



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen

Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von:

Frederik Lautenschlager
Matrikelnummer: 1778261

Gutachter: Prof.Dr.	Rainer Stank	(HAW Hamburg)
Gutachter: Dr.	Jan Hauschild	(TÜV NORD)

Zusammenfassung

Mit der wachsenden Bedeutung der Windenergie in Deutschland hat der Ausbau an Land ein Volumen erreicht durch das windreiche Standorte knapp werden. Immer öfter finden sich Windenergieanlagen in unmittelbarer Umgebung von Straßen oder auf Betriebsgeländen von Industriebetrieben. Hier besteht im Winter eine Gefahr durch herabfallende Eisstücke. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Frage beantwortet, wie sich die Windbedingungen bei Eisansatz gegenüber dem Ganzjahresmittelwert, verändern. Für die Analyse wurden, über ganz Deutschland verteilt, mehrere Wetterstationen ausgewertet. Das Ergebnis ist eindeutig für Standorte, die unterhalb von 500 Höhenmetern liegen. Bei diesen Standorten ist die Windgeschwindigkeit bei Eisansatzbedingungen geringer als das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit. Daraus folgt, dass die Verwendung des Jahresmittels für die Bewertung der Flugweite von Eisansatz, eine eher konservative Annahme ist. Oberhalb von 500 Höhenmetern ist keine klare Aussage zur Veränderung der Windbedingungen an Vereisungstagen möglich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
1 Einleitung.....	- 1 -
2 Aufgabenstellung	- 3 -
2.1 Lösungsansatz.....	- 3 -
3 Grundlagen.....	- 4 -
3.1 Eisbildung an Windenergieanlagen.....	- 4 -
3.1.1 Eisbildung Allgemein.....	- 4 -
3.1.2 Meteorologische Bedingungen für Eisansatz	- 5 -
3.1.3 Unterschiedliche Arten von Eisansatz.....	- 7 -
3.1.4 Europäische Eiskarte	- 8 -
3.1.5 Wetterlagen die Eisbildung an WEA beeinflussen	- 11 -
3.1.6 Einfluss der Eisbildung auf Windenergieanlagen	- 12 -
3.2 Parameterschätzung.....	- 17 -
3.2.1 Weibullverteilung.....	- 17 -
3.2.2 Ermittlung der empirischen Summenhäufigkeit.....	- 19 -
3.2.3 Methode der kleinsten Fehlerquadrate	- 20 -
3.2.4 Maximum-Likelihood Methode (MLM).....	- 21 -
3.2.5 WASP Methode	- 23 -
3.2.6 Vergleich der verschiedenen Schätzverfahren	- 26 -
3.3 Ermittlung der Bewertungsparameter.....	- 30 -
3.3.1 Mittelwert der Verteilung.....	- 30 -
3.3.2 Median der Verteilung.....	- 30 -
3.3.3 Quantile der Verteilung	- 31 -
3.3.4 Ermittlung der Varianz der Verteilung.....	- 32 -
3.3.5 Berechnung Luftdichte	- 33 -

4	Auswertung.....	- 37 -
4.1	Auswahl der Wetterstationen	- 37 -
4.2	Bewertungskriterien für die Auswertung	- 42 -
4.3	Darstellung der Auswertung beispielhaft für einen Standort	- 44 -
4.3.1	Vorstellen der Beispiel Wetterstationen.....	- 44 -
4.3.2	Auswertung der Tagesmittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeit.....	- 46 -
4.3.3	Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit	- 54 -
4.3.4	Auswertung der Luftdichte	- 63 -
4.4	Zentrale Auswertungsergebnisse aller Standorte	- 64 -
4.4.1	Auswertung der Tagesmittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeit.....	- 64 -
4.4.2	Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit	- 68 -
4.4.3	Auswertung der Luftdichte	- 70 -
4.4.4	Auswertung der potentiellen Vereisungstage.....	- 75 -
5	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	- 77 -
5.1	Windgeschwindigkeit.....	- 77 -
5.1.1	Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit.....	- 77 -
5.1.2	Maximale Windgeschwindigkeit	- 80 -
5.2	Luftdichte	- 83 -
5.3	Vereisungstage	- 85 -
6	Fazit	- 86 -
7	Zusammenfassung	- 87 -
8	Literaturangaben	- 88 -
9	Anhang.....	- 90 -
9.1	Ergebnisanhang	- 90 -
9.1.1	Auswertung mittlere Windgeschwindigkeit.....	- 90 -
9.1.2	Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit	- 96 -

Nomenklatur

Formelzeichen:

Symbol Einheit.....Bedeutung

E J kinetische Energie

m kg Masse

v m/s Windgeschwindigkeit

\dot{m} kg/s Massenstrom

ρ kg/m^3 Dichte

A_F m^2 Fläche

P W Leistung

u m/s Umfanggeschwindigkeit

r m Radius

ω $1/s$ Winkelgeschwindigkeit

$F(v)$ -- Summenhäufigkeit der Weibullverteilung

$\tilde{F}(v)$ -- empirische Summenhäufigkeit

$f(v)$ -- relative Häufigkeit der Weibullverteilung

A m/s Skalierungsparameter der Weibullverteilung

k -- Formparameter der Weibullverteilung

b m/s Startparameter der Weibullverteilung

i -- Laufindex

n -- Anzahl der Stichprobenwerte

d_i -- Residuen

$SF(A,k)$ -- Summe der kleinsten Fehlerquadrate der Weibullverteilung

L -- Likelihood Funktion

$\vec{\Psi}$ -- Parametervektor

k_p -- Anzahl der unbekannt Parameter der Verteilung

a_u -- Statistisches Moment u. Ordnung

μ m/s Erwartungswert (Mittelwert) der Weibullverteilung

$\bar{v}_{Messung}$... m/s empirischer Mittelwert

B -- Bestimmtheitsmaß

b_s	..... --	..... Steigung der Regressionsgeraden
v_{median}	..... m/s	..... Median der Verteilung
ε	..... %	..... Quantilswert
$F^{-1}(\varepsilon)$	..... m/s	..... Quantilsfunktion
s^2	..... m ² /s ²	..... Varianz; Einheit abhängig von der Verteilung
s	..... m/s	..... Standardabweichung; Einheit abhängig von der Verteilung
c_w	..... --	..... Strömungswiderstandsbeiwert
W	..... m/s	..... relative Windgeschwindigkeit
p	..... Pa	..... Druck
p_L	..... Pa	..... Partialdruck der trockenen Luft
e	..... Pa	..... Partialdruck des Wasserdampfes
M	..... g/mol	..... mittleres Molekulargewicht
R^*	..... J/(mol K)	..... universelle Gaskonstante
R_L	..... J/(kg K)	..... spezifische Gaskonstante der trockenen Luft
R_W	..... J/(kg K)	..... spezifische Gaskonstante des Wasserdampfes
ρ_W	..... kg/m ³	..... Dichte des Wasserdampfes
t	..... °C	..... Temperatur
T	..... K	..... absolute Temperatur
T_V	..... K	..... virtuelle Temperatur

Abkürzungen

Kurzform.....Bedeutung

BOKU-Met.....	Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur in Wien
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FMI.....	Finnish Meteorological Institute
MDF	Methode der kleinsten Fehlerquadrate
MLM	Maximum Likelihood Methode
mW	maximale Windgeschwindigkeit
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Programm
WEA.....	Windenergieanlage oder Windenergieanlagen
WECO.....	Wind Energy Production in Cold Climate
WMO.....	World Meteorological Organisation

Danksagung:

An dieser Stelle möchte ich meinem betreuenden Professor Herrn Dr. Rainer Stank, von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, für die Bereitschaft diese Arbeit zu begleiten und zu bewerten, danken.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Dr. Jan Hauschild für die Betreuung und fachliche Bewertung der Bachelorarbeit seitens des TÜV NORD. Im Rahmen der Arbeit durfte ich von Herrn Dr. Jan Hauschild sehr viel über statistische Auswertungsverfahren und die Methodik des wissenschaftlichen Arbeitens lernen.

Ich danke Frau Verena Schneider, die als Leiterin der Gruppe Wind Standortgutachten mir überhaupt erst ermöglicht hat, diese Arbeit beim TÜV NORD zu schreiben.

Weiterhin bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Eltern, für die Unterstützung im Studium und ganz besonders während der Erstellung der Bachelorarbeit.

1 Einleitung

Die Nutzung der Windenergie hat in der Geschichte der Menschheit, eine lange Tradition. Die ersten Windräder wurden schon 1700 Jahre v. Chr. für die Bewässerung von Feldern genutzt. Belegbare Quellen, für die Nutzung der Windenergie, finden sich erstmals 644 Jahre nach Chr. im persisch-afghanischen Grenzgebiet. Perfektioniert wurden die Windmühlen im 16. Jahrhundert in Form der Holländer-Windmühle, bei welcher der Turmkopf mit den Flügeln, unabhängig vom Rumpf in den Wind gedreht wurde. In den folgenden Jahrhunderten entwickelten sich die unterschiedlichsten Formen der historischen Windmühlen. Die historische Windmühle wurde für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt, z.B. zum Wasserpumpen oder zum Kornmahlen /1/.

Die erste Nutzung der Windenergie zur Stromerzeugung geht auf das Ende des 19. Jahrhunderts zurück. Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Vorläufer der heutigen modernen Windenergieanlagen (WEA) erprobt. Mit steigenden Rohstoffpreisen im Laufe der 70er Jahre gewann die Stromerzeugung aus Windkraft, neben anderen nicht fossilen Energieträgern, immer mehr an Bedeutung. Die modernen dreiflügeligen WEA, wie sie heute überall zu sehen sind, wurden ursprünglich in Dänemark entwickelt. Verschiedene andere Entwicklungskonzepte, wie z.B. Leeläufer, die Rotorblätter stehen auf der windabgewandten Turmseite, oder Konzepte mit weniger als drei Rotorblättern, konnten sich nicht durchsetzen /2/.

Heute sind die WEA aus dem Landschaftsbild der norddeutschen Küstenregionen nicht mehr weg zu denken. Im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte hat auch der Ausbau der Windenergie im Binnenland stark zugenommen. Durch die Fördermaßnahmen, im Rahmen des Erneuerbare-Energie-Gesetzes (EEG) und der Klimaziele, die die Bundesregierung für Deutschland abgesteckt hat, ist der Ausbau an Land stark fossiert worden. Heute sind neue wirtschaftliche zu betreibende Standorte an Land seltener geworden.

WEA werden immer öfter dicht an bebaute Flächen, Straßen oder Wirtschaftswege gebaut. Industriebetriebe oder städtische Betriebe planen und bauen WEA auf ihren Betriebsgeländen, um ihren Energiebedarf unabhängig zu decken. Die dadurch entstehenden Gefahren für Personen, Tiere oder Bauwerke, im nahen Umfeld der WEA, werden in Deutschland im Rahmen des Genehmigungsverfahrens berücksichtigt.

Neben Schallimmission und Schattenschlag, sind auch der Bruch eines Rotorblattes, das Versagen des Turms oder Eisschlag im Winter nicht zu unterschätzende Gefahren. Diese Risiken werden im Rahmen des behördlichen Genehmigungsverfahrens bewertet. Die Unfallgefahr und die gesundheitliche Belastung, für Personen im Gefahrenbereich dürfen sich durch neu geplante WEA nicht signifikant erhöhen. Der Bauherr ist dazu verpflichtet, hierfür die nötigen Nachweise zu erbringen. Es müssen Schallimmissions- bzw. Schattenschlaggutachten sowie eine Risikobewertung für den neu geplanten Standort angefertigt werden.

Im Rahmen der Risikobewertung wird die Erhöhung der Unfallgefahr durch die WEA bewertet. Als Folge von Rotorblattbruch, Eisschlag oder Turmversagen können lose Teile von der WEA herunterfallen. Personen, die sich in Gefahrenbereichen aufhalten, sind einer erhöhten Unfallgefahr ausgesetzt. Für die Risikobewertung werden sämtliche Abbruch- bzw. Abflugsituationen bei verschiedenen Rotorblattstellungen simuliert. In Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und eventuell der Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblätter, ergeben sich unterschiedliche Gefährdungszonen im Umfeld der WEA.

Für die Bewertung des Risikos durch Eisansatz /3/ wird vorausgesetzt, dass die WEA bei Eisbildung an den Rotorblättern abgeschaltet ist. Das Abschalten der WEA wird durch geeignete Eiserkennungssysteme realisiert. Daraus folgt, dass nur die Windgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Flugweite der Eisstücke hat. Die Umdrehungsgeschwindigkeit durch das Trudeln der Rotorblätter im Leerlauf kann vernachlässigt werden.

2 Aufgabenstellung

Die Bedingungen für Eisabwurf sollen in der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden. Im Rahmen einer Risikobewertung des Ereignisses Eisabwurf bildet der mittlere Jahreswind die Grundlage für die Simulation der Flugweite von Eisobjekten. Aus der Annahme heraus, dass die Windbedingungen bei Eisansatz sich von der über das ganze Jahr gemittelten Windgeschwindigkeit unterscheiden, soll der Einfluss der Windgeschwindigkeiten auf das Ereignis Eisabwurf untersucht werden. Der Fokus der Untersuchung liegt hierbei auf der Veränderung der Windbedingungen, zwischen dem Jahresmittel und den Windbedingungen bei Eisansatz.

2.1 Lösungsansatz

Im Rahmen der Untersuchung werden die Windmessungen verschiedener Wetterstationen ausgewertet. Die ausgewählten Wetterstationen sind über ganz Deutschland verteilt. Bewertet wird der Unterschied zwischen dem mittleren Jahreswind und der Windgeschwindigkeit bei Eisbedingungen. Für die Auswahl der Windgeschwindigkeiten bei Vereisungsbedingungen werden drei verschiedenen Auswahl-situationen definiert. In den einzelnen Situationen werden die Bedingungen für Eisansatz unterschiedlich stark differenziert. Die Datenbasis bilden die frei zur Verfügung stehenden Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes /4/.

3 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden grundlegende Fragestellungen zum Eisansatz an WEA sowie die mathematischen Grundlagen für die Auswertung der Windmessungen vorgestellt.

3.1 Eisbildung an Windenergieanlagen

Eisbildung an WEA ist nicht nur ein Sicherheitsrisiko, sondern beeinflusst auch die gesamte Struktur der WEA. In diesem Abschnitt werden die Grundlagen für Eisbildung, meteorologische Bedingungen und unterschiedliche Wetterlagen für Eisansatz erläutert.

3.1.1 Eisbildung Allgemein

Eis ist der feste Aggregatzustand von Wasser. In Abhängigkeit von Temperatur und Druck ändert das Wasser seinen Aggregatzustand. Bei normalem Atmosphärendruck, ca. 1 Bar, gefriert Wasser bei 0 °C. Dies ist der Phasenübergang vom flüssigen zum festen Aggregatzustand des Wassers. In der Erdatmosphäre kommt Wasser in allen drei Aggregatzuständen, gasförmig, flüssig und fest vor. Im Phasendiagramm des Wassers Abbildung 3.1 ist der Einfluss von Druck und Temperatur auf das Wasser dargestellt /5/, /6/.

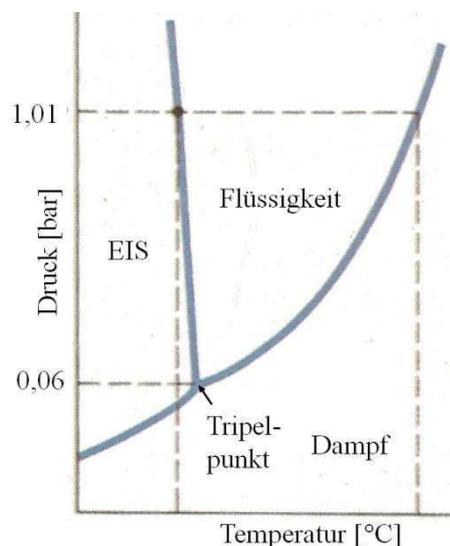


Abbildung 3.1: Phasendiagramm des Wassers /7/

3.1.2 Meteorologische Bedingungen für Eisansatz

Eisansatz ist definiert als das Auswachsen von Eis oder Schnee auf Oberflächen, die ungeschützt der Atmosphäre ausgesetzt sind. Die physikalischen Eigenschaften und die äußerliche Erscheinung des Eisansatzes sind verschieden. Sie variieren mit den meteorologischen Bedingungen, die während des Eisaufwachsens vorherrschen /8/. Je nach Art des Eisansatzes spielen diese Bedingungen in unterschiedlichen Verhältnissen zusammen. Die wichtigsten Größen sind Temperatur, Wassergehalt und Tropfengröße des unterkühlten Wassers (flüssiges Wasser unter 0°C) in der Luft sowie der Zeitraum, über den die Bedingungen für Eisansatz vorherrschen. Die Windgeschwindigkeit hat je nach Eisansatzart einen Einfluss auf die Eisbildung /9/.

Grundlegend werden zwei verschiedene Arten der Entstehung von Eisansatz unterschieden. Erstens die Eisbildung durch Niederschlag (Niederschlagseisbildung) und zweitens die Eisbildung in den Wolken (Wolkeneisbildung). Die Eisbildung durch Niederschlag ist abhängig von der Temperatur, der Tropfengröße und dem Wassergehalt der Luft. Das Zusammenwirken dieser Parameter ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Zu Eisregen kommt es, wenn die Temperatur der Luft zwischen -10°C und 0°C ist und die Tropfengröße des unterkühlten Wassers in der Luft groß ist. Trifft das unterkühlte Wasser auf eine freiliegende Oberfläche so friert es daran sofort fest. Die Dicke der gebildeten Eisschicht ist abhängig von der Dauer und der Menge des Niederschlags /9/. Das Dickenwachstum der entstehenden Eisschicht kann durch Wind, welcher die unterkühlten Wassertropfen an die freien Oberflächen drückt, verstärkt werden /10/.

Nasser Schnee ist eine weitere Form der Niederschlagseisbildung, er fällt bei Temperaturen zwischen 0°C und $+3^{\circ}\text{C}$. Es ist eine Mischung aus großen Schneeflocken und Wassertropfen (siehe Tabelle 3.1). Der nasse Schnee friert auf einer freien Oberfläche als harte Eisschicht fest, wenn die Temperatur der Oberfläche unter 0°C ist. Die Dicke der durch nassen Schnee gebildeten Eisschicht ist abhängig von der Dauer und der Intensität des Niederschlags /9/, /11/.

Die zweite Art der Eisentstehung ist die Eisbildung in den Wolken. Wolken enthalten Eiskristalle oder unterkühlte Wassertropfen, welche an kalten Oberflächen sofort gefrieren /10/. Temperatur und Windgeschwindigkeit bedingen in Abhängigkeit von Tropfengröße und Wassergehalt der Luft die Art des Eisansatzes (siehe Tabelle 3.1). In Abbildung 3.2 ist die Abhängigkeit der unterschiedlichen Eisansatzarten von Windgeschwindigkeit und Temperatur dargestellt. Bei niedrigen Temperaturen gibt es auch bei höhe-

ren Windgeschwindigkeiten noch weichen Eisansatz. Treffen die unterkühlten Wassertropfen schneller auf die Oberfläche als sie gefrieren können, handelt es sich um ein nasses Eiswachstum. Als Ergebnis entsteht ein hartes Glatteis. Ist die Gefrierzeit groß im Verhältnis zur Auftreffrate der Wassertropfen, so entsteht Reif. Der Reif hat je nach Windgeschwindigkeit andere Eigenschaft /9/. Die unterschiedlichen Eisansatzarten werden in Abschnitt 3.1.3 einzeln vorgestellt.

Eisansatzart	Lufttemperatur [°C]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Tropfengröße	Wassergehalt der Luft	Dauer
Niederschlagseisbildung					
Glatteis (Eisregen)	$-10 < t < 0$	Alle	Groß	Mittel	Stunden
Nasser Schnee	$0 < t < +3$	Alle	Flocken	Sehr Hoch	Stunden
Wolkeneisbildung					
Glatteis	Siehe Abbildung 3.2	Siehe Abbildung 3.2	Mittel	Hoch	Stunden
Harter Reif	Siehe Abbildung 3.2	Siehe Abbildung 3.2	Mittel	Mittel	Tage
Weicher Reif	Siehe Abbildung 3.2	Siehe Abbildung 3.2	Klein	Gering	Tage

Tabelle 3.1: Meteorologische Eisansatzparameter /9/

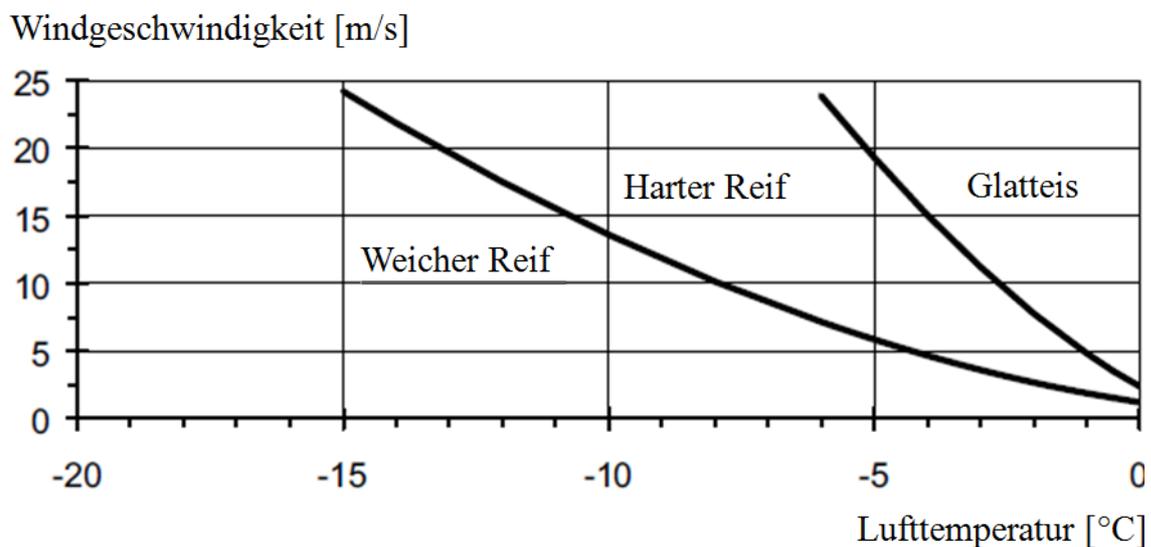


Abbildung 3.2: Abhängigkeit der Eisbildung von Windgeschwindigkeit und Temperatur /9/

3.1.3 Unterschiedliche Arten von Eisansatz

Die unterschiedlichen Eisansatzarten, Glatteis, nasser Schnee und Reif haben verschiedene optische und physikalische Eigenschaften. Sie unterscheiden sich in Farbe, Form und Dichte sowie Adhäsion und Kohäsion.

