem Bereich von ca. 5°C bis 15°C die höchsten Windgeschwindigkeiten auftreten und diese jeweils mit einer Temperaturzunahme oder –abnahme sinken.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

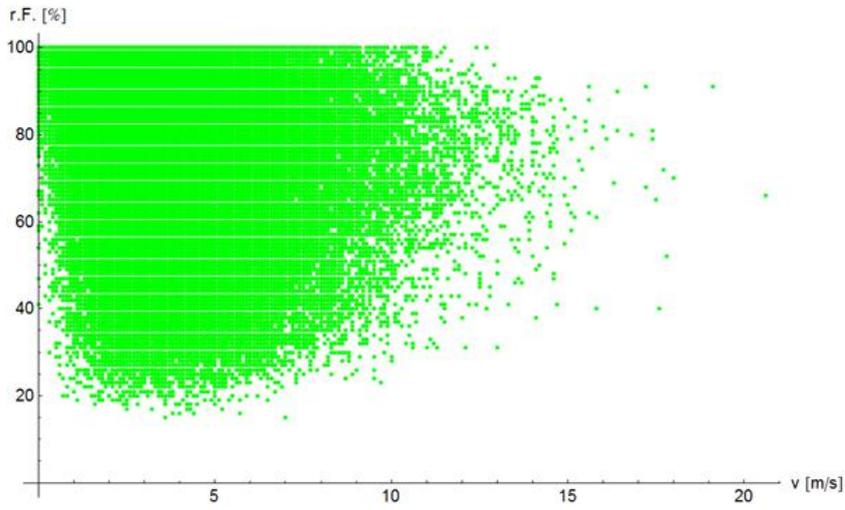


Abbildung 15: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit

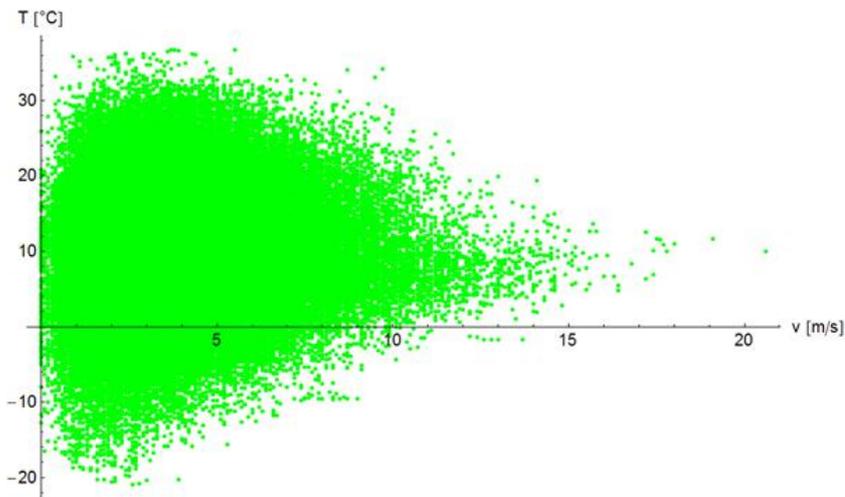


Abbildung 16: Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit

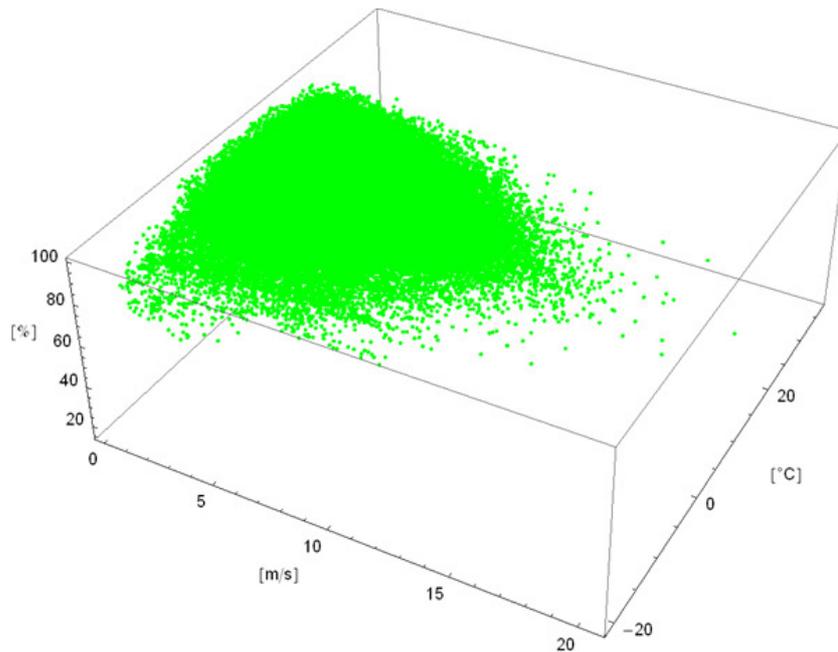


Abbildung 17: Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit

3.2.3 Szenario 2: Auswertung der Daten bei möglicher Vereisung

Dieser Abschnitt stellt die Auswertung der Wind- und Wetterdaten unter möglichen Vereisungsbedingungen vor. Als mögliche Vereisungsbedingungen wurden auf Grundlage von Kapitel 2.2 und Definitionen verschiedener Studien (BOKU-Met: Pospichal & Formayer 2010; FMI: Tammelin et al. 1998; MeteoSchweiz: Fikke et al. 2006) für Wettersituationen die Eisbildung begünstigen, herausgearbeitet. Diese sind als eine Temperatur von unter $0,5^{\circ}\text{C}^3$ und eine relative Luftfeuchtigkeit über 95% definiert. Dies wurde in verschiedenen Studien als Voraussetzung für die Eisbildung an Windenergieanlagen. Ein weiteres Kriterium ist der Luftdruck von 850 hPa auf einer bestimmten Höhe, was eine Inversionswetterlage beschreibt (BOKU-Met: Pospichal & Formayer 2010). Dieses Kriterium konnte aufgrund fehlender Daten zu dem jeweiligen Luftdruck nicht ausgewertet werden, wird jedoch in anderen Studien auch nicht herangezogen. Es wird somit davon ausgegangen, dass bei erfüllten Kriterien für das Szenario 2 immer eine Inversionswetterlage vorliegt, was als konservatives Vorgehen angesehen werden kann.

³ Nach der allgemeinen Gasgleichung ist die Temperatur proportional zum Druck. Da es durch die gewölbte Form des Rotorblatts auf der Vorderseite des Rotorblatts zu einem Druckabfall kommt (Bernullieffekt), folgt ein lokales Absinken der Temperatur (DEWI: Seifert 2005). Aus diesem Grund startet das Temperaturintervall bei $0,5^{\circ}\text{C}$ und nicht bei 0°C .

Abbildung 18 zeigt die Windrose bei möglicher Vereisung. Hier lässt sich erkennen, dass der Wind sehr häufig, sowohl aus Richtung Westsüdwest bis West, als auch aus Ostsüdost bis Ostnordost kommt. Es lässt sich somit festhalten, dass unter möglichen Vereisungsbedingungen die relative Häufigkeit für Ostwinde im Vergleich zur Ganzjahresverteilung zunimmt.

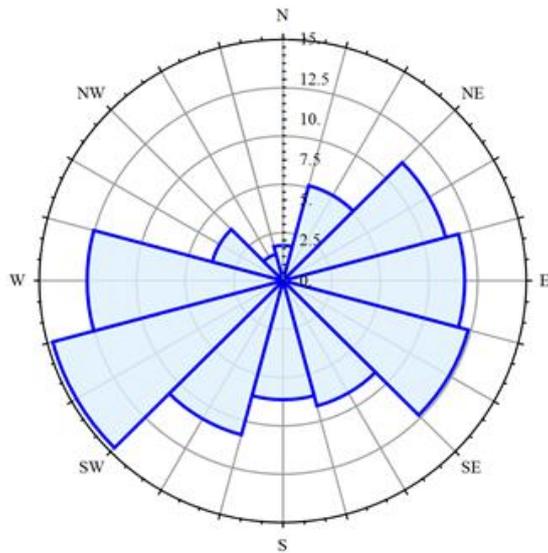


Abbildung 18: Windrose bei möglicher Vereisung

Abbildung 19 zeigt die Weibull-Verteilung bei möglicher Vereisung. Am häufigsten treten Windgeschwindigkeiten um die 2,5 m/s auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit am Standort beträgt 2,81 m/s.

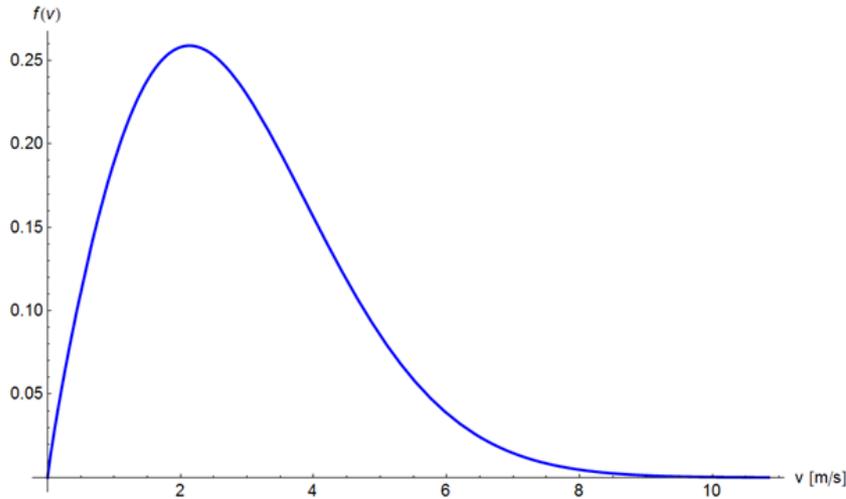


Abbildung 19: Weibull-Verteilung bei möglicher Vereisung

Abbildung 20 zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren. In den Sektoren Westsüdwest bis Westnordwest ist die mittlere Windgeschwindigkeit mit 3,4 – 3,6 m/s am höchsten.

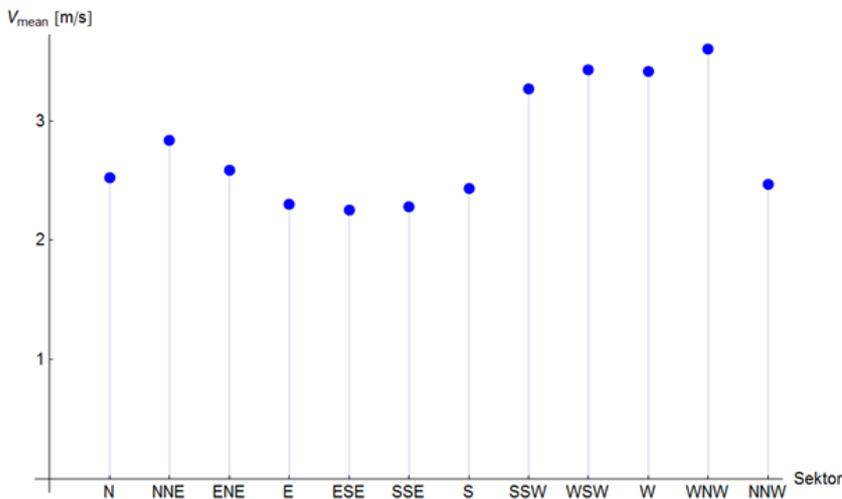


Abbildung 20: Mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren bei möglicher Vereisung

Tabelle 3 zeigt die Windhäufigkeiten je Sektor, die Weibullparameter A und k für jeden Sektor, die mittlere Windgeschwindigkeit je Sektor, die Windgeschwindigkeit unter der 99,9% der Daten liegen (99,9% Quantil) sowie die Anzahl aller in dem Sektor gemessenen Werte. Nach Auswertung dieser Daten lässt sich die Aussage treffen, dass die Sektoren 9 (14,69%), 10 (12,07%) und 5 (11,81%) die am häufigsten angeströmten Sektoren waren. Außerdem wies der Sektor 11 mit 3,6 m/s die höchste mittlere

Windgeschwindigkeit auf. Des Weiteren lagen in Sektor 11 99,9% aller Werte unter einer Windgeschwindigkeit von 10,84 m/s. Über alle Sektoren ergibt sich ein Weibull A von 3,19 m/s und ein Weibull k von 1,88. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 2,83 m/s und 99,9% aller Werte lagen bei Betrachtung aller Sektoren unter einer Windgeschwindigkeit von 8,91 m/s.

Sektor	Häufigkeit (%)	A-Parameter (m/s)	k-Parameter	v (mean) (m/s)	99,9%-Quantil (m/s)	Anzahl der Werte
1 N	2,19	2,85	2,41	2,52	6,34	67
2 NNE	6,12	3,19	1,85	2,84	9,10	187
3 ENE	10,37	2,92	2,24	2,59	6,94	317
4 E	11,19	2,59	1,90	2,30	7,18	342
5 ESE	11,81	2,55	2,32	2,25	5,85	361
6 SSE	8,05	2,58	2,31	2,28	5,94	246
7 S	7,39	2,72	1,66	2,43	8,73	226
8 SSW	9,91	3,68	1,82	3,27	10,62	303
9 WSW	14,69	3,87	1,94	3,43	10,50	449
10 W	12,07	3,85	2,37	3,42	8,72	369
11 WNW	4,51	4,06	1,97	3,60	10,84	138
12 NNW	1,70	2,78	2,07	2,47	7,09	52
All	100,00	3,19	1,88	2,83	8,91	3057

Tabelle 3: Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren

Abbildung 21 stellt die relative Häufigkeit der Temperaturen unter möglichen Vereisungsbedingungen dar. Die höchste Temperatur liegt, wie zuvor definiert, bei 0,5°C vor, die niedrigste Temperatur beträgt -9,8°C. Es lässt sich erkennen, dass am häufigsten Temperaturen zwischen 0,5°C und -2°C auftraten.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

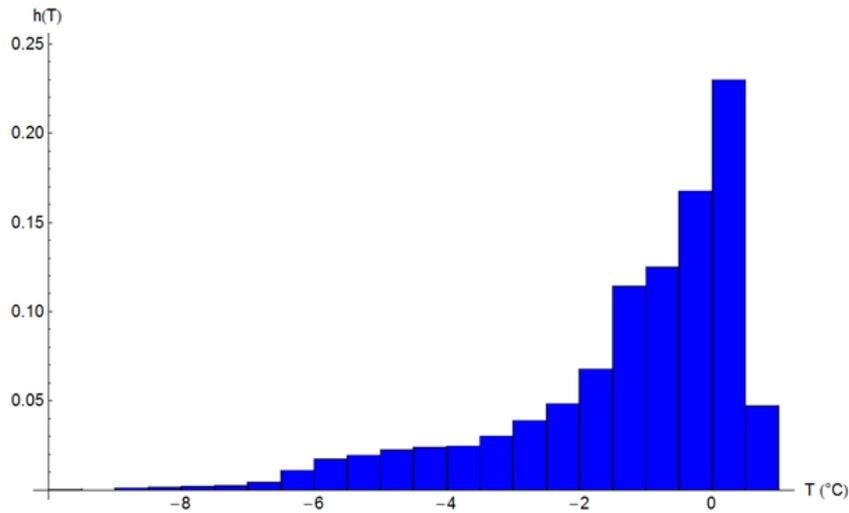


Abbildung 21: Relative Häufigkeit der Temperaturen bei möglicher Vereisung

Abbildung 22 zeigt die relative Häufigkeit der auftretenden relativen Luftfeuchtigkeit. Diese liegt, wie zu erwarten, zwischen 96 und 100%.

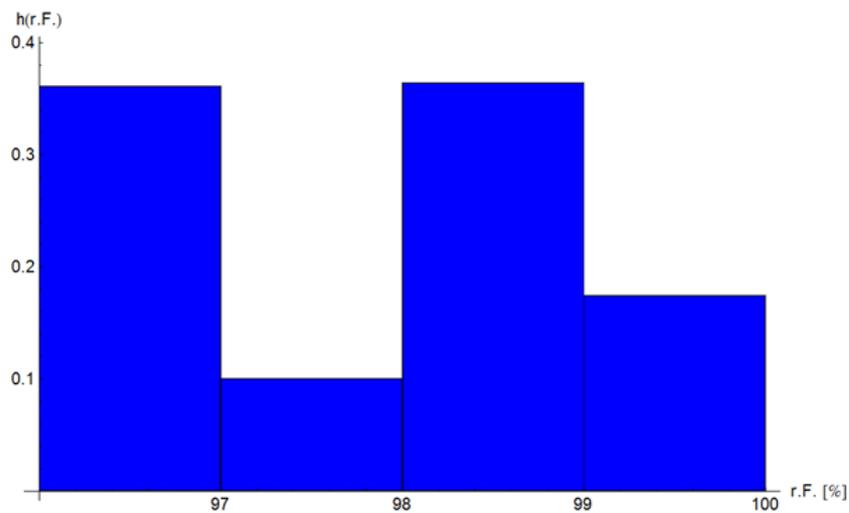


Abbildung 22: Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei möglicher Vereisung

Abbildung 23 setzt die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur ins Verhältnis, hieraus lässt sich jedoch keine Aussage ableiten.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort



Abbildung 23: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei möglicher Vereisung

Abbildung 24 zeigt die relative Luftfeuchtigkeit im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit und Abbildung 25 wiederum das Verhältnis von Temperatur zur Windgeschwindigkeit, woraufhin Abbildung 26 die beiden Faktoren, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur, gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit in einer Grafik aufplottet. Hier lässt sich kein Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und mittlerer Windgeschwindigkeit feststellen. Abbildung 25 lässt allerdings auch den schon zuvor beschriebenen Effekt erkennen, dass die Windgeschwindigkeiten mit abnehmender Temperatur sinken.

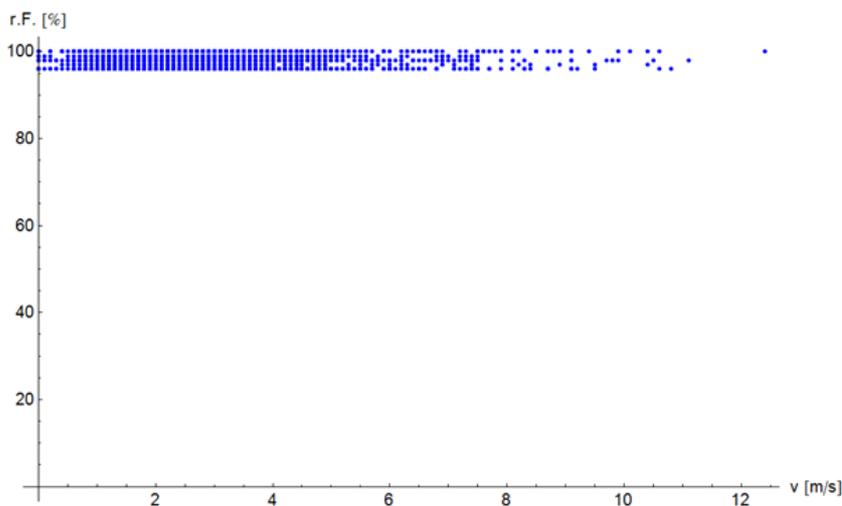


Abbildung 24: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit

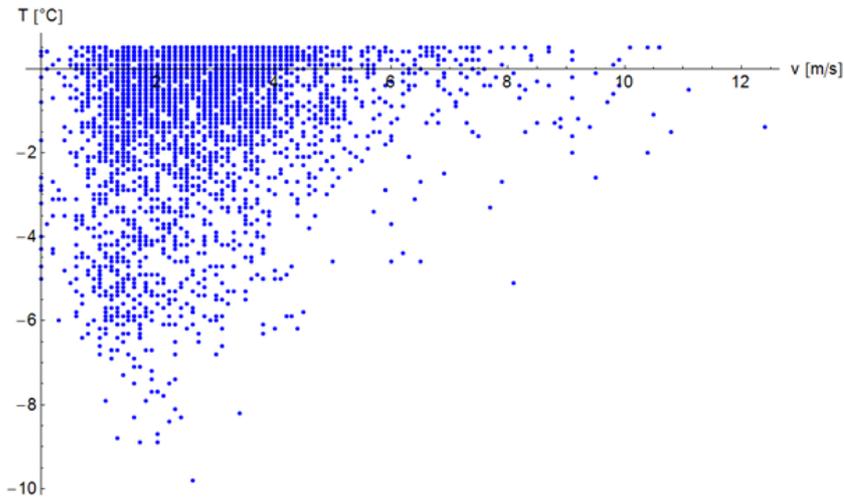


Abbildung 25: Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit

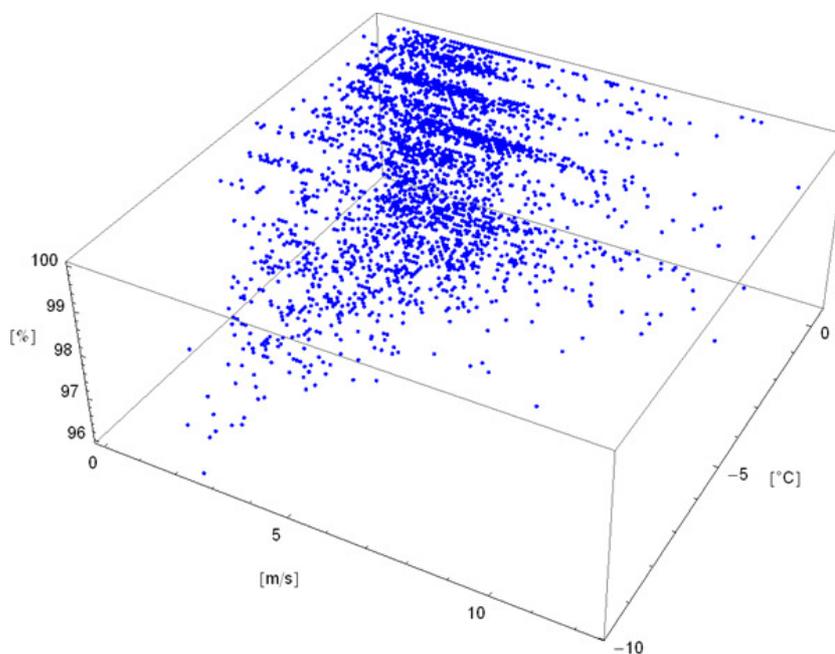


Abbildung 26: Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei möglicher Vereisung

Tabelle 4 zeigt schließlich die absolute Anzahl der Vereisungsereignisse unter den angenommenen Bedingungen, die Anzahl der Monate sowie Tage, in denen Vereisung im Zeitraum eines bestimmten Jahres auftreten kann und die gesamte Anzahl möglicher Vereisungsereignisse, -monate und -tage als auch die durchgehende Vereisung (stündlich gemessene Vereisungsereignisse, aufsummiert auf ganze Tage, so dass sich eine Gesamtdauer der Vereisung ergibt). Außerdem wird der Mittelwert über alle Jahre angegeben. Im Durchschnitt wurden 280,1 mögliche Vereisungsereignisse pro Jahr bestimmt. Es kam zu 45,5 möglichen Vereisungstagen im Jahr, die sich auf 6,4 Monate

verteilten (Januar, Februar, März, April (nicht in allen Jahren), Oktober, November, Dezember).

Jahr	Vereisungsereignisse	Vereisungsmonate	Vereisungstage	Durchgehende Vereisung (Tage)
2002	314	6	39	13,08
2003	254	7	50	10,58
2004	345	7	65	14,38
2005	364	7	67	15,17
2006	354	6	48	14,75
2007	255	6	36	10,63
2008	267	6	49	11,13
2009	440	6	52	18,33
2010	209	6	40	8,71
2011	110	6	22	4,58
2012	169	7	32	7,04
Mean	280,09	6,36	45,46	11,67
Gesamt	3081	70	500	128,38

Tabelle 4: Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren

3.2.4 Szenario 3: Auswertung der Daten bei konkreten Vereisungsbedingungen und möglichem Eisnebel

Dieser Abschnitt stellt die Auswertung der Daten nach konkreten Vereisungsbedingungen und Nebel, der zu Vereisung führen kann, vor. Dafür wurden aus dem Gesamtdatensatz die Daten ausgewählt, bei denen eine konkrete Vereisung – dementsprechend eine der WW-Erscheinungen 24 (Sprühregen oder Regen (gefrierend)), 48/49 (Nebel oder Eisnebel zur Zeit der Beobachtung, schlägt sich als Rauheis/ Klareis nieder), 56/57 (Sprühregen gefrierend, leicht, mäßig/ stark), 66/67 (gefrierender Regen, leicht, mäßig/ stark) – oder möglicher Eisnebel – demzufolge die WW-Erscheinungen 10 (Feuchter

Dunst), 11/12 (flacher Nebel/ Eisnebel an der Station oder in der Umgebung bis zu 5 km), 28 (Nebel oder Eisnebel), 40 – 47 (Nebel oder Eisnebel zur Zeit der Beobachtung in verschiedenen Abstufungen) (WW-Übersicht, siehe Anhang Nummer 8.1) – und eine Temperatur von unter 0°C vorlag. Eine Temperatur von weniger als 0°C ist die Grundvoraussetzung für die Bildung von Nebelfrostablagerungen (DWD 2012). Es kann bei diesen WW-Erscheinungen nicht genau unterschieden werden, ob Eisnebel oder Nebel, der zu Nebelfrostablagerungen führen kann, vorlag und ob es zu Eisansatz gekommen ist. Deshalb wurde das zusätzliche Kriterium der Temperatur angewendet und davon ausgegangen, dass es in diesem Fall immer zu Vereisung kommt. Dieses kann als konservatives Vorgehen angesehen werden. Alle anderen Daten wurden nicht berücksichtigt.

Abbildung 27 zeigt die Windrose bei konkreten Vereisungserscheinungen oder Eisnebel. Die Hauptwindrichtung dieses Szenarios ist Ost bis Ostsüdost. Die relative Häufigkeit für Ostwinde nahm somit, im Vergleich zur Ganzjahresverteilung zu, während Winde aus westlicher Richtung im Verhältnis sehr viel seltener auftraten.

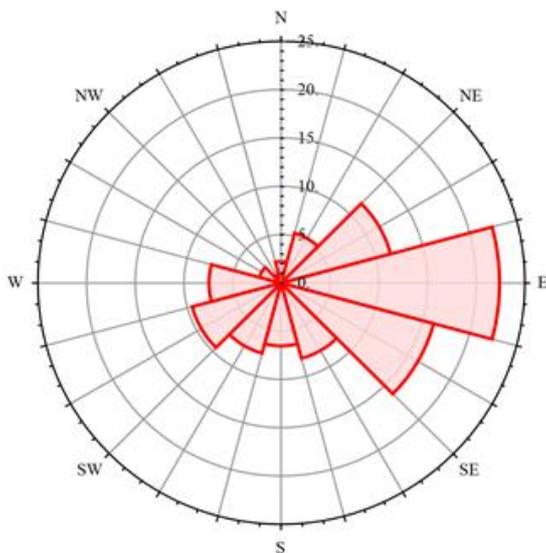


Abbildung 27: Windrose bei konkreter Vereisung mit Eisnebel

Abbildung 28 zeigt die Weibull-Verteilung bei möglicher Vereisung. Am häufigsten treten Windgeschwindigkeiten um die 2,5 m/s auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit am Standort beträgt 2,58 m/s.

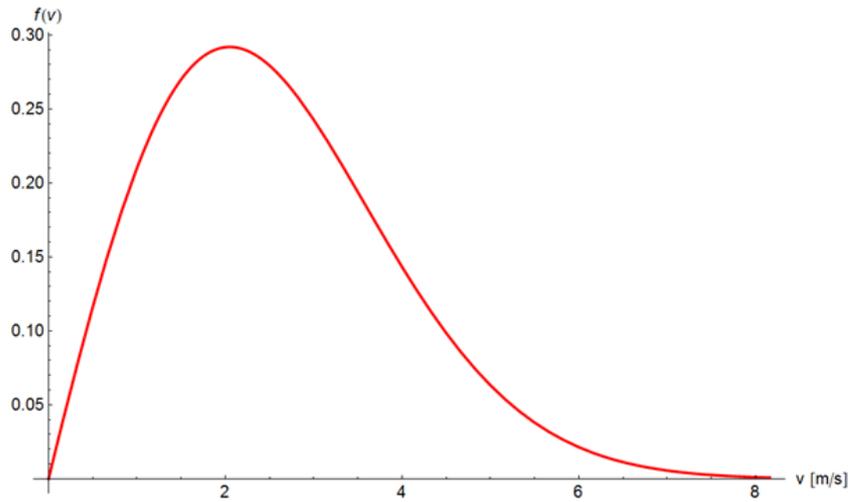


Abbildung 28: Weibull-Verteilung bei konkreter Vereisung mit Eisnebel

Abbildung 29 zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren. Aus den Richtungen Nord bis Westnordwest treten durchgängig Windgeschwindigkeiten zwischen 2 bis 3 m/s auf, wobei die mittlere Windgeschwindigkeit aus Richtung West mit 3,0 m/s am höchsten ist. Auffällig ist, dass die Windgeschwindigkeit in Richtung Nordnordwest stark abfällt.