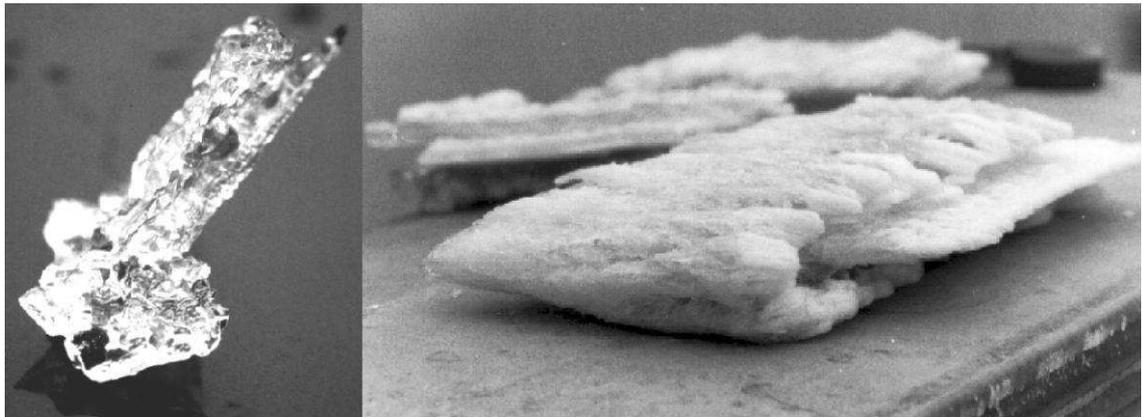


Abbildung 3.3: Glatteisansatz (links) und harter Reifansatz (rechts) /11/

Glatteis ist die Eisansatzart mit der höchsten Dichte. Es wächst meist gleichmäßig auf freiliegenden Oberflächen und hat eine starke Haftkraft. Mechanisch ist es nur schwer von der Oberfläche zu lösen. Das farbliche Erscheinungsbild ist transparent (siehe Abbildung 3.3). Glatteis entsteht bei Eisregen, Nieselregen oder bei nassem Eiswachstum innerhalb der Wolken /9/, /11/. Die verschiedenen Eigenschaften von Glatteis sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Nasser Schnee fällt bei Temperaturen knapp über 0°C . Er setzt sich aus unterkühlten Wassertropfen und Schneeflocken zusammen und hat eine weiße Farbe. Die Dichte und Hafteigenschaften von nassem Schnee sind in erster Linie davon abhängig ob der nasse Schnee gefroren oder nicht gefroren ist /11/. Darüber hinaus werden sie auch davon beeinflusst wie hoch der Anteil an unterkühltem Wasser ist und mit welcher Geschwindigkeit der nasse Schnee auf die Oberfläche auftrifft /9/. Drückt eine hohe Anströmgeschwindigkeit den Schnee auf eine Oberfläche, so wird dieser schon vor dem festfrieren zusammen gepresst, was eine höhere Dichte und stärkere Haftkräfte zur Folge hat. Die unterschiedlichen Eigenschaften sind in Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Reif entsteht üblicherweise bei Bedingungen für Wolkeneisbildung (siehe Kapitel 3.1.2, Tabelle 3.1 und Abbildung 3.2). Die meteorologischen Bedingungen beeinflussen die

Art des Reifansatzes. Seine Farbe variiert von Weiß bis Opak (Lichtdurchlässig). Reif wächst an der windzugewandten Seite der freiangeströmten Oberfläche auf. Die Reifarten werden nach ihren Dichte- und Hafteigenschaften eingeteilt. Es wird zwischen hartem und weichem Reif unterschieden. Die Entstehungsgeschwindigkeit und die Reifansatzart ist von der Größe der angeströmten Oberfläche, der Windgeschwindigkeit (Anströmgeschwindigkeit), der Temperatur, der Menge an unterkühltem Wasser sowie von der Größenverteilung der Wassertropfen in der Luft abhängig /9/. Harter Reif ist meist weiß und bildet tropfsteinförmige Kegelformationen, die sich aus verschiedenen kugelförmigen Segmenten mit Lufteinschlüssen aufbauen (siehe Abbildung 3.3). Weicher Reif besteht aus kleinen Eisnadeln und Eisflocken, welche eine spröde und zerbrechliche Schicht auf freiangeströmten Oberflächen bilden, die relativ leicht zu entfernen ist /11/. Weitere physikalische Eigenschaften sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Eisansatzart	Dichte [kg/m³]	Adhäsion & Kohäsion	Erscheinungsbild	
			Farbe	Form
Glatteis	900	Stark	Transparent	Gleichmäßig verteilt/ Eiszapfen
Nasser Schnee	300-600	Weich (formbar) Stark (gefroren)	Weiß	Gleichmäßig verteilt/ tropfsteinförmig
Harter Reif	600-900	Stark	Opak	Tropfsteinförmig in Richtung Luv
Weicher Reif	200-600	Leicht bis Mittel	Weiß	Tropfsteinförmig in Richtung Luv

Tabelle 3.2: Eigenschaften unterschiedlicher Eisansatzarten /9/

3.1.4 Europäische Eiskarte

Von 1996 bis 1998 wurde von der Europäischen Union, im Rahmen des Nichtnuklearen Energieprogramms, das erste „Wind Energy Production in Cold Climate“ (WECO) Projekt ins Leben gerufen und gefördert. Das WECO Projekt wurde vom Finnischen Meteorologischen Institut (FMI) geleitet. An dem Projekt waren europaweit eine Vielzahl von Forschungsinstituten, WEA-Herstellern und Energieversorgern beteiligt. Im Fokus des Projekts stand ein besseres Verständnis für den Betrieb von WEA in Regionen mit Vereisungsbedingungen. Im Rahmen des Projektes wurden Beobachtungen, Messungen, Simulationen und Berechnungen durchgeführt. Das Ergebnis waren neue Erkennt-

nisse und Empfehlungen für den Betrieb und die Planung von WEA in kalten Klimaregionen. Die Ergebnisse sind im ersten WECO Bericht /12/ festgehalten. Das WECO Projekt wurde in den folgenden Jahren weitergeführt, der letzte veröffentlichte WECO Bericht „State-of-the-art of wind energy in cold climates“ /13/ stammt aus dem Jahr 2010.

Vereisungsbedingungen haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Betrieb von WEA (siehe Kapitel 3.1.6). In diesem Zusammenhang ist die jährliche Vereisungssituation an Windenergiestandorten ein Faktor, der bei der Planung von Windenergieprojekten berücksichtigt werden muss. Im Rahmen des WECO Projektes wurde für Europa eine Eiskarte erstellt. Diese ordnet den Regionen in Europa durchschnittliche Vereisungszeiträume pro Jahr zu. Die europäische Eiskarte des aktuellen WECO Berichts /13/ ist in Abbildung 3.4, als übersetzte Version, dargestellt.

Die europäische Eiskarte wurde aus Messungen von 120 Wetterstationen erstellt. Die Wetterstationen sind über ganz Europa verteilt. Ein Eistag wird erkannt, wenn die Bedingungen Wolkeneisbildung vorliegen (siehe Kapitel 3.1.2 Tabelle 3.1). Hierfür wurden an den Wetterstationen Temperatur, Windgeschwindigkeit und Wolkenhöhe ausgewertet. Die Eiskarte gibt die mittlere jährliche Anzahl der Eistage aus, mit ihr können die erwarteten Eistage für eine Windenergiestandort abgeschätzt werden /14/, /12/.

Die europäische Eiskarte zeigt deutlich, dass die Vereisungsbedingungen über Europa verteilt unterschiedliche sind. Die Häufigkeit der jährlichen Eistage nimmt von Nordeuropa nach Südeuropa ab. Maritim geprägte Küstenregionen haben eine niedrigere jährliche Häufigkeit an Eistagen als Gebirgsregionen. Bemerkenswert ist, dass die weit im Süden von Europa liegenden französischen Alpen im Mittel mehr Eistage haben, als das schwedische Festland und die norwegische Küstenregion.

Im aktuellen WECO Bericht /13/ wird darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der Eiskarte nicht die lokale Topografie berücksichtigt, welche einen entscheidenden Einfluss auf die lokalen Vereisungsbedingungen hat. Für die Bewertung eines Standortes ist die Eiskarte eine Orientierungshilfe. Sie sollte aber mit den lokalen topografischen Informationen abgeglichen und durch Messungen vor Ort validiert werden.

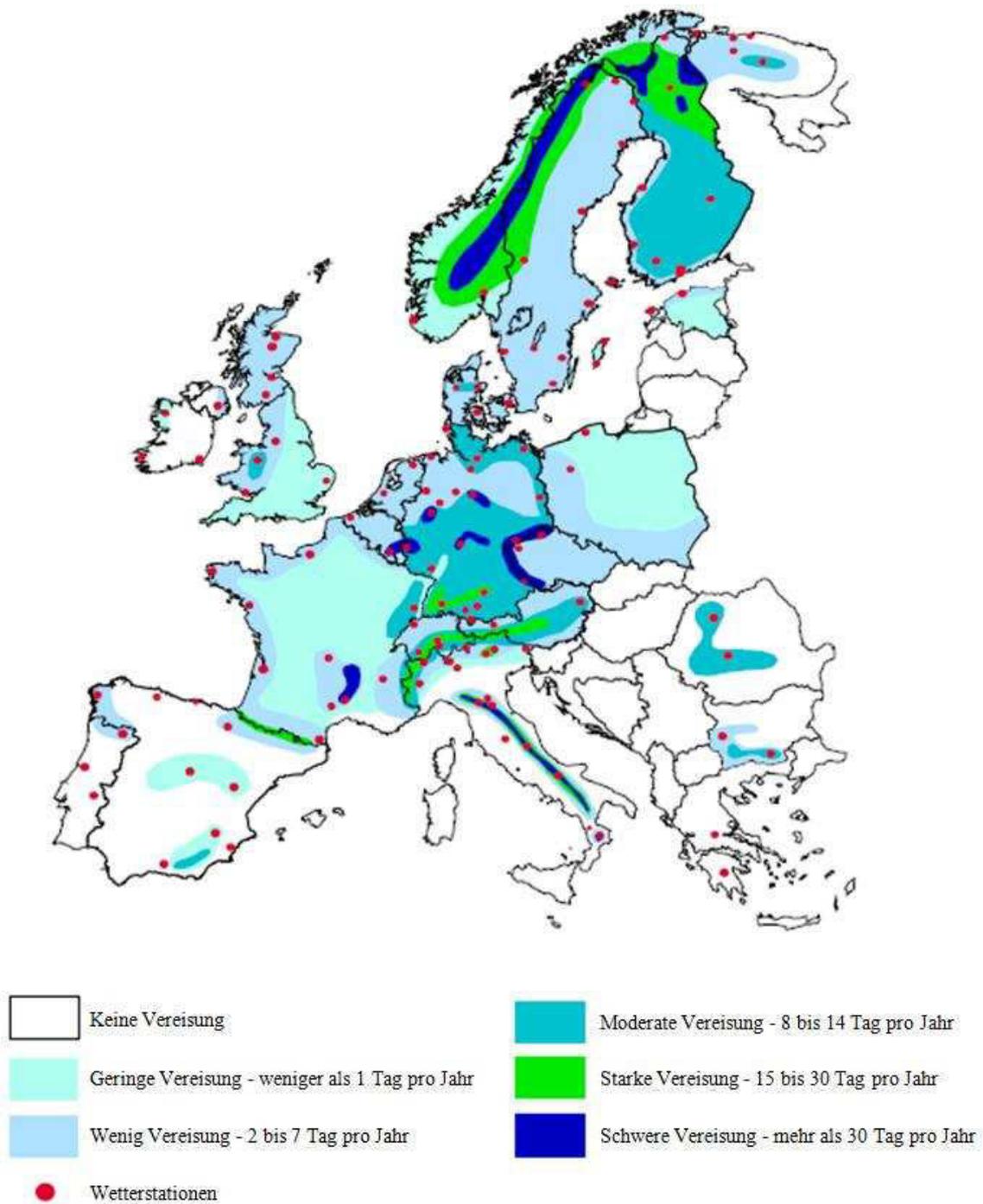


Abbildung 3.4: Europäische Eiskarte /13/

3.1.5 Wetterlagen die Eisbildung an WEA beeinflussen

Für die Beurteilung der Wettersituation, die Eisbildung an WEA begünstigt, sind zwei Wetterlagen von entscheidender Bedeutung. Diese wurden im Rahmen des WECO Berichts /12/ untersucht und definiert. Darüber hinaus werden die relevanten Wetterlagen in einer Untersuchung vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur in Wien (BOKU-Met) charakterisiert /15/. Die folgende Darstellung der Wetterlagen ist dem WECO Bericht und der Untersuchung vom BOKU-Met entnommen.

Die Wetterlage, welche am häufigsten einen Eisansatz zur Folge hat, ist gekennzeichnet durch eine hohe relative Luftfeuchtigkeit von über 90% und einer Temperatur unter 0°C. In Nebel, Hochnebel oder Wolken treten diese meteorologischen Bedingungen auf. Das Phänomen wird als Wolkeneisbildung bezeichnet. Die unterkühlten Wassertropfen, welche den Eisansatz begünstigen, bilden sich am häufigsten in einem Temperaturbereich von 0°C bis -12°C. Die großräumige Wetterlage ist durch ein stabiles Hochdruckgebiet über Mitteleuropa, mit vergleichsweise milden Temperaturen in den hohen Luftschichten und geringen Luftdruckgegensätzen über der Höhe, charakterisiert. Als Folge dieser stabilen Wetterverhältnisse kann die feuchte Kaltluft in den bodennahen Schichten nicht ausgetauscht werden. Die Wetterlage ist durch tiefhängende Wolken und Nebel sowie geringe Niederschläge gekennzeichnet. Die Wolkenuntergrenze liegt oft unter 100m. Moderne WEA sind meist mehr als 100m hoch und reichen mit ihren Rotorblättern in die unteren Wolkenschichten, wo die unterkühlten Wassertropfen an den kalten Rotorblättern gefrieren, dieses Phänomen wird der Wolkeneisbildung zugeordnet /16/ (siehe Abschnitt 3.1.2).

Die zweite Wetterlage, die zu Eisbildung an den Rotorblättern führt, wird im Volkstum üblicherweise als „Eisregen“ bezeichnet. Sie tritt allerdings wesentlich seltener auf als die erst beschriebene. In Abschnitt 3.1.2 wurden die meteorologischen Bedingungen für die Niederschlagseisbildung charakterisiert. Die Wetterlage, welche Eisregen begünstigt, ist eine Inversionswetterlage. Inversion ist die Zunahme der Temperatur über die einzelnen Luftschichten mit der Höhe. Die Temperaturänderung verhält sich umgekehrt zur üblichen Abnahme mit der Höhe /17/. Inversionswetterlagen sind dadurch geprägt, dass eine Warmfront es nicht schafft, die kalte Luft auf dem Boden zu verdrängen, sondern sich aufgrund ihrer geringeren Dichte über die kalten Luftmassen am Boden schiebt. Die Folge ist eine stabile Temperaturschichtung mit einer klaren Inversionsgrenze /10/. Bringt die Warmfront Niederschlag mit, welcher in der Höhe als Regen fällt, so gefriert dieser in der unteren Kaltluftschicht und schlägt sich auf unter-

kühlten Oberflächen als Eis nieder. Im allgemeinen wird die bodennahe Kaltluft aber schnell von den warmen Luftmassen verdrängt. Dadurch löst sich der Eisansatz durch Eisregen meist relativ schnell wieder auf.

3.1.6 Einfluss der Eisbildung auf Windenergieanlagen

Die Eisbildung an den Rotorblättern von WEA hat Auswirkungen auf den Betrieb der Anlagen. Bei der Konstruktion von WEA werden unter anderem Extrem- und Ermüdungslasten berücksichtigt. Ermüdungslasten setzen sich aus Aerodynamischen- und Gewichtskräften zusammen. Der Betrieb von WEA mit Eisansatz führt zu einer Erhöhung der Lasten und verändert die aerodynamischen Eigenschaften der WEA. Durch die Erhöhung der Ermüdungslasten sinkt die Lebensdauer. Die Energieproduktion wird durch die Veränderung der aerodynamischen Eigenschaften der Rotorblätter negativ beeinflusst /18/, /13/.

Die Leistung im Wind berechnet sich aus dem Ansatz der kinetischen Energie /1/

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

in Verbindung mit dem Massenstrom der durch den Querschnitt A_F hindurchfließt

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A_F. \quad (3.2)$$

Aus den Gleichung (3.1) und (3.2) folgt die Energiemenge pro Zeit die den Querschnitt A_F durchströmt, diese ist physikalisch mit der Leistung P identisch:

$$P = \frac{1}{2}\rho \cdot v^3 \cdot A_F. \quad (3.3)$$

Aus Gleichung (3.3) ergibt sich das die Windgeschwindigkeit mit der dritten Potenz in die im Wind enthaltene Leistung eingeht. Daraus ergibt sich, dass höhere Windgeschwindigkeiten einen größeren Einfluss auf die Energieausbeute der Windenergienutzung haben.

Bei niedrigen Temperaturen steigt die Luftdichte. Aus Gleichung (3.3) wird deutlich, dass eine größere Luftdichte bei gleicher Windgeschwindigkeit die im Wind enthaltene Leistung erhöht. Reagiert das Betriebsführungssystem nicht auf die veränderten Be-

triebsbedingungen und passt die Rotorstellung an, so kann das Getriebe und der Generator durch Überleistung überlastet oder beschädigt werden /20/. Eine stallgeregelter Anlage, bei der die Rotorblätter nicht in den Wind gedreht werden können und wo die Leistungsbegrenzung mittels Strömungsabriss geregelt wird, kann auf die geänderten Betriebsbedingungen nicht reagieren. Bei kritischen Betriebsbedingungen muss daher vorbeugend abgeschaltet werden. Im Winterbetrieb aufgestellte stallgeregelter Anlagen, erreichen im Sommer nicht den Nennleistungsbereich, weil ihre Rotorblätter auf die höhere Luftdichte im Winter eingestellt sind /14/.

Liegen die meteorologischen Voraussetzungen für Eisansatz vor, so sind die entscheidenden Einflussgrößen für die Menge des Eisansatzes die Geschwindigkeit, mit welcher der Rotor angeströmt wird und die Dauer der Eisansatzbedingungen /32/. Untersuchungen in einem Vereisungswindkanal haben ergeben, dass die Eisansatzmenge pro Zeit proportional zur Windgeschwindigkeit zunimmt /14/. Ist die WEA in Betrieb, wird die Anströmgeschwindigkeit maßgeblich durch die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors bestimmt. Die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors berechnet sich zu /19/

$$u = r \cdot \omega. \quad (3.4)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit nimmt entlang des Rotorblattes mit dem Abstand von der Rotornabe zu. Daraus folgt, dass die Menge des Eisansatzes am Rotorblatt von der Nabe zur Spitze größer wird. Der Eisansatz wächst auf dem Rotorblatt keilförmig auf. Bei abgeschalteten WEA ist die Anströmgeschwindigkeit gleich der Windgeschwindigkeit; die Umdrehung durch das Trudeln der Anlage im abgeschalteten Zustand ist zu vernachlässigen. Die Umfangsgeschwindigkeit einer eingeschalteten WEA kann an der Blattspitze bis zu 80 m/s betragen. Daraus folgt, dass bei einer WEA im Betrieb aufgrund der höheren Anströmgeschwindigkeit schneller Eis aufwächst als bei einer WEA im Leerlauf /16/. Beobachtungen der Größe des Eisansatzes haben gezeigt, dass im Leerlaufbetrieb wesentlich mehr Eismasse aufwächst als bei Rotorblättern im Betrieb. Im Betrieb fällt der Eisansatz aufgrund der höheren Kräfte, die auf die Eismassen wirken, schneller ab und es bildet sich weniger Eismasse welche haften bleibt /14/.

Ein weiteres Problem für die Belastung der WEA ist der Eiswurf. Durch das Abbrechen von Eisstücken entsteht eine ungleichmäßige Vereisung der Rotorblätter untereinander (siehe Abbildung 3.5). Die Folge ist eine veränderte Lastverteilung, wodurch die bauliche Integrität der WEA gefährdet werden kann. Dies muss bei der Errichtung einer WEA in kalten Klimaregionen mit Vereisungsbedingungen berücksichtigt werden /20/.

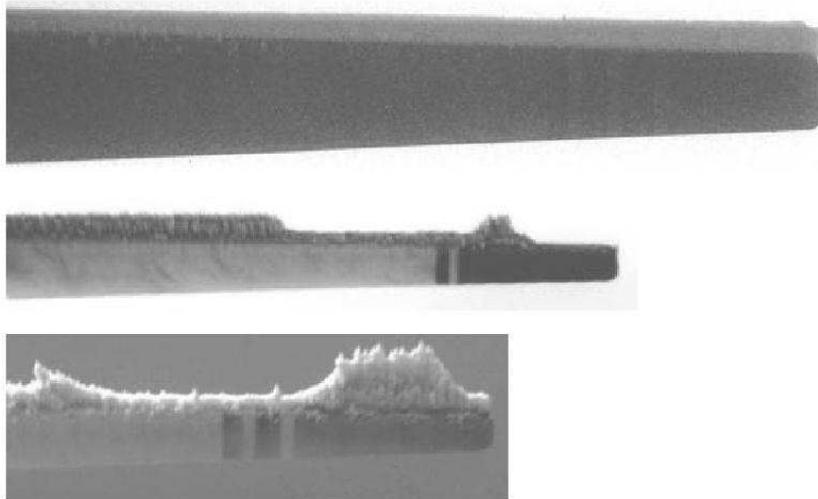


Abbildung 3.5: Eisansatz bei unterschiedlichen Betriebssituationen. Oben: Eisansatz während des Betriebs. Mittel: Eisansatz während des Betriebs nach einem Eiswurf. Unten: Eisansatz einer Anlage im Leerlauf. /12/

Darüber hinaus bedeutet Eisbruch eine große Gefahr für Menschen und Tiere, die sich im Bereich der WEA aufhalten. Auch bauliche Strukturen oder Gebrauchsgegenstände unterhalb der WEA können durch herabfallende Eisobjekte beschädigt werden /20/. Abbildung 3.6 zeigt Beispiele für Eisbruchstücke, die im Umkreis von WEA gefunden wurden. Der Ort, an welchem die Fundstücke an dem Rotorblatt angewachsen sind, ist an ihrer Form gut zu erkennen. Bei allen Fundstücken ist die Rundung der vorderen Rotorblattkante (Rotorblattnase) sichtbar. Nach dem Abbruch vom Rotorblatt zerfallen die großen Eisschilde in der Luft und treffen als kleinere Bruchstücke auf dem Boden auf /16/.



Abbildung 3.6: Fundstücke von Eisbruchstücken von WEA /16/

Neben Eiswurf und der erhöhten Belastung durch Eisansatz ist auch die Vereisung der Messinstrumente eine Gefahr für den sicheren Betrieb der WEA. Für die Betriebsführung sind auf der Gondel im Allgemeinen ein Schalenanemometer für die Messung der Windgeschwindigkeit und eine Windfahne für die Windrichtungsmessung installiert. Über die Messung der Windgeschwindigkeit werden die Anfahr- bzw. Abschaltzeiten bestimmt. Außerdem wird die Stellung der Rotorblätter für die ideale Energieproduktion der Windgeschwindigkeit angepasst. Die Anlage wird nach den Informationen aus der Windmessung in den Wind gedreht /11/.

Eisansatz an den Anemometerschalen erhöht den aerodynamischen Widerstand des Anemometers. Die gemessene Windgeschwindigkeit wird dadurch unterschätzt /16/. Bei kleinen Windgeschwindigkeiten im Bereich der Einschaltgeschwindigkeit wird die WEA zu spät eingeschaltet, weil die tatsächliche Windgeschwindigkeit zu niedrig gemessen wurde. Die Folge sind Produktionsausfall und damit einhergehende wirtschaftliche Verluste. Bei hohen Windgeschwindigkeiten führt die Unterschätzung der tatsächlichen Windgeschwindigkeit zu einem unzulässigen Betriebszustand. Die Anlage wird nicht mit dem Erreichen der Abschaltwindgeschwindigkeit heruntergefahren, sondern erst bei Windgeschwindigkeiten oberhalb der Abschaltwindgeschwindigkeit ausgeschaltet. Daraus resultiert eine extreme Belastung der WEA. Der Extremfall ist ein komplett eingefrorenes Anemometer. Eine Windmessung ist nicht mehr möglich, die Folge ist ein totaler Produktionsausfall. Dies kann nur mit einem beheizten Anemometer vermieden werden /11/.

Festgefrorene Windfahnen zeigen dauerhaft die selbe Windrichtung an. Die Ausrichtung der Gondel kann nicht mehr korrekt gesteuert werden. Bei einer Winddrehung wird die Gondel nicht in den Wind gedreht. Die Folge ist eine ungünstige Schräganströmung der WEA. Friert die Windfahne bei Schräganströmung der WEA fest, so kann eine ständige Entdrillung des Kabelstrangs ausgelöst werden. Die Betriebsführung signalisiert dauerhaft, dass die Gondel dem Wind nachgeführt werden muss /11/, /14/.

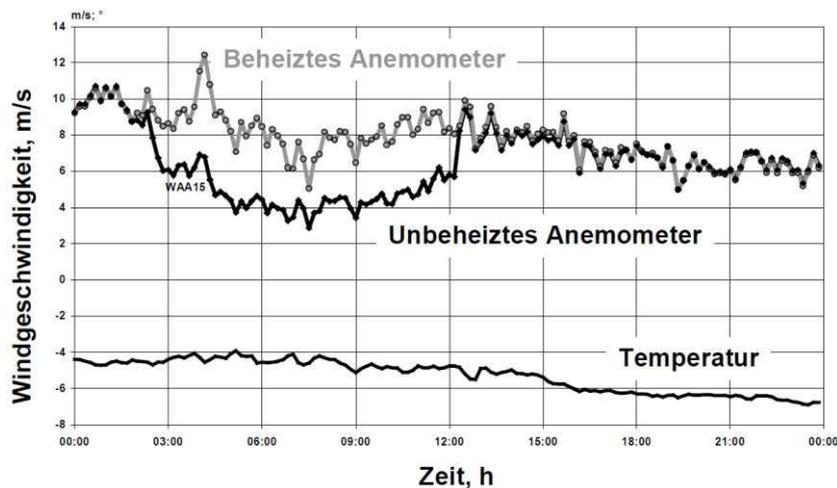


Abbildung 3.7: Vergleich einer beheizten und einer unbeheizten Windmessung über einen Zeitraum von 24 Stunden /14/

Abbildung 3.7 zeigt für denselben Standort zwei unterschiedliche Windmessungen. Der Wind wurde mit zwei unterschiedlichen Anemometern über einen Zeitraum von 24 Stunden gemessen. Zusätzlich ist im unteren Teil der Abbildung noch der Temperaturverlauf über die Zeit aufgetragen. Ein Anemometer ist beheizt und das andere ein unbeheiztes Schalenanemometer. Die Temperatur ist konstant unter 0°C , in der Nacht zeigt das unbeheizte Anemometer eine geringere Windgeschwindigkeit an. Die Abweichung in der angezeigten Windgeschwindigkeit ist ein Indiz für Eisansatz in der Nacht. Das Eis, welches sich auf dem unbeheizten Anemometer niederschlägt, bremst dieses. Am Tag, nachdem die Sonne den Eisansatz gelöst hat, liegen die Messungen der beobachteten Anemometer wieder übereinander. Die Windgeschwindigkeit wird von dem unbeheizten Anemometer im Mittel um 2 m/s unterschätzt. Dies ist eine Größenordnung die, bei der Bewertung eines Windenergiestandortes nicht vernachlässigt werden darf, da die Windgeschwindigkeit in die im Wind enthaltene Leistung mit der dritten Potenz eingeht (siehe Gleichung (3.3)). Eine permanente Unterschätzung der Windgeschwindigkeit bei Eisansatzbedingungen kann einen Standort, der eigentlich für die Windenergienutzung geeignet wäre, als ungeeignet erscheinen lassen /14/.