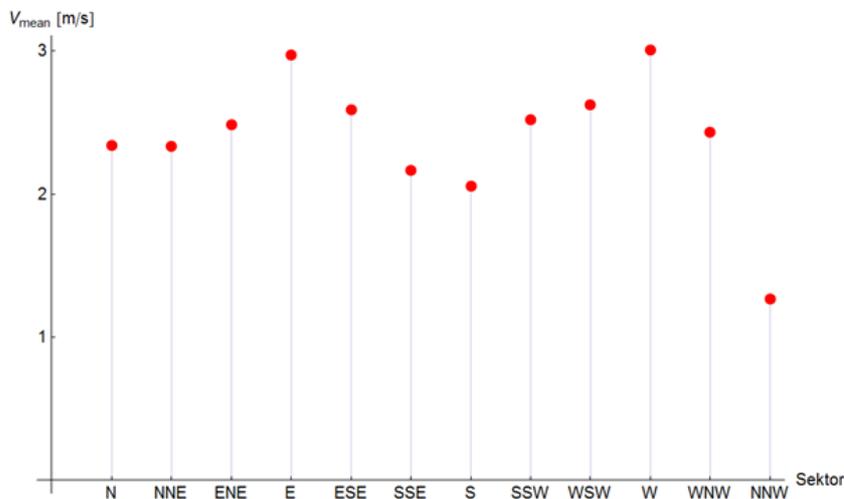


Abbildung 29: Mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren bei konkreter Vereisung mit Eisnebel

Tabelle 5 zeigt die Windhäufigkeiten je Sektor, die Weibullparameter A und k für jeden Sektor, die mittlere Windgeschwindigkeit je Sektor, die Windgeschwindigkeit unter der 99,9% der Daten liegen (99,9% Quantil) sowie die Anzahl aller in dem Sektor gemessenen Werte. Nach Auswertung dieser Daten lässt sich die Aussage treffen, dass die Sektoren 4 (22,42%), 5 (16,21%) und 3 (11,64%) die am häufigsten angeströmten Sektoren waren. Außerdem wies Sektor 10 mit 3,01 m/s die höchste mittlere Windgeschwindigkeit auf. Des Weiteren lagen in Sektor 4 99,9% aller Werte unter einer Windgeschwindigkeit von 8,16 m/s. Über alle Sektoren ergibt sich ein Weibull A von 2,92 m/s und ein Weibull k von 1,98. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 2,53 m/s und 99,9% aller Werte lagen bei Betrachtung aller Sektoren unter einer Windgeschwindigkeit von 7,75 m/s.

Sektor	Häufigkeit (%)	A-Parameter (m/s)	k-Parameter	v (mean) (m/s)	99,9%-Quantil (m/s)	Anzahl der Werte
1 N	2,23	2,64	1,88	2,34	7,36	60
2 NNE	5,36	2,62	1,82	2,33	7,57	144
3 ENE	11,64	2,81	2,07	2,49	7,14	313
4 E	22,42	3,36	2,18	2,97	8,16	603
5 ESE	16,21	2,92	1,94	2,59	7,93	436
6 SSE	8,07	2,43	1,77	2,17	7,26	217
7 S	6,51	2,32	1,89	2,06	6,45	175
8 SSW	7,51	2,85	2,09	2,52	7,17	202
9 WSW	9,45	2,96	2,23	2,62	7,05	254
10 W	7,40	3,39	2,47	3,01	7,41	199
11 WNW	2,31	2,74	1,78	2,43	8,11	62
12 NNW	0,89	1,40	1,47	1,27	5,19	24
All	100,00	2,92	1,98	2,59	7,75	2689

Tabelle 5: Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren

Abbildung 30 stellt die relative Häufigkeit der Temperaturen unter konkreten Vereisungsbedingungen und Nebelfrostablagerungsbedingungen dar. Die höchste Temperatur liegt bei 2,3 °C, die niedrigste bei -20,8°C, am häufigsten treten jedoch Temperaturen zwischen 0 und -7°C auf.

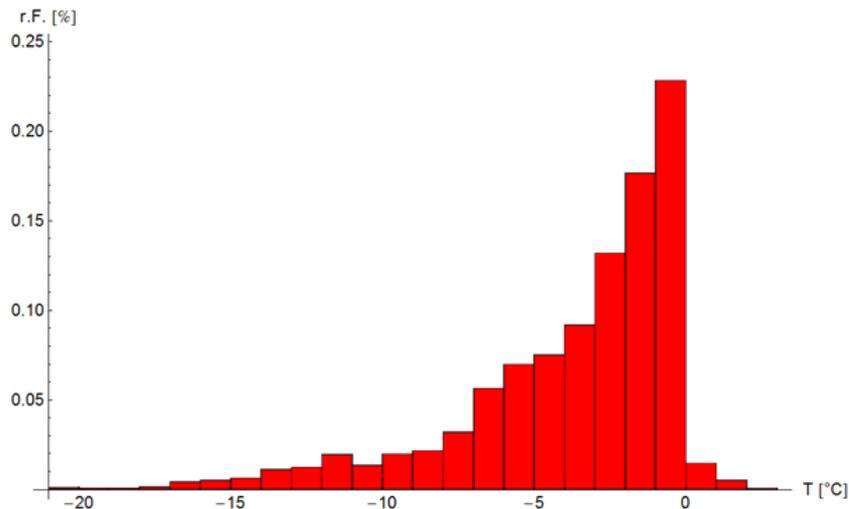


Abbildung 30: Relative Häufigkeit der Temperaturen bei konkreter Vereisung mit Eisnebel

Abbildung 31 zeigt die relative Häufigkeit, der in diesem Szenario auftretenden relativen Luftfeuchtigkeit. Diese liegt zwischen 49 und 100%, wobei eine Luftfeuchtigkeit von unter 80% sehr selten auftritt.

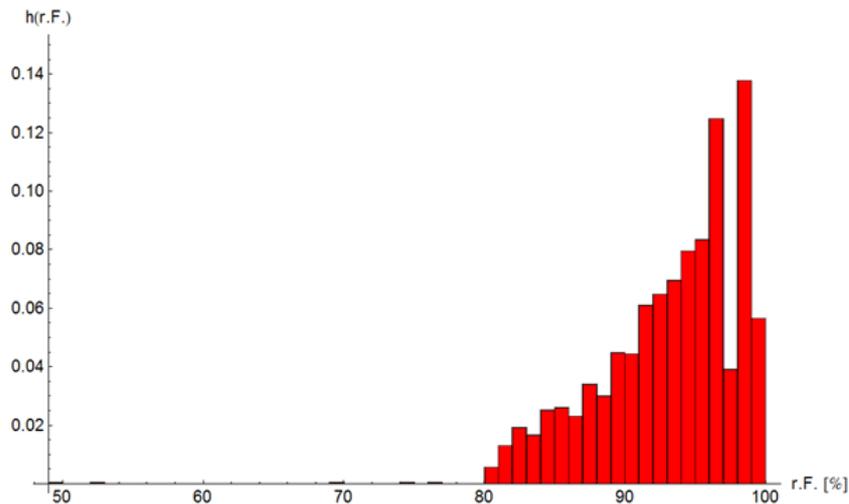


Abbildung 31: Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung mit Eisnebel

Abbildung 32 setzt dann die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur ins Verhältnis. Dabei lässt sich erkennen, dass bei sehr niedrigen Temperaturen die Wahrscheinlichkeit für eine hohe Luftfeuchtigkeit abnimmt. Ab -10°C tritt eine Luftfeuchtigkeit von 100% nicht mehr auf, diese verringert sich weiter mit abnehmender Temperatur.

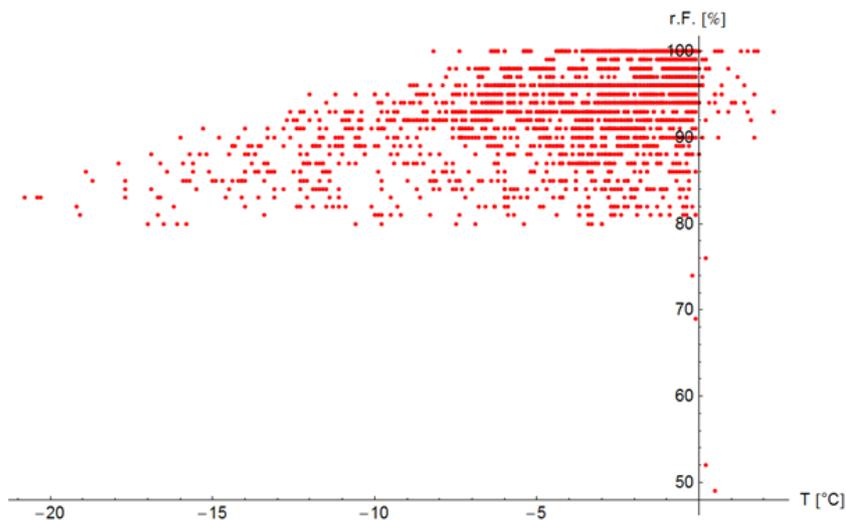


Abbildung 32: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei konkreter Vereisung mit Eisnebel

Abbildung 33 zeigt die relative Luftfeuchtigkeit im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit und Abbildung 34 wiederum das Verhältnis von Temperatur zur Windgeschwindigkeit, woraufhin Abbildung 35 die beiden Faktoren, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur, gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit in einer Grafik aufplottet. Hier lässt sich kein Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und mittlerer Windgeschwindigkeit feststellen. Abbildung 34 lässt allerdings auch den schon zuvor beschriebenen Effekt erkennen, dass die Windgeschwindigkeiten mit abnehmender Temperatur sinken.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

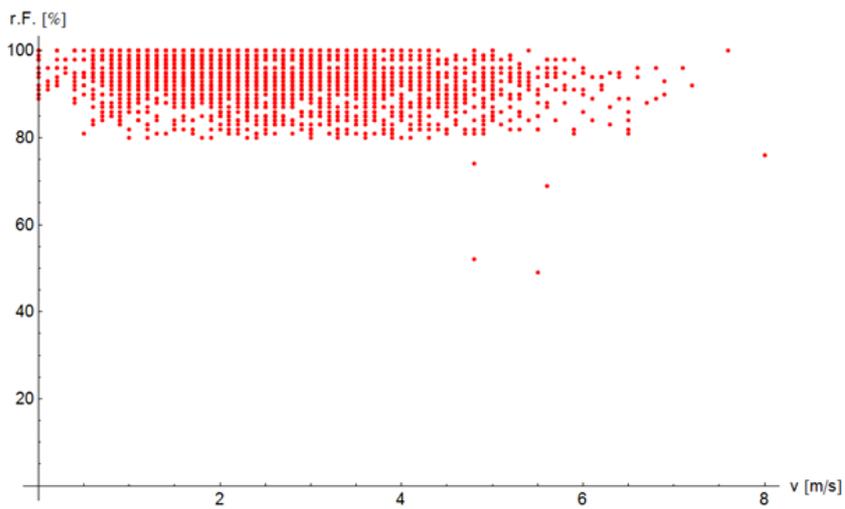


Abbildung 33: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit

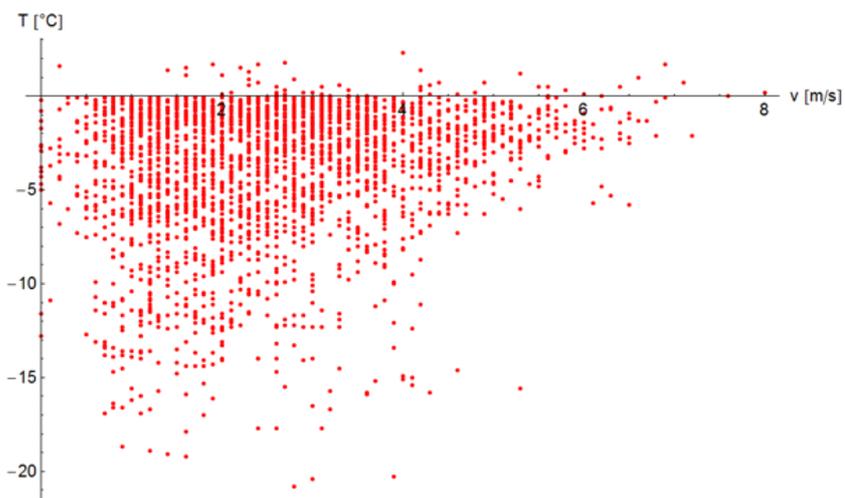


Abbildung 34: Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit

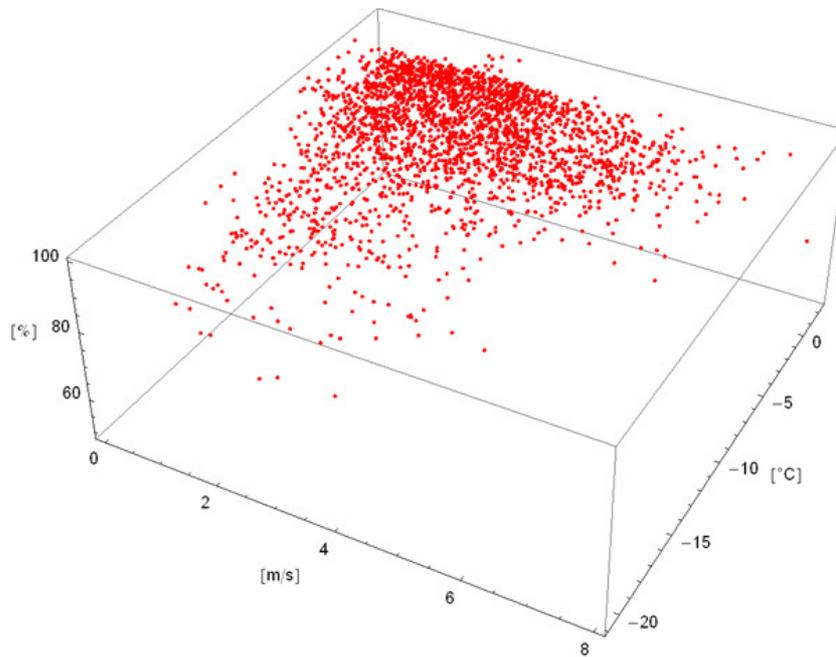


Abbildung 35: Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung mit Eisnebel

Tabelle 6 zeigt schließlich die absolute Anzahl der Vereisungsereignisse unter den angenommenen Bedingungen, die Anzahl der Monate sowie Tage, in denen Vereisung im Zeitraum eines bestimmten Jahres auftreten kann und die gesamte Anzahl möglicher Vereisungsereignisse, -monate und -tage als auch die durchgehende Vereisung (stündlich gemessene Vereisungsereignisse in Tage die 24 Stunden Vereisung aufweisen umgerechnet). Außerdem wird der Mittelwert über alle Jahre angegeben. Im Durchschnitt wurden 234,64 mögliche Vereisungs- oder Nebelfrostablagerungsereignisse pro Jahr ermittelt. Es kam zu durchschnittlich 38,82 möglichen Vereisungs- oder Nebelfrostablagerungsereignissen im Jahr, die sich auf durchschnittlich 6,09 Monate verteilten (Januar, Februar, März, April (nicht in allen Jahren), Oktober (nicht in allen Jahren), November, Dezember).

Jahr	Vereisungsereignisse	Vereisungsmonate	Vereisungstage	Durchschnittliche Vereisung (Tage)
2002	274	6	33	11,42
2003	251	7	52	10,46
2004	218	7	39	9,08
2005	150	6	39	6,25
2006	332	4	50	13,83
2007	176	5	22	7,33
2008	77	6	18	3,21
2009	293	6	44	12,21
2010	487	6	62	20,29
2011	250	7	39	10,42
2012	172	7	29	7,17
Mean	243,64	6,09	38,82	10,15
Gesamt	2680	67	427	111,67

Tabelle 6: Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren

3.2.5 Szenario 4: Auswertung der Daten bei konkreten Vereisungsbedingungen

Dieser Abschnitt stellt die Auswertung der Daten nach konkreten Vereisungsbedingungen vor. Dafür wurden aus dem Gesamtdatensatz die Daten ausgewählt, bei denen eine konkrete Vereisung – dementsprechend eine der WW-Erscheinungen 24 (Sprühregen oder Regen (gefrierend)), 48 (Nebel oder Eisnebel zur Zeit der Beobachtung, schlägt sich als Rauheis oder Klareis nieder, Himmel erkennbar), 49, (Nebel oder Eisnebel zur Zeit der Beobachtung, schlägt sich als Rauheis oder Klareis nieder, Himmel nicht erkennbar), 56 (Sprühregen gefrierend, leicht), 57 (Sprühregen gefrierend, mäßig oder stark), 66 (gefrierender Regen, leicht) oder 67 (gefrierender Regen, mäßig oder stark) – vorlag (WW-Übersicht, siehe Anhang Nummer 8.1). Alle anderen Daten wurden nicht berücksichtigt.

Abbildung 36 zeigt die Windverteilung bei konkreter Vereisung über 12 Sektoren. Es ist zu erkennen, dass der Wind häufig aus Westsüdwest bis Südsüdwest, noch häufiger jedoch aus Ost Südost bis Südsüdost, kam.

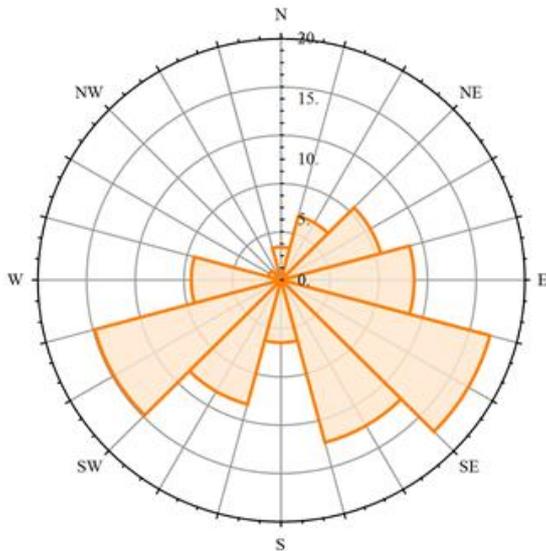


Abbildung 36: Windrose bei konkreter Vereisung

Abbildung 37 zeigt die dazugehörige Weibull-Verteilung über alle Sektoren. Diese lässt erkennen, dass die häufigste Windgeschwindigkeit bei ca. 2,5 m/s liegt, die mittlere Windgeschwindigkeit bei 3,09 m/s.

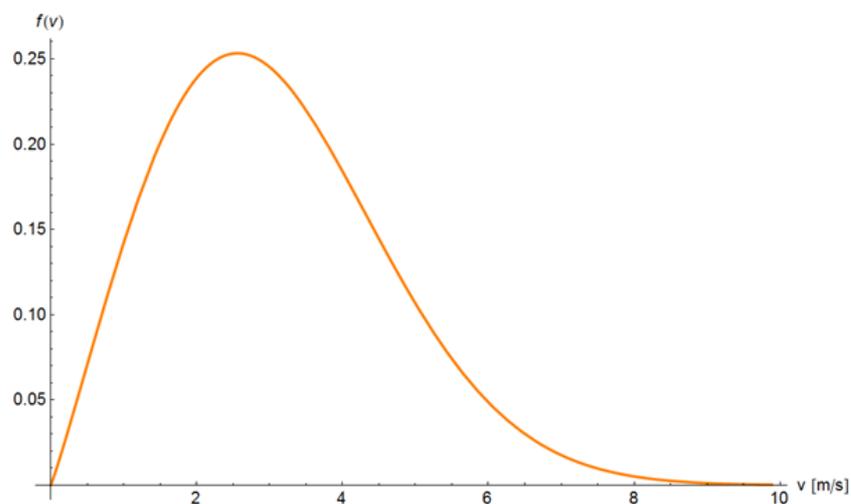


Abbildung 37: Weibull-Verteilung bei konkreter Vereisung

Abbildung 38 stellt die mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren dar. Diese lässt lediglich erkennen, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten in allen Sektoren zwischen 2,2 und 3,4 m/s liegen – nur in Richtung Nordnordwest liegt mit 0,95 m/s eine sehr viel geringere mittlere Windgeschwindigkeit vor.

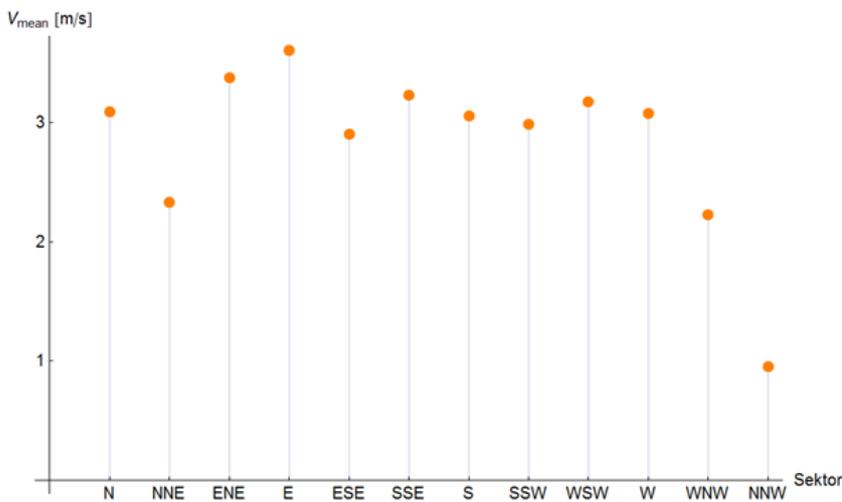


Abbildung 38: Mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren bei konkreter Vereisung

Tabelle 7 zeigt die Windhäufigkeiten je Sektor, die Weibullparameter A und k für jeden Sektor, die mittlere Windgeschwindigkeit je Sektor, die Windgeschwindigkeit unter der 99,9% der Daten liegen (99,9% Quantil) sowie die Anzahl aller in dem Sektor gemessenen Werte. Nach Auswertung dieser Daten lässt sich die Aussage treffen, dass die Sektoren 5 (17,76%), 9 (15,85%) und 6 (13,93%) die am häufigsten angeströmten Sektoren waren. Außerdem wies Sektor 4 mit 3,60 m/s die höchste mittlere Windgeschwindigkeit auf. Des Weiteren lagen in Sektor 7 99,9% aller Werte unter einer Windgeschwindigkeit von 9,89 m/s. Über alle Sektoren ergibt sich ein Weibull A von 3,49 m/s und ein Weibull k von 2,09. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 3,09 m/s und 99,9% aller Werte lagen bei Betrachtung aller Sektoren unter einer Windgeschwindigkeit von 8,79 m/s.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

Sektor	Häufigkeit (%)	A-Parameter (m/s)	k-Parameter	v (mean) (m/s)	99,9%-Quantil (m/s)	Anzahl der Werte
1 N	2,73	3,49	2,00	3,09	9,16	10
2 NNE	5,46	2,63	2,64	2,33	5,46	20
3 ENE	8,47	3,79	2,81	3,38	7,54	31
4 E	10,93	4,07	2,40	3,60	9,10	40
5 ESE	17,76	3,27	1,90	2,90	9,03	65
6 SSE	13,93	3,65	2,14	3,23	9,00	51
7 S	5,19	3,44	1,83	3,05	9,89	19
8 SSW	10,66	3,37	2,29	2,99	7,85	39
9 WSW	15,85	3,58	1,94	3,17	9,68	58
10 W	7,38	3,47	2,25	3,07	8,19	27
11 WNW	1,09	2,51	2,00	2,23	6,60	4
12 NNW	0,55	1,07	2,00	0,95	2,82	2
All	100,00	3,49	2,09	3,09	8,79	366

Tabelle 7: Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren

Abbildung 39 stellt die relative Häufigkeit der Temperaturen unter konkreten Vereisungsbedingungen dar. Die höchste Temperatur liegt bei 2,3°C, die niedrigste bei -15,3°C, am häufigsten treten jedoch Temperaturen zwischen -1 und -2°C auf.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

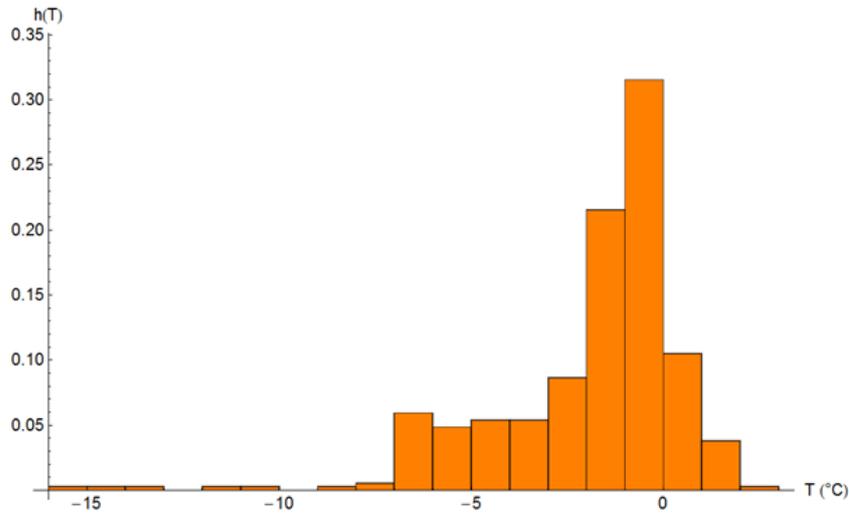


Abbildung 39: Relative Häufigkeit der Temperaturen bei konkreter Vereisung

Abbildung 40 zeigt die relative Häufigkeit der in diesem Szenario auftretenden relativen Luftfeuchtigkeit, diese liegt zwischen 49 und 100%. Die Luftfeuchtigkeit beträgt in fast allen Fällen über 90% – besonders häufig tritt hier eine Luftfeuchtigkeit von 96 bis 100% auf.

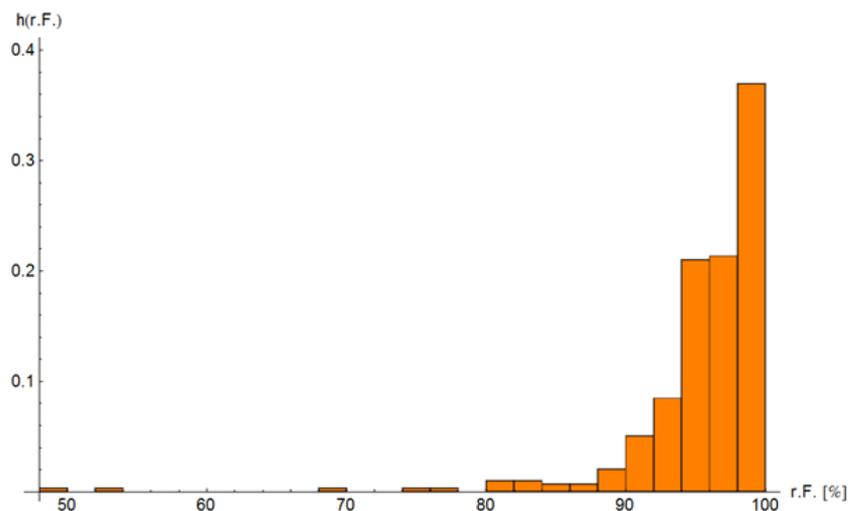


Abbildung 40: Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung

Abbildung 41 setzt dann die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur ins Verhältnis. Es lässt sich erkennen, dass die Fälle von relativ niedriger Luftfeuchtigkeit nur zwischen 1°C und -4°C auftreten.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

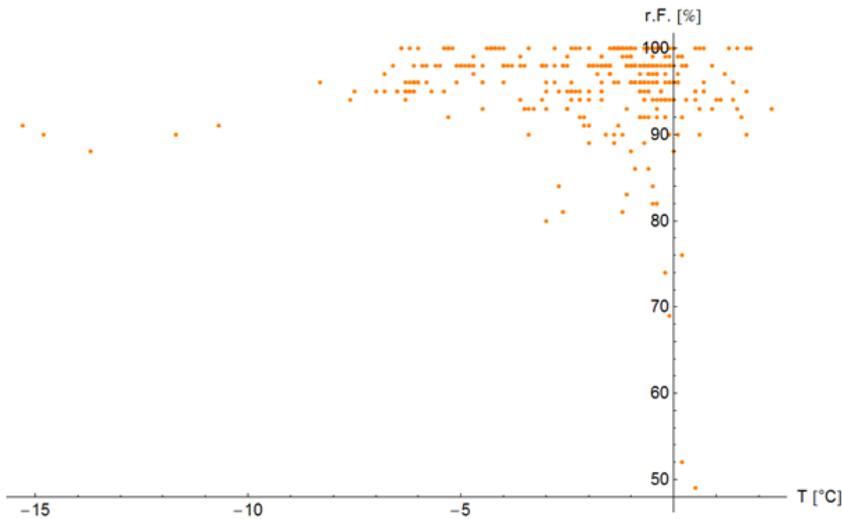


Abbildung 41: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei konkreter Vereisung

Abbildung 42 zeigt die relative Luftfeuchtigkeit im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit und Abbildung 43 wiederum das Verhältnis von Temperatur zur Windgeschwindigkeit, woraufhin Abbildung 44 die beiden, Faktoren relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur, gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit in einer Grafik aufplottet. Hier lässt sich kein Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und mittlerer Windgeschwindigkeit feststellen. Abbildung 43 lässt trotz der geringen Anzahl an Werten den schon zuvor beschriebenen Effekt erkennen, dass die Windgeschwindigkeiten mit abnehmender Temperatur sinken. Außerdem lässt sich erkennen, dass hohe Windgeschwindigkeiten in diesem Szenario nur zwischen 2°C und -3°C auftreten.