3.2 Parameterschätzung

Zur Beschreibung der tatsächlichen Verteilung der Messwerte wird eine theoretische Verteilungsfunktion angepasst. Die Verteilungsfunktion ist durch ihre Funktionsparameter eindeutig charakterisiert. Für die Berechnung der Parameter gibt es unterschiedliche Schätzverfahren. Eine Auswahl wird in diesem Kapitel vorgestellt. Im Bereich der Windmessungen hat sich die Anpassung einer Weibullverteilung bewährt. Die Grundlagen der Mathematik zu der Verteilungsfunktion und der Parameterschätzung sind, so weit nicht anders angegeben, den Quellen /21/, /22/, /23/ und /24/ entnommen.

3.2.1 Weibullverteilung

Der Wind am Standort ist für die Nutzung der Windenergie die maßgebliche Größe. Für die Bewertung eines Standortes ist es nicht ausreichend, die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit zu betrachten. Wie in Abschnitt 3.1.6 durch die Gleichung (3.3) beschrieben, geht die Windgeschwindigkeit in die Leistungsberechnung mit der dritten Potenz ein. Höhere Windgeschwindigkeiten haben demnach einen größeren Einfluss auf die Energie die dem Wind entzogen werden kann. Aus diesem Grund ist eine gute Kenntnis der Windverteilung an einem Standort die Grundlage für ein erfolgreiches Windenergieprojekt /1/, /2/.

Mit Hilfe der Weibullverteilung wird an die tatsächliche Windverteilung, eine mathematische Verteilungsfunktion angenähert. Die Summenhäufigkeit der Weibullverteilung berechnet sich zu

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} . \quad (3.5)$$

Durch Differentiation der Summenhäufigkeit nach der Windgeschwindigkeit (v) ergibt sich die relative Häufigkeit

$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} , \quad (3.6)$$

diese ist auch als Dichtefunktion bekannt.

Die Windverteilung wird üblicherweise mit der zweiparametrischen Weibullverteilung beschrieben. Der dimensionslose Formparameter k beschreibt die Form der Weibullverteilung. Ein großer k Wert steht für relativ konstante Windverhältnisse. Schwankt die Windverteilung stärker um den Mittelwert, so wird dies durch einen kleineren k Wert abgebildet /1/. Neben dem Formfaktor ist für eine vollständige Beschreibung der Weibullverteilung noch der Skalierungsfaktor A mit der Dimension [m/s] notwendig /2/.

In Abbildung 3.8 ist die relative Häufigkeit und Summenhäufigkeit der Weibullverteilung eingetragen. Die Parameter der Weibullverteilung sind beispielhaft ausgewählt. Die relative Häufigkeit zeigt, wie oft eine bestimmte Windgeschwindigkeit in der Verteilung vorkommt. Die Summenhäufigkeit gibt an, wie viel Prozent der Windgeschwindigkeiten unterhalb eines bestimmten Windgeschwindigkeitswertes liegen.

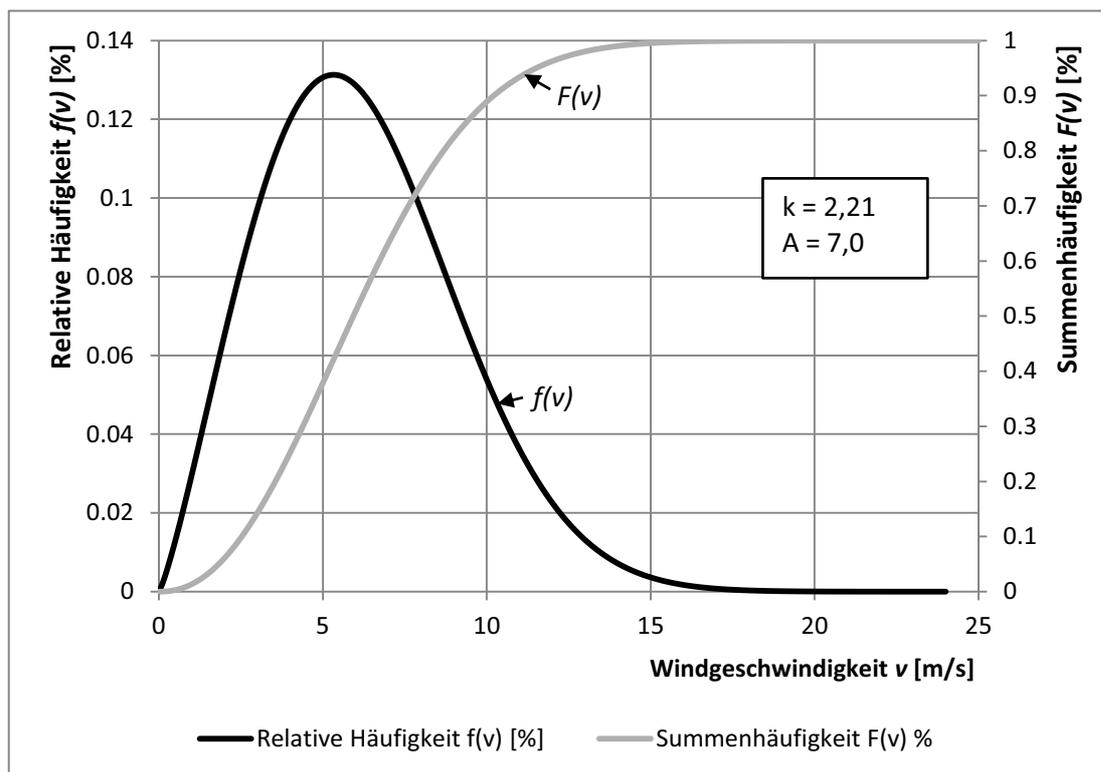


Abbildung 3.8: Summen- und relative Häufigkeit der Weibullverteilung

Die hier beschriebene zweiparametrische Weibullverteilung ist für die Bewertung der Windverteilung die gebräuchliche Form. Für die Bewertung von Ausfallwahrscheinlichkeiten wird häufig die dreiparametrische Weibullverteilung verwendet. Die Summenhäufigkeit ergibt sich dann zu

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v-b}{A-b}\right)^k} \quad (3.7)$$

Für die Dichte der Weibullverteilung ergibt sich

$$f(v) = \frac{k}{A-b} \cdot \left(\frac{v-b}{A-b}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v-b}{A-b}\right)^k} \quad (3.8)$$

Der b-Parameter als dritter Parameter ist der Startwert der Verteilung. Alle Messwerte liegen oberhalb des Startwertes.

3.2.2 Ermittlung der empirischen Summenhäufigkeit

Für die Berechnung der Summenhäufigkeit aus den Messwerten der Windgeschwindigkeit sind drei Methoden gebräuchlich:

Die Erste ist der Mittelwertschätzer mit

$$F(v_i)_m = \frac{i}{n+1} \quad (3.9)$$

Die Zweite ist der Medianschätzer mit

$$F(v_i)_{median} \approx \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad (3.10)$$

für den es keine geschlossene Lösung gibt. Gleichung (3.10) ist die Näherungslösung des Medianschätzers.

Das dritte Verfahren ist der Modalwertschätzer mit

$$F(v_i)_{modal} = \frac{i-1}{n-1} \quad (3.11)$$

Für die Berechnung der Summenhäufigkeiten der empirischen Verteilungen müssen die Windgeschwindigkeiten der Größe nach geordnet werden:

$$v_1 < v_2 < \dots < v_n \quad \text{bzw.} \quad v_i < v_{i+1} \quad \text{mit} \quad i = 1 \dots n \quad (3.12)$$

Aus dem Ordnungsverfahren ergeben sich der Laufindex i und die Anzahl der Messwerte n für das jeweilige Schätzverfahren.

Nach [21] ist keines der drei Verfahren dem Anderen vorzuziehen. In der Praxis wird meist das Median- oder Mittelwertschätzverfahren verwendet. Für die weiteren Berechnungen wurde in dieser Arbeit das Mittelwertschätzverfahren gewählt.

3.2.3 Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (MDF) ist eine Regressionsanalyse. An die empirische Summenhäufigkeit $\tilde{F}(v_i)$ wird die theoretische Summenhäufigkeit der Weibullverteilung $F(v_i)$ angepasst. Jedem Wert der empirischen Summenhäufigkeit wird ein geschätzter Wert zugeordnet. Die Abstände zwischen den theoretischen und den tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten einer Windgeschwindigkeit ergeben sich zu

$$d_i = \tilde{F}(v_i) - F(v_i), \quad (3.13)$$

sie heißen Residuen.

Die Residuen werden quadriert und aufsummiert. Eine ideale Anpassung der geschätzten Funktion an die tatsächliche Verteilung ergibt sich, wenn die Summe der kleinsten Fehlerquadrate (SF) mit

$$SF(A, k) = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (\tilde{F}(v_i) - F(v_i))^2, \quad (3.14)$$

möglichst klein wird.

Mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird an die tatsächliche Summenhäufigkeit der Messwerte (Gleichung (3.9)) die Summenhäufigkeit der Weibullverteilung (Gleichung (3.5)) angepasst. Die Parameter der Weibullverteilung werden so geschätzt, dass die Summe der kleinsten Fehlerquadrate möglichst klein wird. Durch Partielles Ableiten und Null setzen der Gleichung (3.14)

$$\frac{\partial SF(A, k)}{\partial(A, k)} = 0, \quad (3.15)$$

ergibt sich ein Gleichungssystem, welches iterativ gelöst wird. Die numerische Lösung kann z. B. mit dem Newtonverfahren ermittelt werden. Das Ergebnis sind die idealen A - und k -Parameter der Anpassung.

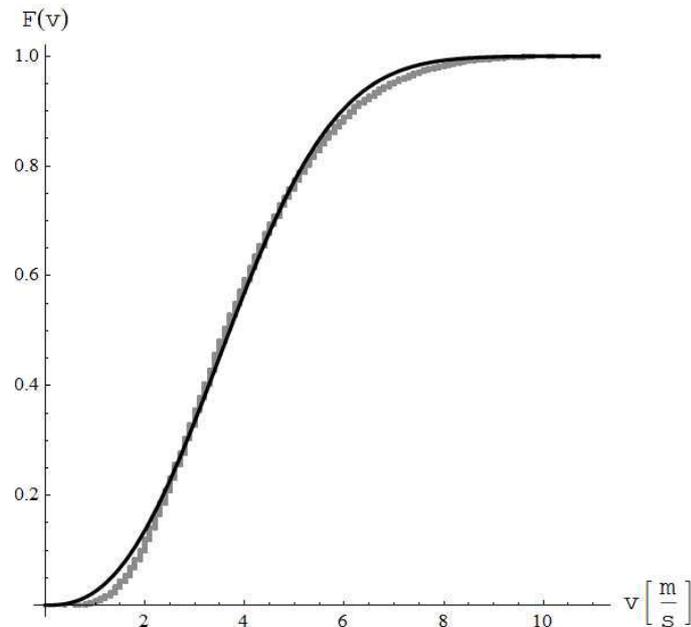


Abbildung 3.9: Angepasste Summenhäufigkeit (MDF)

Die Abbildung 3.9 zeigt die Summenhäufigkeit der Weibullanpassung an die empirische Summenhäufigkeit am Beispiel der Windmessungen in Hamburg-Fuhlsbüttel. Die Weibullparameter wurden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Optisch ist die Qualität der Anpassung überzeugend. Eine quantitative Bewertung der Schätzverfahren erfolgt in Abschnitt 3.2.6.

3.2.4 Maximum-Likelihood Methode (MLM)

Die Maximum-Likelihood Methode ist ein weiteres Schätzverfahren für die Ermittlung der A - und k -Parameter der Weibullverteilung. Das von *R.A. Fisher* [21] entwickelte Verfahren berücksichtigt die relative Häufigkeit der einzelnen Messwerte. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Messwertes wird als Bewertungskriterium zugrunde gelegt.

Aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Intervalle ergibt sich die Likelihood Funktion zu

$$L = f(v_1) \cdot f(v_2) \cdot \dots \cdot f(v_n). \quad (3.16)$$

Die beste Anpassung an die Messwerte (Stichprobe) ist dann gegeben, wenn das Produkt der Wahrscheinlichkeiten (Likelihood-Funktion) maximal wird. Die Funktion wird so angepasst, dass die Dichtefunktion $f(v_i)$ in den Bereichen mit vielen Messwerten hinreichend groß und in Bereichen mit wenigen Messwerten klein ist. Auf dieser Grundlage wird aus der tatsächlichen die theoretische Verteilung geschätzt.

Ist die Dichtefunktion von k_p unbekanntem Parametern Ψ_l abhängig, so werden diese in einem Parametervektor $\vec{\Psi} = (\Psi_1, \dots, \Psi_l, \dots, \Psi_{k_p})$ zusammengefasst. Die Likelihood-Funktion ergibt sich dann wie folgt

$$\begin{aligned} L &= (v_1, \dots, v_i, \dots, v_n; \Psi_1, \dots, \Psi_l, \dots, \Psi_{k_p}) \\ &= \prod_{i=1}^n f(v_i; \Psi_1, \dots, \Psi_l, \dots, \Psi_{k_p}). \end{aligned} \quad (3.17)$$

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.

Im ersten Schritt wird die Likelihood-Funktion logarithmiert, die Produktformel wird zur Summenformel, wodurch sich die partielle Differentiation vereinfacht. Dies ist mathematisch erlaubt, da die logarithmierte Funktion von L streng monoton wachsend ist. Logarithmierte und nicht logarithmierte Likelihood-Funktion haben ihr Maximum an derselben Stelle. Daraus ergibt sich dann $\ln(L)$ zu

$$\ln(L) = \ln[L(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n; \vec{\Psi})] = \sum \ln[f(v_i; \vec{\Psi})]. \quad (3.18)$$

Für die Ermittlung des Maximums werden nun die partiellen Ableitungen nach den Ψ_l Parametern gebildet und gleich Null gesetzt:

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \Psi_l} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f(v_i; \vec{\Psi})} \cdot \frac{\partial f(v_i; \vec{\Psi})}{\partial \Psi_l} = 0, \quad (3.19)$$

Daraus ergibt sich ein nicht lineares Gleichungssystem was iterativ zu lösen ist. Die A- und k-Parameter werden z. B. mit dem Newtonverfahren ermittelt.

Abbildung 3.10 zeigt die Anpassung der Weibullverteilung mit der Maximum-Likelihood-Methode. Die Parameter wurden auf Basis der Messwerte am Standort Hamburg-Fuhlsbüttel geschätzt und die theoretische über die geschätzte Summenhäufigkeit aufgetragen.

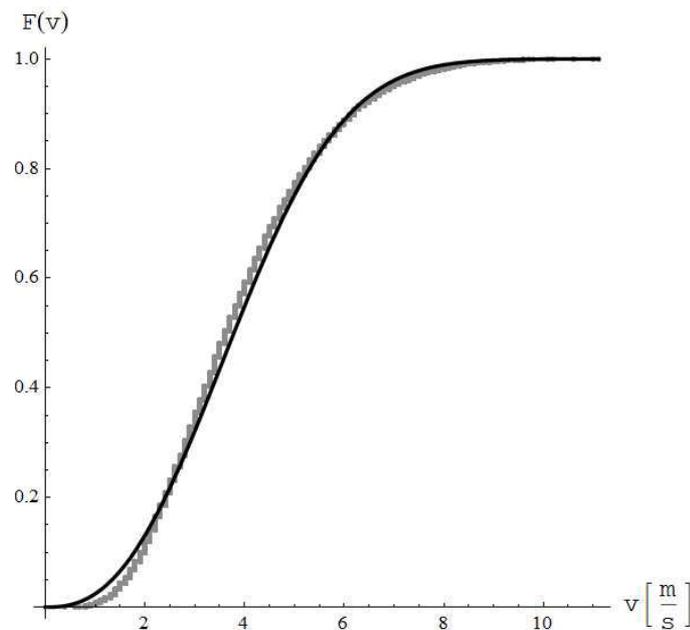


Abbildung 3.10: Angepasste Summenhäufigkeit (MLM)

3.2.5 WASP Methode

Im WindPro Handbuch /25/ wird die WASP-Methode (Wind Atlas Analysis and Application Program) ausführlich beschrieben. Die WASP-Methode ist ein weiteres Verfahren für die Schätzung der Weibullparameter.

Das theoretische, auf den Ursprung bezogene Moment u. Ordnung (a_u) der Weibullverteilung wird mit dem uneigentlichen Integral wie folgt beschrieben

$$a_u = \int_{-\infty}^{+\infty} v^u f(v) dv = A^u \cdot \Gamma[1 + v/k]. \quad (3.20)$$

Das erste statistische Moment ist der Erwartungswert (Mittelwert) der Verteilung, er berechnet sich zu

$$\mu = a_1 = A \cdot \Gamma[1 + 1/k]. \quad (3.21)$$

Wie in Gleichung (3.3) beschrieben, ist die Leistung im Wind proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Über diesen Zusammenhang kann die Windleistungsdichte mit Hilfe der Weibullparameter A und k wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned} P &= \int 0,5 \cdot (\rho \cdot v) \cdot v^2 \cdot f(v) dv = 0,5 \cdot \rho \cdot a_3 \\ &= 0,5 \cdot \rho \cdot A^3 \cdot \Gamma[1 + 3/k], \end{aligned} \quad (3.22)$$

a_3 ist das dritte statistische Moment der Weibullverteilung.

Aus der gemessenen Windverteilung berechnet sich die Leistungsdichte des Windes folgendermaßen:

$$P_{\text{Messung}} = 0,5 \cdot \rho \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_i v_i^3. \quad (3.23)$$

Für die Parameterschätzung werden bei der WAsP-Methode zwei Vorgaben gemacht, mit welchen die Weibullparameter berechnet werden. Die erste besagt, dass die kumulierte Windenergie der Windmessung gleich der Windenergie der Weibullverteilung sein muss:

$$P = P_{\text{Messung}}. \quad (3.24)$$

Durch einsetzen von Gleichung (3.22) und (3.23) in die Gleichung (3.24) ergibt sich der A -Parameter in Abhängigkeit vom k -Parameter zu

$$A = \left[\left(\frac{1}{n} \sum_i v_i^3 \right) / \Gamma(1 + 3/k) \right]^{1/3} = [a_3 / \Gamma(1 + 3/k)]^{1/3}. \quad (3.25)$$

Mit der zweiten Bedingung der WAsP-Methode werden die Mittelwerte der tatsächlichen und der theoretischen Verteilung angepasst. Dies wird durch die Forderung erreicht, dass die Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten, die größer sind als die empirische mittlere Windgeschwindigkeit (\bar{v}_{Messung}), sowohl für die theoretische, als auch für die empirische Verteilung gleich sein müssen. Daraus ergibt sich der folgende Zusammenhang für den k -Parameter:

$$P[v > \bar{v}_{Messung}] = 1 - F(\bar{v}_{Messung}) = \exp\left[\left(\frac{\bar{v}_{Messung}}{A}\right)^k\right] \quad (3.26)$$

$$= \exp\left[\left(\frac{\bar{v}_{Messung}}{\left[a_3/\Gamma(1+3/k)\right]^{1/3}}\right)^k\right]. \quad (3.27)$$

Der Zusammenhang $P[v > \bar{v}_{Messung}]$ wird direkt aus der Verteilung der Messwerte bestimmt. Dies kann entweder über die Zeitreihe oder mit Hilfe des Histogramms erfolgen. Aus Gleichung (3.27) wird der k -Parameter mit einer Nullstellensuche ermittelt. Mit dem geschätzten k ergibt sich aus Gleichung (3.25) der A Parameter der Weibullverteilung. Voraussetzung ist, dass $E_{Messung}$ bzw. a_3 aus der Verteilung der Messwerte bestimmt werden können.

Abbildung 3.11 zeigt die Summenhäufigkeit der mittels WASP-Methode angepassten Weibullverteilung an die gemessenen Windgeschwindigkeiten am Standort Hamburg-Fuhlsbüttel. Die Anpassung im Bereich der Windgeschwindigkeiten oberhalb des Mittelwertes ist deutlich besser als bei kleineren Windgeschwindigkeiten. Dies Resultiert aus der zweiten Forderung der WASP-Methode, d.h. dass die Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten, die größer sind als der gemessene Mittelwert, sowohl für die theoretische wie auch für die tatsächliche Verteilung gleich sein müssen.

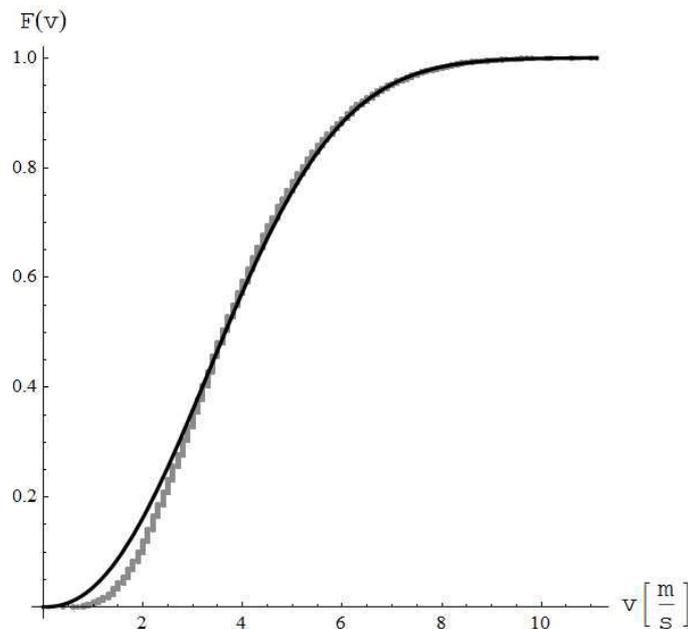


Abbildung 3.11: Anpasste Summenhäufigkeit (WASP)

3.2.6 Vergleich der verschiedenen Schätzverfahren

Für die quantitative Bewertung der verschiedenen Schätzverfahren ist das Probability-Probability-Diagramm (P-P-Diagramm) eine gute Möglichkeit. Die theoretisch ermittelte Summenhäufigkeit $F(v_i)$ wird über die empirische Summenhäufigkeit $\tilde{F}(v_i)$ aufgetragen. Die Korrelation der Summenhäufigkeiten wird mit dem Bestimmtheitsmaß B und über die Steigung b_s der Regressionsgeraden bestimmt.

Das Bestimmtheitsmaß ist, im Falle der linearen Regression, das Quadrat der Korrelation zwischen theoretischer und empirischer Summenhäufigkeit und ergibt sich zu

$$B = \left(\frac{\sum_i x_i \cdot y_i}{\sqrt{\left[\sum_i x_i^2 \right] \cdot \left[\sum_i y_i^2 \right]}} \right)^2. \quad (3.28)$$

Für die Steigung b_s der Regressionsgeraden folgt dann

$$b_s = \frac{\sum_i x_i \cdot y_i}{\sum_i x_i^2}. \quad (3.29)$$

Die Bewertung der vorgestellten Schätzverfahren wird am Beispiel der Auswertung des Standorts Hamburg Fuhlsbüttel dargestellt. Mit Abbildung 3.12 bis 3.14 werden die unterschiedlichen Schätzverfahren im P-P-Diagramm gezeigt.

Die perfekte Anpassung der geschätzten Funktion an die Messwerte ergibt im P-P-Diagramm eine Ursprungsgerade. Jeder Wert der theoretisch geschätzten Funktion ist in diesem Fall gleich dem empirischen Wert. Optisch zeigt sich in den P-P-Diagrammen eine gute Anpassung. Die Regressionsgeraden liegen, bei der Maximum-Likelihood-Methode und bei der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, direkt auf den gegenüber aufgetragenen Summenhäufigkeiten. Im P-P-Diagramm der WAsP-Methode (siehe Abbildung 3.14) zeigt sich, dass die Anpassung im oberen Bereich besser ist als im Unteren. Dieses Anpassungsverhalten ist auf die zweite Bedingung der WAsP-Methode (siehe Abschnitt 3.2.5) zurückzuführen.

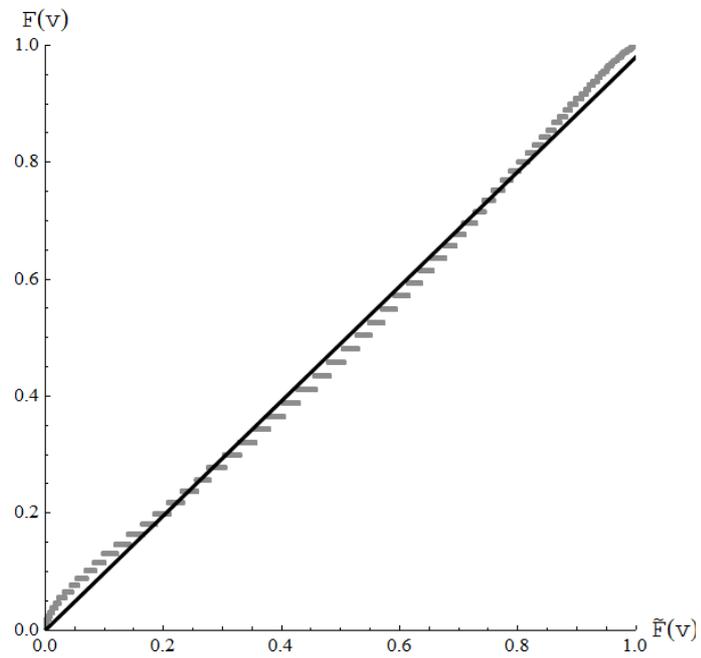


Abbildung 3.12: P-P-Diagramm (MLM).

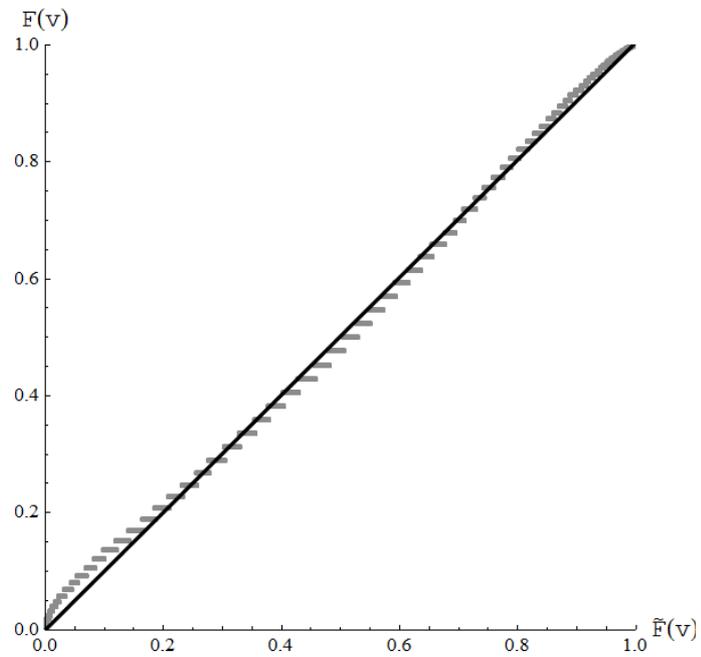


Abbildung 3.13: P-P-Diagramm (MDF)

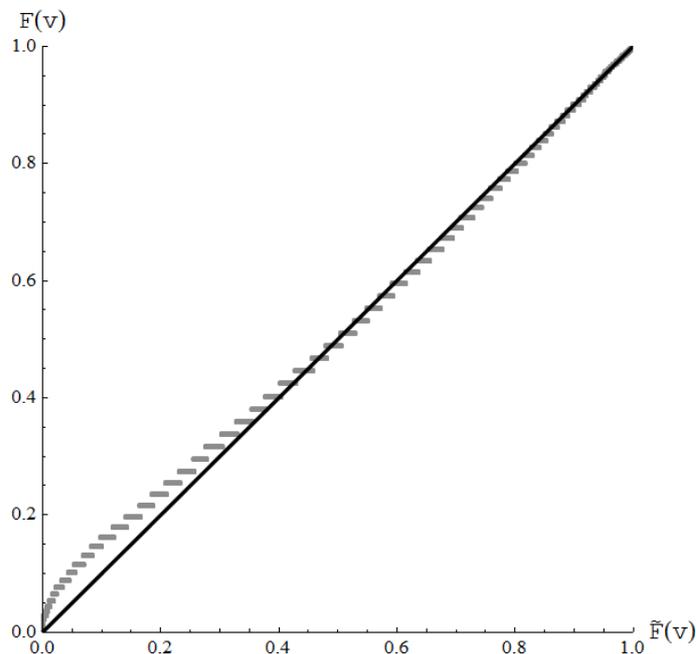


Abbildung 3.14: P-P-Diagramm (WAsP)

Bei einem Bestimmtheitsmaß $B = 1$ und einer Steigung $b_s = 1$ ist die Anpassung der theoretischen Weibullverteilung an die tatsächlichen Messwerte ideal. Eine gute Anpassung ist erfahrungsgemäß dann gegeben, wenn $B \geq 0,99$ und $0,99 \leq b_s \leq 1,01$ ist. In Tabelle 3.3 sind die Bestimmtheitsmaße und die Steigungen der unterschiedlichen Verteilungsanpassungen für den Beispielstandort Hamburg-Fuhlsbüttel aufgelistet. Alle Anpassungen zeigen für das Bestimmtheitsmaß gute Ergebnisse. Auch die Steigungen der Regressionsgeraden liegen in einem Bereich, der eine gute Bewertung der Gesamtanpassung zulässt.

Schätzverfahren	Bestimmtheitsmaß (B)	Steigung (b)
Maximum-Likelihood-Methode	0,9988	0,9804
Methode der kleinsten Fehlerquadrate	0,9992	1,0050
WAsP-Methode	0,9981	1,0006

Tabelle 3.3: Quantitative Bewertungsparameter der Schätzmethoden

Die Mittelwerte der Ergebnisse aus der Korrelationsanalyse für alle ausgewerteten Standorte sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Schätzverfahren	Bestimmtheitsmaß (B)	Steigung (b)
Maximum-Likelihood-Methode	0,9968	0,9678
Methode der kleinsten Fehlerquadrate	0,9983	1,0084
WASP-Methode	0,9901	1,0115

Tabelle 3.4: *Quantitative Bewertungsparameter der Schätzmethoden Mittelwert über alle ausgewerteten Standorte*

Für die Auswertung der Winddaten in dieser Arbeit wurde die Maximum-Likelihood-Methode gewählt, obwohl die Steigung der Regressionsgeraden knapp unter dem vorgeschlagenen Auswahlbereich liegt. Die Entscheidung begründet sich aus der Vorgehensweise bei der Anpassung. Mit der MLM wird, im Gegensatz zur MDF, welche sich direkt an den Messwerten orientiert, die Funktion hinter den Messwerten beschrieben. Die MLM orientiert sich nicht ausschließlich an den Messwerten, sondern schätzt auch die statistischen Unsicherheiten der Verteilung ab. Aus dem Grund wird sie im WindPro Handbuch /25/ als die zu bevorzugende Anpassung empfohlen.

3.3 Ermittlung der Bewertungsparameter

Dieser Abschnitt stellt die Ermittlung der Bewertungsparameter vor, welche die Grundlage für die Auswertung und Diskussion der Ergebnisse bilden (siehe Abschnitt 4 und 5). Anhand der Bewertungsparameter werden die ausgewerteten Standorte untereinander verglichen. Die Grundlagen in dem folgenden Abschnitt wurden den Quellen /21/, /22/, /23/ und /24/ entnommen. Weitere verwendete Quellen sind an den entsprechenden Stellen explizit gekennzeichnet.

3.3.1 Mittelwert der Verteilung

Der Mittelwert der Windgeschwindigkeiten wird direkt aus den Messwerten berechnet. Er berechnet sich über den empirischen arithmetischen Mittelwert zu

$$v_m = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i. \quad (3.30)$$

Der Erwartungswert der Weibullverteilung, wurde in Abschnitt 3.2.5 vorgestellt, er berechnet sich wie folgt:

$$\mu = E(v) = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right). \quad (3.31)$$

Der Erwartungswert der Verteilungsfunktion entspricht ihrem Mittelwert.

3.3.2 Median der Verteilung

Der Medianwert, welcher auch Zentralwert genannt wird, entspricht der Mitte aller Messwerte der auszuwertenden Zeitreihe. Er teilt die Messwerte genau in zwei gleiche Hälften. Für die Berechnung des Medianwertes ist die Anzahl der Messwerte entscheidend. Ist die Anzahl der Messwerte gerade oder ungerade, ergeben sich die unterschiedlichen Berechnungsansätze zu

$$v_{median} = v\left(\frac{n+1}{2}\right) \quad \text{für eine gerade Anzahl} \quad (3.32)$$

und

$$v_{median} = \frac{1}{2} \left(v_{\left(\frac{n}{2}\right)} + v_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right) \quad \text{für eine ungerade Anzahl.} \quad (3.33)$$

Bei einer ungeraden Anzahl an Messwerten, wird der Median durch einen eindeutigen Wert beschrieben. Ist die Anzahl der Messwerte gerade, gibt es keinen eindeutigen Median Wert. In diesem Fall ist der Medianwert als der kleinste Messwert oberhalb der Summenhäufigkeit von 0,5 ($F(v) > 0,5$) definiert (siehe Gleichung (3.32)) /27/.

Die Bestimmung des Medianwertes aus der geschätzten Weibullverteilung erfolgt auf Basis der Summenhäufigkeit $F(v)$:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} = 0,5. \quad (3.34)$$

Durch Umstellen der Gleichung nach v ergibt sich für den Median der Verteilung

$$v_{median} = A \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{k}}. \quad (3.35)$$

Der Median teilt die Fläche unter der Dichtefunktion $f(v)$ (siehe Gleichung (3.6)) in zwei gleich große Hälften. Der Vorteil des Medianwertes besteht darin, dass er im Gegensatz zum Mittelwert gegenüber „Ausreißern“ weniger anfällig ist. Extreme Abweichungen vom Mittelwert fallen nicht ins Gewicht.

3.3.3 Quantile der Verteilung

Quantile sind charakteristische Kenngrößen einer Verteilung. Ein Quantil (ε) gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher die Werte einer Verteilung unter dem zugehörigen Quantilswert (v_ε) liegen. Die Wahrscheinlichkeit, dass größere Werte als v_ε auftreten, ergibt sich zu $1 - \varepsilon$. Der Median, welcher in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wurde, ist ein spezieller Quantilswert. Er wird aus dem 50% Quantil berechnet.

Quantile (ε) teilen die Verteilung in unterschiedliche Bereiche. Aus dem Summenhäufigkeitsdiagramm $F(v)$ kann direkt der zugehörige Quantilswert (v_ε) abgelesen werden. Eine Anwendung in der Risikobewertung findet sich z.B. bei der Abschätzung der ma-

ximalen Flugweite eines Eisobjekts. Hier wird die Windgeschwindigkeit des 99,9% Quantils ($v_{99,9}$) der Verteilung zu Grunde gelegt.

Die Quantile berechnen sich aus der folgenden Gleichung:

$$F(v_\varepsilon) = \varepsilon. \quad (3.36)$$

Die Quantilsfunktion ergibt als Umkehrfunktion der Häufigkeitsverteilung zu

$$F^{-1}(\varepsilon) = v_\varepsilon, \quad \text{für } 0 < \varepsilon < 1, \quad (3.37)$$

$$F(v_\varepsilon) = P(X \leq \varepsilon) = \int_{-\infty}^{v_\varepsilon} f(x) dx = \varepsilon. \quad (3.38)$$

Für die Berechnung der empirischen Quantile, müssen die Messwerte der Größe nach geordnet sein $v_1 < v_2 < \dots < v_n$. Bei der Berechnung des ε -Quantils, wird nach zwei Fällen unterschieden:

$$v_\varepsilon = \frac{1}{2}(v_{n \cdot \varepsilon} + v_{n \cdot \varepsilon + 1}), \quad \text{für } n \cdot \varepsilon \text{ ganzzahlig,} \quad (3.39)$$

$$v_\varepsilon = v_{\lfloor n \cdot \varepsilon \rfloor}, \quad \text{für } n \cdot \varepsilon \text{ nicht ganzzahlig.} \quad (3.40)$$

Quantile liefern Kenngrößen, mit denen Verteilungen untereinander verglichen werden. Gebräuchliche Quantile, die für die Beschreibung von Verteilungsfunktionen verwendet werden, sind neben dem schon vorgestellten Median, die unteren und oberen Quartile sowie die ε -Quantile, für ε nahe 0 und 1.

3.3.4 Ermittlung der Varianz der Verteilung

Die Varianz ist ein Maß für die Streuung einer Verteilung. Für empirische Messwerte berechnet sich die Varianz aus der Summe der Abweichungsquadrate zu

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2. \quad (3.41)$$

Für die angepasste theoretische Verteilung, ist die Varianz das zweite Moment der Verteilung. Aus der allgemeinen Form der Momente u. Ordnung, wie in Abschnitt 3.2.5 mit

der Gleichung (3.20) beschrieben, lässt sich die Varianz berechnen. Höhere Momente werden allgemein auf das Moment erster Ordnung (Mittelwert) bezogen. Sie werden als Zentralmomente bezeichnet. Für die Gleichung (3.20) aus Abschnitt 3.2.5 ergibt sich daraus

$$a_{uz} = \int_{-\infty}^{+\infty} (v - a_1)^u \cdot f(v) dv. \quad (3.42)$$

Die Varianz der Weibullverteilung berechnet sich aus der Gleichung (3.42) zu

$$s^2 = A^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]. \quad (3.43)$$

Die Standardabweichung ist die Quadratwurzel der Varianz. Sie ist ein weiteres Maß für die Streuung der Funktionswerte:

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (3.44)$$

3.3.5 Berechnung Luftdichte

Die Luft besteht zu einem Teil aus Wasserdampf und zum anderen aus trockener Luft. In Abhängigkeit von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit verändert sich die Luftdichte ρ . Eine gute Kenntnis der Luftdichte ist nicht nur für die Ermittlung der im Wind enthaltenden Leistung (siehe Abschnitt 3.1.6) entscheidend, sondern auch für die Bewertung des Risikos eines Eisschlags eine wichtige Einflussgröße. Bei der Berechnung der Flugweite wird, vereinfacht nach /26/ angenommen, dass Geschwindigkeit und Richtung des Eisstücks, der Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Moment des Abfalls des Eisstücks entsprechen. Die Bewegungsgleichungen ergeben sich dann zu

$$m\ddot{x} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_F \cdot c_w \cdot W \cdot (\dot{x} - v), \quad (3.45)$$

$$m\ddot{y} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_F \cdot c_w \cdot W \cdot \dot{y} \quad \text{und} \quad (3.46)$$

$$m\ddot{z} = -mg - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_F \cdot c_w \cdot W \cdot \dot{z}. \quad (3.47)$$

Das Koordinatensystem entspricht dem Azimutlagerkoordinatensystem nach /28/. Die z-Koordinate läuft aufwärts in vertikaler Richtung, die x-Koordinate entlang der Richtung in die der Wind weht und die y-Koordinate steht in der horizontalen Ebene, im rechten Winkel zur x-Achse. A_F ist die frontale Querschnittsfläche des Eisstücks, die von der Windgeschwindigkeit (v) angeströmt wird. Der Widerstandsbeiwert c_w beschreibt, im Zusammenhang mit der Fläche und der Geschwindigkeit, die Eigenschaften des Eisstücks in der Luft. W ist die relative Windgeschwindigkeit und berechnet sich zu

$$W = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (\dot{z} - v)^2}. \quad (3.48)$$

Wie aus den Bewegungsgleichungen zu sehen ist, sind die Einflussgrößen auf die Flugbahn des Eisstückes, die Luftdichte, die Form des Eisstücks sowie Richtung und Geschwindigkeit des Windes. Daraus leitet sich ab, dass eine gute Kenntnis der Luftdichte für die Berechnung der Flugbahn wichtig ist.

Die folgende Herleitung der Luftdichte ist den Quellen /10/ und /19/ entnommen. Luft besteht zu einem Teil aus Wasserdampf. Dieser hat eine andere Dichte als trockene Luft. Er muss bei der Berechnung der Luftdichte mit berücksichtigt werden.

Die allgemeine Gasgleichung für ideale Gase lautet

$$p = \rho \cdot (R^*/M) \cdot T, \quad (3.49)$$

worin p der Gasdruck, ρ die Dichte, R^* die universelle Gaskonstante, M das mittlere Molekulargewicht und T die absolute Temperatur sind. Auf Basis der allgemeinen Gasgleichung gilt für trockene Luft, wenn kein Wasserdampf vorhanden ist, die Gasgleichung in der folgenden Form

$$p_L = \rho_L \cdot R_L \cdot T, \quad (3.50)$$

wobei der Index „L“ für trockene Luft steht. Auch Wasserdampf kann näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden, die Gasgleichung ergibt sich damit zu

$$e = \rho_w \cdot R_w \cdot T. \quad (3.51)$$

Der Index „W“ steht für Wasserdampf und e ist der Partialdruck des Wasserdampfes. Für die Gaskonstanten der Luft und des Dampfes besteht der folgende Zusammenhang:

$$R_W = 1,6078 \cdot R_L \approx \frac{8}{5} \cdot R_L, \quad (3.52)$$

für die Wasserdampfdichte folgt dann:

$$\rho_W = \frac{5}{8} \cdot \frac{e}{R_L \cdot T}. \quad (3.53)$$

Der Gesamtdruck (p) für feuchte Luft setzt sich aus den Partialdrücken des Wasserdampfes und der trockenen Luft zusammen

$$p = p_L + e. \quad (3.54)$$

Die Dichte der feuchten Luft ergibt sich zu

$$\rho = \frac{p - e}{R_L \cdot T} + \frac{e}{R_W \cdot T}. \quad (3.55)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (3.52) in (3.55) folgt

$$\rho = \frac{p}{R_L \cdot T} - \frac{e}{R_L \cdot T} + \frac{5}{8} \cdot \frac{e}{R_L \cdot T}. \quad (3.56)$$

Damit wird die spezifische Gaskonstante für Wasserdampf R_W , durch die spezifische Gaskonstante für trockene Luft R_L , ersetzt. Die Abhängigkeit der spezifischen Gaskonstante für Wasserdampf, vom Wasserdampfgehalt der Luft, muss nicht mehr berücksichtigt werden. Zur einfacheren Handhabung wird die Gleichung (3.56) wie folgt umgeformt und durch die Einführung der „virtuellen Temperatur“ (T_V) vereinfacht:

$$\rho = \frac{p}{R_L \cdot T_V}, \quad (3.57)$$

$$T_V = \frac{T}{1 - 3/8 \cdot e/p}. \quad (3.58)$$

Wasserdampf hat eine geringere Dichte als trockene Luft, bei gleicher Temperatur und gleichem Druck (siehe Gleichung (3.53)). Die virtuelle Temperatur entspricht der Tem-

peratur, die trockene Luft annehmen müsste, um bei gleichem Druck dieselbe Dichte wie Wasserdampf zu haben. Mit Gleichung (3.57) ist eine einfache Möglichkeit für die Berechnung der Dichte der feuchten Luft gegeben, in der die unterschiedlichen Eigenschaften der trockenen Luft und des Wasserdampfes berücksichtigt werden.

4 Auswertung

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Auswertung vorgestellt. Die Datenbasis bilden die frei zur Verfügung stehenden Wetterdaten des DWD /4/. Diese werden hinsichtlich der Bewertungskriterien, welche in Abschnitt 3.3 beschrieben wurden, ausgewertet. Die Wetterdaten stellt der DWD als Tagesmittelwerte zur Verfügung.

4.1 Auswahl der Wetterstationen

Die Auswahlkriterien für die Wetterstationen wurden in Anlehnung an die „Winddaten für Windenergienutzer“ vom DWD /30/ festgelegt. In den Winddaten für Windenergienutzer sind die Windmessungen diverser Wetterstationen in ganz Deutschland ausgewertet und für die Anforderungen der Windenergienutzer aufbereitet worden.

Das Startjahr der Auswertung wurde, wie in /30/ für die neuen Bundesländer, auf 1992 festgelegt. Damit bei der Auswahl des Bewertungszeitraums nicht nur windschwache oder windstarke Jahre berücksichtigt werden, wird von der „World Meteorological Organisation“ (WMO) ein Messzeitraum von 30 Jahren empfohlen /31/. Da so lange homogene Messreihen nur begrenzt zur Verfügung stehen, wurde in dieser Arbeit, in Anlehnung an die Auswertung /30/, ein Bewertungszeitraum von 20 Jahren gewählt. Das Startjahr wurde für alle ausgewerteten Standorte auf 1992 festgelegt. Die Verfügbarkeit der Windmessungen innerhalb des Bewertungszeitraums muss mindestens 90% betragen.

Auf dieser Basis sind aus den 78 freien Wetterstationen des DWD 60 Stationen, mit einer Verfügbarkeit der Windmessung von über 90%, ausgewählt worden. In Tabelle 4.1 sind die ausgewählten Wetterstationen eingetragen, mit Höhe über Normalnull, Anemometerhöhe und Repräsentanz des Standortes. Die Abbildung 4.1 zeigt die Deutschlandkarte mit den ausgewählten Wetterstationen.

Von der WMO wird in /31/ eine Anemometerhöhe von 10m über Grund und ein frei angeströmter Standort empfohlen, dies ist z.B. bei Messstationen auf Flugplätzen gegeben. An Standorten, wo eine freie Anströmung auf 10m Höhe nicht möglich ist, sind die Anemometer auf Höhen über 10m aufgestellt. In dieser Arbeit wird keine Höhenkorrektur oder Umrechnung der Geländerauigkeiten durchgeführt, weil die Windmessungen, der einzelnen Standorte nicht direkt miteinander verglichen werden. Der Vergleich der

Standorte geschieht über die Verhältnisse der ausgewerteten Eisbedingungssituationen. Eine detaillierte Vorstellung der unterschiedlichen Auswahl-situationen findet sich in Abschnitt 4.2.

Die Repräsentanz gibt einen Anhaltspunkt, für welche Gebietsgrößen die Messungen aussagekräftig sind. Ist eine regionale Repräsentanz des Standortes angegeben, kann die Windmessung für den ganzen Landschaftsraum des Aufstellungsorts als Bewertungsgrundlage der Windverhältnisse dienen. Windmessungen die mit überregional gekennzeichnet sind, können auch über den regionalen Landschaftsraum hinaus als repräsentativ angesehen werden. Gipfelstationen oder Stationen in komplexem Gelände, welches orografisch stark gegliedert ist, sind nur eingeschränkt repräsentativ. Sie können nur mit genauer Kenntnis der Orografie der Umgebung über den Standort hinaus angewendet werden. Bei den Stationen in Tabelle 4.1, für die keine Angaben zur Repräsentanz vorliegen, gab es keine Angaben für die Stationen in /30/.