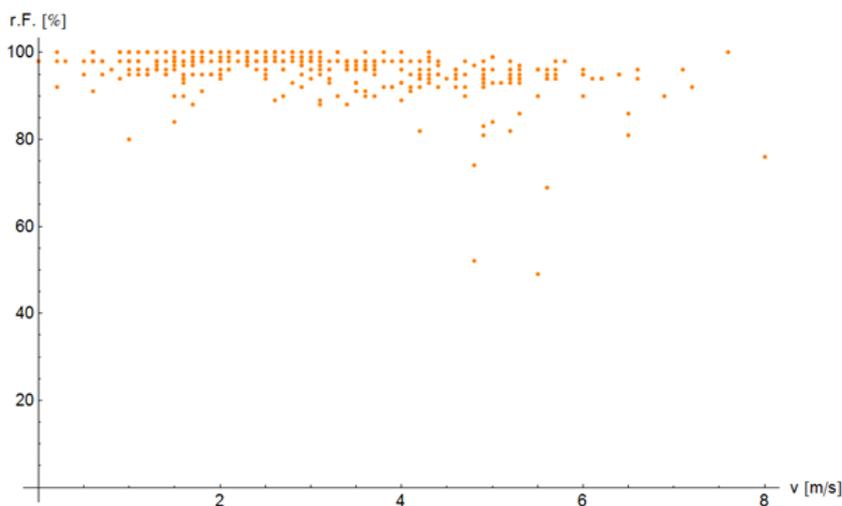


Abbildung 42: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit

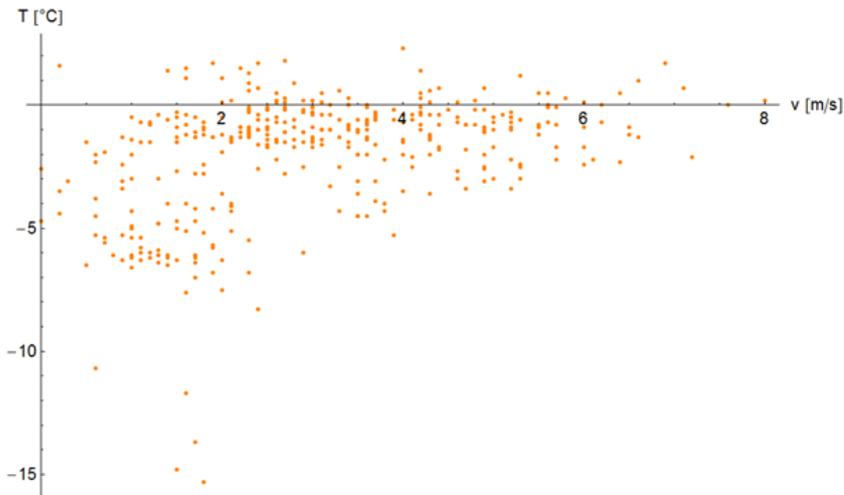


Abbildung 43: Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit

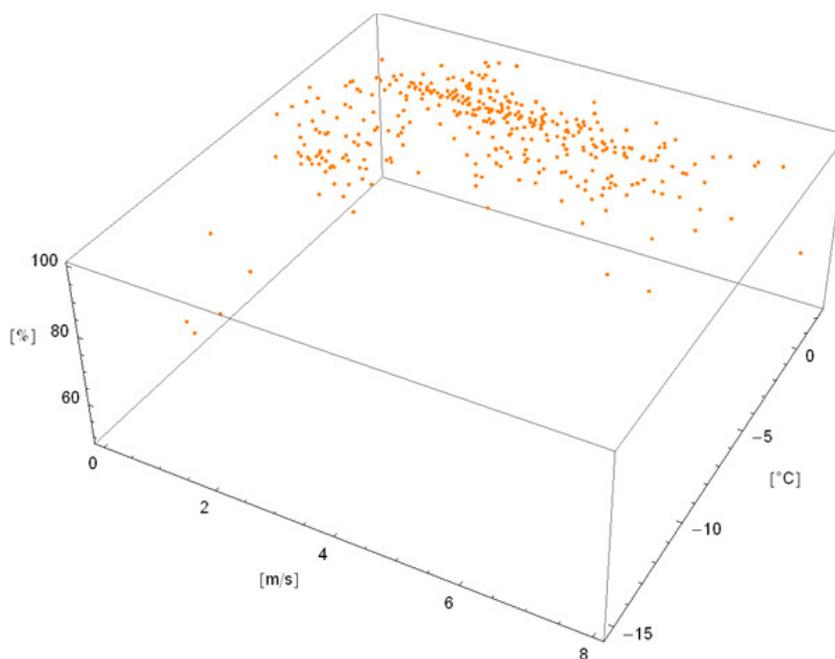


Abbildung 44: Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung

Tabelle 8 zeigt schließlich die absolute Anzahl der Vereisungsereignisse unter den angenommenen Bedingungen, die Anzahl der Monate sowie Tage, in denen Vereisung im Zeitraum eines bestimmten Jahres auftreten kann und die gesamte Anzahl möglicher Vereisungsereignisse, -monate und -tage als auch die durchgehende Vereisung (stündlich gemessene Vereisungsereignisse in Tage die 24 Stunden Vereisung aufweisen umgerechnet). Außerdem wird der Mittelwert über alle Jahre angegeben. Im Durchschnitt

wurden 33,73 Vereisungsereignisse in diesem Szenario detektiert. Es kam zu durchschnittlich 8,45 Vereisungstagen im Jahr, die sich auf durchschnittlich 3,18 Monate verteilten (Januar, Februar (nicht in allen Jahren), März (nicht in allen Jahren), April (nicht in allen Jahren), Oktober (nicht in allen Jahren), November (nicht in allen Jahren), Dezember).

Jahr	Vereisungsereignisse	Vereisungsmonate	Vereisungstage	Durchgehende Vereisung (Tage)
2002	70	3	11	2,92
2003	32	5	9	1,33
2004	28	4	12	1,17
2005	4	2	2	0,17
2006	49	4	8	2,04
2007	28	2	6	1,17
2008	11	1	2	0,46
2009	45	2	15	1,88
2010	51	5	15	2,13
2011	30	4	8	1,25
2012	23	3	5	0,96
Mean	33,73	3,18	8,45	1,41
Gesamt	371	35	93	15,46

Tabelle 8: Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren bei konkreter Vereisung

3.2.6 Szenario 5: Auswertung der Daten bei Wetterbedingungen, unter denen konkrete Vereisung festgestellt wurde (Szenario 4)

Dieser Abschnitt stellt die Auswertung der Wind- und Wetterdaten unter Wetterbedingungen vor, die bei konkreter Vereisung (Szenario 4) vorlagen. Dafür wurden die Maximaltemperatur und die minimale Luftfeuchtigkeit in Szenario 4 bestimmt und diese wiederum als Rahmenbedingungen für dieses Szenario festgelegt. So wurden nur Daten

ausgewertet, die unter der höchsten Temperatur und gleichzeitig über der niedrigsten Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung lagen. Diese können aus Abbildung 39, bzw. Abbildung 40 in Kapitel 3.2.5 abgelesen werden und lagen bei 2,3°C, bzw. bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 49%. Dies könnte allerdings auch darauf zurückzuführen sein, dass evtl. bereits vorher eine Eisbildung stattgefunden hat, zum Zeitpunkt der Beobachtung aber noch nicht wieder vollständig abgetaut war, obwohl die Wetterverhältnisse keine Vereisung zulassen würden (Regenerationszeit, siehe Kapitel 2.2).

Abbildung 45 zeigt die Windrose für Szenario 5. Die Hauptwindrichtung dieses Szenarios ist Ost. Allerdings liegen die relativen Häufigkeiten für Westsüdwestwinde auch recht hoch.

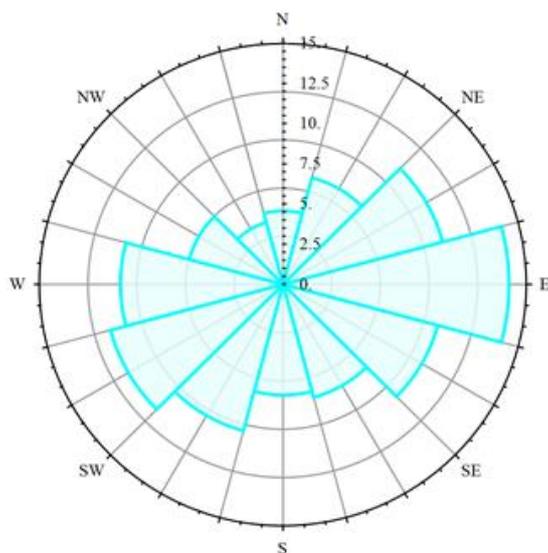


Abbildung 45: Windrose Wetterbedingungen bei konkreter Vereisung

Abbildung 46 zeigt die Weibull-Verteilung bei möglicher Vereisung. Am häufigsten treten Windgeschwindigkeiten um die 3 m/s auf, die mittlere Windgeschwindigkeit am Standort beträgt 3,47 m/s.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

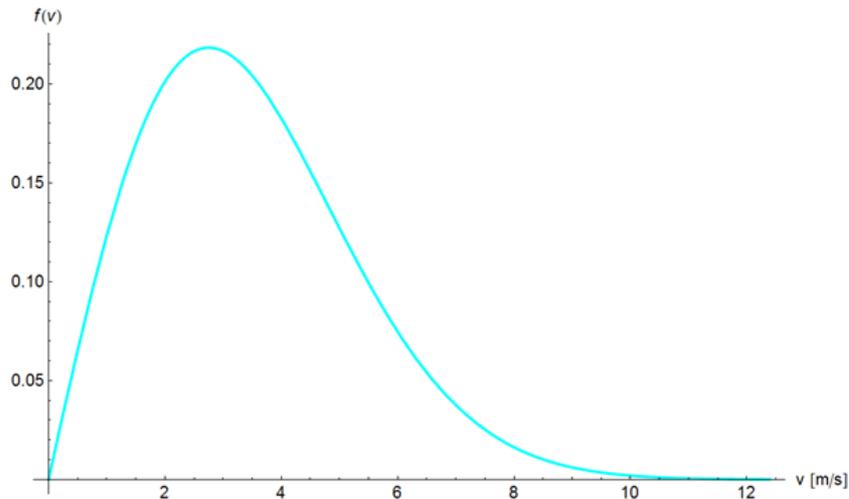


Abbildung 46: Weibull-Verteilung bei Wetterbedingungen bei konkreter Vereisung

Abbildung 47 zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit in den einzelnen Sektoren. Aus Richtung Süd bis Richtung Westnordwest steigt diese um 1,61 m/s auffällig an.

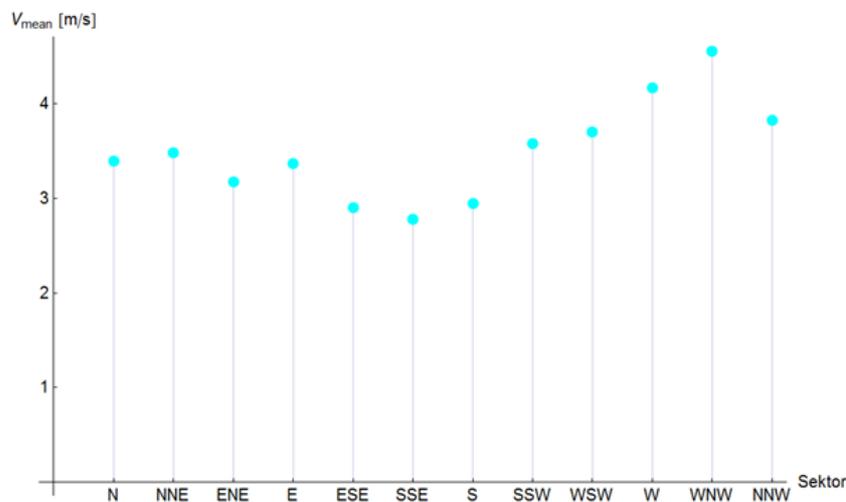


Abbildung 47: Mittlere Windgeschwindigkeit pro Sektor bei konkreter Vereisung

Tabelle 9 zeigt die Windhäufigkeiten je Sektor, die Weibullparameter A und k für jeden Sektor, die mittlere Windgeschwindigkeit je Sektor, die Windgeschwindigkeit unter der 99,9% der Daten liegen (99,9% Quantil) sowie die Anzahl aller in dem Sektor gemessenen Werte. Nach Auswertung dieser Daten lässt sich die Aussage treffen, dass die Sektoren 4 (13,92%), 9 (11,01%) und 3 (10,19%) die am häufigsten angeströmten Sektoren waren. Außerdem wies Sektor 11 mit 4,56 m/s die höchste mittlere Windgeschwindigkeit auf. Des Weiteren lag das 99,9%-Quantil in Sektor 11 bei einer Windgeschwindig-

keit von 12,39 m/s. Über alle Sektoren ergibt sich ein Weibull A von 3,91 m/s und ein Weibull k von 1,99. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 3,47 m/s und 99,9% aller Werte lagen bei Betrachtung aller Sektoren unter einer Windgeschwindigkeit von 10,35 m/s.

Sektor	Häufigkeit (%)	A-Parameter (m/s)	k-Parameter	v (mean) (m/s)	99,9%-Quantil (m/s)	Anzahl der Werte
1 N	4,57	3,83	2,14	3,40	9,46	925
2 NNE	6,87	3,93	2,06	3,48	10,03	1390
3 ENE	10,19	3,58	1,99	3,18	9,47	2061
4 E	13,92	3,80	2,10	3,37	9,52	2816
5 ESE	9,86	3,28	2,05	2,90	8,39	1996
6 SSE	7,27	3,14	2,33	2,78	7,18	1472
7 S	6,89	3,32	1,95	2,95	8,97	1394
8 SSW	9,43	4,04	2,03	3,58	10,49	1908
9 WSW	11,01	4,18	2,03	3,70	10,83	2227
10 W	10,02	4,71	2,12	4,17	11,72	2028
11 WNW	5,98	5,14	2,20	4,56	12,39	1211
12 NNW	3,98	4,32	2,09	3,82	10,89	806
All	100,00	3,91	1,99	3,47	10,35	20234

Tabelle 9: Werte der Windverhältnisse in den einzelnen Sektoren

Abbildung 48 stellt die relative Häufigkeit der Temperaturen unter konkreten Vereisungsbedingungen dar. Diese sind identisch mit Szenario 4.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

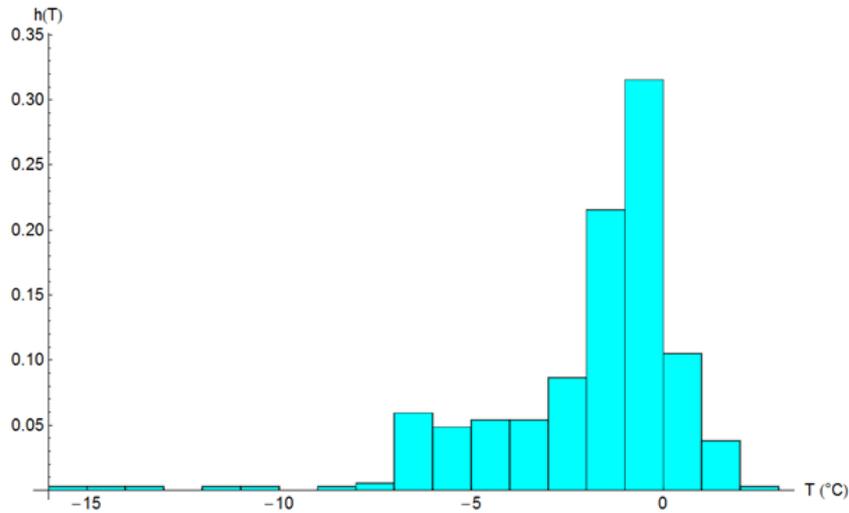


Abbildung 48: Relative Häufigkeit der Temperatur bei konkreter Vereisung

Abbildung 49 zeigt die relative Häufigkeit, der in diesem Szenario auftretenden relativen Luftfeuchtigkeit, auch hier gibt es keine Veränderungen zu Szenario 4.

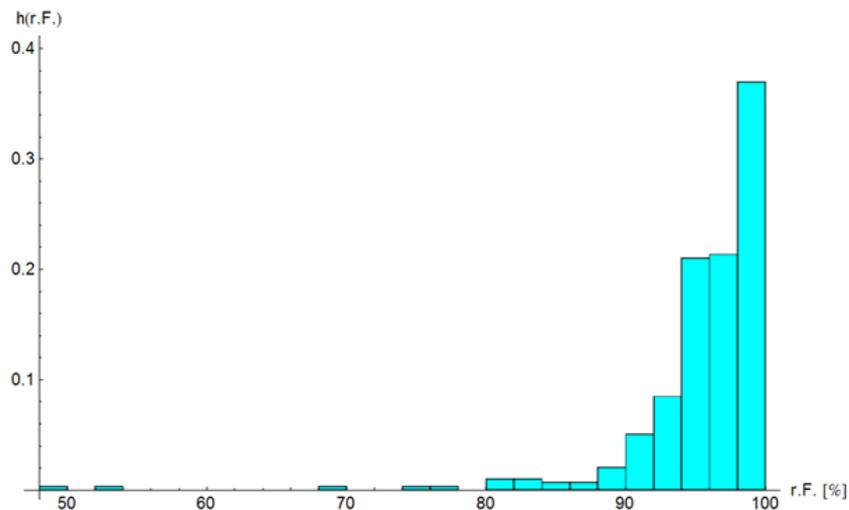


Abbildung 49: Relative Häufigkeit der Luftfeuchtigkeit bei konkreter Vereisung

Abbildung 50 setzt dann die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur ins Verhältnis. Auch hier liegen keine Veränderungen zu Szenario 4 vor.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

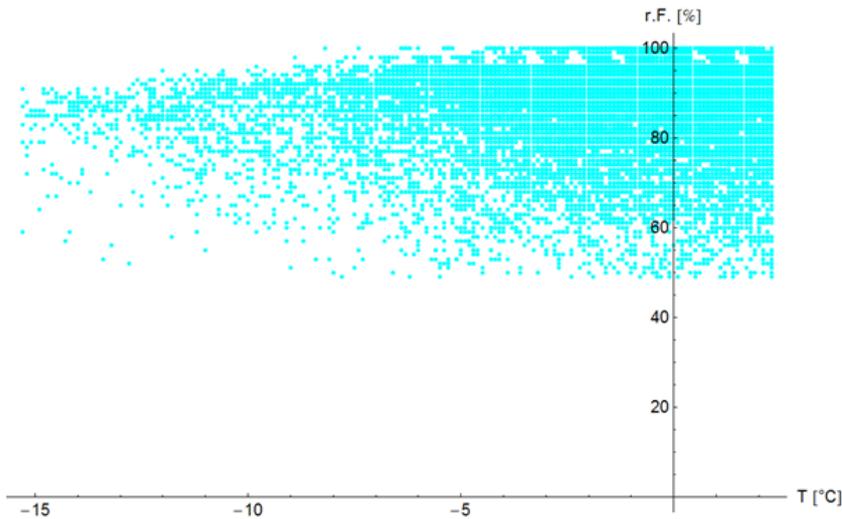


Abbildung 50: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur bei Wetterbedingungen der konkreter Vereisung

Abbildung 51 zeigt die relative Luftfeuchtigkeit im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit und Abbildung 52 wiederum das Verhältnis von Temperatur zur Windgeschwindigkeit, woraufhin Abbildung 53 die beiden Faktoren, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur, gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit in einer Grafik aufplottet. Auch Abbildung 52 lässt den schon zuvor beschriebenen Effekt erkennen, dass die Windgeschwindigkeiten mit abnehmender Temperatur sinken. Bei allen drei Graphiken lässt sich außerdem eine breite Streuung sowohl im Temperatur- als auch im Luftfeuchtigkeitsbereich erkennen – jedoch wird kein Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und mittlerer Windgeschwindigkeit deutlich.

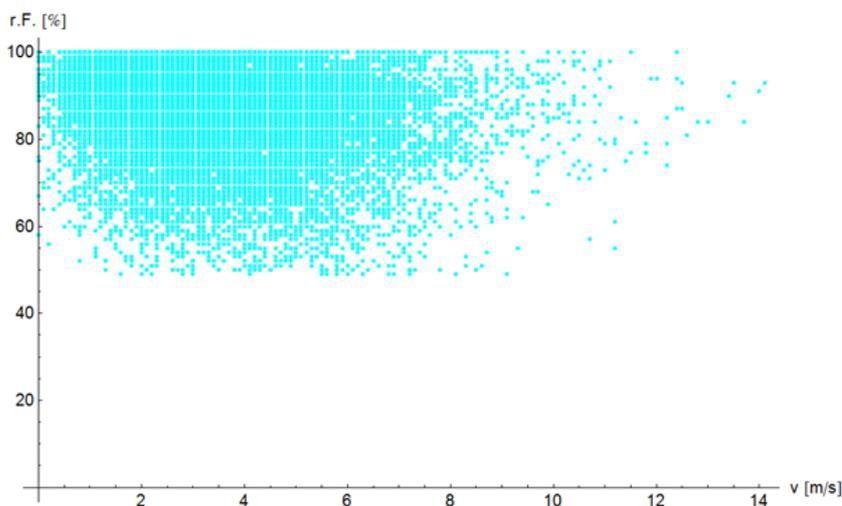


Abbildung 51: Verhältnis der relativen Luftfeuchtigkeit zur Windgeschwindigkeit

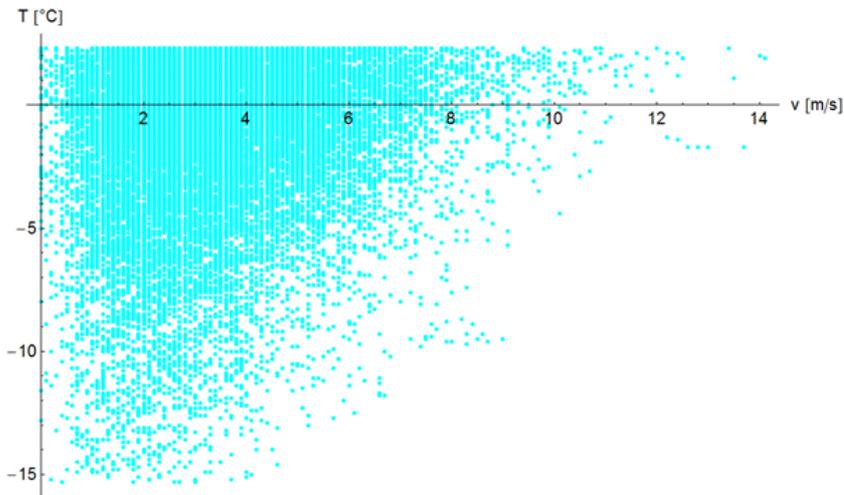


Abbildung 52: Verhältnis der Temperatur zur Windgeschwindigkeit

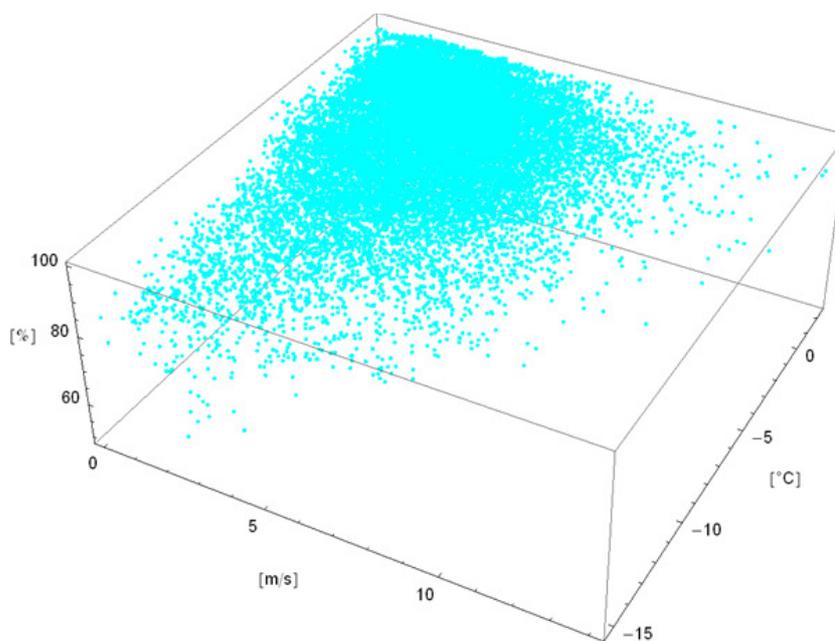


Abbildung 53: Verhältnis der Windgeschwindigkeit zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei Wetterbedingungen bei konkreter Vereisung

Tabelle 10 zeigt schließlich die absolute Anzahl der Vereisungsereignisse unter den angenommenen Bedingungen, die Anzahl der Monate sowie Tage, in denen Vereisung im Zeitraum eines bestimmten Jahres auftreten kann und die gesamte Anzahl möglicher Vereisungsereignisse, -monate und -tage als auch die durchgehende Vereisung (stündlich gemessene Vereisungsereignisse in Tage die 24 Stunden Vereisung aufweisen umgerechnet). Außerdem wird der Mittelwert über alle Jahre angegeben. Im Durchschnitt

wurden 1841,73 mögliche Vereisungsereignisse pro Jahr unter den angenommenen Bedingungen ermittelt. Es kam zu durchschnittlich 123,73 möglichen Vereisungstagen im Jahr, die sich auf durchschnittlich 7,64 Monate verteilten (Januar, Februar, März, April, Mai (nicht in allen Jahren), September (nicht in allen Jahren), Oktober, November, Dezember).

Jahr	Vereisungsereignisse	Vereisungsmonate	Vereisungstage	Durchgehende Vereisung (Tage)
2002	1798	8	127	74,92
2003	2114	8	144	88,08
2004	1995	8	138	83,13
2005	2067	8	130	86,13
2006	2008	7	120	83,67
2007	1277	8	103	53,21
2008	1314	7	107	54,75
2009	1890	7	115	78,75
2010	2546	8	145	106,08
2011	1635	8	118	68,13
2012	1615	7	114	67,29
Mean	1841,73	7,64	123,73	76,74
Gesamt	20259	84	1361	844,13

Tabelle 10: Vereisungsereignisse, -tage und -monate und durchgehende Vereisung in den jeweiligen Jahren

3.3 Vergleich der verschiedenen Szenarien

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für den Beispielstandort Berlin Schönefeld präsentiert. Der Vergleich der verschiedenen Szenarien soll aufzeigen, wo deren Unterschiede liegen und die Ergebnisse beschreiben. Eine Auswertung der Ergebnisse aller Standorte findet sich in Kapitel 4.

Abbildung 53 zeigt die Windrosen aller Szenarien im Vergleich. Dabei stellt der grüne Bereich, mit grüner Umrandung, die Häufigkeitsverteilung der Gesamtjahresdaten dar (Szenario 1), Blau kennzeichnet die mögliche Vereisung nach bestimmten Temperatur- und Wetterkriterien (Szenario 2), Rot repräsentiert die konkrete Vereisung und mögliche Nebelfrostablagerungen (Szenario 3), Orange ist der konkreten Vereisung zugeordnet (Szenario 4) und Türkis zeigt mögliche Vereisung unter den Bedingungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit der konkreten Vereisung (Szenario 5).

Hier sind deutliche Unterschiede zu erkennen. So tritt in Szenario 3 die Hauptwindrichtung der Gesamtjahresdaten (West-südwest) noch häufiger auf, in allen anderen Szenarien aber seltener. Des Weiteren kommen im Gegensatz zur Ganzjahresverteilung bei allen anderen Szenarien Winde aus den Richtungen Nordnordost bis Südsüdost sehr viel häufiger vor.

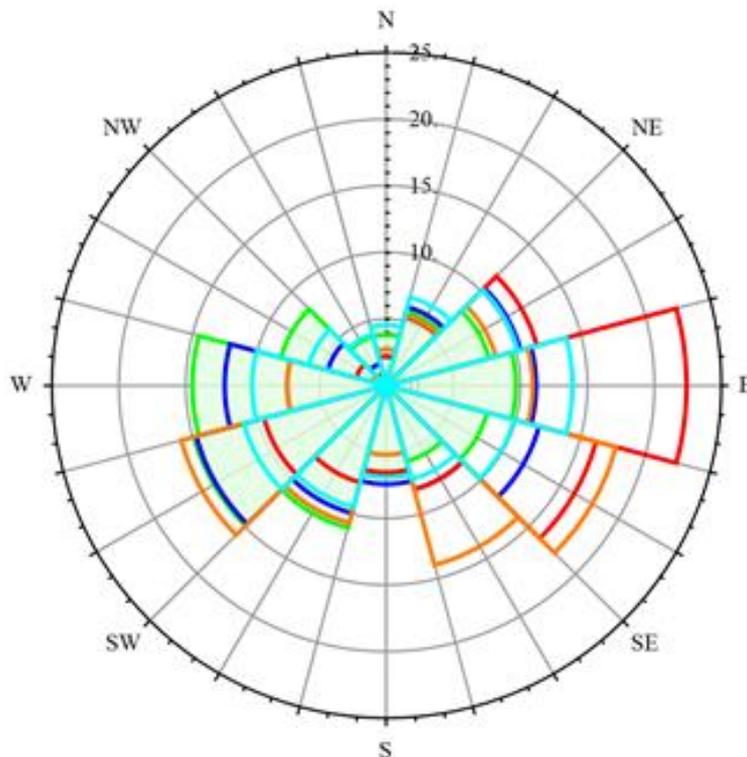


Abbildung 54: Windrosen aller Szenarien im Vergleich (Szenario 1 (grün); 2 (blau); 3 (rot); 4 (orange); 5 (türkis))

Um das ganze übersichtlicher darzustellen, eine Vergleichbarkeit herzustellen und eine Aussage treffen zu können, werden im Folgenden noch einmal die Windverteilungen aller Szenarien einzeln dargestellt und verglichen, allerdings nur unter Berücksichtigung der drei jeweilig häufigsten Windrichtungen (Hauptwindrichtung sowie erste und zweite Nebenwindrichtung) mit Fokus auf der Hauptwindrichtung. Tabelle 11 stellt ergänzend die drei häufigsten Windrichtungen und die jeweiligen Abweichung zum Szenario 1 dar. Hier lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien feststellen.

Szenario	Windrichtungen		
Szenario 1	9 WSW	10 W	8 SSW
Szenario 2	9 WSW	10 W	5 ESE
Abweichung zu S1 (°)	0	0	90
Szenario 3	4 E	5 ESE	3 ENE
Abweichung zu S1 (°)	150	150	150
Szenario 4	5 ESE	9 WSW	6 SSE
Abweichung zu S1 (°)	120	30	60
Szenario 5	4 E	9 WSW	3 ENE
Abweichung zu S1 (°)	150	30	150

Tabelle 11: Übersicht der Hauptwindrichtung und der 1. und 2. Nebenwindrichtung für alle Szenarien

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

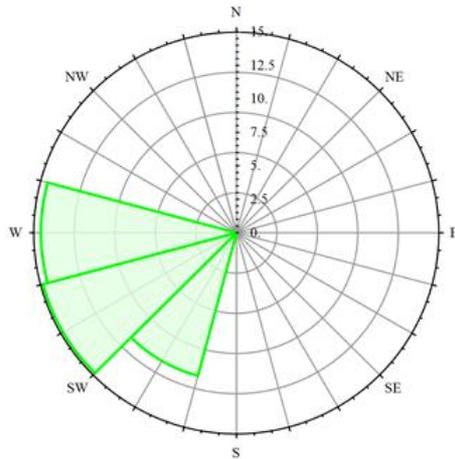


Abbildung 55: Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 1

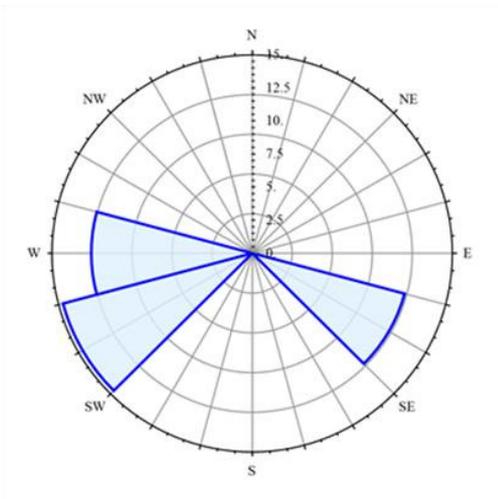


Abbildung 56: Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 2

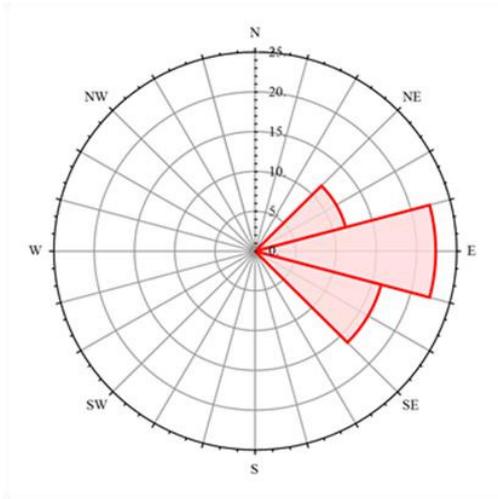


Abbildung 57: Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 3

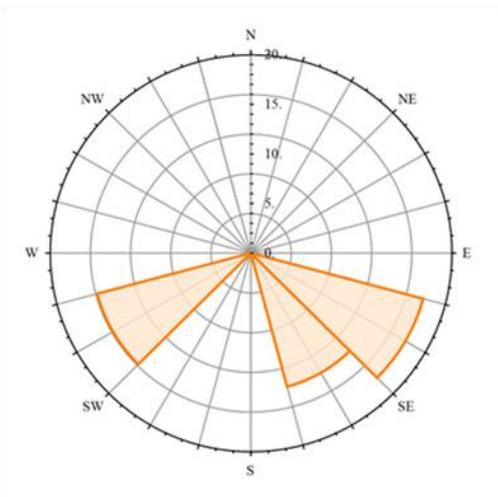


Abbildung 58: Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 4

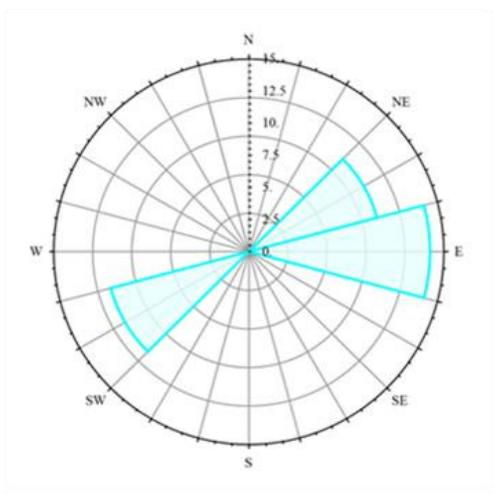


Abbildung 59: Hauptwindrichtung, 1. und 2. Nebenwindrichtung Szenario 5

In Szenario 2 (Abbildung 56) ändert sich im Verhältnis zu Szenario 1 nur die zweite Nebenwindrichtung, diese aber um 90° , von Südsüdwest auf Ostsüdost. Die Hauptwindrichtung und die erste Nebenwindrichtung bleiben gleich, am häufigsten kommt der Wind weiterhin aus Richtung Westsüdwest bis West.

In Szenario 3 (Abbildung 57) ändern sich alle Windrichtungen um 150° , von westliche auf östliche Windrichtungen (Von Westsüdwest nach Ost, von West nach Ostsüdost und von Südsüdwest nach Ostnordost).

In Szenario 4 (Abbildung 58) ändert sich die Hauptwindrichtung stark um 120° , von Westsüdwest nach Ostsüdost, bei den beiden Nebenwindrichtungen sind die Änderungen mit 30° von West nach Westsüdwest bzw. 60° von Südsüdwest auf Südsüdost sehr viel geringer. Die erste Nebenwindrichtung dieses Szenarios ist die Hauptwindrichtung aus Szenario 1.

In Szenario 5 (Abbildung 59) ändern sich die Hauptwindrichtung und die zweite Nebenwindrichtung mit 150° (Von Westsüdwest auf Ost, bzw. von Südsüdwest auf Ostnordost) sehr stark, die erste Nebenwindrichtung ändert sich nur um 30° , von West auf Richtung Westsüdwest, der Hauptwindrichtung des Szenario 1.

Abbildung 60 zeigt die unterschiedlichen Weibull-Verteilungen der einzelnen Szenarien mit gleicher Farbgebung wie in Abbildung 56 bis Abbildung 59. Hier lässt sich erkennen, dass die Häufigkeiten niedriger Windgeschwindigkeiten in den Vereisungsszenarien deutlich höher sind als im Gesamtjahresszenario und somit auch die mittlere Windgeschwindigkeit geringer ist. Außerdem ist zu sehen, dass auch die höchsten Windgeschwindigkeiten der Szenarien 2 bis 5 geringer sind als im Ganzjahresmittel. Tabelle 12 bestätigt diese Erkenntnisse in der Übersicht über $v_{(\text{mean})}$ und auch das 99,9%-Quantil liegt in allen Szenarien niedriger als bei der Gesamtjahresauswertung. Zudem ist auch zu erkennen, dass die A-Parameter der Weibull-Verteilung in Szenario 2 bis 5 geringer sind als in Szenario 1, dies ergibt sich daraus, dass der A-Parameter oder auch Skalierungsfaktor die charakteristische Windgeschwindigkeit des Messzeitraums beschreibt und proportional zur mittleren Windgeschwindigkeit ist. Da die mittlere Windgeschwindigkeit abnimmt, wird auch der A Parameter kleiner. Weiter ist zu erkennen, dass der k-Parameter der Weibull-Verteilung in Szenario 2 bis 5 höher liegt als in Szenario 1. Dieser

Anstieg ergibt sich daraus, dass der k-Parameter die „breite“ der Verteilung beschreibt. Je höher dieser Parameter ist, desto „spitzer“ ist die Kurve (Siehe Kapitel 2.4.1).

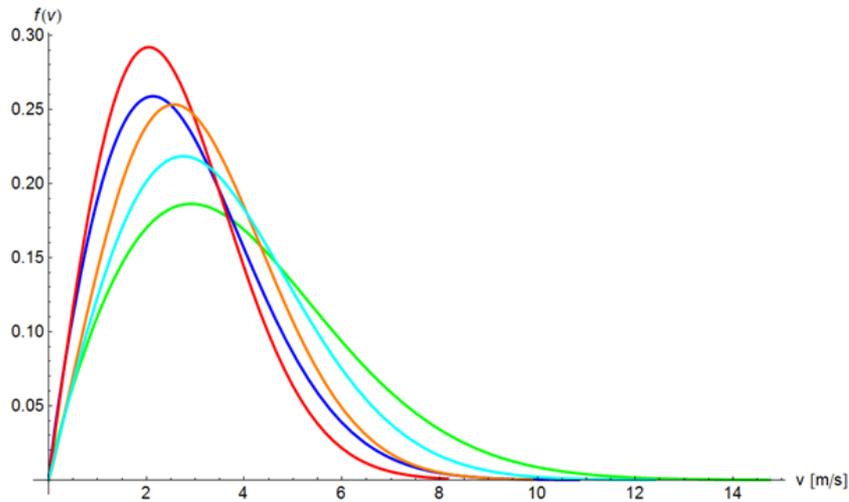


Abbildung 60: Weibull-Verteilungen aller Szenarien (Szenario 1 (grün); 2 (blau); 3 (rot); 4 (orange); 5 (türkis))

Szenario	A-Parameter	k-Parameter	v (mean) (m/s)	99,9%-Quantil (m/s)	Anzahl der Werte
Szenario 1	4,41	1,86	3,91	12,44	96271
Szenario 2	3,19	1,88	2,83	8,91	3057
Szenario 3	2,92	1,98	2,59	7,75	2689
Szenario 4	3,49	2,09	3,09	8,79	366
Szenario 5	3,91	1,99	3,47	10,35	20234

Tabelle 12: Weibullwerte, mittlere Windgeschwindigkeit und 99,9%-Quantil aller Szenarien

In Abbildung 61, die die unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten aller Szenarien in den einzelnen Sektoren zeigt, lässt sich erkennen, dass die Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Sektoren in Szenario 2 bis 5 stark von den Windgeschwindigkeiten in Szenario 1 abweichen. Die mittleren Windgeschwindigkeiten in Szenario 2 und 3 liegen in jedem Sektor unter der mittleren Windgeschwindigkeit des ersten Szenarios. In Szenario 4 werden die mittleren Windgeschwindigkeiten des Szenarios 1 in Richtung Ostnordost bis Süd leicht übertroffen. Gleiches gilt für Szenario 5 bei den Windrichtungen Nord bis Ost. Der Verlauf der Höhe der Windgeschwindigkeiten über die Sektoren

ist bei allen Szenarien ähnlich, allerdings fällt die Höhe der Windgeschwindigkeit in Szenario 3 und 4 in den letzten beiden Sektoren (Westnordwest und Nordnordwest) auffallend stark ab.

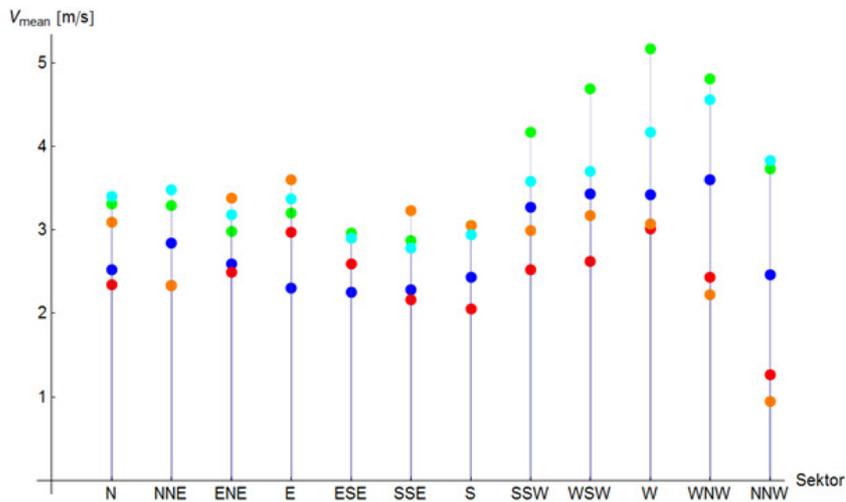


Abbildung 61: Windgeschwindigkeiten aller Szenarien in den einzelnen Sektoren (Szenario 1 (grün); 2 (blau); 3 (rot); 4 (orange); 5 (türkis))

Tabelle 13 stellt die Häufigkeiten, mit denen bestimmte Sektoren angeströmt werden, für alle Szenarien gegenüber und hebt den Hauptwindrichtungssektor sowie die ersten beiden Nebenwindrichtungssektoren in jedem Szenario hervor (leicht grau hinterlegt).

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

Sektor	Häufigkeit S1	Häufigkeit S2	Häufigkeit S3	Häufigkeit S4	Häufigkeit S5
N	3,84	2,19	2,23	2,73	4,57
NNE	5,72	6,12	5,36	5,46	6,87
ENE	7,95	10,37	11,64	8,47	10,19
E	9,69	11,19	22,42	10,93	13,92
ESE	7,79	11,81	16,21	17,76	9,86
SSE	5,87	8,05	8,07	13,93	7,27
S	6,81	7,39	6,51	5,19	6,89
SSW	11,05	9,91	7,51	10,66	9,43
WSW	14,84	14,69	9,45	15,85	11,01
W	14,49	12,07	7,40	7,38	10,02
WNW	8,14	4,51	2,31	1,09	5,98
NNW	3,81	1,70	0,89	0,55	3,98

Tabelle 13: Häufigkeiten mit denen Werte in einem bestimmten Sektor liegen für alle Szenarien

Tabelle 14 stellt nocheinmal vergleichend die minimale und maximale Temperatur, bzw. relative Luftfeuchtigkeit der einzelnen Szenarien, gegenüber.

Szenario	Max. T (°C)	Min. T (°C)	Max. r.F. (%)	Min. r.F. (%)
Szenario 1	36,7	-20,9	100	15
Szenario 2	0,5	-9,8	100	96
Szenario 3	2,3	-20,8	100	49
Szenario 4	2,3	-15,3	100	49
Szenario 5	2,3	-15,3	100	49

Tabelle 14: Übersicht der maximalen und minimalen Temperatur und Luftfeuchtigkeit für alle Szenarien

3.4 Diskussion der Ergebnisse am Beispielstandort

Die Auswertungen des Beispielstandorts lassen einige Rückschlüsse zu, die in der Gesamtauswertung validiert werden können.

Zunächst sollen die Szenarien untereinander verglichen werden, um eine Auswahl zu treffen.

Das Szenario 2 wurde auf Grundlage von Studien erstellt, die die Rahmenbedingungen dieses Szenarios vorgeben. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass auch die Betrachtung der Häufigkeiten der relativen Luftfeuchtigkeit unter konkreten Vereisungsbedingungen (Szenario 4) in Abbildung 40, die Annahme einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 95% für die Vereisungsbedingungen bestätigt. Dieses Szenario ist eine praxisnahe Vorgehensweise, da die Wetterdaten (Luftfeuchtigkeit und Temperatur) des DWD für jede Wetterstation frei zugänglich sind.

Szenario 3 beruht auf Augenbeobachtungen, die nur an einigen Wetterstationen des Hauptamtlichen DWD-Messnetzes durchgeführt werden und des Weiteren nicht frei zur Verfügung stehen. Diese Auswertung ist jedoch ziemlich genau, da die real vorliegenden Wettererscheinungen betrachtet werden und die Auswertung nicht nur auf Temperatur- und Luftfeuchtmessungen beruht. Zudem wurden hier, sowohl vorliegende Eisbildung als auch mögliche Nebelfrostablagerungen an WEA betrachtet. Dieses Szenario deckt alle Möglichkeiten der Eisbildung, die aus den Augenbeobachtungen erschlossen werden können ab und ist somit auch eine konservative Möglichkeit der Eisbildungsvorhersage.

Szenario 4 bildet nur erkannte Eisbildung ab. Es wurden nur WW-Erscheinungen ausgewertet, bei denen eine konkrete Vereisung durch die Augenbeobachtung detektiert wurde. Nebel, der nur an Gegenständen zu Nebelfrostablagerungen führen kann, aber nicht zwangsläufig direkt an der Station (sondern z.B. in 50 m Höhe) erkannt wurde, wurde nicht berücksichtigt. Dieses Verfahren ist als sehr genau, jedoch nicht als abdeckend für alle Fälle von Vereisung an Windenergieanlagen, zu betrachten.

Szenario 5 sollte dazu dienen, die Bedingungen für Vereisung genauer zu bestimmen und evtl. eine genauere Auswahl der Wetterbedingung für Vereisung zu ermöglichen. Wie sich jedoch bei der Auswertung herausstellte, bildet der hier zugrundegelegte

Datensatz keine genaue Eingrenzung. Vereisung taut nicht sofort ab und wird gemeldet, solange sie vorliegt. Somit kann es durchaus vorkommen, dass Vereisung, die sich unter anderen Wetterbedingungen gebildet hat, gemeldet wird, obwohl eine Eisbildung unter vorliegenden Wetterbedingungen nicht möglich wäre (Regenerationszeit, siehe Kapitel 2.2). Dafür spricht, dass in diesem Szenario Temperaturen von 2,3°C und eine Luftfeuchtigkeit von 49% berücksichtigt wurden. Diese Werte weichen sehr stark von den Bedingungen für Eisbildung aus Kapitel 2.2 und denen in der Literatur ab (BOKU-Met: Pospichal & Formayer 2010; FMI: Tammelin et al. 1998; MeteoSchweiz: Fikke et al. 2006).

Im Folgenden und auch in der Gesamtauswertung werden deshalb nur noch Szenario 2 und 3 bewertet, da diese als praxisnah, bzw. als sehr genau, aber trotzdem als abdeckend und konservativ bewertet werden.

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Anzahl der Werte	96430	3081	2680
Vereisungsmonate (mean)	-	6	6
Vereisungstage (mean)	-	46	39
Durchgehende Vereisung (Tage)	-	11,67	10,15
v (mean) (m/s)	3,91	2,83	2,59
Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	72,37	66,17
99,9%-Quantil (m/s)	12,44	8,91	7,75
Verhältnis 99,9%-Quantil zu S1 (%)	-	71,62	62,30
A-Parameter (m/s)	4,41	3,19	2,92
Verhältnis A-Parameter zu S1 (%)	-	72,33	66,21
k-Parameter	1,86	1,88	1,98
Verhältnis k-Parameter zu S1 (%)	-	101,08	106,45
Hauptwindrichtung	9 WSW	9 WSW	4 E
Abweichung zu S1 (°)	-	0	150
1. Nebenwindrichtung	10 W	10 W	5 ESE
Abweichung zu S1 (°)	-	0	150
2. Nebenwindrichtung	8 SSW	5 ESE	3 ENE
Abweichung zu S1 (°)	-	90	150

Tabelle 15: Vergleich aller Parameter von Szenario 1, 2, 3

Auswertung der Daten für einen Beispielstandort

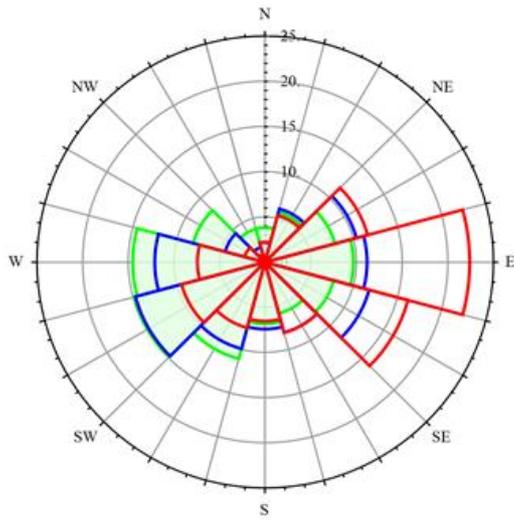


Abbildung 62: Windrose Szenario 1 (grün), 2 (blau), 3 (rot)

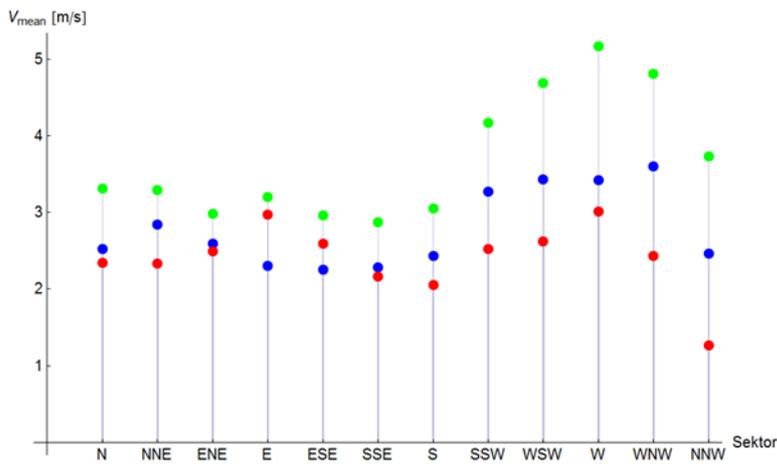


Abbildung 63: Vektorielle mittlere Windgeschwindigkeit Szenario 1 (grün), 2 (blau), 3 (rot)

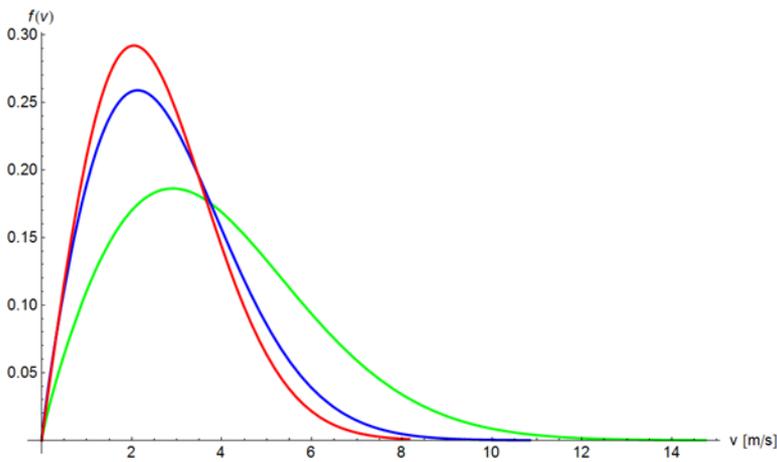


Abbildung 64: Weibull-Verteilungen der Szenarien 1 (grün), 2 (blau), 3 (rot)

Wie in Tabelle 15 zu erkennen ist, liegen Szenario 2 ca. 400 Werte mehr zu Grunde als für Szenario 3. Dies lässt sich mit der zuvor beschriebenen genaueren Datenauswahl erklären. Infolge dessen ergeben sich für Szenario 2 (46 Tage) etwas mehr Vereisungstage als für Szenario 3 (39 Tage). Diese liegen jedoch in der gleichen Größenordnung. In beiden Szenarien kommt es zu durchschnittlich ca. 6 Monaten, in denen Vereisung auftreten kann (Januar, Februar, März, November, Dezember sowie in manchen Jahren auch im April und/ oder Oktober). Die durchschnittliche durchgehende Vereisung pro Jahr beträgt für Szenario 2 11,67 Tage und für Szenario 3 10,15 Tage.

Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt in beiden Szenarien (2,83 bzw. 2,59 m/s) unter der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit (3,91 m/s). In Abbildung 63 lässt sich erkennen, dass das auch in jedem einzelnen Sektor der Fall ist. Das bedeutet, dass in Szenario 2 nur ca. 72,37% und in Szenario 3 nur ca. 66,17% der mittleren Ganzjahreswindgeschwindigkeit erreicht wird. Dieses Verhältnis ist interessant, da es besagt, dass die mittlere Windgeschwindigkeit unter Vereisung geringer ist als die mittlere Ganzjahreswindgeschwindigkeit. Dies wird bei der Auswertung der Gesamtergebnisse überprüft und ggf. eine allgemeingültige Aussage getroffen. Auch das 99,9%-Quantil liegt in Szenario 2 (8,91 m/s) und 3 (7,75 m/s) unter dem Langzeit-99,9%-Quantil (12,44 m/s) – das entspricht einem Verhältnis von 71,62% bzw. 62,30%. Dies bestätigt auch der zuvor in Kapitel 3.2 aufgezeigte Effekt im Zusammenhang von Temperatur und Windgeschwindigkeit. In jedem Szenario wurde festgestellt, dass die Windgeschwindigkeiten ab einer Temperatur nahe dem Gefrierpunkt mit sinkender Temperatur abnehmen. Da bei Vereisung immer Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt vorliegen, bestätigt dies die Annahme.

Auch die Weibull-Verteilungen in Abbildung 64 lassen erkennen, dass niedrige Windgeschwindigkeiten sehr viel häufiger auftreten und die höchsten Windgeschwindigkeiten der Szenarien 2 und 3 sehr viel geringer sind als die langjährige maximale Windgeschwindigkeit. Dies geben auch die A- und k-Parameter der Weibull-Verteilungen in Tabelle 15 wieder.