Nr.	Station:	Stationshöhe ü. NN [m]	Anemometer höhe [m]	Repräsentanz
1	Angermünde	54	18	regional
2	Arkona	42	24	regional
3	Augsburg	462	10	regional
4	Bamberg	239	10	regional
5	Berlin Tegel	36	10	überregional
6	Berlin Tempelhof	48	10	überregional
7	Bremen	4	10	überregional
8	Brocken	1142	27	regional
9	Cottbus	69	16	regional
10	Dresden	227	10	regional
11	Düsseldorf	37	10	regional
12	Erfurt	316	10	regional
13	Fehmarn	1	10	-
14	Feldberg	1490	19	regional
15	Fichtelberg	1213	24	regional
16	Frankfurt am Main	112	10	regional

Nr.	Station:	Stationshöhe ü. NN [m]	Anemometer höhe [m]	Repräsentanz
17	Freudenstadt	797	16	regional
18	Gera	311	12	eingeschränkt
19	Gießen	180	21	regional
20	Görlitz	238	13	regional
21	Greifswald	2	25	regional
22	Großer Arber	1446	10	regional
23	Hamburg -Fuhlsbüttel	11	10	überregional
24	Hannover	55	10	überregional
25	Helgoland	4	10	-
26	Hof	565	12	regional
27	Hohenpeißenberg	977	40	regional
28	Kahler Asten	839	20	regional
29	Kempten	705	10	regional
30	Köln-Bonn	92	10	regional
31	Konstanz	442	17	-
32	Lahr	155	8	regional
33	Leipzig	131	10	regional
34	Lindenberg	98	10	-
35	Lippspringe	157	10	-
36	Magdeburg	76	18	regional
37	Mannheim	96	22	regional
38	Marnitz	81	18	regional
39	Meiningen	450	18	regional
40	München Flughafen	443	10	überregional
41	Münster	48	10	regional
42	Neuruppin	38	18	überregional
43	Norderney	11	12	-
44	Nürnberg	314	10	regional

Nr.	Station:	Stationshöhe ü. NN [m]	Anemometer höhe [m]	Repräsentanz
45	Oberstdorf	806	10	regional
46	Öhringen	276	16	regional
47	Potsdam	81	25	regional
48	Regensburg	366	10	regional
49	Rostock-Warnemünde	4	15	regional
50	Saarbrücken	320	10	-
51	Schleswig-Jagel	22	10	überregional
52	Schwerin	59	22	überregional
53	Stötten	734	10	regional
54	Straubigen	350	10	regional
55	Stuttgart	371	10	regional
56	Sylt-List	26	10	-
57	Weiden	438	12	regional
58	Wendelstein	1832	13	-
59	Würzburg	268	10	regional
60	Zugspitze	2964	16	-

Tabelle 4.1: Ausgewählte Wetterstationen

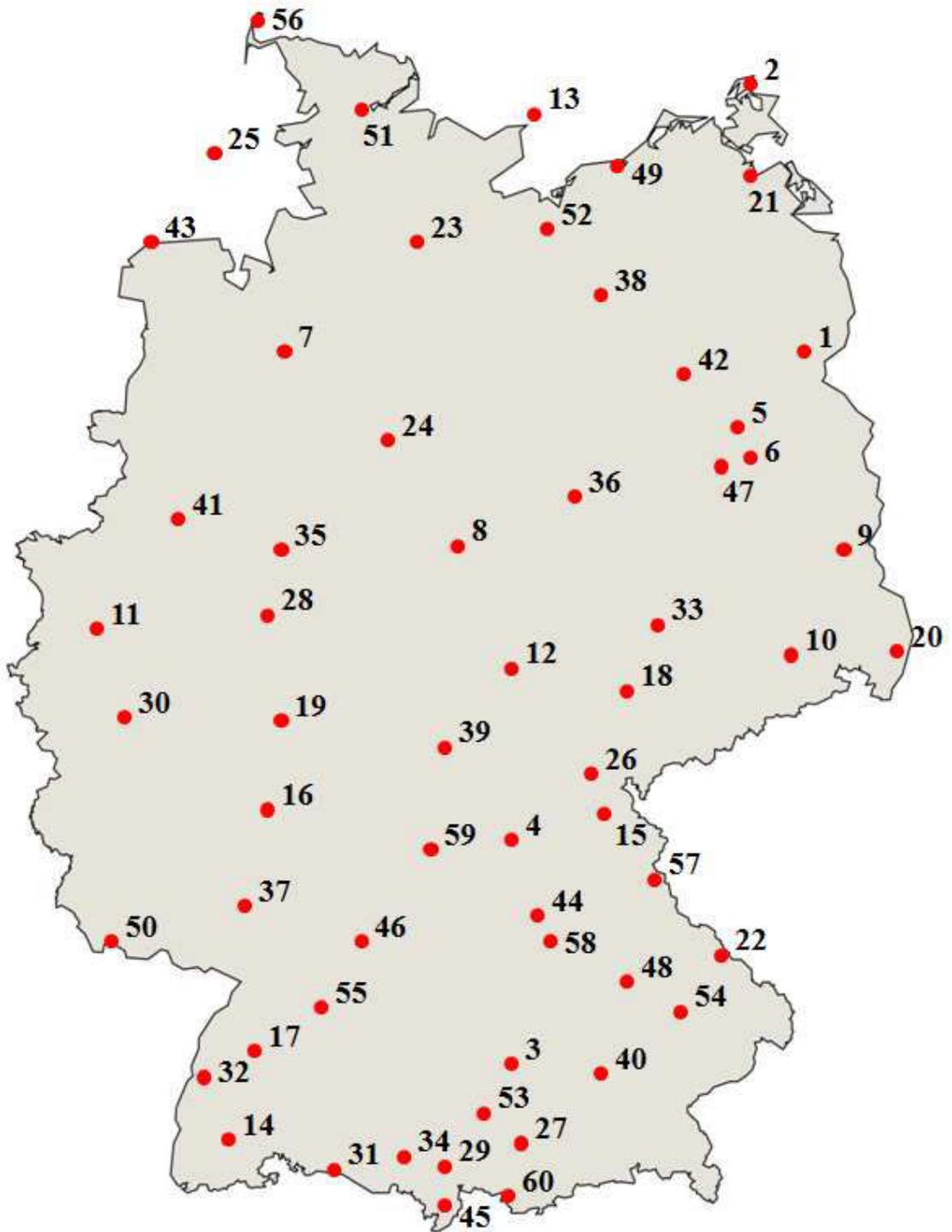


Abbildung 4.1: Deutschlandkarte mit den Wetterstationen

4.2 Bewertungskriterien für die Auswertung

Die Bewertungskriterien bilden die Grundlage für die Auswahl der zu untersuchenden Windgeschwindigkeiten. Für die Auswahl werden verschiedene Situationen definiert, in denen die Voraussetzung für Eisansatz unterschiedlich differenziert eingegrenzt wird. Die meteorologischen Bedingungen und die Wetterlagen bilden die Definitionsgrundlage für die einzelnen Situationen, die Eisbildung an WEA beeinflussen (siehe Abschnitte 3.1.2 und 3.1.5). Für die Bewertung selbst, werden die Windverteilungen der Situationen mit der ganzjährigen Windverteilung verglichen.

Die erste Untersuchungssituation grenzt die Eisbildungsbedingungen allgemein ein. Es werden stark vereinfacht alle Monate ausgewählt, in denen Temperaturen unter 0°C vorkommen können. Der Zeitraum ist auf ein halbes Jahr, von Oktober bis März, beschränkt. Je nach Region kommen darüber hinaus auch in anderen Monaten noch Temperaturen unter 0°C vor. Diese fließen in die Auswertungssituation nicht ein. Diese vereinfachte Einordnung berücksichtigt nicht die lokalen Wetterbedingungen. Sie teilt das Jahr in zwei Hälften, eine mit der Möglichkeit für Eisansatz und eine ohne. Die Einteilung ist eine grobe Teilung des Jahres in Sommer und Winter. Die beschriebene Einteilung wird im Folgenden als „Winter-Situation“ bezeichnet.

Mit der Definition der zweiten Situation werden die Eisansatzbedingungen differenzierter betrachtet. Das Auswahlkriterium ist die Temperatur. Der Temperaturbereich, für welchen die Windgeschwindigkeiten ausgewählt werden, wird auf $+0,5^{\circ}\text{C}$ bis -12°C festgelegt. Die Grundlagen für die Festlegung sind in Abschnitt 3.1.2 und 3.1.5 dargestellt. Bei modernen WEA hat sich das Prinzip der Auftriebsläufer für die Rotorblattgeometrie durchgesetzt, nach welchem auch die Tragflächen von Flugzeugen konstruiert werden. Das grundlegende Wirkprinzip ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Auf der Oberseite des Rotorblattes herrscht bei einem umströmten Blatt ein Unterdruck /1/. Nach der allgemeinen Gasgleichung (siehe Abschnitt 3.3.5 Gleichung (3.49)) ist die Temperatur proportional zum Druck. Aus der Druckabnahme am Rotorblatt folgt ein lokales Absinken der Temperatur /16/. Aufbauend auf dieser Tatsache startet das Temperaturintervall nicht bei 0°C , sondern bei $0,5^{\circ}\text{C}$. Mit dieser Einteilung werden die Ereignistage für Eisansatzbedingungen stärker eingegrenzt als durch die kalendarische Definition der Winter-Situation. Nur Windgeschwindigkeiten bei denen die Temperaturbedingungen für Eisansatz erfüllt sind, werden ausgewählt. Im Folgenden wird diese Auswahlsituation als „Temperatur-Situation“ bezeichnet.

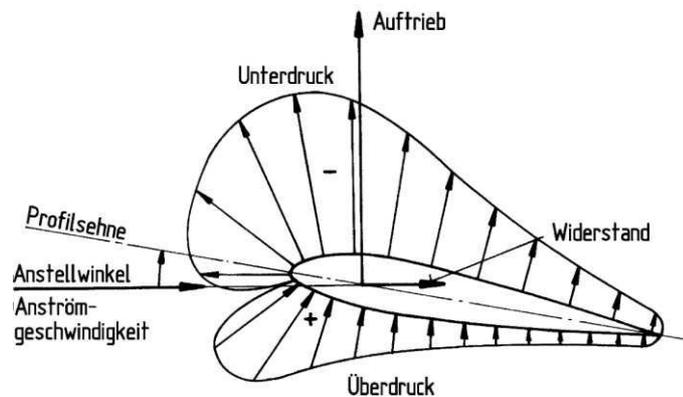


Abbildung 4.2: Auftriebsläufer /1/

Für die dritte Auswahl-situation werden nur Windgeschwindigkeiten berücksichtigt, bei denen die Voraussetzungen für Eisansatzbedingungen erfüllt sind. Wie in Abschnitt 3.1.2 und 3.1.5 beschrieben, muss die Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes und die relative Luftfeuchtigkeit hoch sein. Daraus ergeben sich folgende Auswahlkriterien, die Temperatur soll in einem Bereich von $+0,5^{\circ}\text{C}$ bis -12°C liegen und die relative Luftfeuchtigkeit über 90%. Mit dieser Auswahl werden alle Windgeschwindigkeiten erkannt, bei denen die meteorologischen Bedingungen für Wolkeneisbildung vorliegen. Diese Auswahlkriterien werden im Folgenden als „Luftfeuchtigkeits-Situation“ bezeichnet.

Die Eisbildung durch gefrierenden Regen wird mit den definierten Auswahl-situationen nicht berücksichtigt. Die freie Datenbasis des DWD liefert nicht die nötigen Daten, die für die Detektion von gefrierendem Regen nötig wären. Informationen zur Regenmenge, der Temperatur direkt über Grund und in höheren Luftschichten sind in den frei verfügbaren DWD Daten nicht enthalten. Darüber hinaus tritt gefrierender Regen mit signifikanten Niederschlagsmengen, im Gegensatz zu Wolkeneisbildung, wesentlich seltener auf /15/.

Für die einzelnen Situationen wurden noch weitere Filterkriterien definiert, um die Windmessungen zu bereinigen. Messwerte die kleiner als 0 m/s oder größer als 99 m/s waren sowie alle fehlerhaften Messungen wurden aussortiert. Darüber hinaus sind alle Windgeschwindigkeiten kleiner als 0,2 m/s, als unterhalb der Kalmgrenze, entfernt worden. Kalmgrenze bedeutet, dass alle Windgeschwindigkeiten die kleiner sind als der Grenzwert, unter Flaute eingeordnet werden. Die hier beschriebenen Filterkriterien sind /30/ entnommen.

4.3 Darstellung der Auswertung beispielhaft für einen Standort

Dieser Abschnitt fasst für den Beispielstandort Hamburg-Fuhlsbüttel die Ergebnisse der Auswertung ausführlich zusammen. Eine Darstellung aller Ergebnisse, die nicht in Abschnitt 4 vorgestellt werden, findet sich im Ergebnisanhang Abschnitt 9.1.

4.3.1 Wetterstation Hamburg-Fuhlsbüttel

Exemplarisch für die Wetterstationen wurde die Wettermessstation am Flughafen Hamburg-Fuhlsbüttel ausgewählt. Die Windmessung befindet sich am westlichen Rand des Flughafens und hat eine überregionale Repräsentanz. Die Windmessung wurde 2001 auf ein beheiztes Messgerät umgestellt, im Zuge dieser Umstellung ist der Standort der Windmessung geringfügig verändert worden. Die neue Standortposition weicht aber weniger als 30m von der Alten ab. Damit hat der geänderte Standort keine Auswirkungen auf die Auswertungen in dieser Arbeit. In Abbildung 4.3 ist die Messstation mit einem roten Punkt markiert. Hier ist die Position der Messstation vor dem Standortwechsel eingetragen /30/.

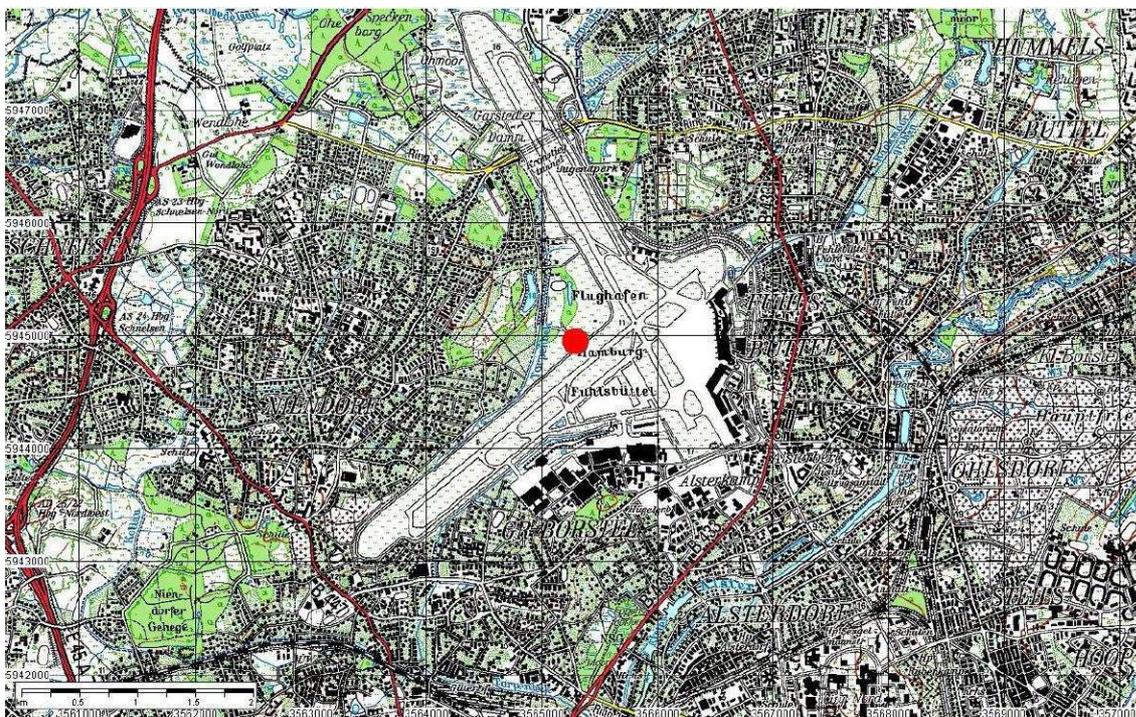


Abbildung 4.3: Standort Hamburg-Fuhlsbüttel /30/ Datenquelle: DTK50-V, © Vermessungsverwaltung der Länder und BKG 2006

Der Flughafen liegt am nördlichen Stadtrand ca. 8 km von der Hamburger Innenstadt entfernt. Das Anemometer ist in 10m über Grund installiert. Im direkten Umfeld der Windmessung befindet sich die ebene Landebahn. Im Westen und Nordwesten beginnt in 200 m Entfernung leichter Baumbewuchs. Nördlich der Windmessung befindet sich die Landebahn, dahinter geht die Vorstadtbebauung in eine zerstreutere ländliche Gliederung über. Die Flughafengebäude haben im Osten und Südosten einen Abstand von mehr als 1000m zum Messpunkt. In den übrigen Himmelsrichtungen schließt sich an die Lande- bzw. Startbahn eine städtische Bebauung an /30/.

Die Abbildung 4.4 und 4.5 zeigen den Rundumblick am Messpunkt. Die Bilder sind am Boden aufgenommen und zeigen die 360° Ansicht vor dem Umsetzen der Messposition.



Abbildung 4.4: Rundumblick (N-E-S) Windmessung Hamburg-Fuhlsbüttels /30/



Abbildung 4.5: Rundumblick (S-W-N) Windmessung Hamburg-Fuhlsbüttels /30/

4.3.2 Auswertung der Tagesmittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeit

Die Auswertung der gemessenen mittleren Windgeschwindigkeit für den Beispielstandort Hamburg-Fuhlsbüttel werden im Folgenden vorgestellt.

Tabelle 4.2 zeigt die Auswahl der Datensätze. Der Beobachtungszeitraum umfasst 20 Jahre, von 1992 bis 2011. Daraus ergibt sich eine Gesamtanzahl an Datensätzen von 7305, dies entspricht den Tagen von 20 Jahren inklusive der Schaltjahre. Die Situationsauswahl und die Filterkriterien, mit denen die Situationen bereinigt wurden, entsprechen der in Abschnitt 4.2 aufgezeigten Vorgehensweise. Mit den Ereignistagen pro Jahr ist ein Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit der entsprechenden Situationen gegeben. Die Verfügbarkeit der Messungen liegt für den gesamten Datensatz innerhalb der vorgegebenen Verfügbarkeit von mindestens 90% (siehe Abschnitt 4.1). Auch die Auswahl-situationen Winter, Temperatur und Luftfeuchtigkeit haben eine hohe Verfügbarkeit.

Situation	Ausgewählte Datensätze	Gefilterte Datensätze	Ausgewertete Datensätze	Ereignistage pro Jahr	Verfügbarkeit [%]
Alle Daten	7305	32	7273	363	99,56
Winter	3645	23	3622	181	99,37
Temperatur	1562	1	1561	78	99,94
Luftfeuchtigkeit	385	0	385	19	100,00

Tabelle 4.2: Mittlere Windgeschwindigkeit, Auswahl der Daten am Beispielstandort

Die Auswertungsergebnisse der Windmessung am Standort Hamburg-Fuhlsbüttel sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Die Tabelle zeigt den Mittelwert, den Medianwert und das 99,9 % Quantil der gemessenen Windverteilung. Die Werte sind für jede untersuchte Situation gesondert ausgewiesen. Zu jedem Wert ist die Änderung gegenüber dem Jahresmittel in Prozent eingetragen. Zusätzlich werden noch die Varianz und Standardabweichung der Verteilung ermittelt, sie sind ein Maß dafür, wie stark die Messungen um den Mittelwert streuen. Je größer die Varianz (bzw. die Streuung) ist, desto breiter ist das Windangebot um den Mittelwert verteilt.

Situation	Mittelwert [m/s]	Änderung [%]	Medianwert [m/s]	Änderung [%]	99,9% Quantil	Änderung [%]	Varianz [m ² /s ²]	Standardabweichung [m/s]
Alle Daten	3,88	0,00	3,60	0,00	9,80	0,00	2,73	1,65
Winter	4,24	9,42	4,10	13,89	10,60	8,16	3,39	1,84
Temperatur	3,59	-7,39	3,40	-5,56	9,30	-5,10	2,55	1,60
Luftfeuchtigkeit	3,17	-18,16	3,00	-16,67	8,10	-17,35	1,81	1,34

Tabelle 4.3: Mittlere Windgeschwindigkeit, Auswertung der Messdaten am Beispielstandort

Die Abbildung 4.6 bis 4.9 zeigen die gemessenen Windgeschwindigkeiten der einzelnen Ereignisstage für die Datensätze der untersuchten Situationen. Zusätzlich ist in jeder Abbildung die mittlere Windgeschwindigkeit eingetragen.

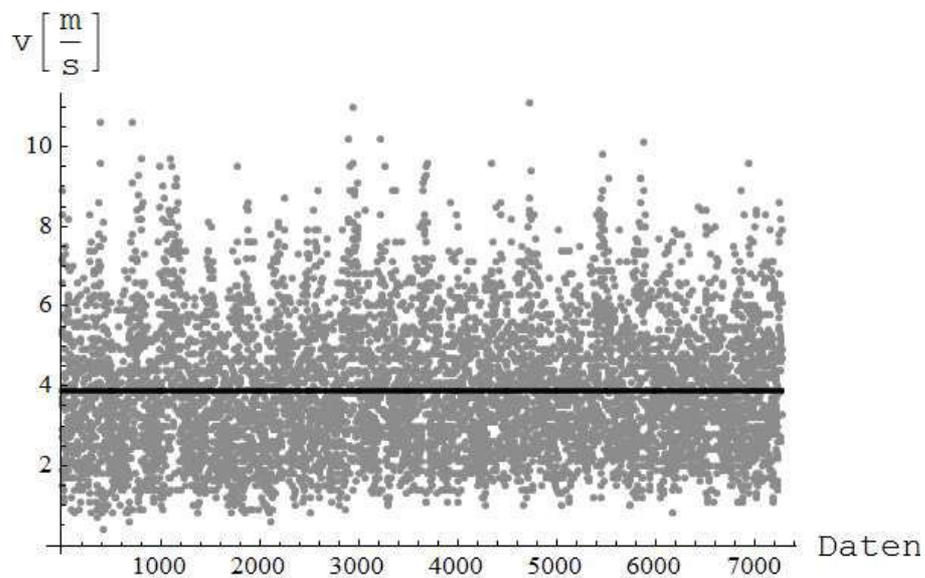


Abbildung 4.6: Windgeschwindigkeiten der Datensätze (alle Daten)

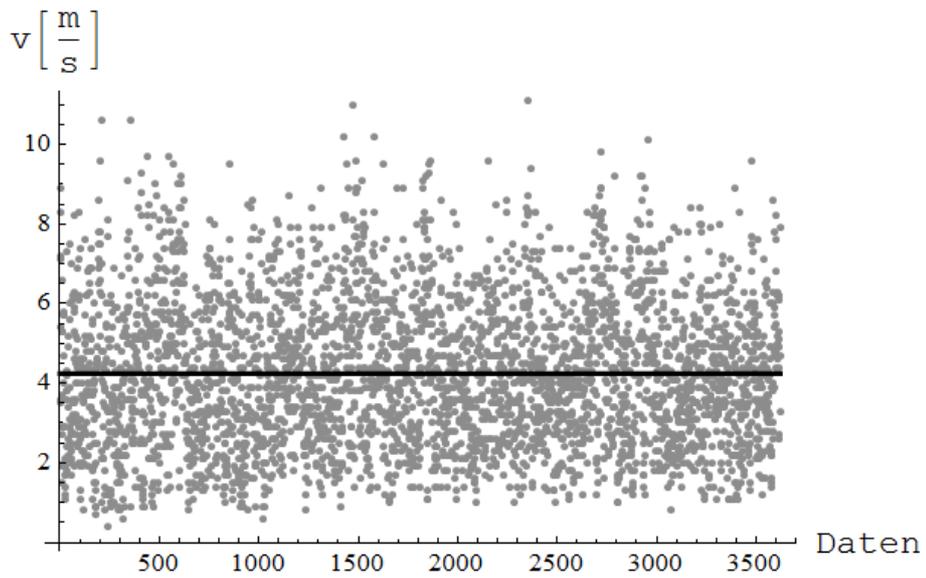


Abbildung 4.7: Windgeschwindigkeiten der Datensätze (Winter)

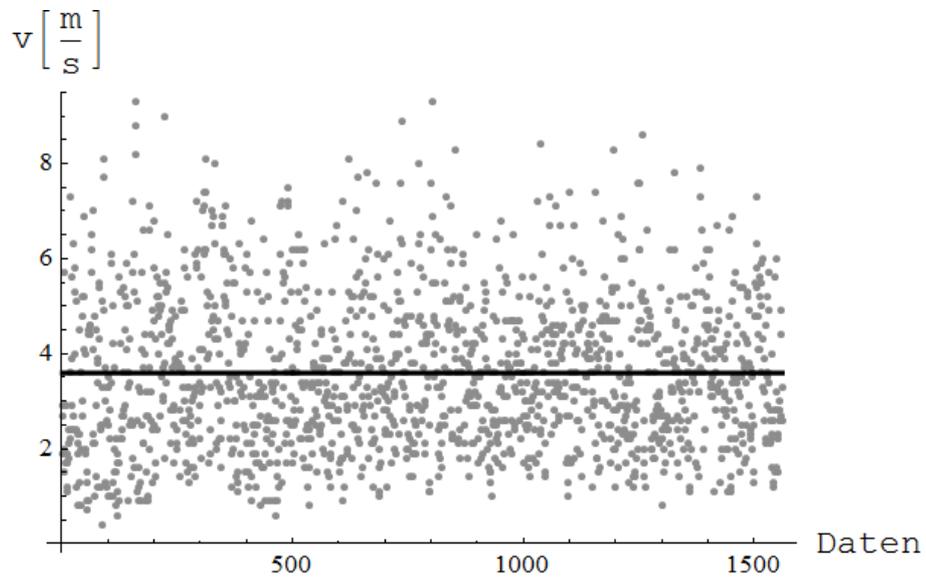


Abbildung 4.8: Windgeschwindigkeiten der Datensätze (Temperatur)

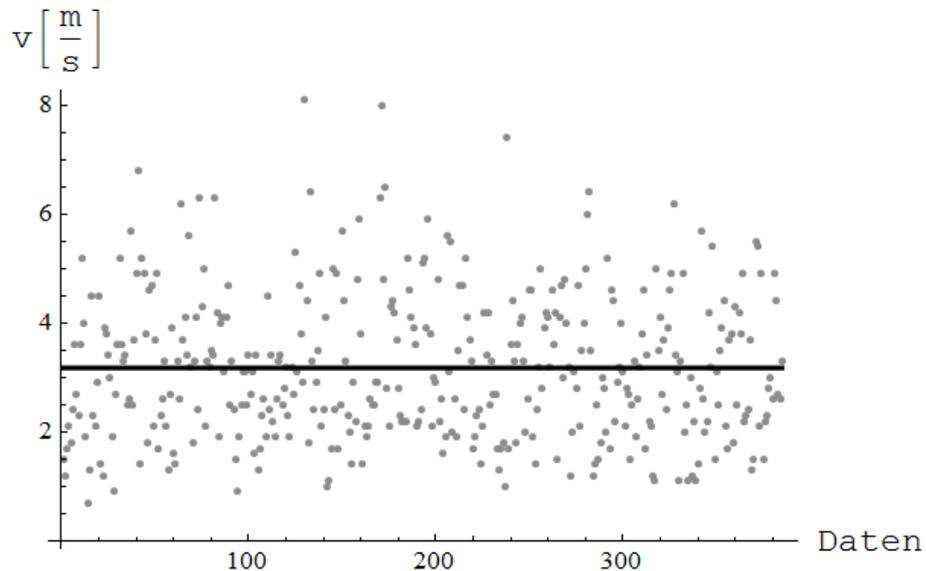


Abbildung 4.9: Windgeschwindigkeiten der Datensätze (Luftfeuchtigkeit)

Mit der Maximum-Likelihood Methode werden aus den empirischen Messwerten die A- und k-Parameter der Weibullverteilung bestimmt. Die Tabelle 4.4 zeigt die daraus berechneten Bewertungsparameter. Die Änderung gibt an wie die Ergebnisse der jeweiligen Situation von dem Ergebnis aller Daten abweichen. In Tabelle 4.5 sind die A- und k-Parameter der geschätzten Weibullverteilung angegeben.

Situation	Mittelwert [m/s]	Änderung [%]	Medianwert [m/s]	Änderung [%]	99,9% Quantil	Änderung [%]	Varianz [m ² /s ²]	Standardabweichung [m/s]
Alle Daten	3,89	0,00	3,78	0,00	9,47	0,00	2,76	1,66
Winter	4,25	9,40	4,13	9,23	10,47	10,54	3,38	1,84
Temperatur	3,60	-7,38	3,49	-7,84	9,06	-4,41	2,54	1,59
Luftfeuchtigkeit	3,18	-18,14	3,10	-18,05	7,70	-18,74	1,82	1,35

Tabelle 4.4: Mittlere Windgeschwindigkeit, Bewertungsparameter der Weibullverteilung

Situation	A-Parameter [m/s]	k-Parameter [-]
Alle Daten	4,38	2,50
Winter	4,79	2,47
Temperatur	4,06	2,41
Luftfeuchtigkeit	3,58	2,53

Tabelle 4.5: A- und k-Parameter des Beispielstandorts

In den Abbildung 4.11 bis 4.17 sind für die einzelnen Situationen die relative Dichte $F(v)$ der Weibullverteilung zusammen mit der empirischen Verteilung und die empirischen mit der theoretischen Summenhäufigkeit $f(v)$ dargestellt.

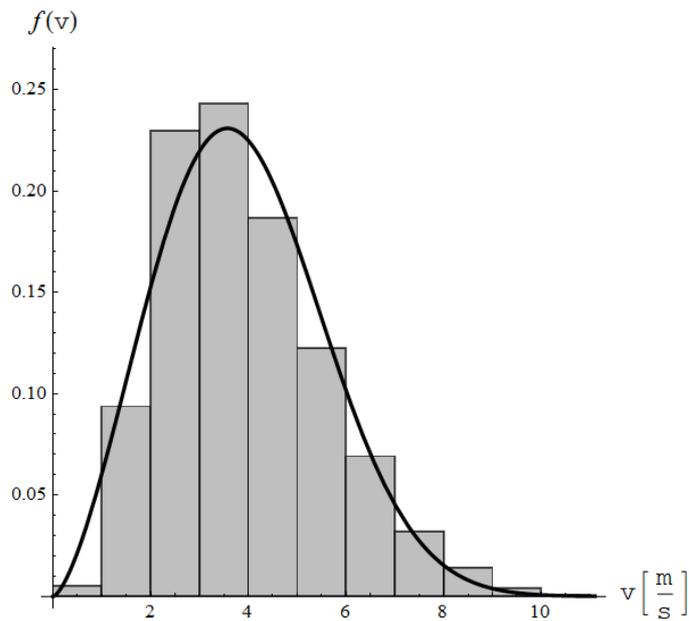


Abbildung 4.10: Dichte Weibullverteilung (alle Daten)

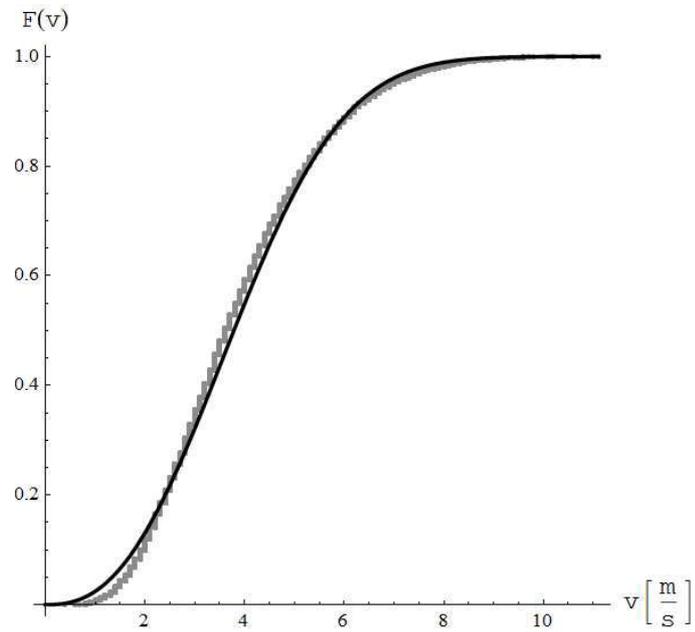


Abbildung 4.11: Summenhäufigkeit (alle Daten)

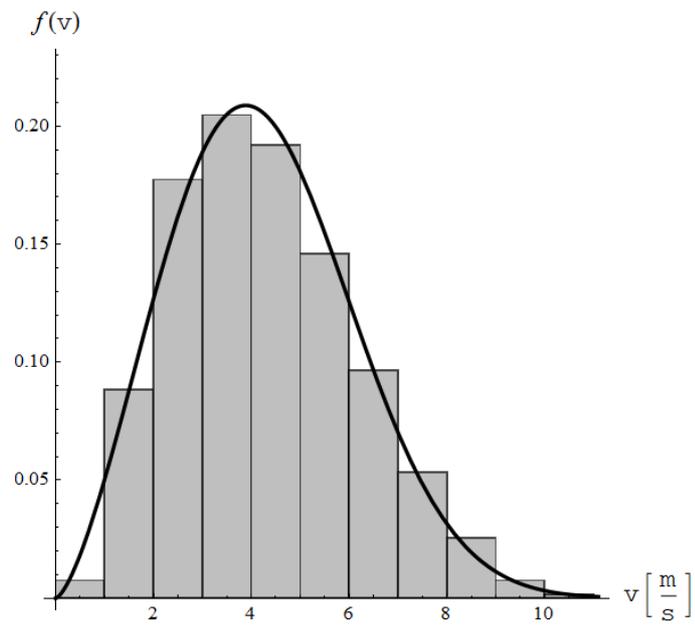


Abbildung 4.12: Dichte Weibullverteilung (Winter)

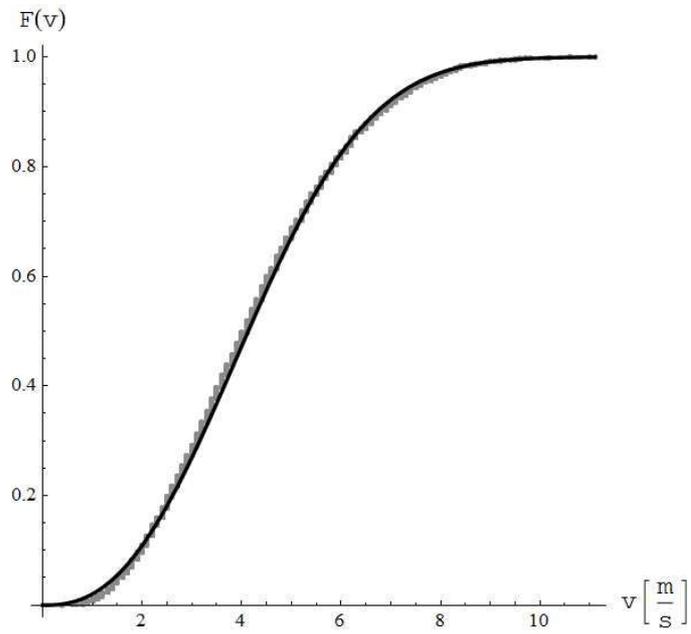


Abbildung 4.13: Summenhäufigkeit (Winter)

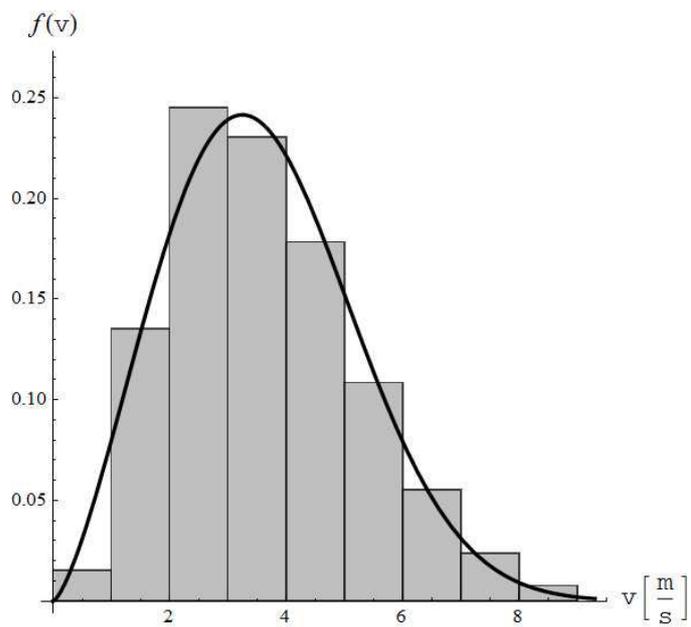


Abbildung 4.14: Dichte Weibullverteilung (Temperatur)

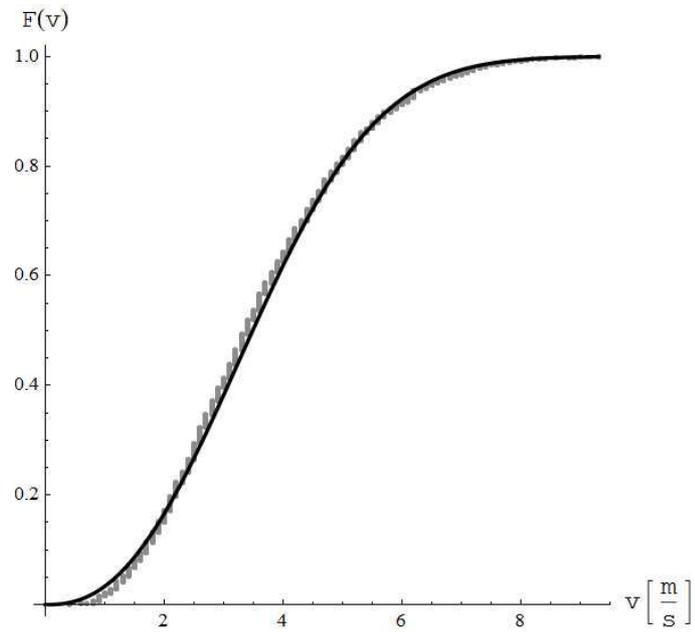


Abbildung 4.15: Summenhäufigkeit (Temperatur)

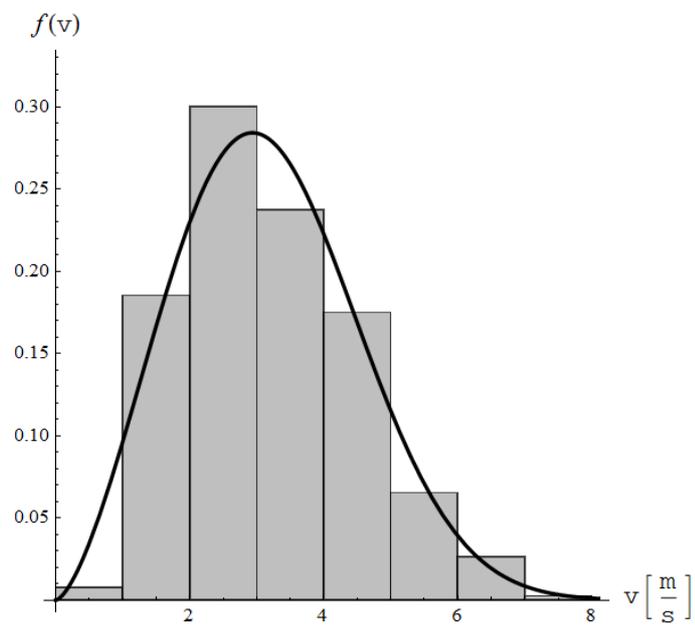


Abbildung 4.16: Dichte Weibullverteilung (Luftfeuchtigkeit)

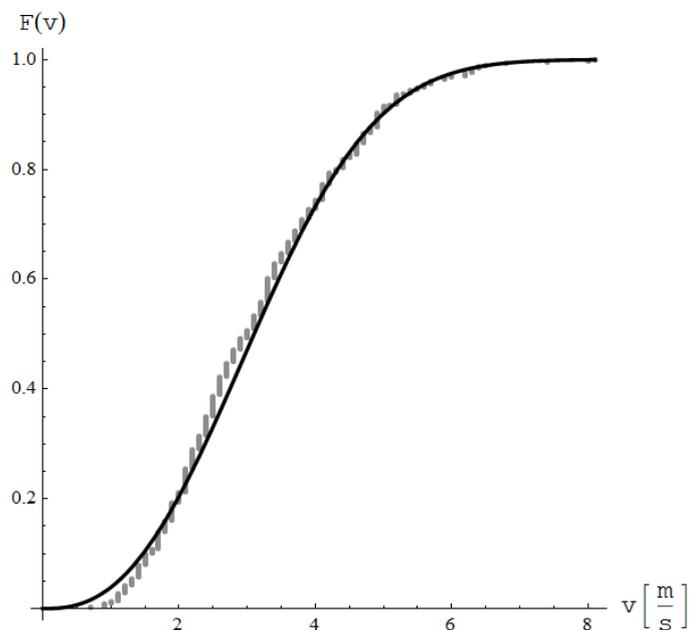


Abbildung 4.17: Summenhäufigkeit (Luftfeuchtigkeit)

4.3.3 Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit

Für die Beurteilung der maximalen Flugweite von Eisstücken, die von einem Rotorblatt abfallen, ist die maximale Windgeschwindigkeit ein wichtiger Faktor. Aus diesem Grund wird sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Die Wetterdaten des DWD liefern Angaben zur maximale Böe pro Tag. Diese wird, mit einer kleinen Änderung für die Weibullverteilung, wie die mittlere Windgeschwindigkeit ausgewertet. Nur für die Weibullverteilung wird eine kleine Modifikation gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit vorgenommen, hier wird die dreiparametrische Weibullverteilung angepasst.

Tabelle 4.6 zeigt die Auswahl der Daten für die maximale Windgeschwindigkeit am Standort Hamburg-Fuhlsbüttel. Bei der Auswahl werden dieselben Filterkriterien wie für die mittleren Windgeschwindigkeit angewendet (siehe Abschnitt 4.2).

Situation	Ausgewählte Datensätze	Gefilterte Datensätze	Ausgewertete Datensätze	Ereignistage pro Jahr	Verfügbarkeit [%]
Alle Daten	7305	10	7295	365	99,86
Winter	3645	3	3642	182	99,92
Temperatur	1562	2	1560	78	99,87
Luftfeuchtigkeit	385	0	385	19	100,00

Tabelle 4.6: Maximale Windgeschwindigkeit, Auswahl der Daten am Beispielstandort

Die Tabelle 4.7 zeigt die Auswertungsergebnisse der gemessenen maximalen Windgeschwindigkeiten.

Situation	Mittelwert [m/s]	Änderung [%]	Medianwert [m/s]	Änderung [%]	99,9% Quantil	Änderung [%]	Varianz [m ² /s ²]	Standardabweichung [m/s]
Alle Daten	10,92	0,00	10,40	0,00	29,80	0,00	15,35	3,92
Winter	11,15	2,16	10,50	0,96	31,70	6,38	20,01	4,47
Temperatur	9,68	-11,34	9,30	-10,58	23,40	-21,48	12,91	3,59
Luftfeuchtigkeit	8,42	-22,92	8,00	-23,08	19,30	-35,23	9,58	3,10

Tabelle 4.7: Maximale Windgeschwindigkeit, Auswertung der Messdaten am Beispielstandort

Die Abbildung 4.18 bis 4.21 zeigen die gemessenen maximalen Windgeschwindigkeiten der einzelnen Ereignistage, für die jeweiligen Datensätze der untersuchten Situationen. In jeder Abbildung ist zusätzlich die mittlere maximale Windgeschwindigkeit eingetragen.

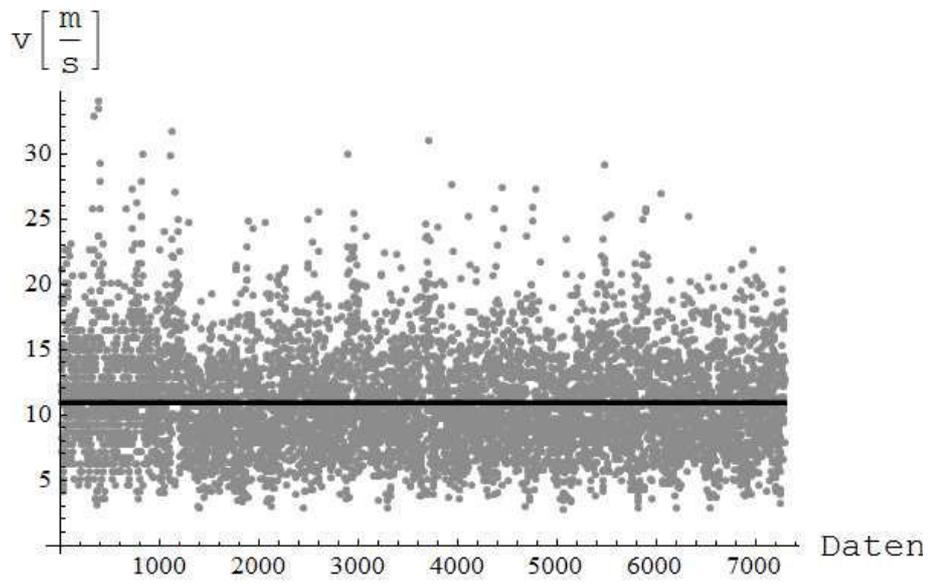


Abbildung 4.18: maximale Windgeschwindigkeiten der Datensätze (alle Daten)

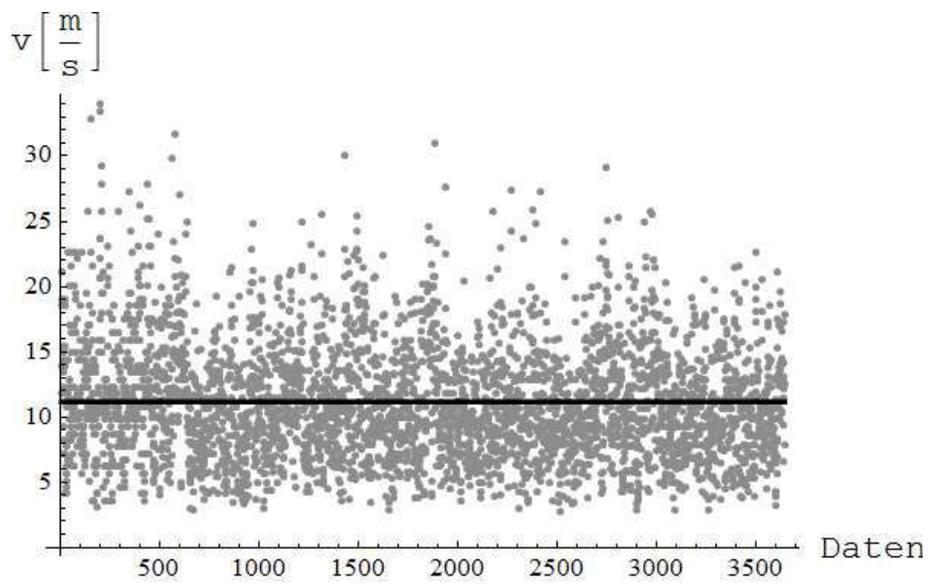


Abbildung 4.19: maximale Windgeschwindigkeiten der Datensätze (Winter)

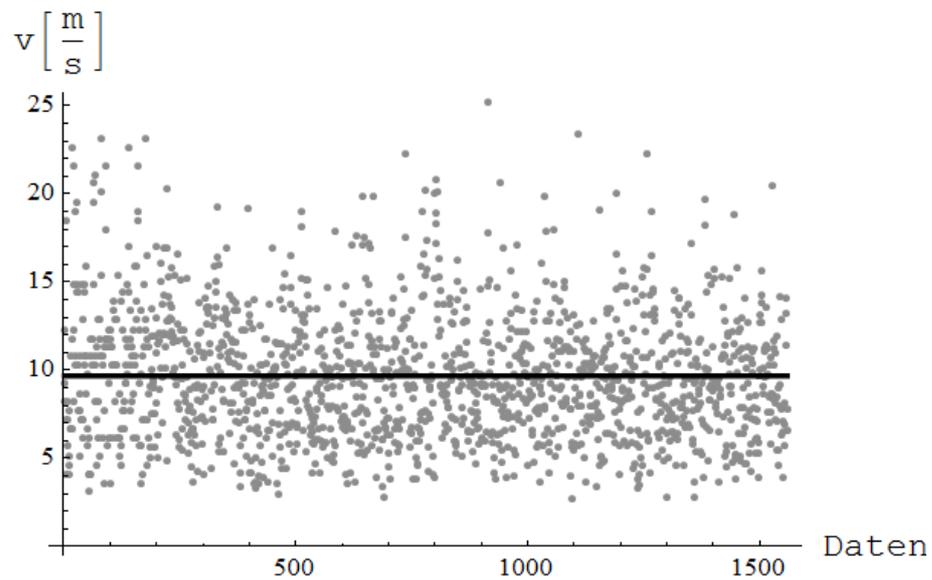


Abbildung 4.20: maximale Windgeschwindigkeiten der Datensätze (Temperatur)

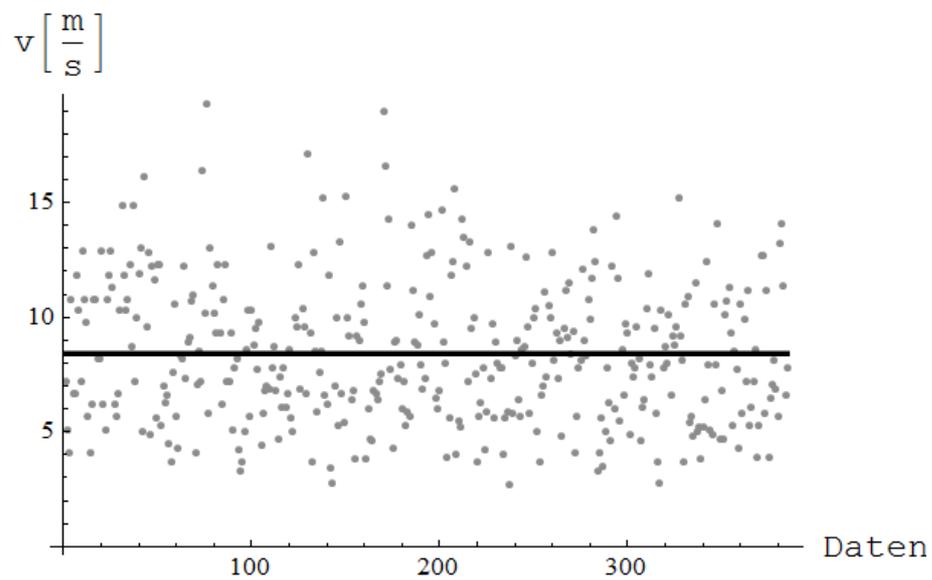


Abbildung 4.21: maximale Windgeschwindigkeiten der Datensätze (Luftfeuchtigkeit)

Die theoretische Verteilung wird für die maximalen Windgeschwindigkeiten mit der dreiparametrischen Weibullverteilung angepasst. Diese ist bei der Bestimmung von Ausfallwahrscheinlichkeiten eine gebräuchliche Form, findet in der Windenergie allerdings

üblicherweise keine Anwendung. Sie liefert aber eine gute Anpassung an die tatsächliche Verteilung der maximalen Windgeschwindigkeiten. Die Auswertung der Verteilung der maximalen Windgeschwindigkeiten ist in der Windenergie kein Standardverfahren. Aus diesem Grund ist auch die Wahl der ungebräuchlichen Anpassung für die Verteilung der maximalen Windgeschwindigkeit eine zulässige Vorgehensweise.