Abbildung 62 lässt erkennen, dass zwar die Haupt- und die erste Nebenwindrichtung in Szenario 2 die gleichen sind wie in Szenario 1, jedoch ändert sich die 3. Hauptwindrich-

tung um 90° und Winde aus östlicher Richtung treten sehr viel häufiger auf als in Szenario 1.

In Szenario 3 ändern sich sogar die Hauptwindrichtung, die erste Nebenwindrichtung und die 2. Nebenwindrichtung jeweils um 150°. Das heißt, Winde aus östlicher Richtung treten am häufigsten auf, im Gegensatz zu Szenario 1, in dem am häufigsten Winde aus westlicher Richtung auftraten (Vergleiche hierzu auch Werte aus Tabelle 15). Es bleibt festzuhalten, dass sich die Häufigkeiten der Windrichtungen, je nach Szenario, teilweise stark verändern, auch dies wird in der Gesamtauswertung überprüft, es wird versucht, eine allgemeingültige Aussage abzuleiten.

4 Darstellung der Gesamtergebnisse

Insgesamt lagen für die Auswertung Daten zu 42 Wetterstationen in ganz Deutschland vor. Allerdings konnte nicht für alle Stationen eine Auswertung durchgeführt werden, da die Daten teilweise unvollständig oder fehlerhaft waren.

Zunächst wurden Stationen ausgeschlossen, deren Messzeiträume geringer als 10 Jahre waren (Station Neubrandenburg, Station Aachen-Orsbach, Station Memmingen, Station Dortmund, Station Zweibrücken, Station Friedrichshafen). Um jährliche Schwankungen auszugleichen, müssen Winddaten für einen gewissen Zeitraum vorliegen. Ein Zeitraum von 30 Jahren gilt als klimatologisch stabil. Laut der aktuellen technischen Richtlinie (TR6) muss ein Langzeitraum mindesten 10 Jahre umfassen (FGW 2007).

Aus dem gleichen Grund wurden Stationen, mit weniger als 10 Jahren WW-Aufzeichnungen (Station Karlsruhe), nicht berücksichtigt.

Auch Stationen, bei denen im Messzeitraum von mindestens 10 Jahren weniger als 200 relevante WW-Erscheinungen in Szenario 3 aufgetreten sind (Station Barth, Station Kassel, Station Lübeck-Blankensee) – das bedeutet, dass bei 87.600 Werten (Zeitraum von 10 Jahren) in nur 0,2% der Fälle Vereisung aufgetreten ist – wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Die Messungen sind im Vergleich zu den anderen Stationen offensichtlich fehlerhaft oder unvollständig und lassen deshalb keine weitere Auswer-

tung zu, bzw. würden die Auswertung evtl. verfälschen. Dies kann auch aufgrund unregelmäßiger WW-Erscheinungsaufzeichnungen, z.B. an Sportflughäfen, der Fall sein.

Insgesamt wurden für die Gesamtbetrachtung 30 Standorte herangezogen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gesamtauswertung dargestellt. Dafür wurden die wichtigsten Parameter an jedem Standort betrachtet und verglichen. Dies stellt Tabelle 16 dar. Darin sind, zusätzlich zum Standortnamen die Koordinaten der Wetterstation in geographischer Länge und Breite (Dezimalgrad), die Windverteilungen der Hauptwindrichtung, der 1. und 2. Nebenwindrichtung der 30 ausgewählten Standorte mit langjähriger mittlerer Windverteilung (Szenario 1, grün), die Windverteilung unter möglichen Vereisungsbedingungen (Szenario 2, blau) sowie bei konkreter Vereisung und Nebelfrostablagerungen (Szenario 3, rot), zu sehen. Zudem wurden die Windrichtungsänderungen der Hauptwindrichtung von Szenario 2 und Szenario 3 im Verhältnis zu Szenario 1 angegeben. Außerdem werden die jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeiten aufgeführt und auch hier das Verhältnis der beiden Vereisungsszenarien zu der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit angegeben. Zusätzlich sind die Vereisungstage (Durchschnittliche Anzahl der Tage innerhalb derer Vereisung aufgetreten ist) und die durchschnittliche durchgehende Vereisung pro Jahr in Tagen angegeben (In Klammern hinter dem Wert der Vereisungstage aufgeführt). Dies sind die Werte, die in einer Risikobeurteilung für Eisabfall berücksichtigt werden.

Des Weiteren zeigen Abbildung 65 die Hauptwindrichtung jedes Szenarios und Abbildung 66 die Vereisungstage und Tage durchgehender Vereisung jedes Szenarios am jeweiligen Standort in Deutschland. So kann ein schneller Überblick über die Lage des Standorts, die Windverhältnisse und den Vereisungstagen der verschiedenen Szenarien am jeweiligen Standort gewonnen und diese geografisch eingeschätzt werden.

Bei der Untersuchung der Daten und dem Vergleich der Standorte hat sich bei der Betrachtung der Windgeschwindigkeit herausgestellt, dass diese in beiden Vereisungsszenarien überwiegend unter der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit liegt. Nur an den vier sehr exponierten Standorten Brocken (Harz), Fichtelberg, Hohenpeissenberg und auf Helgoland lagen die mittleren Windgeschwindigkeiten über den langjährigen mittleren Windgeschwindigkeiten. Dies liegt an den besonderen Bedingungen, die diese

Standorte aufweisen (große Höhenlagen bzw. Inselstandort). Deshalb kann für diese Standorte keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Für alle anderen Standorte liegt die durchschnittliche mittlere Windgeschwindigkeit in Szenario 2, durchschnittlich 31,0% unter der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit (Szenario 1). Jedoch gibt es an einzelnen Standorten große Abweichungen von diesem Mittel. So liegt die größte Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeit mit 50,7% in Szenario 2 bei der Station in Münster-Osnabrück, bei der Station Hahn liegt die mittlere Windgeschwindigkeit jedoch nur knapp 5% unter dem langjährigen Mittel. Daraus ergibt sich zwischen den beiden Extremen ein Unterschied mit dem Faktor 10. Ein Mittelwert ist hier also nicht die richtige Wahl, sondern es muss immer von Station zu Station gesondert betrachtet werden.

Bei Szenario 3 liegt die durchschnittliche mittlere Windgeschwindigkeit im Mittel 33,8% unter der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit. Auch hier gibt es jedoch große Unterschiede zwischen den Stationen. Die größte Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeit liegt in Düsseldorf mit 49,0% vor, die geringste Abweichung zum langjährigen Mittelwert ist wiederum an der Station Hahn mit nur 10,2% unter der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit auszumachen.

Es lässt sich festhalten, dass die mittlere Windgeschwindigkeit in beiden Vereisungsszenarien immer mindestens 5% unter der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit liegt, aber in Einzelfällen sogar bis zu 50% geringer ausfallen kann.

Die Untersuchung der Windrichtungsänderung der Hauptwindrichtungen sowie der Nebenwindrichtungen hat kein Muster erkennen lassen und damit kein eindeutiges Ergebnis geliefert. Es können sowohl in Szenario 2 als auch in Szenario 3 an einzelnen Standorten Änderungen der Hauptwindrichtungen von 180° zur langjährigen Hauptwindrichtung auftreten und auch die Nebenwindrichtungen weisen deutliche Änderungen auf. An anderen Standorten ändern sich Hauptwindrichtung oder eine der Nebenwindrichtungen hingegen in keinem der Vereisungsszenarien. Es gab hingegen in jedem Fall entweder eine Änderung der Hauptwindrichtung oder mindestens einer Nebenwindrichtung wobei es ebenfalls vorkam, dass sich lediglich die Häufigkeiten der ersten und zweiten Nebenwindrichtung geändert und gewissermaßen „getauscht“ haben, (siehe z.B. Fichtelberg). Es lässt sich zudem erkennen, dass an den Gebirgsstandorten

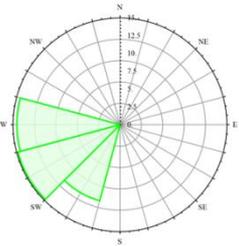
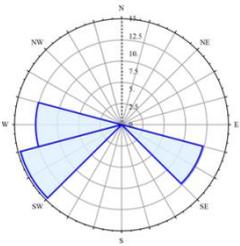
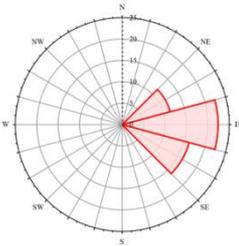
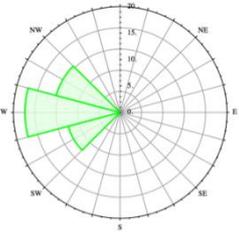
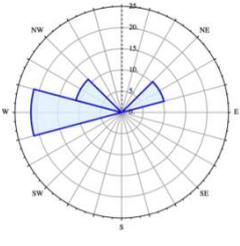
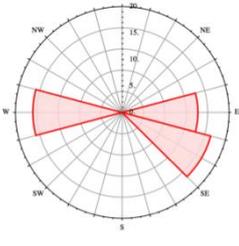
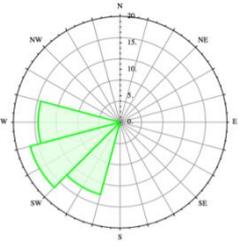
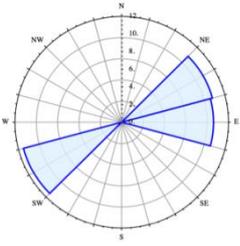
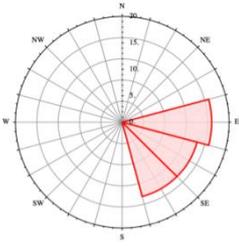
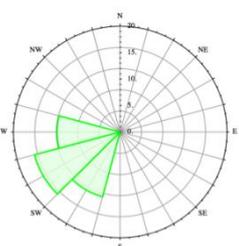
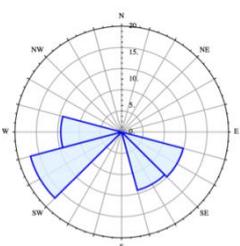
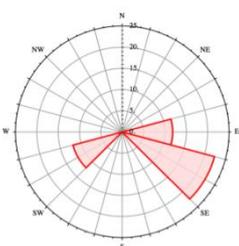
eine eher geringe Windrichtungsänderung auftritt, was damit zusammenhängt, dass durchschnittlich ca. 10% mehr Vereisungsereignisse pro Jahr vorliegen als an den übrigen Standorten. Bei Betrachtung der Karte (Abbildung 65) lässt sich allerdings kein weiteres Muster (z.B. ähnliche Änderungen in bestimmten Regionen) erkennen.

Es kann festgehalten werden, dass mit einer Änderung der Windrichtungsverteilung zu rechnen ist, die in einigen Fällen bis zu 180° betragen kann.

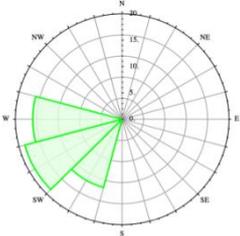
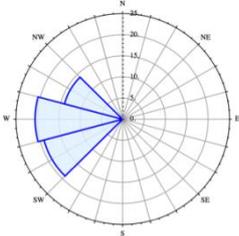
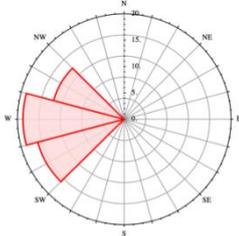
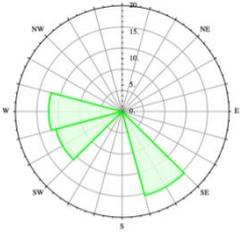
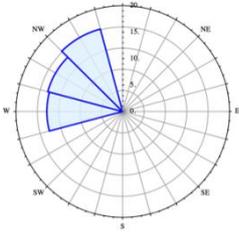
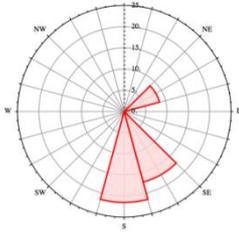
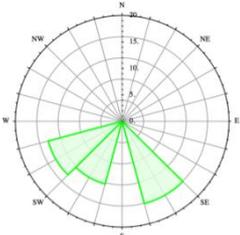
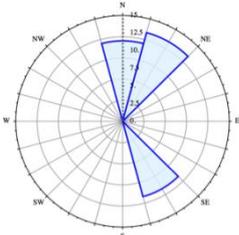
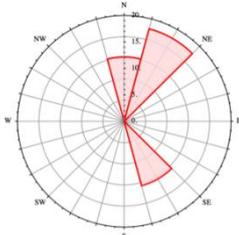
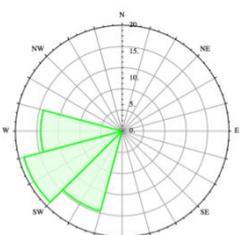
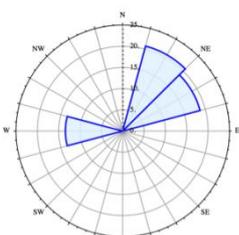
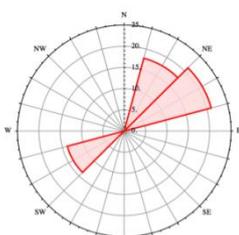
Die Tage, an denen Vereisung auftreten kann, sind standortspezifisch und müssen daher einzeln betrachtet werden. Eindeutig ist, dass es in Höhenlagen (z.B. Brocken) zu weitaus mehr Vereisungstagen und zu einer weitaus längeren, durchgehenden Vereisung kommt als an anderen Standorten. Ansonsten ist Abbildung 66 kein weiterer geographischer Zusammenhang ersichtlich (z.B. ähnliche Vereisungsdauer in bestimmten Regionen). Weiterhin ist zu erkennen, dass die Vereisungstage in den zwei unterschiedlichen Szenarien an einigen Standorten sehr ähnlich sind (z.B. Bremen), an anderen Standorten jedoch wieder sehr stark voneinander abweichen (z.B. Erfurt-Weimar). Gleiches gilt für die durchschnittliche durchgehende Vereisung. Auch hier gibt es Standorte, bei denen die Szenarien sehr ähnliche Werte aufweisen, an anderen wiederum nicht. Dies korreliert auch mit der Anzahl der Vereisungsereignisse pro Standort, da sich die durchgehende Vereisungsdauer aus diesen ergibt. Dies ist wichtig, da sich dadurch keinerlei Zusammenhang zu den Vereisungstagen feststellen lässt. Es bleibt festzuhalten, dass die Vereisungstage nur standortspezifisch betrachtet werden können.

Darstellung der Gesamtergebnisse

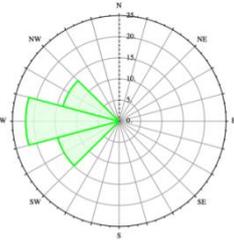
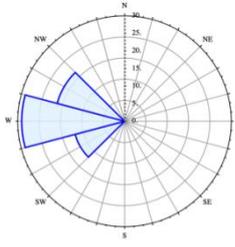
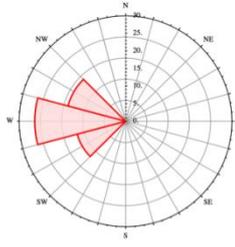
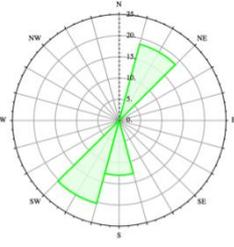
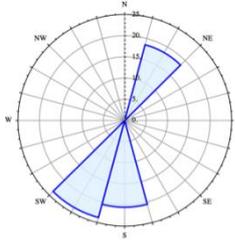
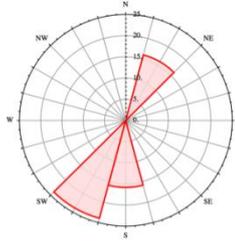
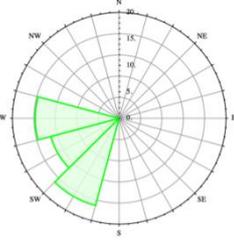
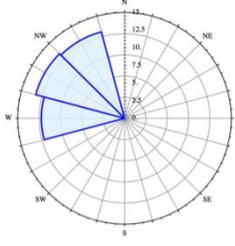
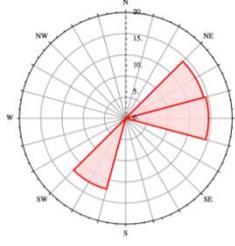
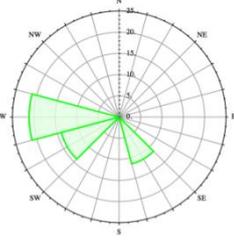
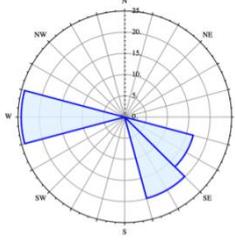
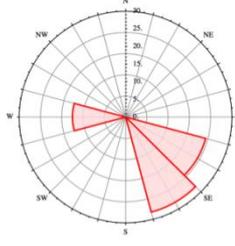
Tabelle 16: Auswertungstabelle aller ausgewählten Standorte

Standort: Berlin Schönefeld (13,53°E; 52,38°N)			
S1: v (mean): 3,91 m/s	S2: v (mean): 2,83 m/s	S3: v (mean): 2,59 m/s	S2: Vereisungstage: 46 d/a (11,7 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 72,37%
			S3: Vereisungstage: 39 d/a (10,2 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 66,17%
Standort: Berlin Tegel (13,31°E; 52,57°N)			
S1: v (mean): 3,49 m/s	S2: v (mean): 2,16 m/s	S3: v (mean): 2,44 m/s	S2: Vereisungstage: 19 d/a (4,2 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 61,95%
			S3: Vereisungstage: 30 d/a (7,7d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 69,83%
Standort: Braunschweig-Völ (10,45°E; 52,29°N).			
S1: v (mean): 3,43 m/s	S2: v (mean): 2,49 m/s	S3: v (mean): 2,38 m/s	S2: Vereisungstage: 36 d/a (9,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 72,50%
			S3: Vereisungstage: 25 d/a (5,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 69,37%
Standort: Bremen (8,80°E; 53,05°N)			
S1: v (mean): 4,13 m/s	S2: v (mean): 2,44 m/s	S3: v (mean): 2,65 m/s	S2: Vereisungstage: 36 d/a (9,66 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 59,18%
			S3: Vereisungstage: 36 d/a (10,3 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 64,32%

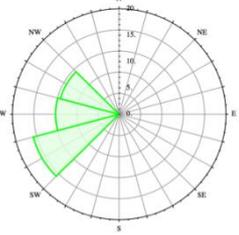
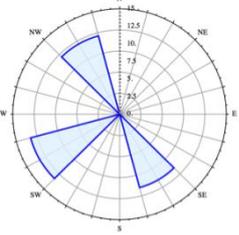
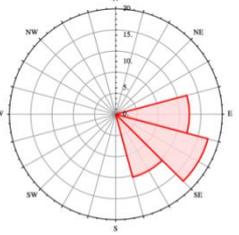
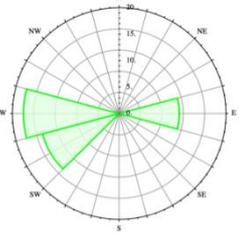
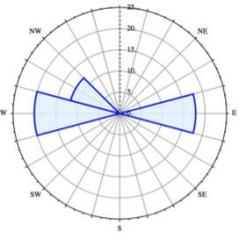
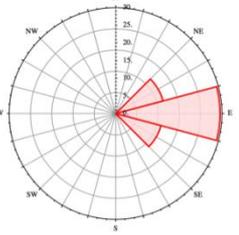
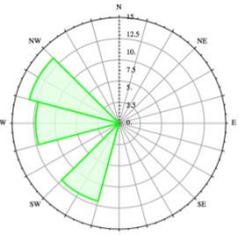
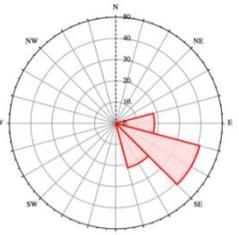
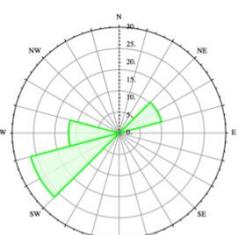
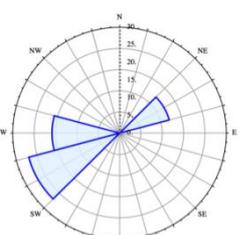
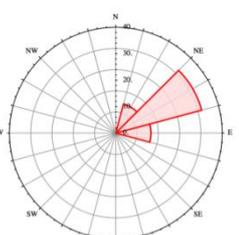
Darstellung der Gesamtergebnisse

Standort: Brocken (10,62°E; 51,80°N)			
S1: v (mean): 10,81 m/s	S2: v (mean): 12,95 m/s	S3: v (mean): 12,44 m/s	S2: Vereisungstage: 145 d/a (96,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 30° Verhältnis v (mean) zu S1: 119,85%
			S3: Vereisungstage: 137 d/a (56,3 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 30° Verhältnis v (mean) zu S1: 115,12%
Standort: Dresden (13,76°E; 51,13°N)			
S1: v (mean): 4,16 m/s	S2: v (mean): 3,35 m/s	S3: v (mean): 3,09 m/s	S2: Vereisungstage: 39 d/a (11,9 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 80,49%
			S3: Vereisungstage: 33 d/a (8,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 30° Verhältnis v (mean) zu S1: 74,19%
Standort: Düsseldorf (6,78°E; 51,30°N)			
S1: v (mean): 3,90 m/s	S2: v (mean): 2,02 m/s	S3: v (mean): 1,99 m/s	S2: Vereisungstage: 20 d/a (3,7 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 51,89%
			S3: Vereisungstage: 21 d/a (4,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 50,95%
Standort: Erfurt-Weimar (10,96°E; 50,98°N)			
S1: v (mean): 4,21 m/s	S2: v (mean): 2,99 m/s	S3: v (mean): 2,20 m/s	S2: Vereisungstage: 49 d/a (15,2 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 70,81%
			S3: Vereisungstage: 36 d/a (12,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 52,13%

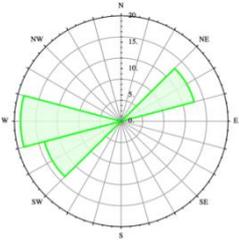
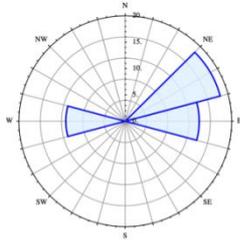
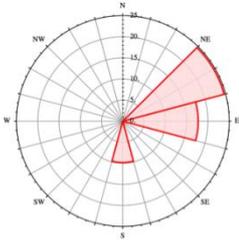
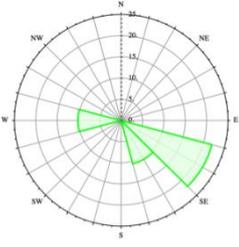
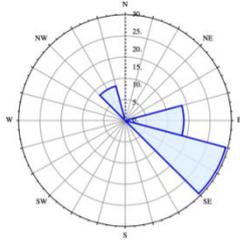
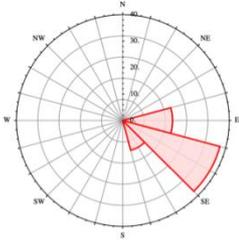
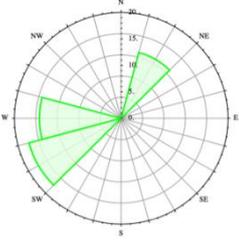
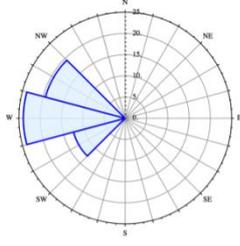
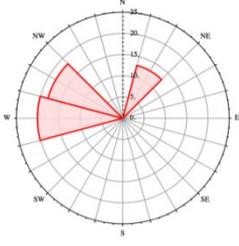
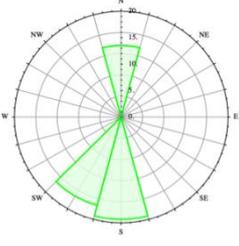
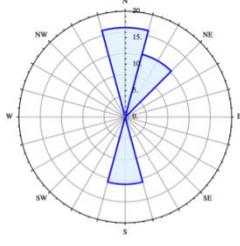
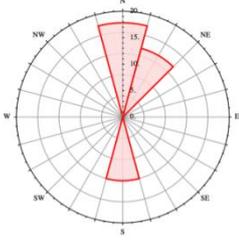
Darstellung der Gesamtergebnisse

Standort: Fichtelberg (12,9°E 6; 50,43°N)						
S1: v (mean): 9,34 m/s	S2: v (mean): 11,52 m/s	S3: v (mean): 10,91 m/s	S2: Vereisungstage: 143 d/a (94,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 123,33%			
			S3: Vereisungstage: 133 d/a (50,1 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 116,81%			
Standort: Frankfurt (Main) (8,60°E; 50,05°N)						
S1: v (mean): 3,30 m/s	S2: v (mean): 2,22 m/s	S3: v (mean): 1,83 m/s	S2: Vereisungstage: 22 d/a (4,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 67,08%			
			S3: Vereisungstage: 22 d/a (5,1 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 55,33%			
Standort: Görlitz (14,95°E; 51,16°N)						
S1: v (mean): 3,85 m/s	S2: v (mean): 3,08 m/s	S3: v (mean): 3,00 m/s	S2: Vereisungstage: 46 d/a (13,0 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 90° Verhältnis v (mean) zu S1: 79,85%			
			S3: Vereisungstage: 47 d/a (14,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 77,92%			
Standort: Hahn (9,14°E; 47,68°N)						
S1: v (mean): 3,96 m/s	S2: v (mean): 2,50 m/s	S3: v (mean): 2,75 m/s	S2: Vereisungstage: 40 d/a (15,2 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 95,01 %			
			S3: Vereisungstage: 42 d/a (14,1 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 89,77%			

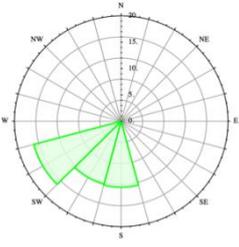
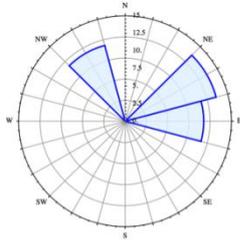
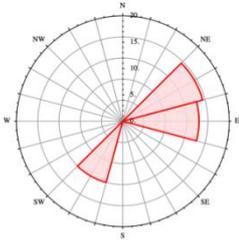
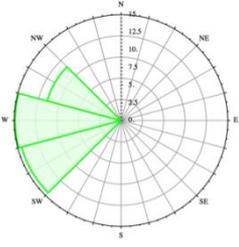
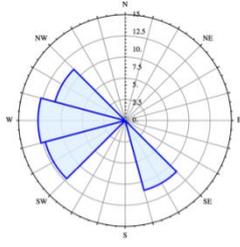
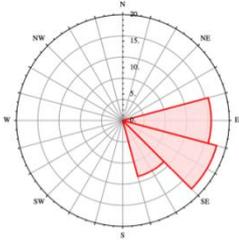
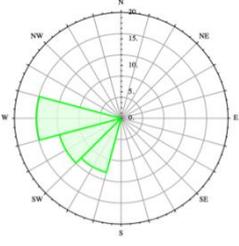
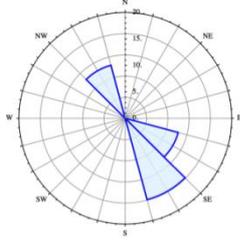
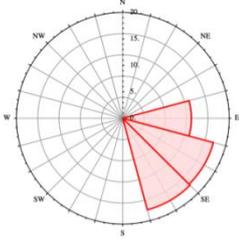
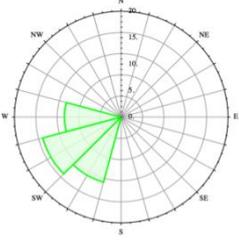
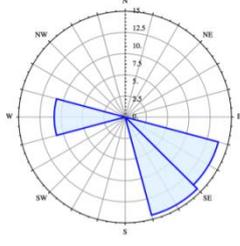
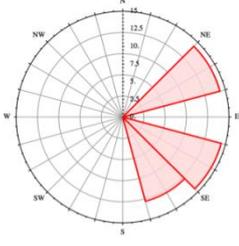
Darstellung der Gesamtergebnisse