Die Tabelle 4.8 zeigt die aus der theoretischen Verteilung ermittelten Bewertungsparameter. In der Tabelle 4.9 sind die Weibullparameter der geschätzten Verteilung eingetragen.

Situation	Mittelwert [m/s]	Änderung [%]	Medianwert [m/s]	Änderung [%]	99,9% Quantil	Änderung [%]	Varianz [m ² /s ²]	Standardabweichung [m/s]
Alle Daten	10,92	0,00	10,56	0,00	24,97	0,00	7,87	2,80
Winter	11,16	2,18	10,64	0,69	27,98	12,05	10,46	3,23
Temperatur	9,68	-11,36	9,29	-12,02	22,97	-8,04	5,90	2,43
Luftfeuchtigkeit	8,42	-22,93	8,06	-23,68	20,01	-19,88	3,80	1,95

Tabelle 4.8: Maximale Windgeschwindigkeit, Bewertungsparameter der Weibullverteilung

Situation	A-Parameter [m/s]	b-Parameter [m/s]	k-Parameter [-]
Alle Daten	9,31	2,68	2,21
Winter	9,60	2,65	1,99
Temperatur	8,00	2,60	2,07
Luftfeuchtigkeit	6,70	2,48	2,01

Tabelle 4.9: A-, b- und k-Parameter des Beispielstandorts

Die folgenden Abbildung 4.22 bis 4.29 zeigen die Summenhäufigkeiten $F(v)$ der theoretischen und empirischen Verteilung sowie die Dichtefunktionen $f(v)$ der Weibullverteilung zusammen mit der Häufigkeitsverteilung der gemessenen maximalen Windgeschwindigkeiten.

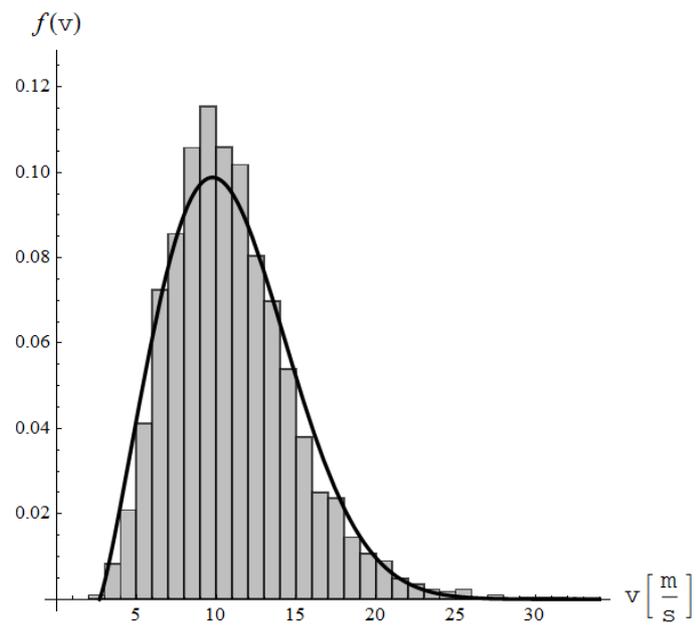


Abbildung 4.22: Dichte Weibullverteilung (alle Daten) maximale Windgeschwindigkeiten

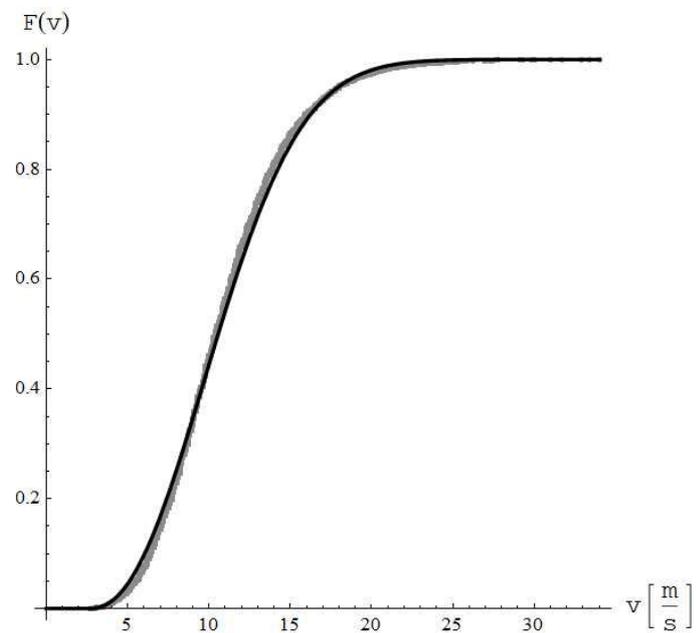


Abbildung 4.23: Summenhäufigkeit (alle Daten) maximale Windgeschwindigkeiten

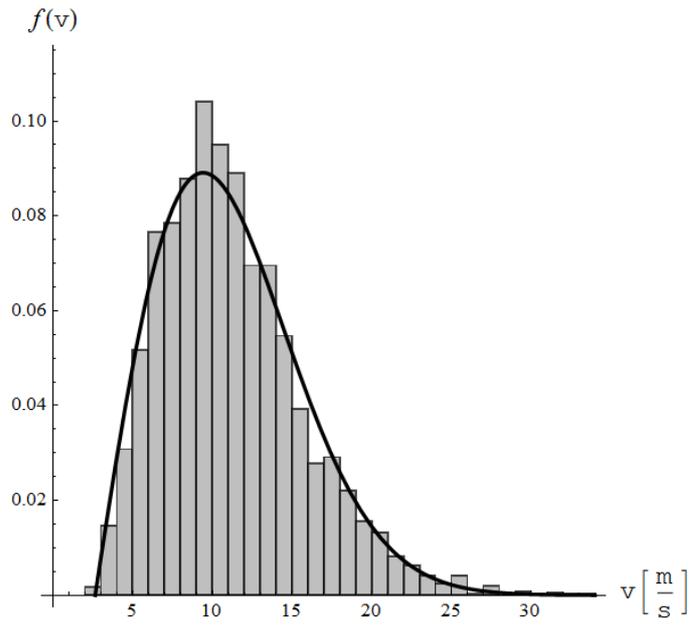


Abbildung 4.24: Dichte Weibullverteilung (Winter) maximale Windgeschwindigkeiten

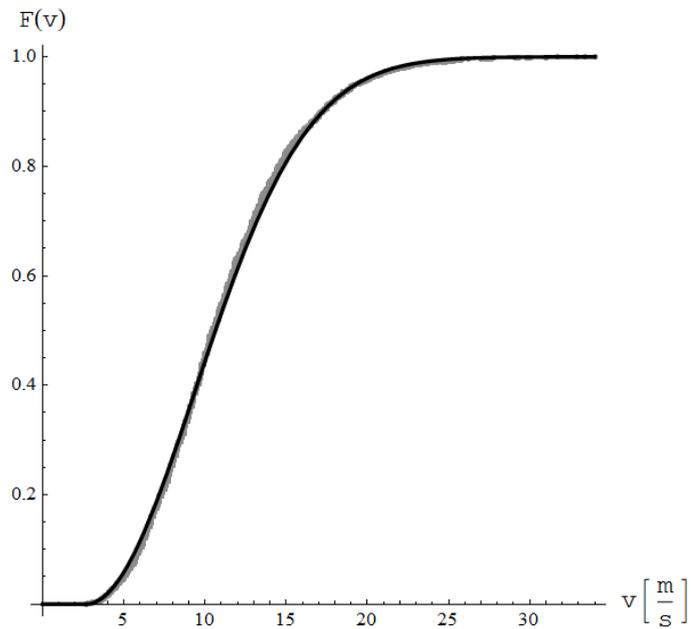


Abbildung 4.25: Summenhäufigkeit (Winter) maximale Windgeschwindigkeiten

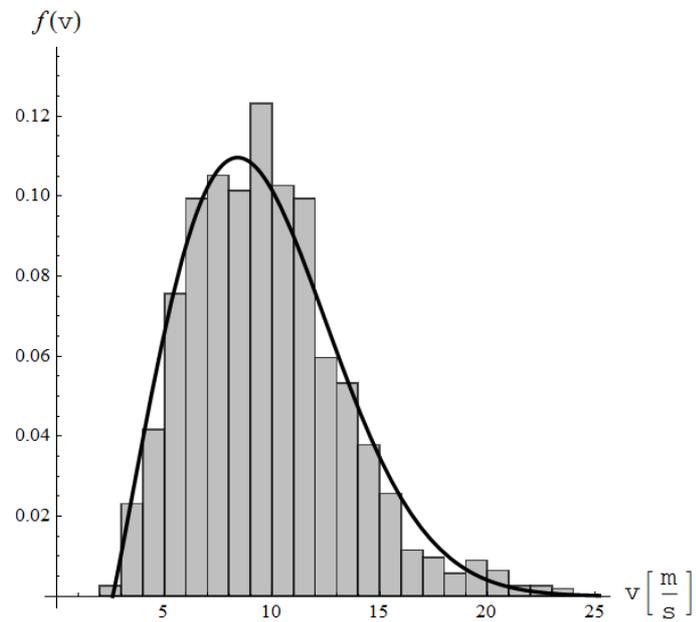


Abbildung 4.26: Dichte Weibullverteilung (Temperatur) maximale Windgeschwindigkeiten

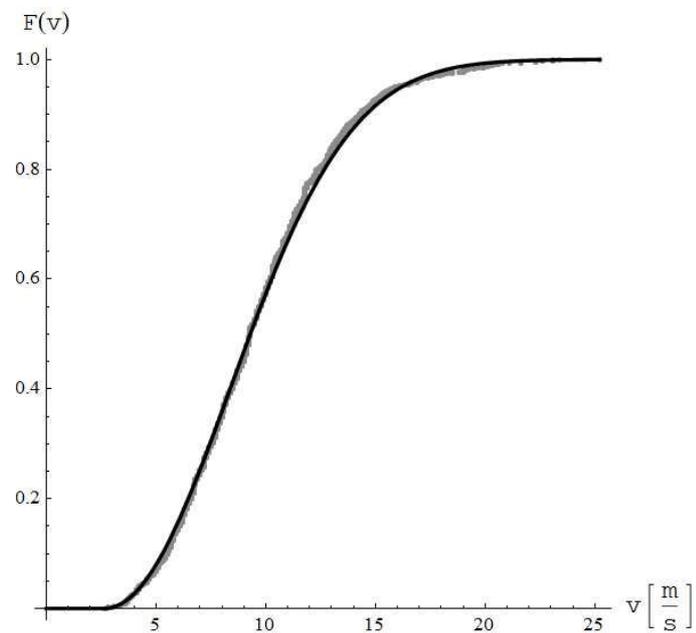


Abbildung 4.27: Summenhäufigkeit (Temperatur) maximale Windgeschwindigkeiten

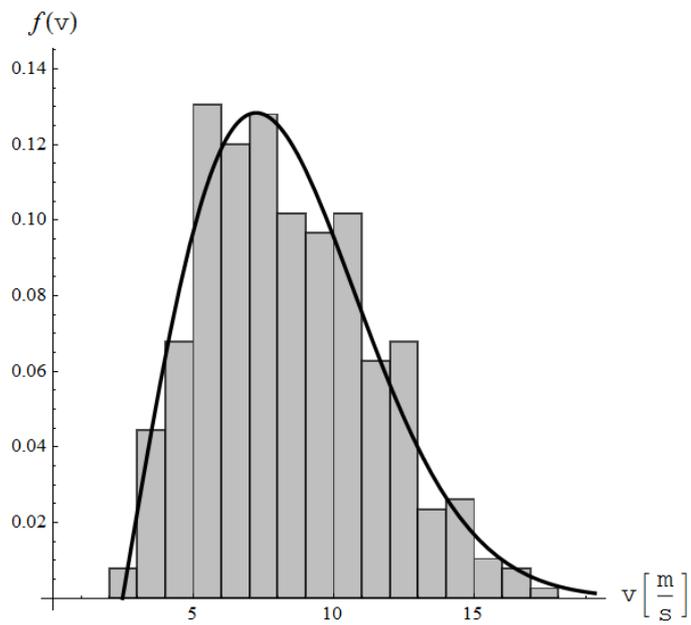


Abbildung 4.28: Dichte Weibullverteilung (Luftfeuchtigkeit) maximale Windgeschwindigkeiten

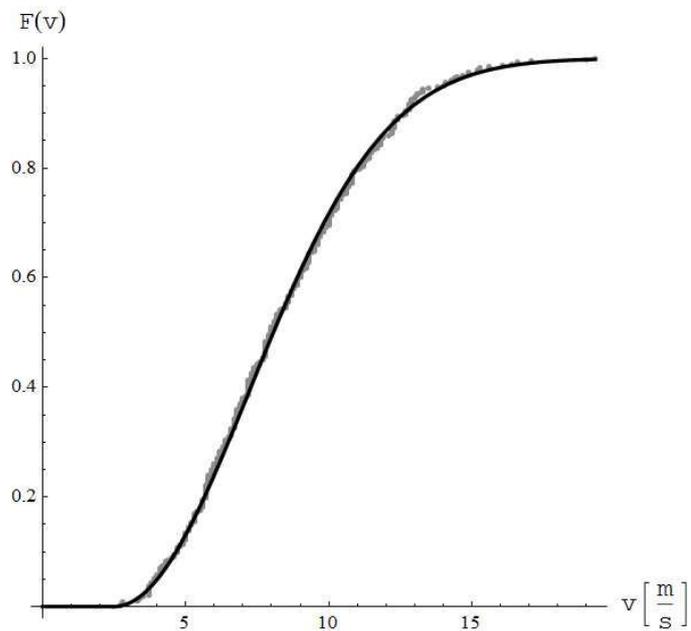


Abbildung 4.29: Summenhäufigkeit (Temperatur) maximale Windgeschwindigkeiten

4.3.4 Auswertung der Luftdichte

Die Luftdichte wurde auf Basis des in Abschnitt 3.3.5 hergeleiteten Zusammenhangs berechnet (siehe Gleichung (3.57)). In Tabelle 4.10 sind die maximale, minimale und mittlere Luftdichte für den Beispielstandort Hamburg-Fuhlsbüttel eingetragen. Die Werte berechnen sich aus den Tagesmittelwerten der freien DWD Daten.

	Luftdichte ρ [kg/m ³]
Maximum	1,38
Mittelwert	1,24
Minimum	1,16

Tabelle 4.10: Luftdichte am Beispielstandort (alle Daten)

In Tabelle 4.11 ist die maximale, minimale und mittlere Luftdichte für Eisansatzbedingungen am Beispielstandort dargestellt. Die einzelnen Werte der Luftdichte berechnen sich auf Basis der Tagesmittelwerte der freien DWD-Daten, die für die Luftfeuchtigkeits-Situation ausgewählt wurden.

	Luftdichte ρ [kg/m ³]
Maximum	1,35
Mittelwert	1,29
Minimum	1,23

Tabelle 4.11: Luftdichte am Beispielstandort (Luftfeuchtigkeit)

4.4 Zentrale Auswertungsergebnisse aller Standorte

Dieser Abschnitt fasst die wichtigsten Auswertungsergebnisse zusammen. Ergänzend sind die fehlenden Diagramme aller Auswertungen im Ergebnisanhang zusammengefasst (siehe Abschnitt 9.1).

4.4.1 Auswertung der Tagesmittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeit

Die folgenden Abbildung 4.30 bis 4.36 zeigen die Ergebnisse aller ausgewerteten Standorte für die Tagesmittelwerte der Windmessungen. In blau sind im oberen Teil die prozentualen Änderungen zwischen der untersuchten Situation und dem gesamten Datensatz dargestellt. In rot sind im unteren Teil die Höhen der Anemometer über Normalnull (NN) aufgetragen. Die Information zur Situation, zum Bewertungsparameter sowie den Werten aus welchen die Ergebnisse berechnet wurden, findet sich im Untertitel der Abbildungen. Die einzelnen Angaben sind der Reihe nach durch Kommata voneinander getrennt.

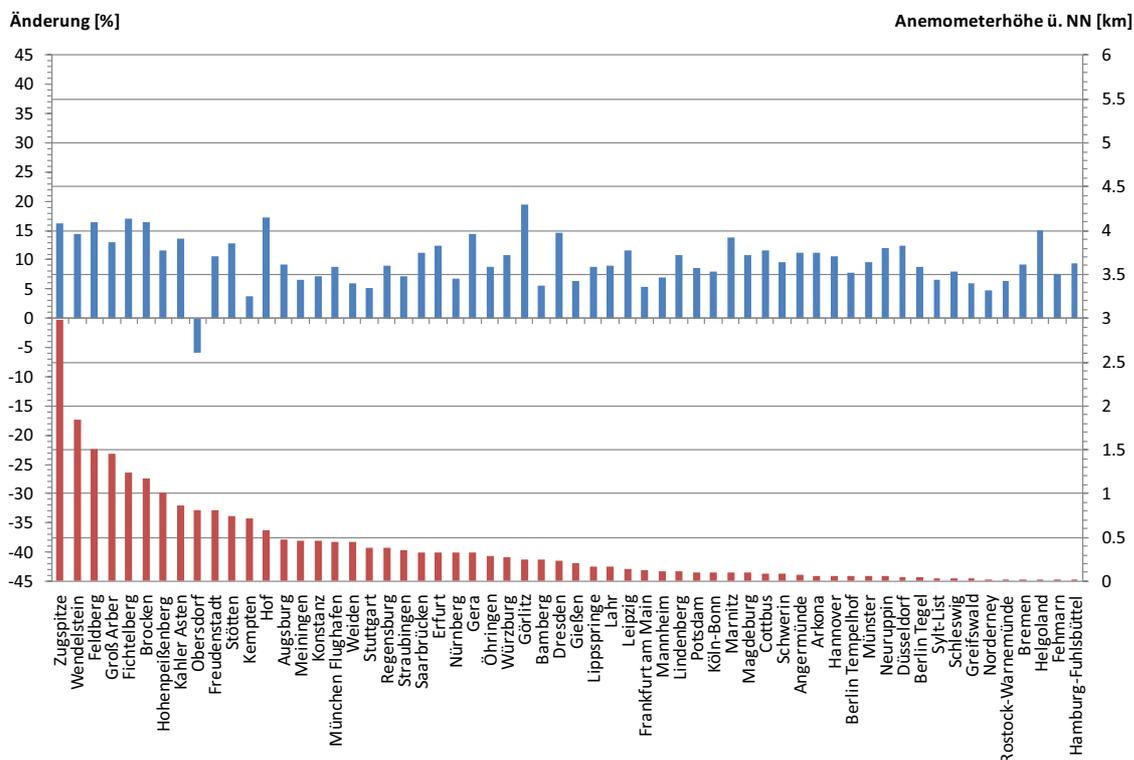


Abbildung 4.30: Winter, mittlere Windgeschwindigkeit, empirische Daten

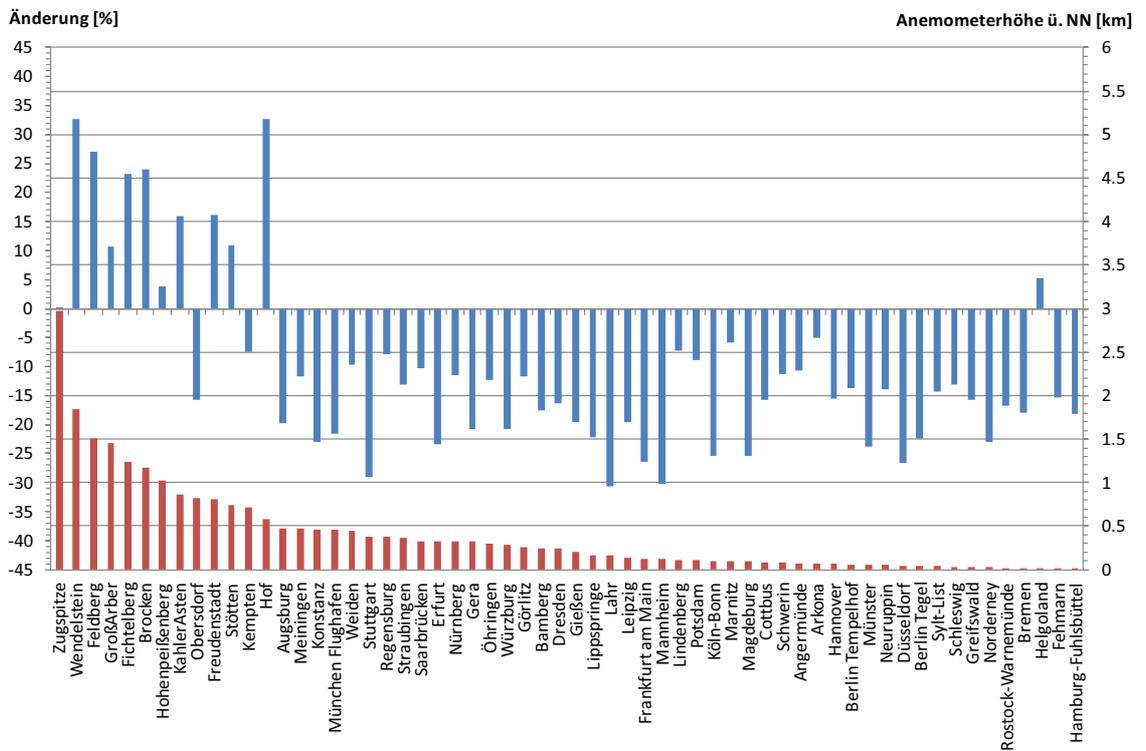


Abbildung 4.31: Luftfeuchtigkeit, mittlere Windgeschwindigkeit, empirische Daten

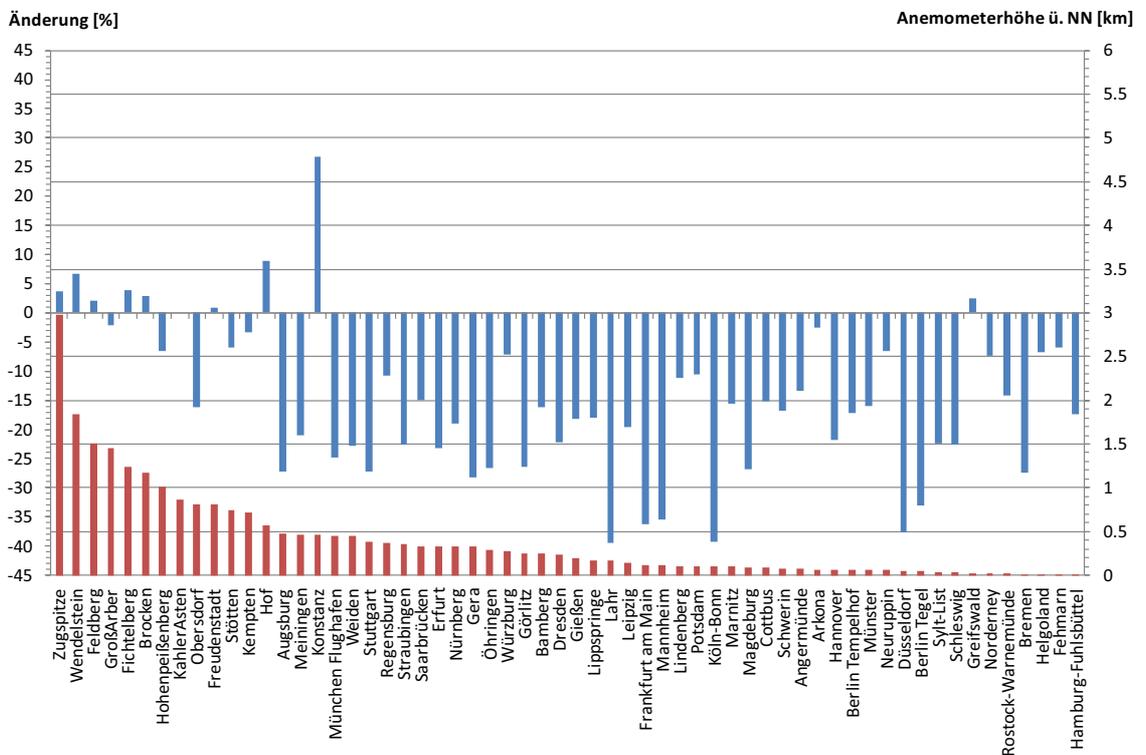


Abbildung 4.32: Luftfeuchtigkeit, 99,9% Quantil, empirische Daten

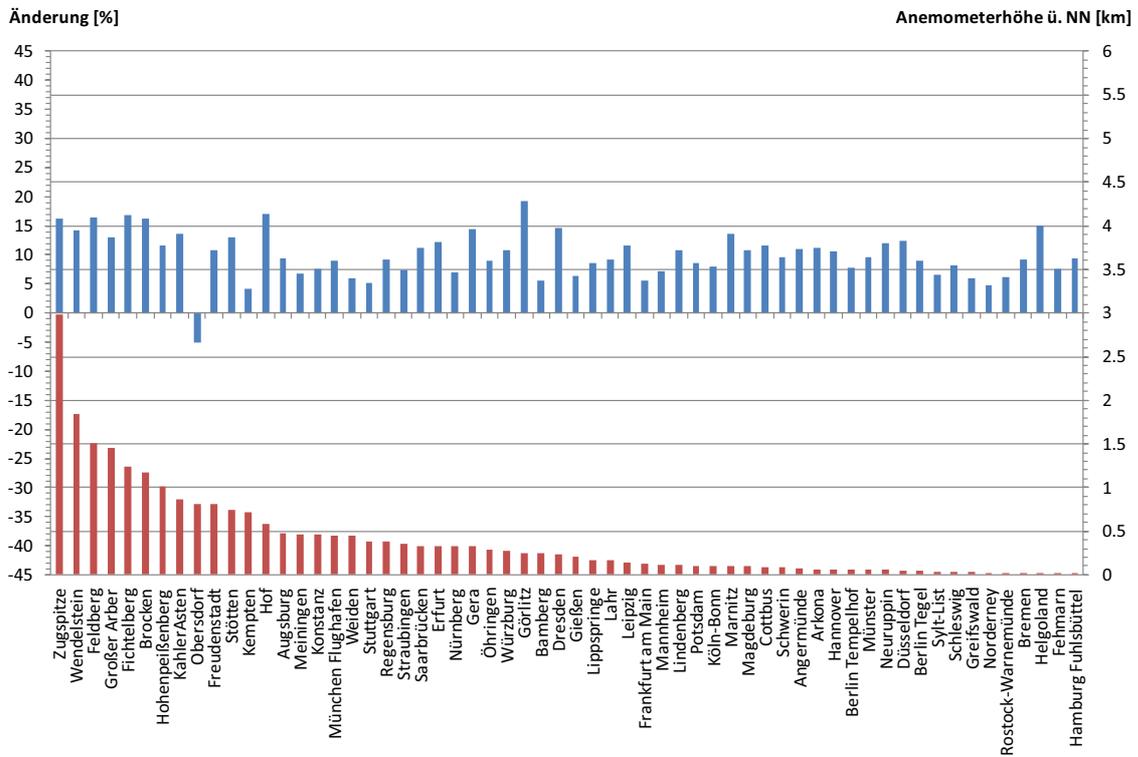


Abbildung 4.33: Winter, mittlere Windgeschwindigkeit, geschätzte Weibullverteilung