Standort: Hamburg-Fuhlsbüttel (9,99°E; 53,63°N)						
S1: v (mean): 3,96 m/s	S2: v (mean): 2,50 m/s	S3: v (mean): 2,75 m/s	S2: Vereisungstage: 31 d/a (7,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 63,14%			
			S3: Vereisungstage: 35 d/a (9,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 69,50%			
Standort: Hannover-Langenhagen (9,69°E; 52,47°N)						
S1: v (mean): 3,75 m/s	S2: v (mean): 2,58 m/s	S3: v (mean): 2,65 m/s	S2: Vereisungstage: 38 d/a (9,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 68,65%			
			S3: Vereisungstage: 34 d/a (10,2 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 70,73%			
Standort: Helgoland 7,92°E; 54,19°N)						
S1: v (mean): 8,35 m/s	S2: v (mean): 8,75 m/s	S3: v (mean): 8,63 m/s	S2: Vereisungstage: 11 d/a (2,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 104,70%			
			S3: Vereisungstage: 10 d/a (3,3 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 103,28%			
Standort: Hohenpeissenberg (11,01°E; 47,80°N)						
S1: v (mean): 5,19 m/s	S2: v (mean): 5,46 m/s	S3: v (mean): 3,83 m/s	S2: Vereisungstage: 71 d/a (34,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 105,09%			
			S3: Vereisungstage: 57 d/a (16,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 73,75%			

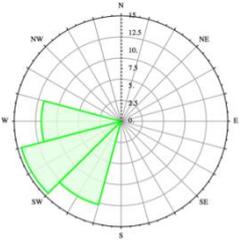
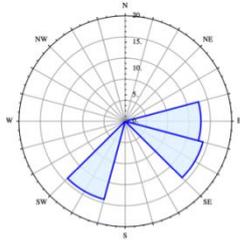
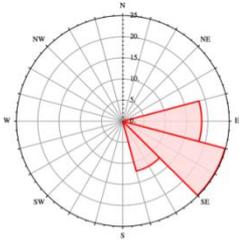
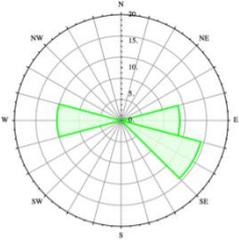
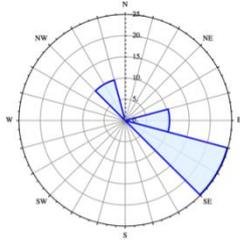
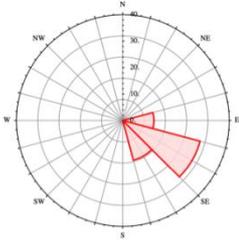
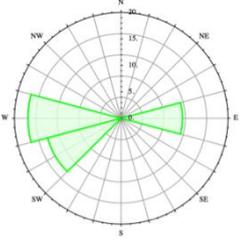
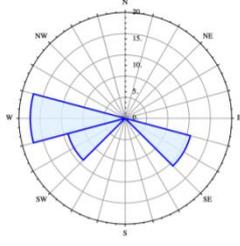
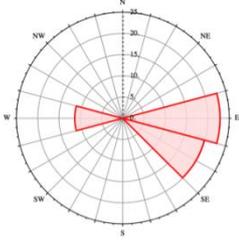
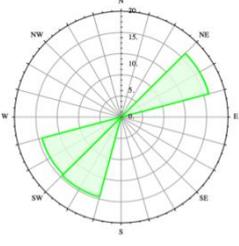
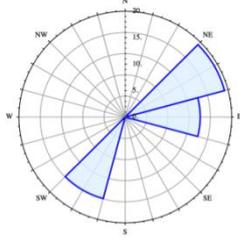
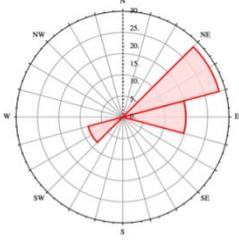
Darstellung der Gesamtergebnisse

Standort: Ingolstadt (11,55°E; 48,72°N)			
S1: v (mean): 2,94 m/s	S2: v (mean): 1,72 m/s	S3: v (mean): 1,70 m/s	S2: Vereisungstage: 42 d/a (6,9 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 58,38%
			S3: Vereisungstage: 32 d/a (7,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 57,93%
Standort: Köln-Wahn (7,13°E; 50,86°N)			
S1: v (mean): 3,21 m/s	S2: v (mean): 1,87 m/s	S3: v (mean): 1,85 m/s	S2: Vereisungstage: 30 d/a (7,2 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 58,37%
			S3: Vereisungstage: 21 d/a (4,0 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 57,59%
Standort: Konstanz (7,16°E; 49,57°N)			
S1: v (mean): 2,19 m/s	S2: v (mean): 1,45 m/s	S3: v (mean): 1,37 m/s	S2: Vereisungstage: 36 d/a (12,0 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 30° Verhältnis v (mean) zu S1: 66,48%
			S3: Vereisungstage: 33 d/a (12,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 30° Verhältnis v (mean) zu S1: 62,76%
Standort: Lahr (7,83°E; 48,37°N)			
S1: v (mean): 2,58 m/s	S2: v (mean): 1,45 m/s	S3: v (mean): 1,32 m/s	S2: Vereisungstage: 48 d/a (14,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 56,17%
			S3: Vereisungstage: 39 d/a (12,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 51,09%

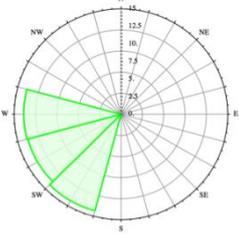
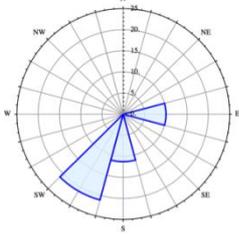
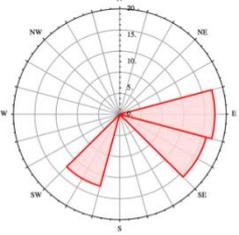
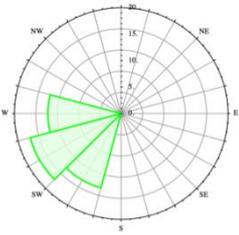
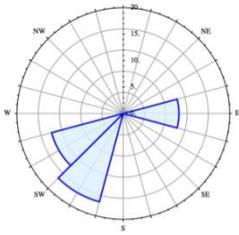
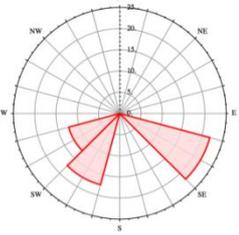
Darstellung der Gesamtergebnisse

Standort: Leipzig-Halle (12,26°E; 51,44°N)			
S1: v (mean): 4,33 m/s	S2: v (mean): 3,40 m/s	S3: v (mean): 2,98 m/s	S2: Vereisungstage: 32 d/a (9,3 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 78,58%
			S3: Vereisungstage: 33 d/a (9,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 68,82%
Standort: Lindenberg (14,12°E; 52,22°N)			
S1: v (mean): 3,51 m/s	S2: v (mean): 2,79 m/s	S3: v (mean): 2,82 m/s	S2: Vereisungstage: 42 d/a (11,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 79,48%
			S3: Vereisungstage: 48 d/a (16,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 80,32%
Standort: Magdeburg (11,58°E; 52,10°N)			
S1: v (mean): 2,60 m/s	S2: v (mean): 1,72 m/s	S3: v (mean): 1,72 m/s	S2: Vereisungstage: 38 d/a (9,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 66,19%
			S3: Vereisungstage: 33 d/a (12,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 66,12%
Standort: Münster-Osnabrück (7,70°E; 52,14°N)			
S1: v (mean): 3,19 m/s	S2: v (mean): 1,61 m/s	S3: v (mean): 1,47 m/s	S2: Vereisungstage: 36 d/a (9,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 90° Verhältnis v (mean) zu S1: 50,29%
			S3: Vereisungstage: 38 d/a (10,1 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 45,93%

Darstellung der Gesamtergebnisse

Standort: Nordholz (8,65°E; 53,76°N)			
S1: v (mean): 4,64 m/s	S2: v (mean): 3,16 m/s	S3: v (mean): 3,08 m/s	S2: Vereisungstage: 42 d/a (11,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 30° Verhältnis v (mean) zu S1: 68,02%
			S3: Vereisungstage: 36 d/a (12,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 66,46%
Standort: Nürnberg (11,06°E; 49,50°N)			
S1: v (mean): 3,01 m/s	S2: v (mean): 2,02 m/s	S3: v (mean): 1,96 m/s	S2: Vereisungstage: 48 d/a (10,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 67,15%
			S3: Vereisungstage: 39 d/a (8,8 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 65,07%
Standort: Potsdam (13,06°E; 52,38°N)			
S1: v (mean): 4,26 m/s	S2: v (mean): 3,41 m/s	S3: v (mean): 3,36 m/s	S2: Vereisungstage: 55 d/a (16,7 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 79,94%
			S3: Vereisungstage: 32 d/a (8,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 180° Verhältnis v (mean) zu S1: 78,83%
Standort: Saarbrücken (7,12°E; 49,22°N)			
S1: v (mean): 3,57 m/s	S2: v (mean): 2,50 m/s	S3: v (mean): 2,26 m/s	S2: Vereisungstage: 40 d/a (12,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 70,14%
			S3: Vereisungstage: 34,5 d/a (12,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 63,17%

Darstellung der Gesamtergebnisse

Standort: Schleswig (9,51°E; 54,46°N)			
<p>S1: v (mean): 4,04 m/s</p> 	<p>S2: v (mean): 3,14 m/s</p> 	<p>S3: v (mean): 3,04 m/s</p> 	<p>S2: Vereisungstage: 44 d/a (14,4 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 77,65%</p>
			<p>S3: Vereisungstage: 35 d/a (12,5 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 75,19%</p>
Standort: Schwerin (11,39°E; 53,64°N)			
<p>S1: v (mean): 3,80 m/s</p> 	<p>S2: v (mean): 2,79 m/s</p> 	<p>S3: v (mean): 2,72 m/s</p> 	<p>S2: Vereisungstage: 25 d/a (6,6 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 30° Verhältnis v (mean) zu S1: 73,55%</p>
			<p>S3: Vereisungstage: 29 d/a (6,7 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 120° Verhältnis v (mean) zu S1: 71,65%</p>

Darstellung der Gesamtergebnisse

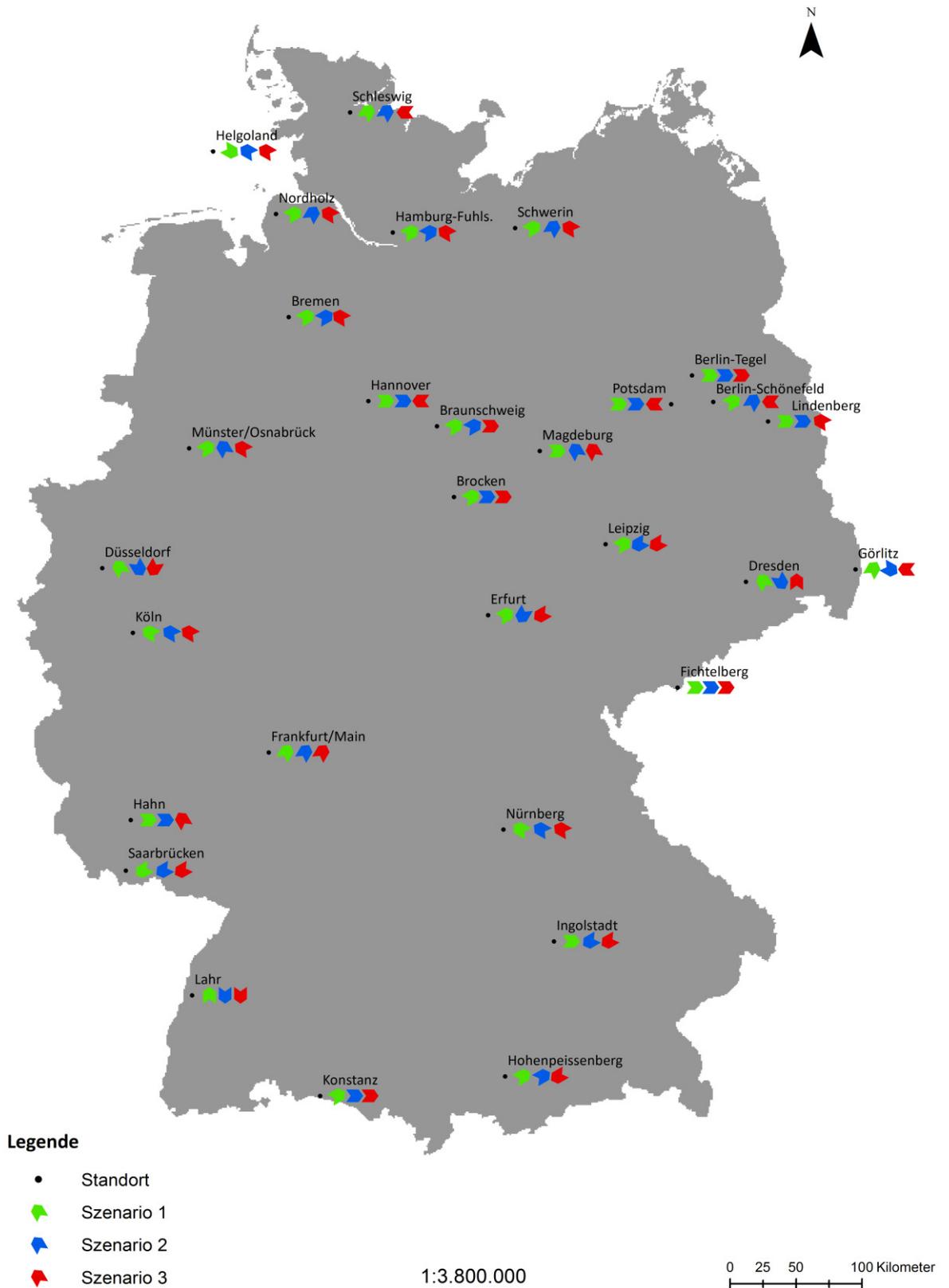


Abbildung 65: Hauptwindrichtungen an allen Standorten

Darstellung der Gesamtergebnisse



Abbildung 66: Vereisungstage und Tage durchgehender Vereisung an allen Standorten

5 Fallbeispiel zur Risikobeurteilung

5.1 Beschreibung des Fallbeispiels

Der Einfluss der unterschiedlichen Wetterszenarien auf die Ergebnisse einer Risikobeurteilung wird anhand eines Fallbeispiels untersucht. Dabei wird eine Risikobeurteilung des Eisabfalls für einen fiktiven Standort (Hauschild et al. 2014) für alle drei unterschiedlichen Szenarien durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Zur Art und Lage der WEA und der Schutzobjekte, werden zu diesem Zwecke Annahmen getroffen, die im Folgenden erläutert werden.

Am fiktiven Standort „Schönbetrieb“ soll eine WEA mit 110 m Nabenhöhe und 84 m Rotordurchmesser errichtet werden. Der Standort befindet sich zwischen einer Landstraße (westlich des Standorts) und einem Betriebsgelände (südöstlich). An das Betriebsgelände schließt sich ein Parkplatz an (östlich), der über eine Zufahrtsstraße (nördlich) von der Landstraße aus erreicht werden kann. Des Weiteren befindet sich in der Nähe des geplanten Standorts eine Gasleitung (nordöstlich). Diese wird jedoch nicht weiter betrachtet, da sie unterirdisch verlegt ist und aus diesem Grund keine Gefährdung durch Eisabfall zu erwarten ist. Die minimalen Abstände der WEA betragen zur Landstraße ca. 73 m, zur Zufahrtsstraße ca. 70 m, zum Parkplatz ca. 55 m und zum Betriebsgelände ca. 50 m. Der Standort und die Umgebung sind auf dem Lageplan in Abbildung 67 schematisch dargestellt.

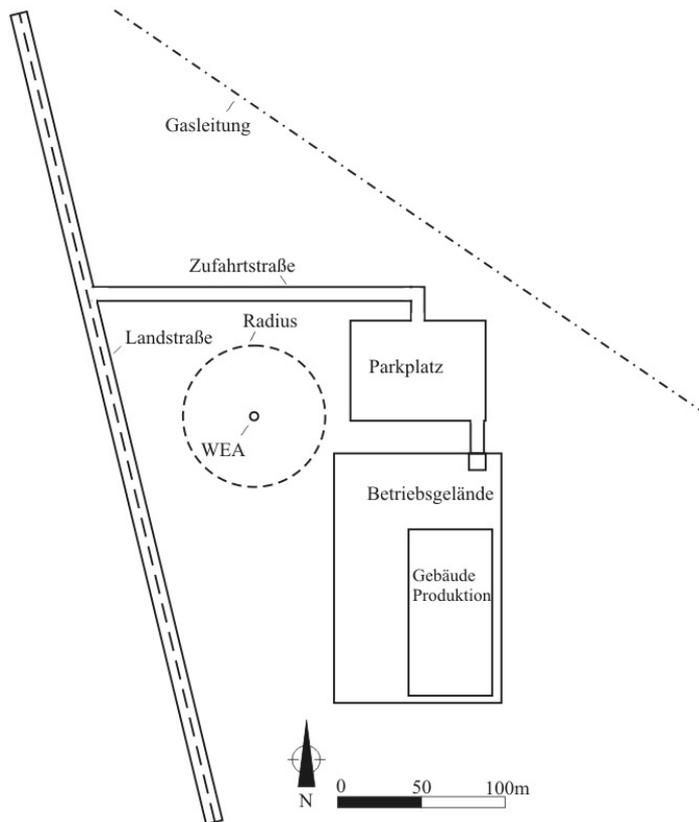


Abbildung 67: Lageplan des Standorts Schönbetrieb (Hauschild et al. 2014)

Am Standort Schönbetrieb sollen die gleichen Wind- und Wetterbedingungen, wie am zuvor ausgewerteten Beispielstandort Berlin-Schönefeld, herrschen (siehe Kapitel 3.2). Diese werden als Randbedingungen zur Berechnung der Trefferhäufigkeiten herangezogen. Aufgrund von Systemen zur automatischen Abschaltung von WEA, welche bei der geplanten WEA vorausgesetzt werden können⁴, ist bei Eisansatz mit Eisabwurf von drehenden Rotorblättern nicht zu rechnen. Aus diesem Grund erfolgt hier eine Betrachtung der Gefährdungsbereiche durch Eisabfall, dementsprechend von einer stehenden Anlage oder einer Anlage im Trudelbetrieb.

Grundlage für die Risikoberechnung der einzelnen Szenarien sind die jeweilige Häufigkeitsverteilung der Windrichtung (diskrete Verteilung⁵) und die sich aus den A- und k-

⁴ Um eine mögliche Gefährdung durch Eisabwurf zu vermeiden sind bei WEA, die innerhalb eines Abstandes von $1,5 \times (\text{Rotordurchmesser} + \text{Nabenhöhe})$ zu Verkehrswegen oder Gebäuden geplant werden, technische bzw. betriebliche Maßnahmen anzuwenden (DiBt 2011). Das heißt, sie sind mit einem Eiserkennungssystem auszurüsten, welches die WEA bei Eisansatz automatisch abschaltet.

⁵ Die Zufallsvariable kann nur endlich viele oder abzählbar unendlich viele Werte annehmen (Hartung et al. 2002).

Parametern der Weibull-Verteilung ergebende Windgeschwindigkeit für jede Windrichtung.

Die Flugbahn eines Eisobjekts wird durch verschiedene Randbedingungen, wie der Luftdichte ($1,3 \text{ kg/m}^3$ bei 0°C) sowie der Schwerkraft (Gravitationskonstante $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) beeinflusst. Des Weiteren sind verschiedene Parameter, wie Position und Größe des Eisobjekts und die Stellung des Rotorblatts, zu berücksichtigen.

Die Simulation der flächenbezogenen Trefferhäufigkeiten wurde mithilfe der Monte-Carlo-Simulation durchgeführt (Hauschild et al. 2011, 2014). Dazu wird ein Eisabfall mit einer zufälligen Form (Würfel, Quader, Brett) und Fläche ($0,013$ bis $0,035 \text{ m}^2$) von einer zufälligen Stelle des Rotorblatts simuliert (diskrete Verteilungsfunktionen), wobei für manche Positionen auf dem Rotorblatt höhere Wahrscheinlichkeiten angenommen werden als für andere (Garrad Hassan: Morgan & Bossanyi 1996). Da in Studien kein Zusammenhang zwischen dem Gewicht und der Flugweite ausgemacht werden konnte, wird ein Gewicht von 1 kg angenommen (Meteotest: Cattin et al. 2007). Des Weiteren wird für den Trudelbetrieb eine Umlaufgeschwindigkeit von $(0,411 \times v)/60$ Umdrehungen pro Sekunde angenommen. Dies ergibt sich aus einer durchgeführten Auswertung zum Trudelbetrieb unterschiedlicher Hersteller. Die Position des Rotorblatts wird in der Rotorblattebene zum Zeitpunkt des Eisabfalls als gleichverteilt angenommen.

Die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe wird ausgehend von den Standortdaten auf Messmasthöhe (siehe Kapitel 2.3) nach der IEC-Richtlinie durch ein normales Höhenprofil⁶ mit dem Exponenten $\alpha = 0,2$ ermittelt (IEC 2005).

Auf Grundlage dieser Zufallsvariablen werden 100.000 Durchläufe durchgeführt, sprich, Eisabfallereignisse simuliert und die Trefferkoordinaten berechnet. Daraus wird wiederum die Wahrscheinlichkeit, dass es auf bestimmten Flächen zu Treffern kommt, berechnet und somit das Risiko für diese Flächen bestimmt.

Durch die in den jeweiligen Szenarien unterschiedlichen Häufigkeiten der Windrichtungen und der variierenden Windstärken können sich daraus Abweichungen ergeben, die im Folgenden beschrieben werden.

⁶ Das Höhenprofil gibt Auskunft über den Verlauf der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Es gibt die Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe über Grund an (IEC 2005).

Die Auswertung wird für die Szenarien 1, 2.1 und 3 durchgeführt, die in den jeweiligen Kapiteln nochmals kurz erläutert werden. Die wichtigsten Parameter der Szenarien sind in Tabelle 17 dargestellt. Zu jedem Szenario findet sich eine Grafik mit den unterschiedlichen Gefahrenbereichen. Rot kennzeichnet dabei jeweils den ersten Gefährdungsbereich, bei dem eine mittlere Trefferhäufigkeit von mehr als $1,0 \times 10^{-4}/m^2$ vorlag. Der zweite Gefährdungsbereich, mit einer mittleren Trefferhäufigkeit von $1,0 \times 10^{-5}/m^2$ bis $1,0 \times 10^{-4}/m^2$, ist orange dargestellt. Gelb repräsentiert den dritten Gefährdungsbereich, mit einer mittleren Trefferhäufigkeit von $1,0 \times 10^{-6}/m^2$ bis $1,0 \times 10^{-5}/m^2$. Der vierte Gefährdungsbereich, mit einer mittleren Trefferhäufigkeit von $1,0 \times 10^{-7}/m^2$ bis $1,0 \times 10^{-6}/m^2$, ist weiß dargestellt (Siehe exemplarisch für jedes Szenario Tabelle 18).

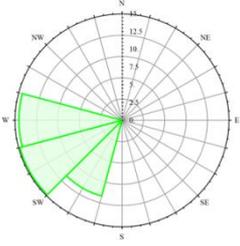
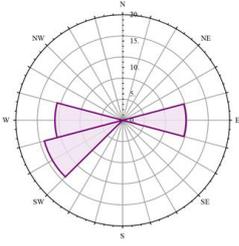
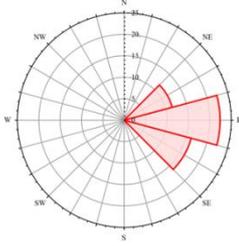
Beispielstandort: Schönbetrieb			
S1: v (mean): 3,91 m/s	S2.1: v (mean): 2,91 m/s	S3: v (mean): 2,59 m/s	S2.1: Vereisungstage: 56 d/a (15,9 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 0° Verhältnis v (mean) zu S1: 74,43%
			S3: Vereisungstage: 39 d/a (10,2 d/a) Windrichtungsänderung zu S1: 150° Verhältnis v (mean) zu S1: 66,17%

Tabelle 17: Windbedingungen und Vereisungstage sowie Tage mit durchgehender Vereisung am Beispielstandort für Szenario 1 (grün), Szenario 2.1 (violett) und Szenario 3 (rot)

Zone	Trefferhäufigkeiten [$1/m^2$]
1	$> 1,0E-04$
2	$\leq 1,0E-04$
3	$\leq 1,0E-05$
4	$\leq 1,0E-06$

Tabelle 18: Mittlere Trefferhäufigkeit pro m^2 und Eisabfallereignis

5.2 Berechnung der Gefährdung unter Annahme der Ganzjahresstatistik (Szenario 1)

Das gängige Verfahren zur Risikobeurteilung eines Standorts berechnet das Risiko mithilfe der Ganzjahreswindstatistik. Hierfür werden die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit und Windverteilungen herangezogen. Dies entspricht Szenario 1, welches das erste gewählte Verfahren darstellt und anschließend mit den anderen beiden Szenarien verglichen werden soll.

Abbildung 68 zeigt die simulierten Treffer der 100.000 Durchläufe am Standort unter den Bedingungen von Szenario 1. Aus diesen simulierten Treffern ergibt sich die Bestimmung der unterschiedlichen Gefährdungsbereiche in Abbildung 69 (vgl. Tabelle 18).

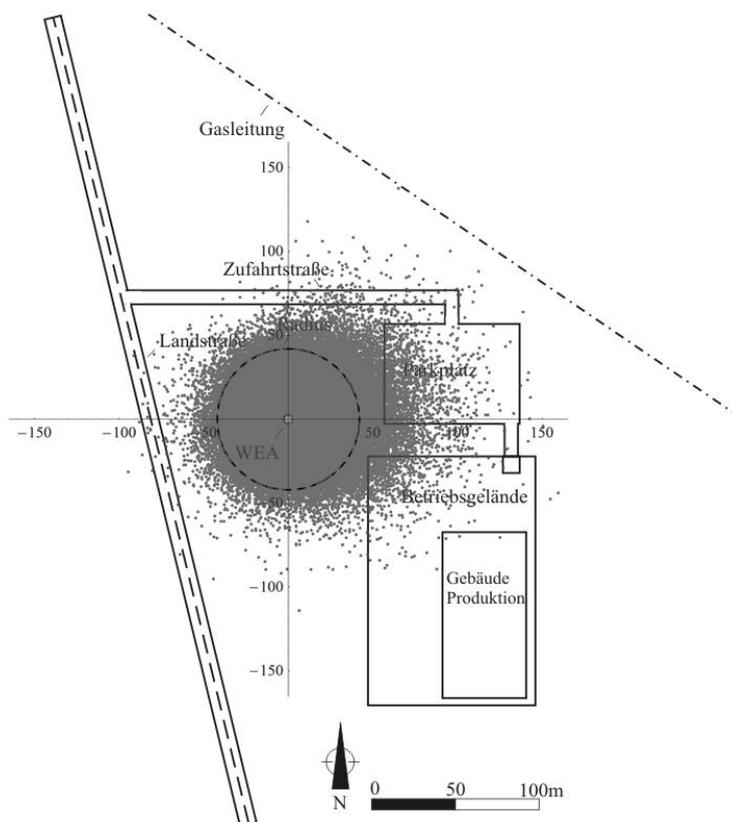


Abbildung 68: Simulierte Treffer für Szenario 1

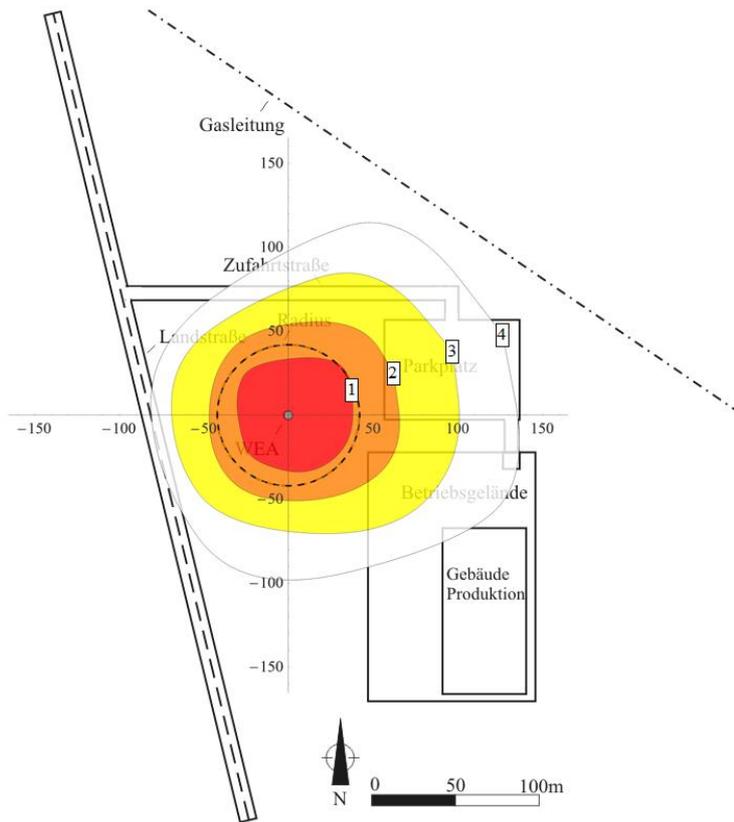


Abbildung 69: Gefährdungsbereiche für Szenario 1

5.3 Berechnung der Gefährdung unter Annahme der Windverhältnisse der möglichen Vereisung auf Nabenhöhe (Szenario 2.1)

In diesem Abschnitt werden die Gefährdungsbereiche bei Windverhältnissen des Szenarios 2 unter möglichen Vereisungsbedingungen berechnet. Dieses Szenario wurde bezüglich der möglichen Vereisung auf Nabenhöhe modifiziert. Dazu wurde das Auswahlkriterium der Temperatur angepasst. Unter der Annahme, dass die Temperatur 100 m über der Messhöhe eine andere ist als auf Messmasthöhe (10 m), wurde diese mithilfe des trockenadiabatischen Temperaturgradienten angepasst. Dieser entspricht $0,976 \text{ K}/100 \text{ m}$ und dementsprechend ca. $1,0^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ (Warnecke 1997). Da der trockenadiabatische Temperaturgradient immer höher ist als der feuchtadiabatische, kann die Anwendung des trockenadiabatischen Temperaturgradienten als abdeckend und konservativ betrachtet werden (Siehe Kapitel 2.3).

Die Bedingung für mögliche Vereisung wurde somit von einer relativen Luftfeuchtigkeit größer 95% und einer Temperatur größer $0,5^\circ\text{C}$ in Szenario 2, hin zu einer relativen

Luftfeuchtigkeit größer 95% und einer Temperatur größer 1,5°C in Szenario 2.1 verändert. Darauf folgend wurden die Berechnungen der Wetter- und Windbedingungen erneut durchgeführt. Dieses Szenario ist anlagenspezifisch und findet nur in diesem speziellen Fall Berücksichtigung, es ist ansonsten identisch mit Szenario 2. Die geänderten Windbedingungen und Vereisungstage finden sich in Tabelle 17 (S 2.1, Violett).

Abbildung 70 zeigt die simulierten Treffer der 100.000 Durchläufe am Standort unter den Bedingungen von Szenario 2.1. Aus diesen simulierten Treffern ergibt sich die Bestimmung der unterschiedlichen Gefährdungsbereiche in Abbildung 71 (vgl. Tabelle 18).

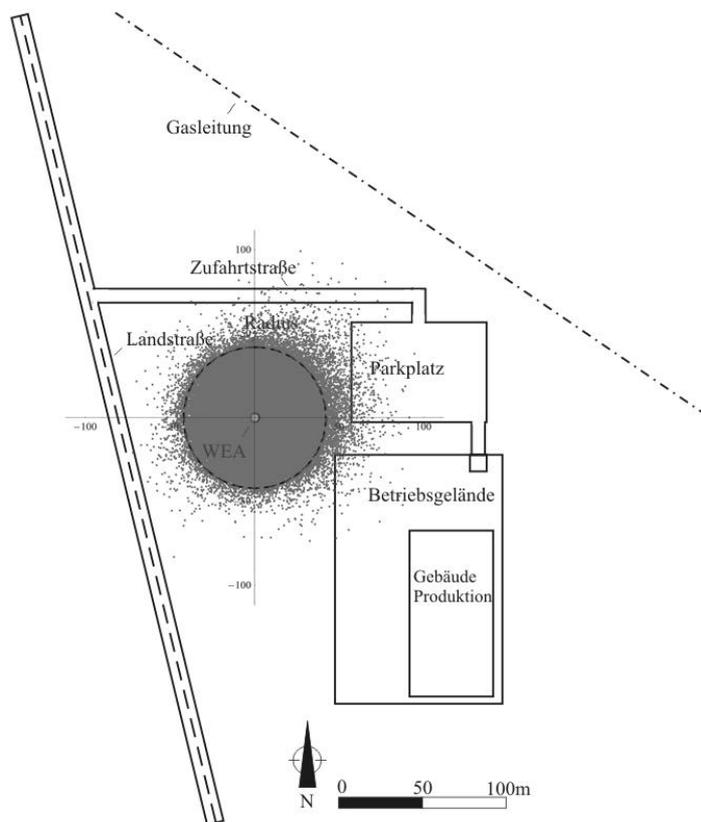


Abbildung 70: Simulierte Treffer für Szenario 2.1

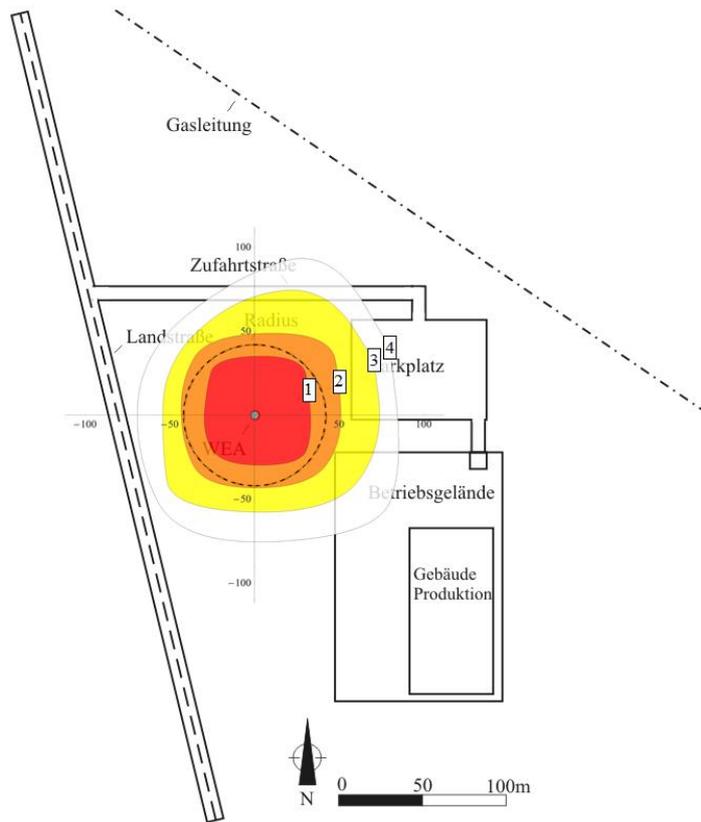


Abbildung 71: Gefährdungsbereiche für Szenario 2.1

5.4 Berechnung der Gefährdung unter Annahme der Windverhältnisse bei konkreter Vereisung und Nebelfrostablagerungen (Szenario 3)

In diesem Abschnitt werden die Gefährdungsbereiche bei Windverhältnissen des Szenarios 3, unter konkreter Vereisung und Nebelfrostablagerungen, berechnet. Dabei handelt es sich um Windverhältnisse, die auftraten, als Vereisung oder Nebelereignisse, die zu Nebelfrostablagerungen führen, gemeldet wurden.

Abbildung 72 zeigt die simulierten Treffer der 100.000 Durchläufe am Standort unter den Bedingungen von Szenario 3. Aus diesen simulierten Treffern ergibt sich die Bestimmung der unterschiedlichen Gefährdungsbereiche in Abbildung 73 (vgl. Tabelle 18).

Fallbeispiel zur Risikobeurteilung

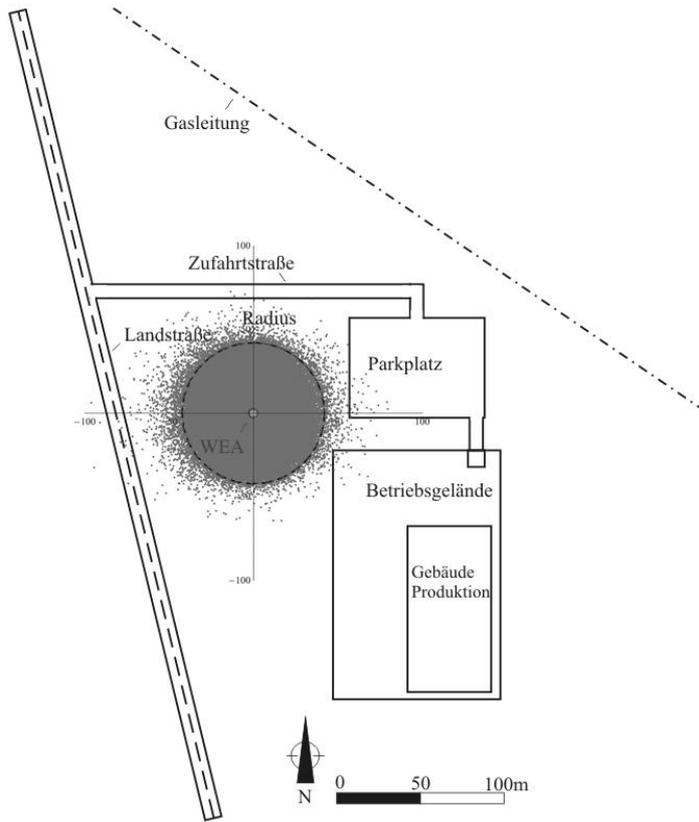


Abbildung 72: Simulierte Treffer für Szenario 3

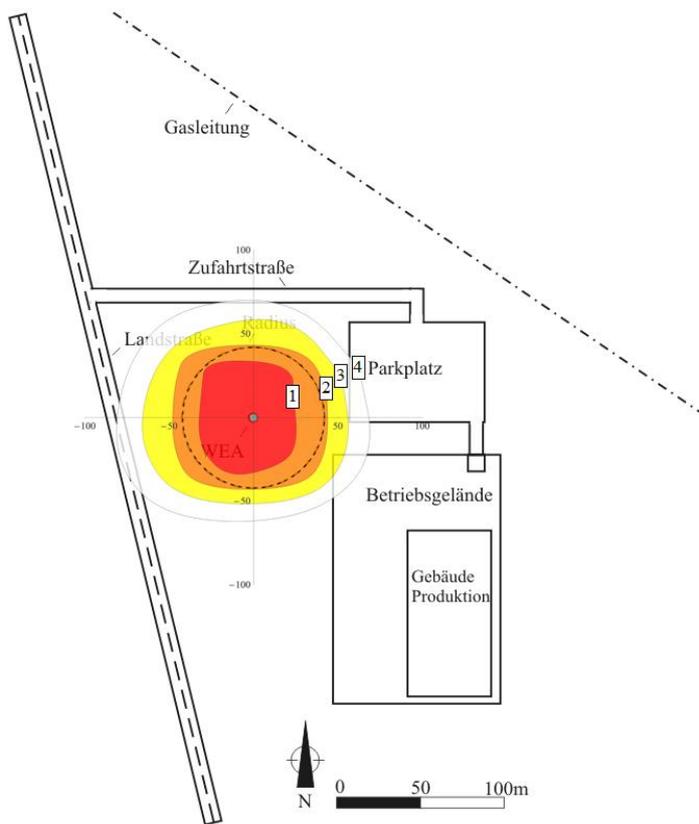


Abbildung 73: Gefährdungsbereiche für Szenario 3

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Wie in Abbildung 69 (Szenario 1), Abbildung 71 (Szenario 2.1) und Abbildung 73 (Szenario 3) zu erkennen, werden die Gefahrenbereiche von Szenario 1 über Szenario 2.1 zu Szenario 3 immer kleiner und nehmen unterschiedliche Formen an. Dies lässt sich gut anhand der unterschiedlichen Windbedingungen (siehe Tabelle 16) erklären. In Szenario 1 liegt die mittlere Windgeschwindigkeit mit 3,91 m/s deutlich über den mittleren Windgeschwindigkeiten von Szenario 2.1 (2,91 m/s) und Szenario 3 (2,59 m/s). Dadurch erreichen die simulierten Eisabfälle eine größere Reichweite und die Gefährdungsbereiche sind deutlich größer, was auch bedeutet, dass für die Gefährdungsobjekte ein höheres Risiko ermittelt wird. Mit sinkender Windgeschwindigkeit nimmt allerdings auch die Gefährdung nahegelegener Bereiche zu, da die Eisabfallereignisse sich auf einen kleineren Bereich verteilen.

Gut erkennen lässt sich auch die Ausdehnung der Gefahrenbereiche in Abhängigkeit zur Windrichtung. Während in Szenario 1 eine deutliche Ausdehnung in Richtung Ostnordost zu erkennen ist, liegt diese in Szenario 2.1 eher in nordöstlicher Richtung, da die zweite Nebenwindrichtung aus West viel seltener auftritt (Siehe Tabelle 17). In Szenario 3 ist eine deutlich größere Ausbreitung des Gefährdungsbereiches in westlicher Richtung zu erkennen.

Dies wirkt sich auch auf die Trefferhäufigkeit der einzelnen Gefährdungsobjekte aus (Tabelle 19). Es lässt sich festhalten, dass vor allem die Windgeschwindigkeit großen Einfluss auf die Gefährdungsradien hat, doch diese auch von der Windrichtung beeinflusst werden, wie z.B. an der Trefferanzahl der Straße zu erkennen ist.

Die Trefferanzahl ist in jedem Szenario sehr unterschiedlich. So wurde im Fallbeispiel, unter der Berücksichtigung der Ganzjahresdaten (Szenario 1) bei 100.000 Eisabfallereignissen, 1.949 Mal eines der Gefährdungsobjekte (Betriebsgelände, Parkplatz, Landstraße und Zufahrtsstraße) getroffen. Das entspricht einer Trefferwahrscheinlichkeit von 0,0195, dementsprechend einer relativen Häufigkeit für einen Treffer von 1,95%. In Szenario 2.1 führten nur noch 391 der 100.000 Eisabfallereignisse zu Treffern der Schutzobjekte, was einer relativen Häufigkeit von nur noch 0,39% gleichkommt. Für Szenario 3 wurden lediglich 61 Treffer beobachtet und entsprechen somit einer relativen Häufigkeit für einen Treffer von nur noch 0,061%.

Auch für die einzelnen Schutzobjekte wurden in der Simulation unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Der Parkplatz ist in jedem Szenario das Gefährdungsobjekt mit dem größten Risiko durch Eisabfall. Wenn es zu einem Eisabfall kommt, liegt die relative Häufigkeit, dass der Parkplatz getroffen wird, in Szenario 1 bei 1,2%, in Szenario 2.1 nur noch bei 0,23% und in Szenario 3 bei lediglich 0,03% (Tabelle 19).

Auch die Wahrscheinlichkeit, dass das Betriebsgelände im Falle eines Eisabfalls getroffen wird, ist in jedem Szenario noch recht hoch. In Szenario 1 liegt die relative Häufigkeit eines Treffers bei 0,67%, in Szenario 2.1 bei 0,088% und in Szenario 3 nur noch bei 0,018% (Tabelle 19). Für die Zufahrtsstraße und die Landstraße sind die Wahrscheinlichkeiten für einen Treffer bei Eisabfall hingegen eher gering (Tabelle 19).

Festzuhalten bleibt, dass in Szenario 1 die meisten Treffer der Gefährdungsobjekte vorlagen. In Szenario 2.1 waren diese in der Simulation bereits weitaus weniger betroffen und in Szenario 3 ging die Wahrscheinlichkeit von Treffern der Gefährdungsobjekte nochmals deutlich zurück. Dieser Umstand ist stark von der angenommenen Windgeschwindigkeit und Windrichtung abhängig. Daher müssten für jedes Szenario unterschiedliche Maßnahmen zum Schutz der Gefährdungsobjekte geplant werden.

Das gängige Vorgehen zur Ermittlung des Risikos durch Eisabfall, mithilfe der Ganzjahreswindstatistik, lässt sich für das vorgestellte Fallbeispiel als eher konservativ einstufen, da es alle Szenarien abdeckt, gleichwohl es in nahen Bereichen zu einer Unterschätzung der Trefferhäufigkeit führen kann. Jedoch kann mithilfe der ermittelten Windbedingungen in Szenario 2.1 eine genauere Eingrenzung der Gefährdungsbereiche erreicht werden. Durch die in Szenario 3 ermittelten Windbedingungen können die Gefährdungsbereiche nochmals verkleinert werden, allerdings stehen diese Daten bei einer Risikobeurteilung für einen Standort nicht zur Verfügung und können auch nicht auf Nabenhöhe einer Anlage ermittelt werden. Um diese Daten von einer Wetterstation auf einen entfernteren Standort übertragen zu können, sollten jedoch noch weitere Analysen, bezüglich der Übertragbarkeit von Vereisungsdaten, durchgeführt werden.

Gefährdungsobjekt	Szenario 1	Szenario 2.1	Szenario 3
Straße (Anzahl der Treffer absolut)	18	2	9
% Anteil der Treffer im jeweiligen Szenario	0,9	0,6	14,8
Wahrscheinlichkeit eines Treffers	1,8E-04	2,0E-05	9,0E-05
Zufahrtsstraße (Anzahl der Treffer absolut)	36	14	4
% Anteil der Treffer im jeweiligen Szenario	1,8	4,3	6,6
Wahrscheinlichkeit eines Treffers	3,6E-04	1,4E-04	4,0E-05
Parkplatz (Anzahl der Treffer absolut)	1223	225	30
% Anteil der Treffer im jeweiligen Szenario	62,8	68,4	49,2
Wahrscheinlichkeit eines Treffers	1,2E-02	2,3E-03	3,0E-04
Betriebsgelände (Anzahl der Treffer absolut)	672	88	18
% Anteil der Treffer im jeweiligen Szenario	34,5	26,7	29,5
Wahrscheinlichkeit eines Treffers	6,7E-03	8,8E-04	1,8E-04
Treffer gesamt	1949	329	61

Tabelle 19: Treffer der Gefährdungsobjekte in den unterschiedlichen Szenarien

6 Fazit

Eisabfall von Windenergieanlagen kann zu einer Gefährdung von Personen oder Gefahrenobjekten führen. Daher ist es insbesondere an Standorten, wo dies der Fall sein kann, wichtig eine Risikobeurteilung durchzuführen. Grundlage einer solchen Risikobeurteilung sind die Windbedingungen am Standort.

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss der Wetterdaten bei Vereisungsbedingungen, auf das Risiko von Eisabfall, zu untersuchen. Hierfür wurden zunächst unterschiedliche Szenarien festgelegt, die Vereisungsbedingungen widerspiegeln. Diese wurden, sowohl nach Wetterbedingungen, als auch nach konkreten, beobachteten Vereisungen sowie einer Kombination aus beidem eingeteilt. Anschließend wurden die Windbedingungen

für 30 unterschiedliche Standorte untersucht und für ein Fallbeispiel auf einen Beispielstandort übertragen.

Die Auswertung der Windbedingungen hat gezeigt, dass die mittlere Windgeschwindigkeit, sowohl unter Vereisungsbedingungen, die durch Wetterbedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) definiert waren (Szenario 2), als auch für Vereisungsbedingungen, die nach beobachteten Vereisungen sowie Nebelfrostablagerungsbedingungen definiert wurden (Szenario 3), niedriger war als die mittleren Ganzjahreswindgeschwindigkeiten (Szenario 1) an den unterschiedlichen Standorten. Dies lässt sich allerdings nicht auf exponierte Standorte in Höhenlagen oder auf Inseln übertragen und daher keine eindeutige Aussage bezüglich dieser Standorte treffen. Die niedrigeren Windgeschwindigkeiten unter Vereisungsbedingungen führen dazu, dass der Radius, in dem Treffer auftreten können, zwar kleiner wird, es muss aber berücksichtigt werden, dass sich somit auch die Häufigkeit für Treffer in diesem kleineren Radius erhöht.

Des Weiteren war zu erkennen, dass die Hauptwindrichtung je nach Szenario und Standort sehr stark (bis zu 180°) von der Ganzjahreshauptwindrichtung abweichen kann. Die Häufigkeitsverteilung kann sich unter Vereisungsbedingungen demnach stark verändern, tut dies aber nicht zwangsläufig. Eine präzisere, allgemeingültige Aussage über die Windrichtungsänderung lässt sich daher nicht treffen.

Auf das Ergebnis einer Risikobeurteilung haben die Windverhältnisse unter verschiedenen Wetterbedingungen starken Einfluss. So wurde im Fallbeispiel unter der Berücksichtigung der Ganzjahresdaten (Szenario 1) gut 80% mehr Treffer simuliert als bei einer ausschließlichen Berücksichtigung der vorherrschenden Windbedingungen bei einer Temperatur von 0,5°C auf Nabenhöhe und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 95% (Szenario 2.1). Unter Berücksichtigung der Windbedingungen der Vereisungs- und Nebelfrostablagerungsdaten (Szenario 3) wurden lediglich noch 3,1% der Treffer im Verhältnis zu den Treffern unter Berücksichtigung der Ganzjahresdaten erzielt. Auch die Größe jedes einzelnen Gefährdungsbereiches sowie der gefährdeten Fläche ist sehr viel kleiner. Diese Veränderung beruht primär auf der niedrigeren mittleren Windgeschwindigkeit unter Vereisungsbedingungen. Doch auch die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung hat einen Einfluss auf die Gefährdungsflächen. Demnach müssten für jedes Szenario unterschiedliche Maßnahmen für die Sicherheit der Schutzobjekte geplant

werden. Eine weiterführende Bewertung, z.B. für das Individualrisiko einer Person durch Eisabfall am Standort tödlich zu verunglücken oder zu verunfallen, wäre auf Basis von Arbeitsunfallstatistiken der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung oder Unfallstatistiken möglich (DGUV 2009).

Diese Arbeit zeigt somit, dass die Annahme der Ganzjahreswindbedingungen für eine Risikobewertung eines Eisabfallereignisses, in Abhängigkeit der Lage der Schutzobjekte (siehe Kapitel 5), zwar eine eher konservative Annahme ist, jedoch ließe sich unter Zuhilfenahme der Wetter- und Beobachtungsdaten eine sehr viel genauere Risikobeurteilung durchführen. Dabei konnten die Gefährdungsbereiche im Fallbeispiel sehr viel genauer eingegrenzt und die Gefährdungsradien verringert werden, was insgesamt zu einer Verkleinerung der von Eisabfall betroffenen Fläche führte.

Da die ausgewerteten Daten (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wettererscheinungen) für eine Risikobeurteilung eines Standortes in der Regel nicht vorliegen, bleibt weitergehend zu untersuchen, in welchem Maß die Daten, die standortspezifisch für die jeweiligen Wetterstationen ausgewertet wurden, auf andere Standorte übertragen werden können. Neueste Studien gehen zumindest von einer Übertragbarkeit der Vereisungsdauer, bzw. der Vereisungstage, auf nahegelegene Standorte aus (VTT Technical Research Centre of Finland: Lehtomäki et al. 2014). Doch für eine Übertragbarkeit der Windbedingungen müssen weitere Untersuchungen angestellt werden.

Auch das Verhältnis von Inkubations- und Regenerationszeit zur tatsächlichen Vereisungszeit sowie zur Zeit der für Vereisung auftretenden Wetterbedingungen, könnte durch eine weitere Analyse, die Eingrenzung der Vereisung unter bestimmten Wetterverhältnissen weiter präzisieren.

7 Literaturangaben

- BOKU-Met (Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur in Wien) - Pospichal, B., Formayer, H. (2010): Bedingungen für Eisansatz an Windkraftanlagen in Nordostösterreich: Meteorologische Bedingungen und klimatologische Betrachtungen.
- BWE (Bundesverband Windenergie e.V.) (2013): Windenergie im Binnenland: Handbuch der Wirtschaftlichkeit und Projektplanung an Binnenstandorten. Berlin.
- DEWI (Deutsches Windenergie Institut) - Seifert, H. (2005): Eiszeit am Standort: Ice Conditions for Wind Turbines. In: DEWI Magazin Nr. 28, S. 68–75. Wilhelmshafen. Unter:
http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_26/12.pdf
(Stand: 3.4.2014).
- DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) (2009): DGUV-Statistiken für die Praxis 2009. Unter: <http://www.dguv.de/medien/inhalt/zahlen/documents/DGUV-Statistiken-2009-deutsch.pdf> (Stand: 3.4.2014).
- DiBt (Deutsches Institut für Bautechnik) (2011): Anlage 2.7/12: Zur Richtlinie für „Windenergieanlagen; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“. In: Muster-Liste Der Technischen Baubestimmungen: Fassung Dezember 2011. Unter:
http://www.fm.rlp.de/fileadmin/fm/downloads/bauen/baurecht_bautechnik/bauvorschriften/technische_baubestimmungen/Baubest_2012.pdf (Stand: 3.4.2014).
- Diesing, H., Tischer, W. (o.J.): Anwendung von Parameterschätzverfahren zur Identifikation mechanischer Schwingungssysteme. Unter: http://www.uni-magdeburg.de/ifme/zeitschrift_tm/1982_Heft4/Diessing_Tischer.pdf (Stand: 3.4.2014).
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (o.J.): Wetterlexikon. Offenbach. Unter:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_wetterlexikon&_nfls=false (Stand: 3.4.2014).
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2008): Beschreibung des Standortes Berlin Schönefeld. Offenbach.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2012): Hauptamtliches Stationsnetz DWD und GeoInfoDBw inkl. Aerologische Stationen (Aero). Offenbach. Unter:
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Luftfahrt/Index/Downloads/Me_C3_9Fnetz_karte__DWD__und__GeoInfoDBW,templated=raw,property=publicationFile.pdf/Meßnetz_karte__DWD__und__GeoInfoDBW.pdf
(Stand: 3.4.2014).
- DWD (Deutscher Wetterdienst) - Sebecker, J., Deutschländer, T., Wichura, B., Behrens, U. (2012): Winddaten für Windenergienutzer. 2. Auflage, Version 6. Potsdam.

- DWIA (Danish Wind Industry Association) (o.J.): The Weibull distribution. Unter: http://www.windpowerwiki.dk/index.php?title=The_Weibull_distribution (Stand: 3.4.2014).
- FGW (Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien e.V.) (2007): Technische Richtlinien für Windenergieanlagen: Teil 6: Bestimmung von Windpotential und Energieerträgen. Revision 7.
- FMI (Finnish Meteorological Institute) - Tammelinen, B., Cavaliere, M., Holttinen, H., Seifert, H., Säntti, K., Morgan, C. (1998): Wind Energy Production in Cold Climate (WECO). Unter: <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/47698271EN6.pdf> (Stand: 3.4.2014)
- Garrad Hassan - Morgan, C., Bossanyi, E. (1996): Wind Turbine Icing And Public Safty: A Quantifiable Risk?. Bristol. Unter: <http://www.easthavenwindfarm.com/filing/feb/ehwf-ml-reb4.pdf> (Stand: 3.4.2014).
- Hartung, J.D., Elpelt, B.D., Klösener, K.-H.D. (2002): Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 13. Auflage. München.
- Hau, E. (2008): Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Hauschild, J., Böhme, E., Raupach, O. (2011): Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. In: VDI-Berichte 2146. Düsseldorf.
- Hauschild, J., Röglin, O., Lautenschlager, F. (2014): Methoden zur Risikobeurteilung von Windenergieanlagen: Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage. Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. In: VDI-Berichte 2210. Düsseldorf.
- IEC (International Electrotechnical Comission) (2005): IEC 61400-1: Interanational Standard. Windturbines. 3. Auflage.
- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie) - Fikke, S., Ronsten, G., Heimo, A., Kunz, S., Ostrozlik, M., Persson, P.-E., Sabata, J., Wareing, B., Wichura, B., Chum, J., Laakso, T., Säntti, K., Makkonen, L. (2006): COST 727: Atmospheric Icing on Structures Measurements and data collection on icing: State of the Art. In: *MeteoSchweiz Nr. 75*.
- Meteotest (Bundesamt für Energie Schweiz (BFE)) - Cattin, R. (2008): Alpine Test Site Guetsch: Handbuch und Fachtagung. Bern.
- Meteotest (Bundesamt für Energie Schweiz (BFE)) - Cattin, R., Koller, S. (2011): Vereisung WEA St. Brais: Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen im Jurabogen. Bern.

- Meteotest (Bundesamt für Energie Schweiz (BFE)) - Cattin, R., Kunz, S., Heimo, A., Russi, M., Tiefgraber, M. (2007): Wind Turbine Ice Throw Studies In The Swiss Alps. Bern.
- Meyna, A., Pauli, B. (2010): Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren. In: Praxisreihe Qualitätswissen. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. München.
- Nielsen, P. (2010): WindPRO 2.7 Handbuch. 2. Auflage.
- REpower Systems (2011): Windenergieanlage MM/ 3.XM/ 5M/6M: Maßnahmen bei Eisansatz. Unter: <http://www.hamburg.de/contentblob/3890114/data/kap14-3netohg.pdf> (Stand: 3.4.2014).
- Seifert, H., Tammelin, B. (1996): Icing of Wind Turbines: Jou2-CT93-0366. Havell.
- VTT Technical Research Centre of Finland - Lehtomäki, V., Karlsson, T., Rissanen, S. (2014): Wind Power Icing Atlas: Tool for financial risk assessment. Sundsvall. Unter: <http://www.winterwind.se/presentations-2014/> (Stand: 3.4.2014).
- Warnecke, G. (1997): Meteorologie und Umwelt: Eine Einführung. 2. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg.

8 Anhang

8.1 Übersichtsliste der Wettererscheinungen

00 – 49 Kein Niederschlag an der Station z.Z. der Beobachtung		WETTER ZUR ZEIT DER BEOBACHTUNG		
Wetter an der Station oder im Gesichtskreis		ww		
An der Station während der letzten Stunde kein Niederschlag, kein Nebel (außer 11 u.12), z.Z. der Beobachtung kein Niederschlag	charakteristisches Verhalten des Himmelszustandes in der letzten Stunde	00		
	keine Meteore außer Photometeore	Wolkenentwicklung nicht festgestellt oder nicht feststellbar	00	
		Wolken im allgemeinen in Auflösung oder Rückentwicklung	01	
		Himmelsbild im ganzen unverändert	02	
	Trockener Dunst Staub, Sand oder Rauch	Wolken in Bildung oder Weiterentwicklung	03	
		Sichtverminderung durch Rauch (Industrierauch, Heide oder Waldbrand) Trockener Dunst (= VV 94–96) Differ. Lufttemp./Taupunkttemp. $\Delta t \geq 3,5^\circ$	Wolkenentwicklung nicht festgestellt oder nicht feststellbar	04
			Wolken im allgemeinen in Auflösung oder Rückentwicklung	05
			Himmelsbild im ganzen unverändert	06
			Wolken in Bildung oder Weiterentwicklung	07
		Sichttrübung durch Gischt, Staub oder Sandsturm in der letzten Stunde an der Station oder zum Beobachtungstermin im Gesichtskreis	09	
		Feuchter Dunst (= VV 94–96) Differ. Lufttemp./Taupunkttemp. $\Delta t \geq 3,4^\circ$	10	
	flacher Nebel/Eisnebel an der Station oder in der Umgebung bis zu 5 km (2,7sm) (über See etwa bis zu 10 m hoch)	einzelne Schwaden oder Bänke mehr oder weniger zusammenhängend	11 12	
	Wetterleuchten, kein Donner hörbar		13	
	Niederschlag im Gesichtskreis	der nicht den Boden erreicht (Fallstreifen)	14	
		erreichend	mehr als 3 sm entfernt	15
			weniger als 3 sm entfernt, aber nicht an der Station	16
	Gewitter, aber kein Niederschlag z.Z. der Beobachtung (hat Vorrang vor ww = 20–49)		17	
	an der Station oder im Gesichtskreis während der letzten Stunde oder zur Zeit der Beobachtung	markante Böen*	18	
		Großtromben	19	
Niederschlag, Nebel, Eisnebel oder Gewitter an der Station in der letzten Stunde, aber nicht zur Zeit der Beobachtung	nicht schauerartig	Sprühregen (nicht gefrierend) oder Schneegriesel	20	
		Regen (nicht gefrierend)	21	
		Schnee	22	
		Regen und Schnee oder Eiskörner	23	
		Sprühregen oder Regen (gefrierend)	24	
	Schauer	Regenschauer	25	
		Schneeschauger oder Schneeregenschauer	26	
		Hagel- oder Graupelschauger (auch mit Regen)	27	
	Nebel oder Eisnebel Gewitter (mit oder ohne Niederschlag)		28	
			29	
Staubsturm oder Sandsturm	leicht oder mäßig	hat in der letzten Stunde nachgelassen	30	
		keine wesentliche Änderung in der letzten Stunde	31	
	stark	hat in der letzten Stunde begonnen oder zugenommen	32	
		hat in der letzten Stunde nachgelassen	33	
		keine wesentliche Änderung in der letzten Stunde	34	
Nebel oder Eisnebel zur Zeit der Beobachtung Sichtweite < 1000 m (< 0.6 sm) VV = 90–93 ww 42–49	Nebel oder Eisnebel	im Gesichtskreis, nicht an der Station während der letzten Stunde, über die Höhe des Beobachters hinausreichend	40	
		Schwaden (Nebeltreiben)	41	
	in der letzten Stunde dünner geworden	Himmel erkennbar	42	
		Himmel nicht erkennbar	43	
	keine wesentliche Änderung in der letzten Stunde	Himmel erkennbar	44	
		Himmel nicht erkennbar	45	
	hat in der letzten Stunde eingesetzt od. ist in der letzten Stunde dichter geworden	Himmel erkennbar	46	
		Himmel nicht erkennbar	47	
	Nebel schlägt sich als Rauheis oder Klareis nieder	Himmel erkennbar	48	
		Himmel nicht erkennbar	49	

* Hinweis: Plötzliche Windzunahme um wenigstens 16 kn auf 22 kn oder mehr und wenigstens 1 Minute anhaltend.

Anhang

WETTER ZUR ZEIT DER BEOBACHTUNG		50 – 99 Niederschlag an der Station z.Z. der Beobachtung				
Wetter an der Station		ww	Wetter an der Station		ww	
Sprühregen (Nieselin) zur Zeit der Beobachtung	Leicht. Sprühregen (nicht gefrierend)	mit Unterbrechung ohne Unterbrechung	50 51	leichter Regen (nicht gefrierend)	mit Unterbrechung ohne Unterbrechung	60 61
	Mäß. Sprühregen (nicht gefrierend)	mit Unterbrechung ohne Unterbrechung	52 53	mäßiger Regen (nicht gefrierend)	mit Unterbrechung ohne Unterbrechung	62 63
	Stark. Sprühregen (nicht gefrierend)	mit Unterbrechung ohne Unterbrechung	54 55	starker Regen (nicht gefrierend)	mit Unterbrechung ohne Unterbrechung	64 65
	Sprühregen gefrierend	leicht mäßig oder stark	56 57	gefrierender Regen	leicht mäßig oder stark	66 67
	Sprühregen mit Regen	leicht mäßig oder stark	58 59	Regen oder Sprüh- regen und Schnee	leicht mäßig oder stark	68 69
	Wetter an der Station					ww
Niederschlag in fester Form, nicht schauerartig zur Zeit der Beobachtung	Leichter Schneefall		mit Unterbrechung ohne Unterbrechung		70 71	
	Mäßiger Schneefall		mit Unterbrechung ohne Unterbrechung		72 73	
	Starker Schneefall		mit Unterbrechung ohne Unterbrechung		74 75	
	Eisnadeln (mit oder ohne Nebel) Schneegriesel (mit oder ohne Nebel) Vereinzelte Schneesterne (mit oder ohne Nebel) Eiskörner				76 77 78 79	
Schauer (ohne Gewitter, aber evtl. nach Gewitter) zur Zeit der Beobachtung	Regenschauer		leicht mäßig oder stark sehr stark		80 81 82	
	Schneeregenschauer		leicht mäßig oder stark		83 84	
	Schneeschauber		leicht mäßig oder stark		85 86	
	Graupelschauber (Frost- oder Reifgraupel) mit oder ohne Regen bzw. Schneeregen		leicht mäßig oder stark		87 88	
	Hagelschauber mit oder ohne Regen bzw. Schneeregen (ohne Donner)		leicht mäßig oder stark		89 90	
Gewitter	Gewitter während der letzten Stunde, aber nicht zur Beobachtungszeit		Regen zur Zeit der Beobachtung		leicht mäßig oder stark	91 92
			Schnee- oder Schneeregen, Graupeln oder Hagel z. Z. der Beobachtung		leicht mäßig oder stark	93 94
	Gewitter zur Zeit der Beobachtung		Leichtes oder mäßiges Gewitter		mit Regen oder Schnee oder Schneeregen ohne Hagel/Graupeln mit Hagel oder Graupeln	95 96
			starkes Gewitter mit Regen oder Schnee oder Schneeregen ohne Hagel/Graupeln			97
			Gewitter mit Staub- oder Sandsturm			98
			Starkes Gewitter mit Hagel oder Graupeln			99

8.2 Erklärung des DWD zum bereitgestellten Datensatz

```

-----
I  FELD.NR.  : CHAR.VON-BIS : Z.D.CHAR.: I N H A L T                                     I
-----
I  1       : 1 - 5       : 5       : STATIONSNUMMER                               I
I  2       : 6 - 9       : 4       : JAHR                                          I
I  3       : 10 - 11     : 2       : MONAT                                         I
I  4       : 12 - 13     : 2       : TAG                                            I
I  5       : 14 - 15     : 2       : UHRZEIT IN UTC = + 1 STD.MEZ                I
I  6       : 16          : 1       : LEERSPALTE                                   I
I  7       : 17 - 18     : 2       : WINDRICHTUNG IN 36 TEILIGER WINDROSE        I
I          :             :         : IN 10 GRAD                                  I
I  8       : 19          : 1       : LEERSPALTE                                   I
I  9       : 20 - 22     : 3       : 10 MIN.MITTEL DER WINDGESCHWIN -           I
I          :             :         : DIGKEIT IN 0.1 M/S                          I
I 10       : 23          : 1       : LEERSPALTE                                   I
I 11       : 24 - 27     : 4       : LUFTTEMPERATUR IN 0.1 °C                   I
I 12       : 28          : 1       : LEERSPALTE                                   I
I 13       : 29 - 30     : 2       : WETTERERSCHEINUNGEN                         I
I 14       : 31          : 1       : LEERSPALTE                                   I
I 15       : 32 - 34     : 3       : RELATIVE LUFTFEUCHTE IN %                  I
I          :             :         :                                               I
I          :             :         :                                               I
I          :             :         : -999 FEHLKENNUNG/ AUSFALL                   I
-----

```

8.3 Beispielhafter Datensatz des DWD für den Standort Berlin Schönefeld vom
08.01.2002 00:00h bis zum 10.01.2002 23:00h

103852002010800	29	24	4	3	98
103852002010801	28	30	4	10	98
103852002010802	30	28	3	10	98
103852002010803	30	25	3	10	98
103852002010804	28	34	2	10	98
103852002010805	31	30	-1	20	100
103852002010806	27	32	-2	1	100
103852002010807	28	26	-5	20	98
103852002010808	27	33	-8	10	98
103852002010809	27	33	-5	20	98
103852002010810	27	28	-4	28	100
103852002010811	25	22	-3	10	100
103852002010812	24	21	0	10	98
103852002010813	22	16	4	10	98
103852002010814	15	16	4	10	97
103852002010815	20	24	3	10	98
103852002010816	22	28	2	50	98
103852002010817	21	32	-1	50	98
103852002010818	22	31	-3	50	100
103852002010819	23	29	-3	51	100
103852002010820	23	30	-3	56	100
103852002010821	23	30	-3	56	100
103852002010822	22	23	-3	56	100
103852002010823	20	14	-6	24	98
103852002010900	23	20	-12	56	100
103852002010901	22	17	-13	56	100
103852002010902	23	9	-13	56	100
103852002010903	22	21	-13	56	100
103852002010904	23	26	-14	56	100

Anhang

103852002010905	22	22	-13	56	100
103852002010906	20	25	-14	56	100
103852002010907	23	17	-11	56	98
103852002010908	21	15	-9	56	98
103852002010909	22	11	-7	56	98
103852002010910	24	15	-5	56	98
103852002010911	25	18	-5	51	98
103852002010912	21	21	-5	51	98
103852002010913	18	22	-5	51	98
103852002010914	17	14	-8	50	98
103852002010915	18	19	-9	51	98
103852002010916	21	25	-9	56	98
103852002010917	19	25	-10	56	98
103852002010918	19	25	-12	56	100
103852002010919	20	23	-12	56	100
103852002010920	24	26	-15	56	98
103852002010921	24	21	-14	56	100
103852002010922	22	26	-14	56	100
103852002010923	25	27	-15	56	98
103852002011000	24	24	-16	56	98
103852002011001	25	30	-15	56	98
103852002011002	28	25	-17	56	98
103852002011003	28	20	-19	56	98
103852002011004	30	7	-19	56	98
103852002011005	25	25	-17	56	98
103852002011006	27	15	-15	56	98
103852002011007	21	15	-13	56	100
103852002011008	22	23	-13	56	100
103852002011009	23	27	-11	56	98
103852002011010	22	25	-9	56	98
103852002011011	26	24	-6	56	98
103852002011012	25	25	-6	24	95
103852002011013	30	23	-6	20	93
103852002011014	25	14	-6	50	94
103852002011015	23	12	-6	50	94
103852002011016	16	12	-8	56	95
103852002011017	24	16	-8	24	95
103852002011018	14	12	-8	77	94
103852002011019	18	20	-11	77	95
103852002011020	20	18	-12	77	95
103852002011021	16	20	-14	77	94
103852002011022	18	12	-16	77	96
103852002011023	18	26	-18	77	96

9 Übersichtstabelle der Ergebnisse an allen Standorten für Szenario 1,2 und 3

Standort	-	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Anzahl Jahre mit WW-Aufz.
BERLIN-SCHÖNEFELD	Anzahl der Werte	96430	3081	2680	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,36	6,09	-
	Vereisungstage (mean)	-	45,45	38,82	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	11,67	10,15	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	25,68	26,15	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	9 WSW	4 E	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	150	-
	99,9%-Quantil (m/s)	12,44	8,91	7,75	-
	v (mean) (m/s)	3,91	2,83	2,59	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	72,37	66,17	-
BERLIN-TEGEL	Anzahl der Werte	96431	1013	1841	10
	Vereisungsmonate (mean)	-	4,70	5,45	-
	Vereisungstage (mean)	-	18,80	29,91	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	4,22	7,67	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	22,45	25,65	-
	Hauptwindrichtung	10 W	10 W	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	150	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,77	7,93	9,60	-
	v (mean) (m/s)	3,49	2,16	2,44	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	61,95	69,83	-
BRAUNSCHWEIG	Anzahl der Werte	96429	2578	1463	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,91	4,57	-
	Vereisungstage (mean)	-	35,55	25,00	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	9,77	5,54	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	27,47	22,17	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	9 WSW	4 E	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	150	-
	99,9%-Quantil (m/s)	10,70	9,60	10,71	-
	v (mean) (m/s)	3,43	2,49	2,38	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	72,50	69,37	-
BREMEN	Anzahl der Werte	96431	2550	2726	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,45	6,36	-
	Vereisungstage (mean)	-	36,18	35,82	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	9,66	10,33	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	26,70	28,83	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	9 WSW	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	12,65	8,18	9,31	-
	v (mean) (m/s)	4,13	2,44	2,65	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	59,18	64,32	-

Übersichtstabelle der Ergebnisse an allen Standorten für Szenario 1,2 und 3

BROCKEN	Anzahl der Werte	96431	25459	15659	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	8,36	8,36	-
	Vereisungstage (mean)	-	145,18	136,73	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	96,44	59,31	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	66,42	43,38	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	10 W	10 W	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	30	30	-
	99,9%-Quantil (m/s)	30,58	31,33	29,57	-
	v (mean) (m/s)	10,81	12,95	12,44	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	119,85	115,12	-
	DRESDEN	Anzahl der Werte	96431	3147	2272
Vereisungsmonate (mean)		-	5,82	5,45	-
Vereisungstage (mean)		-	38,91	32,82	-
durchgehende Vereisung (mean) (Tage)		-	11,92	8,61	-
Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)		-	30,64	26,22	-
Hauptwindrichtung		6 SSE	12 NNW	7 S	-
Windrichtungsänderung zu S1 (°)		-	180	30	-
99,9%-Quantil (m/s)		12,26	11,18	9,93	-
v (mean) (m/s)		4,16	3,35	3,09	-
Verhältnis v (mean) zu S1 (%)		-	80,49	74,19	-
DÜSSELDORF		Anzahl der Werte	96431	876	1146
	Vereisungsmonate (mean)	-	4,80	5,00	-
	Vereisungstage (mean)	-	19,70	21,18	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	3,65	4,78	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	18,53	22,54	-
	Hauptwindrichtung	6 SSE	2 NNE	2 NNE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	120	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	12,43	9,85	7,38	-
	v (mean) (m/s)	3,90	2,02	1,99	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	51,89	50,95	-
	ERFURT-WEIMAR	Anzahl der Werte	96431	4020	3377
Vereisungsmonate (mean)		-	6,36	5,64	-
Vereisungstage (mean)		-	48,55	35,73	-
durchgehende Vereisung (mean) (Tage)		-	15,23	12,79	-
Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)		-	31,37	35,80	-
Hauptwindrichtung		9 WSW	2 NNE	3 ENE	-
Windrichtungsänderung zu S1 (°)		-	150	180	-
99,9%-Quantil (m/s)		14,04	9,86	6,87	-
v (mean) (m/s)		4,21	2,99	2,20	-
Verhältnis v (mean) zu S1 (%)		-	70,87	52,13	-
FICHTELBERG		Anzahl der Werte	96431	25030	13214
	Vereisungsmonate (mean)	-	8,64	8,64	-
	Vereisungstage (mean)	-	142,64	132,91	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	94,81	50,05	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	66,47	37,66	-
	Hauptwindrichtung	10 W	10 W	10 W	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	0	-
	99,9%-Quantil (m/s)	27,30	29,67	27,76	-
	v (mean) (m/s)	9,34	11,52	10,91	-

Übersichtstabelle der Ergebnisse an allen Standorten für Szenario 1,2 und 3

	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	123,33	116,81	-
FRANKFURT-MAIN	Anzahl der Werte	96431	1277	1348	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	4,91	5,36	-
	Vereisungstage (mean)	-	22,09	21,45	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	4,84	5,11	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	21,90	23,80	-
	Hauptwindrichtung	8 SSW	8 SSW	8 SSW	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	0	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,53	7,90	5,88	-
	v (mean) (m/s)	3,30	2,22	1,83	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	67,08	55,33	-
GÖRLITZ	Anzahl der Werte	96431	3436	3852	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,27	6,18	-
	Vereisungstage (mean)	-	45,64	46,45	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	13,02	14,59	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	28,52	31,41	-
	Hauptwindrichtung	8 SSW	11 WNW	4 E	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	90	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	15,22	11,88	12,71	-
	v (mean) (m/s)	3,85	3,08	3,00	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	79,85	77,92	-
HAHN	Anzahl der Werte	96429	4004	3730	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,73	6,09	-
	Vereisungstage (mean)	-	39,91	42,09	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	15,17	14,13	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	38,00	33,57	-
	Hauptwindrichtung	10 W	10 W	6 SSE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,30	10,89	11,12	-
	v (mean) (m/s)	3,94	3,74	3,54	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	95,01	89,77	-
HAMBURG-FUHLBÜTTTEL	Anzahl der Werte	96430	1940	2495	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,18	6,00	-
	Vereisungstage (mean)	-	30,55	34,64	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	7,35	9,45	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	24,06	27,29	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	9 WSW	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,97	9,48	10,03	-
	v (mean) (m/s)	3,96	2,50	2,75	-
Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	63,14	69,50	-	
HANNOVER-LANGENHAGEN	Anzahl der Werte	96430	2533	2690	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,36	6,18	-
	Vereisungstage (mean)	-	37,64	33,91	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	9,59	10,19	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	25,49	30,05	-
	Hauptwindrichtung	10 W	10 W	4 E	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	180	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,88	11,01	9,67	-

Übersichtstabelle der Ergebnisse an allen Standorten für Szenario 1,2 und 3

	v (mean) (m/s)	3,75	2,58	2,65	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	68,65	70,73	-
HELGOLAND	Anzahl der Werte	96431	688	875	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	2,18	2,27	-
	Vereisungstage (mean)	-	11,27	9,64	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	2,61	3,31	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	23,12	34,39	-
	Hauptwindrichtung	11 WNW	5 ESE	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	180	180	-
	99,9%-Quantil (m/s)	22,01	22,29	19,93	-
	v (mean) (m/s)	8,35	8,75	8,63	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	104,70	103,28	-
HOHENPEISENBERG	Anzahl der Werte	96430	9146	4325	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	7,18	7,09	-
	Vereisungstage (mean)	-	70,64	56,55	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	34,64	16,38	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	49,05	28,97	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	9 WSW	3 ENE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	180	-
	99,9%-Quantil (m/s)	20,03	20,27	13,82	-
	v (mean) (m/s)	5,19	5,46	3,83	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	105,09	73,75	-
INGOLSTADT	Anzahl der Werte	41043	1831	1949	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	7,09	6,55	-
	Vereisungstage (mean)	-	41,73	31,91	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	6,94	7,38	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	16,62	23,14	-
	Hauptwindrichtung	10 W	3 ENE	3 ENE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	150	150	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,26	8,79	7,36	-
	v (mean) (m/s)	2,94	1,72	1,70	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	58,38	57,93	-
KOELN	Anzahl der Werte	96431	1893	1059	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,64	5,73	-
	Vereisungstage (mean)	-	29,82	20,64	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	7,17	4,01	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	24,05	19,44	-
	Hauptwindrichtung	5 ESE	5 ESE	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	0	-
	99,9%-Quantil (m/s)	9,84	6,73	6,88	-
	v (mean) (m/s)	3,21	1,87	1,85	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	58,37	57,59	-
KONSTANZ	Anzahl der Werte	96430	3177	3266	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	4,45	4,64	-
	Vereisungstage (mean)	-	35,45	33,27	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	12,03	12,37	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	33,94	37,18	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	10 W	10 W	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	30	30	-

Übersichtstabelle der Ergebnisse an allen Standorten für Szenario 1,2 und 3

	99,9%-Quantil (m/s)	7,97	4,81	3,77	-
	v (mean) (m/s)	2,19	1,45	1,37	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	66,48	62,76	-
LAHR	Anzahl der Werte	96431	3858	3300	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,18	6,00	-
	Vereisungstage (mean)	-	48,27	38,73	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	14,61	12,50	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	30,27	32,28	-
	Hauptwindrichtung	7 S	1 N	1 N	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	180	180	-
	99,9%-Quantil (m/s)	12,12	10,73	8,36	-
	v (mean) (m/s)	2,58	1,45	1,32	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	56,17	51,09	-
LEIPZIG-HALLE	Anzahl der Werte	96431	2456	2494	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	4,64	5,00	-
	Vereisungstage (mean)	-	32,18	32,45	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	9,30	9,45	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	28,91	29,11	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	3 ENE	3 ENE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	180	180	-
	99,9%-Quantil (m/s)	12,93	10,25	8,70	-
	v (mean) (m/s)	4,33	3,40	2,98	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	78,58	68,82	-
LINDENBERG	Anzahl der Werte	96431	3115	4351	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,45	5,36	-
	Vereisungstage (mean)	-	41,64	47,82	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	11,80	16,48	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	28,34	34,47	-
	Hauptwindrichtung	10 W	10 W	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	150	-
	99,9%-Quantil (m/s)	10,76	7,67	7,71	-
	v (mean) (m/s)	3,51	2,79	2,82	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	79,48	80,32	-
MAGDEBURG	Anzahl der Werte	96430	2495	2863	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,73	5,09	-
	Vereisungstage (mean)	-	37,73	35,73	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	9,45	10,84	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	25,05	30,35	-
	Hauptwindrichtung	10 W	6 SSE	6 SSE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	120	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	9,24	6,15	5,61	-
	v (mean) (m/s)	2,60	1,72	1,72	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	66,19	66,12	-
MUENSTER-OSNABRUECK	Anzahl der Werte	96430	2471	2669	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,55	6,45	-
	Vereisungstage (mean)	-	36,00	38,18	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	9,36	10,11	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	26,00	26,48	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	6 SSE	5 ESE	-

Übersichtstabelle der Ergebnisse an allen Standorten für Szenario 1,2 und 3

	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	90	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,71	7,15	6,02	-
	v (mean) (m/s)	3,19	1,61	1,47	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	50,29	45,93	-
NORDHOLZ	Anzahl der Werte	95870	3548	3326	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,27	5,00	-
	Vereisungstage (mean)	-	42,73	35,36	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	13,44	12,60	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	31,45	35,63	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	8 SSW	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	30	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	13,65	12,93	12,00	-
	v (mean) (m/s)	4,64	3,16	3,08	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	68,02	66,46	-
NUERNBERG	Anzahl der Werte	96430	2809	2311	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,82	6,55	-
	Vereisungstage (mean)	-	47,73	38,64	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	10,64	8,75	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	22,29	22,66	-
	Hauptwindrichtung	5 ESE	5 ESE	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	0	-
	99,9%-Quantil (m/s)	10,24	7,39	7,49	-
	v (mean) (m/s)	3,01	2,02	1,96	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	67,15	65,07	-
POTSDAM	Anzahl der Werte	96431	4411	2230	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	6,18	5,27	-
	Vereisungstage (mean)	-	54,64	31,45	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	16,71	8,45	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	30,58	26,85	-
	Hauptwindrichtung	10 W	10 W	4 E	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	180	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,28	9,90	9,20	-
	v (mean) (m/s)	4,26	3,41	3,36	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	79,94	78,83	-
SAARBUECKEN	Anzahl der Werte	96430	3302	2731	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,91	5,36	-
	Vereisungstage (mean)	-	39,82	33,00	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	12,51	10,34	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	31,41	31,35	-
	Hauptwindrichtung	3 ENE	3 ENE	3 ENE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	0	-
	99,9%-Quantil (m/s)	12,46	10,49	8,57	-
	v (mean) (m/s)	3,57	2,50	2,26	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	70,14	63,17	-
SCHLESWIG	Anzahl der Werte	96429	3800	3298	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	5,91	5,09	-
	Vereisungstage (mean)	-	44,00	34,45	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	14,39	12,49	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	32,71	36,26	-

Übersichtstabelle der Ergebnisse an allen Standorten für Szenario 1,2 und 3

	Hauptwindrichtung	8 SSW	8 SSW	4 E	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	0	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,21	9,22	8,61	-
	v (mean) (m/s)	4,04	3,14	3,04	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	77,65	75,19	-
SCHWERIN	Anzahl der Werte	96421	1745	1756	11
	Vereisungsmonate (mean)	-	4,36	4,91	-
	Vereisungstage (mean)	-	24,82	28,82	-
	durchgehende Vereisung (mean) (Tage)	-	6,61	6,65	-
	Verhältnis durchgehende Vereisung zu mögliche Vereisungstage (%)	-	26,63	23,08	-
	Hauptwindrichtung	9 WSW	8 SSW	5 ESE	-
	Windrichtungsänderung zu S1 (°)	-	30	120	-
	99,9%-Quantil (m/s)	11,82	8,72	7,55	-
	v (mean) (m/s)	3,80	2,79	2,72	-
	Verhältnis v (mean) zu S1 (%)	-	73,55	71,65	-

10 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich zunächst Herrn Dr. Jan Hauschild für die Betreuung und fachliche Bewertung der Bachelorarbeit, seitens des TÜV NORD, danken. Im Rahmen der Arbeit durfte ich von Herrn Dr. Jan Hauschild sehr viel über das Verfahren einer Risikobeurteilung lernen.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinem betreuenden Professor, Herrn Prof. Dr. Henrik von Wehrden, von der Leuphana Universität Lüneburg, für die Bereitschaft, diese Arbeit zu begleiten und zu bewerten.

Weiterer Dank gilt Frau Verena Schneider, als Leiterin der Gruppe Wind Standortgutachten, für die Möglichkeit, diese Arbeit beim TÜV NORD zu schreiben.

Außerdem bedanke ich mich bei Frederik Lautenschlager für die fachliche Unterstützung während dieser Arbeit und bei Frau Marie-Luise Hillebrenner für die Korrektur.

Mein besonderer Dank geht an meine Familie für die Ermöglichung meines Studiums und die uneingeschränkte Unterstützung während der gesamten Zeit. Auch bei Anastasia Reschke möchte ich mich ganz herzlich für die Unterstützung während des Studiums und insbesondere während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

11 Erklärung

Ich versichere hiermit, dass

- ich diese Master-Arbeit – bei einer Gruppenarbeit den entsprechend gekennzeichneten Teil der Master-Arbeit – selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe,
- alle Stellen der Arbeit, die wortwörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe
- und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt zu haben.

(Datum, Unterschrift)