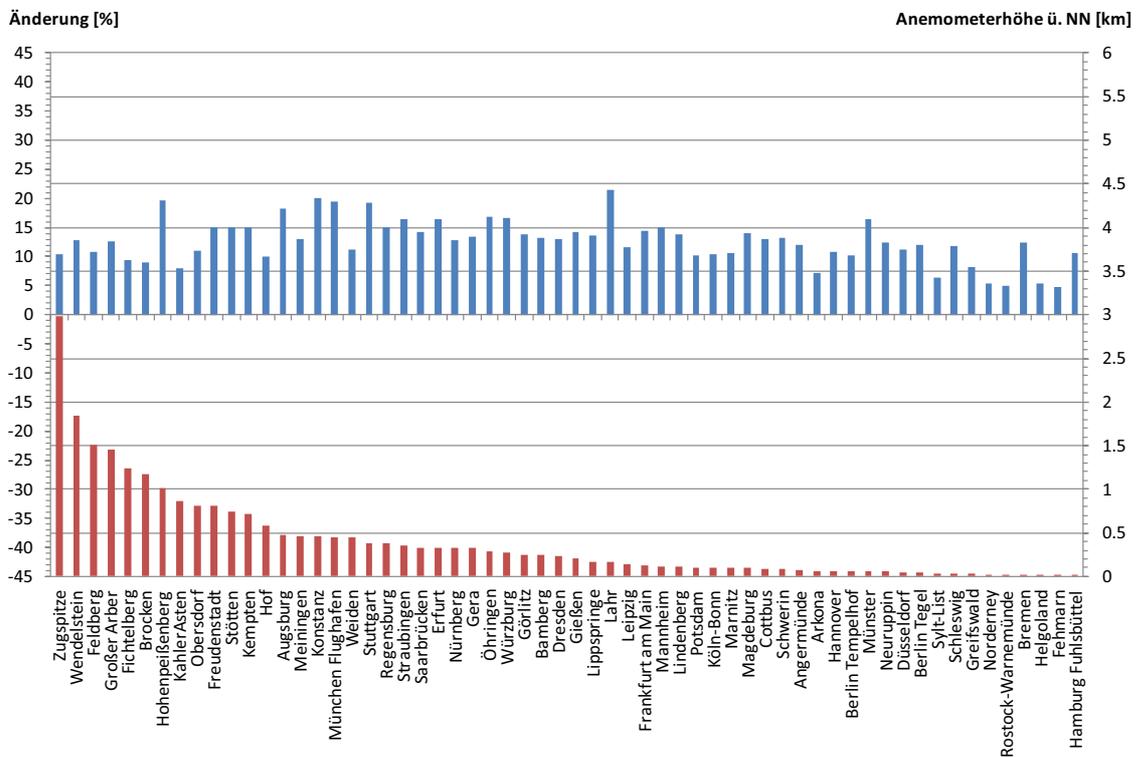


Abbildung 4.34: Winter, 99,9% Quantil, geschätzte Weibullverteilung

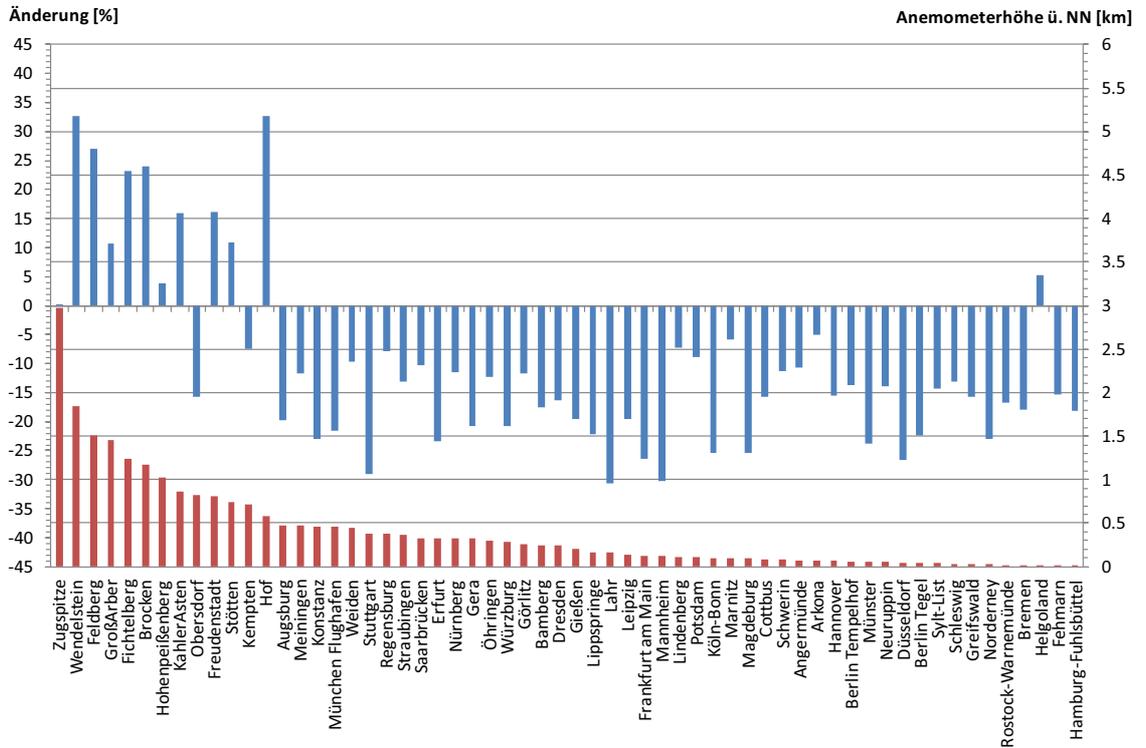


Abbildung 4.35: Luftfeuchtigkeit, mittlere Windgeschwindigkeit, geschätzte Weibullverteilung

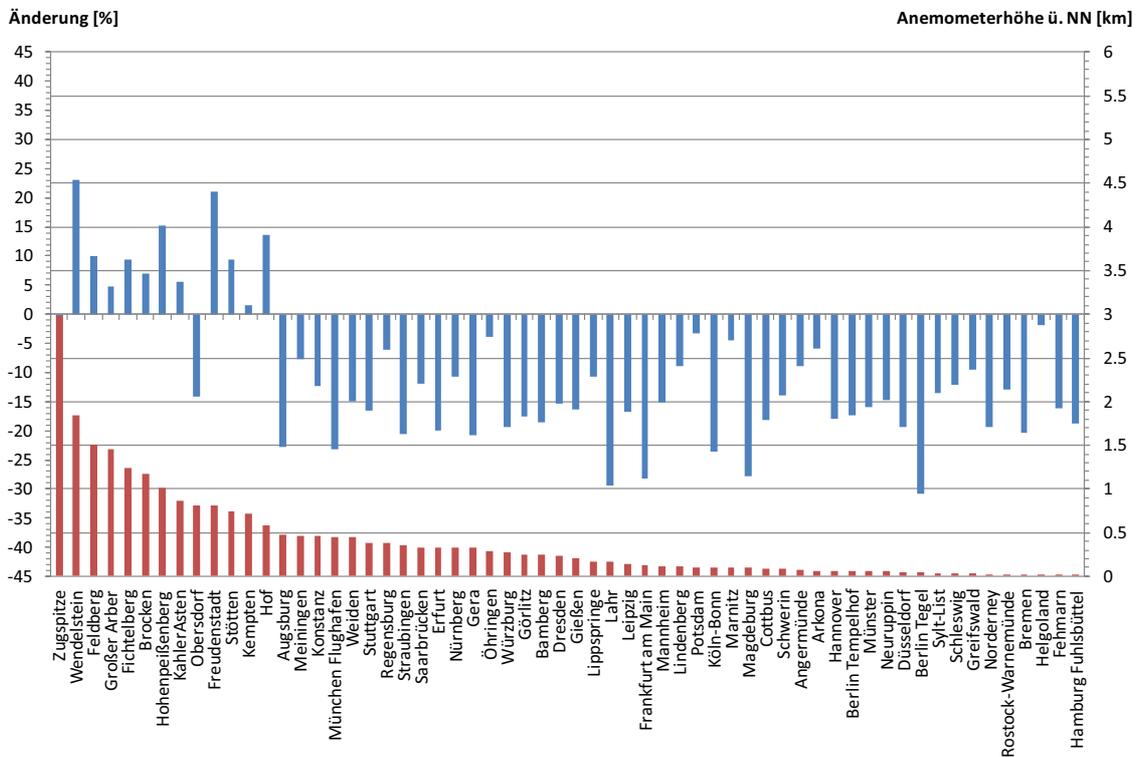


Abbildung 4.36: Luftfeuchtigkeit, 99,9% Quantil, geschätzte Weibullverteilung

4.4.2 Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit

Die folgenden Abbildung 4.37 bis 4.40 zeigen die wichtigsten Auswertungsergebnisse der maximalen Windgeschwindigkeit, aufgeteilt auf die unterschiedlichen Standorte. In blau ist die Änderung der verschiedenen Situationen gegenüber dem gesamten Datensatz aufgetragen. Rot zeigt die jeweilige Anemometerhöhe in Kilometern über Normalnull. Die Information zur Situation, zum Bewertungsparameter sowie den Werten aus welchen die Ergebnisse berechnet wurden, findet sich im Untertitel der Abbildungen. Die einzelnen Angaben sind durch Kommata voneinander getrennt. Die Abkürzung „mW“ steht für Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit.

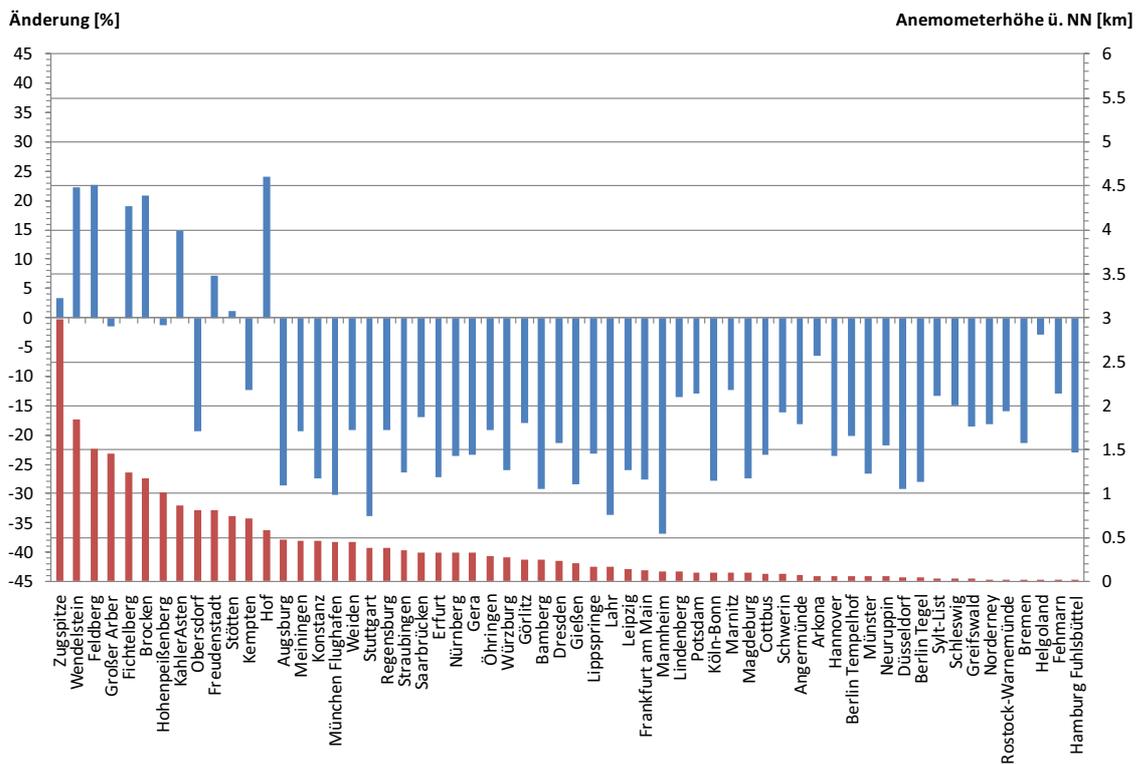


Abbildung 4.37: Luftfeuchtigkeit, mittlere Windgeschwindigkeit, empirische Daten (mW)

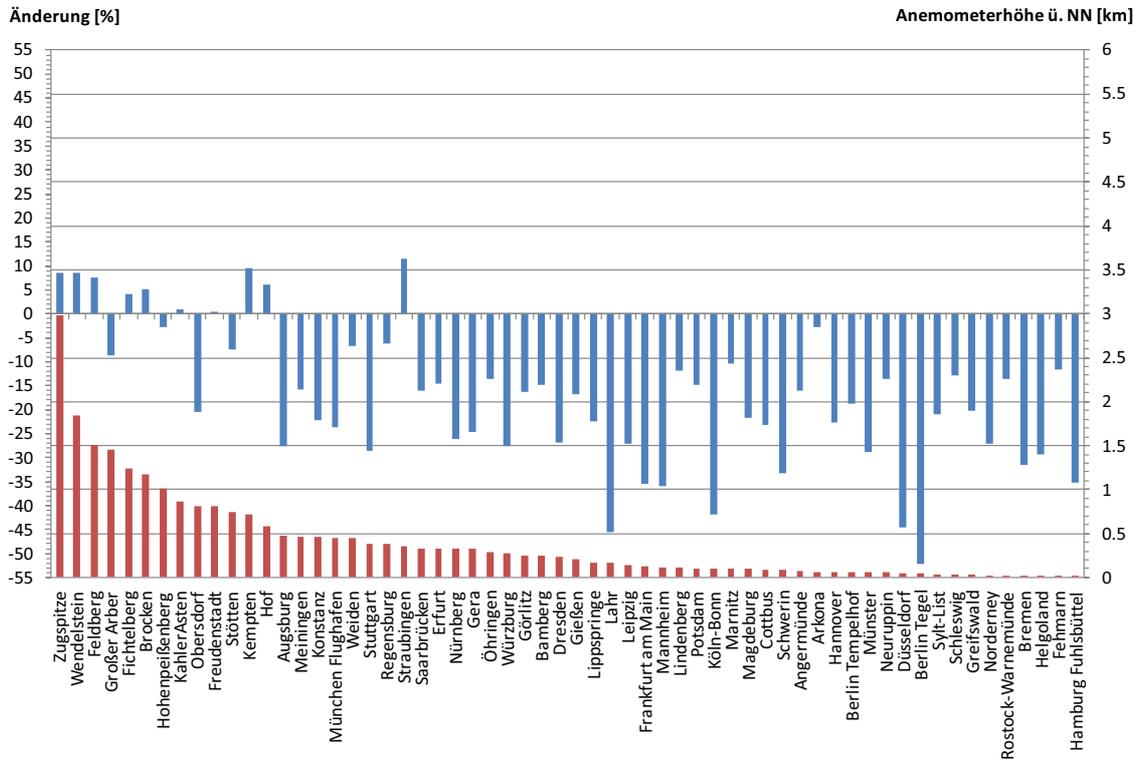


Abbildung 4.38: Luftfeuchtigkeit, 99,9% Quantil, empirische Daten (mW)

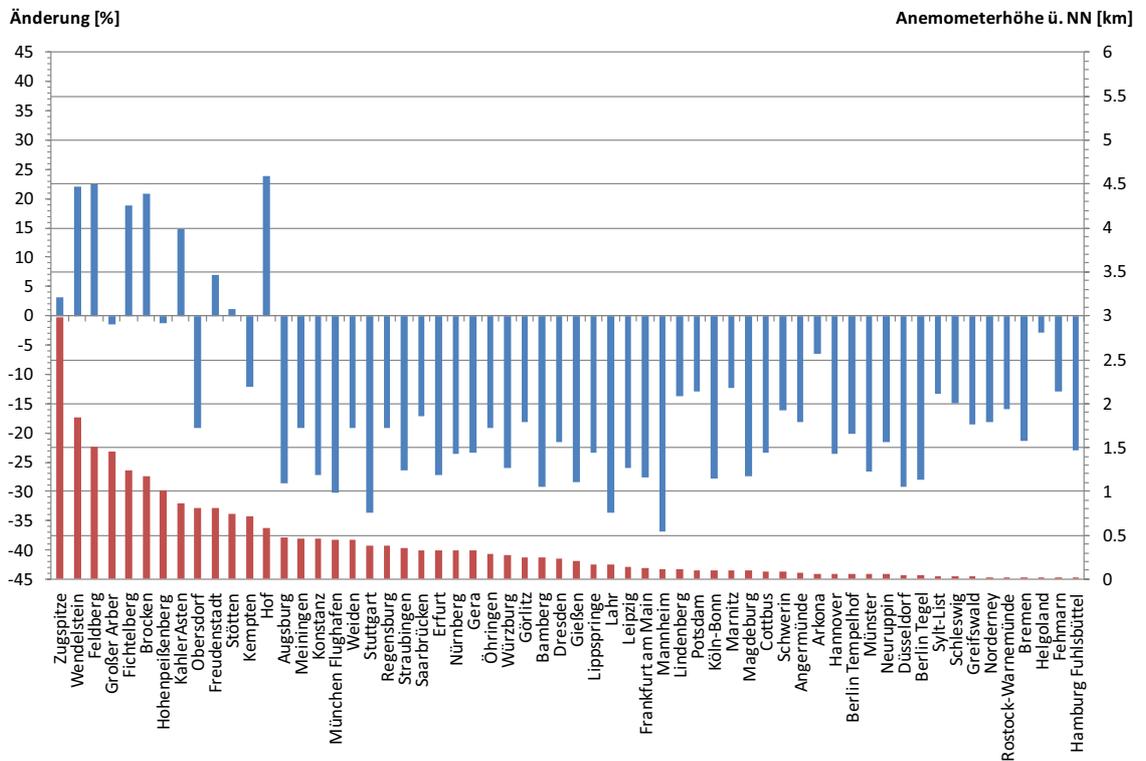


Abbildung 4.39: Luftfeuchtigkeit, mittlere Windgeschwindigkeit, geschätzte Weibullverteilung (mW)

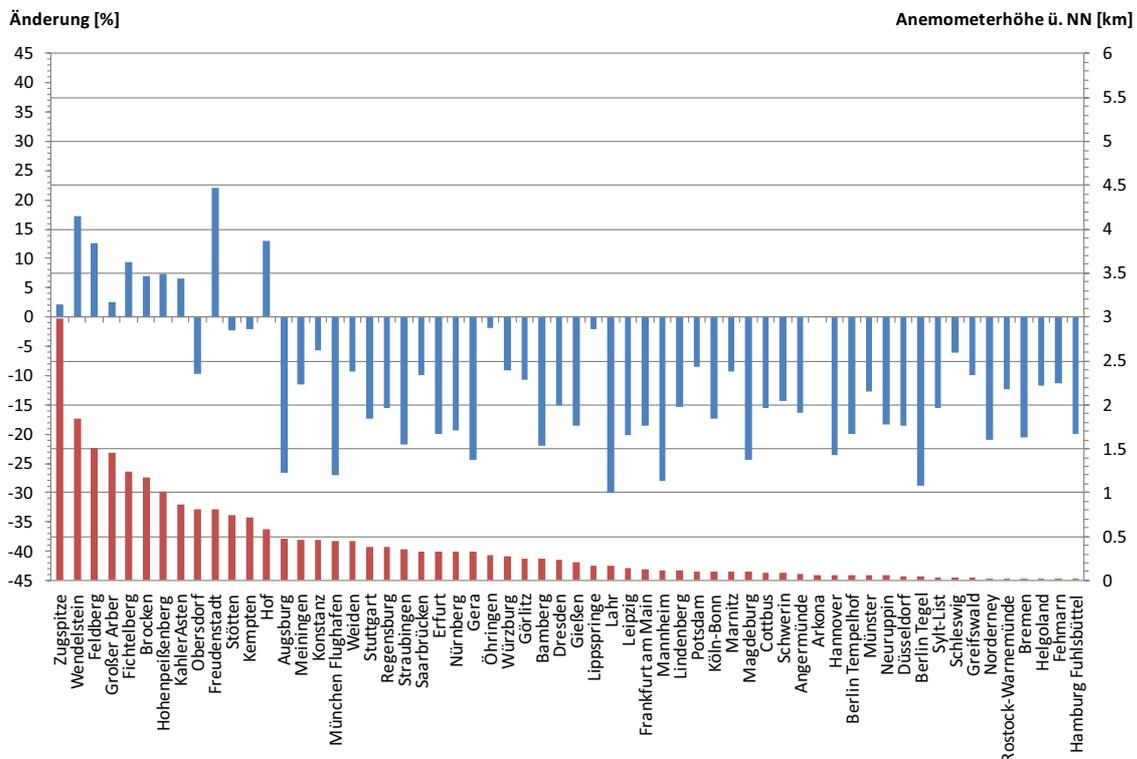


Abbildung 4.40: Luftfeuchtigkeit, 99,9% Quantil, geschätzte Weibullverteilung (mW)

4.4.3 Auswertung der Luftdichte

Die Abbildung 4.41 bis 4.43 zeigen die Auswertungsergebnisse der Luftdichte für alle untersuchten Standorte. Im oberen Teil ist in blau die Luftdichte und im unteren Teil in rot die jeweilige Messhöhe eingetragen. In den Abbildungen sind die maximale, minimale und mittlere Luftdichte dargestellt. Die Luftdichte wurde aus den Tagesmittelwerten der ausgewerteten Stationen errechnet. Die Berechnung der Luftdichte ist in Abschnitt 3.3.5 ausführlich hergeleitet.

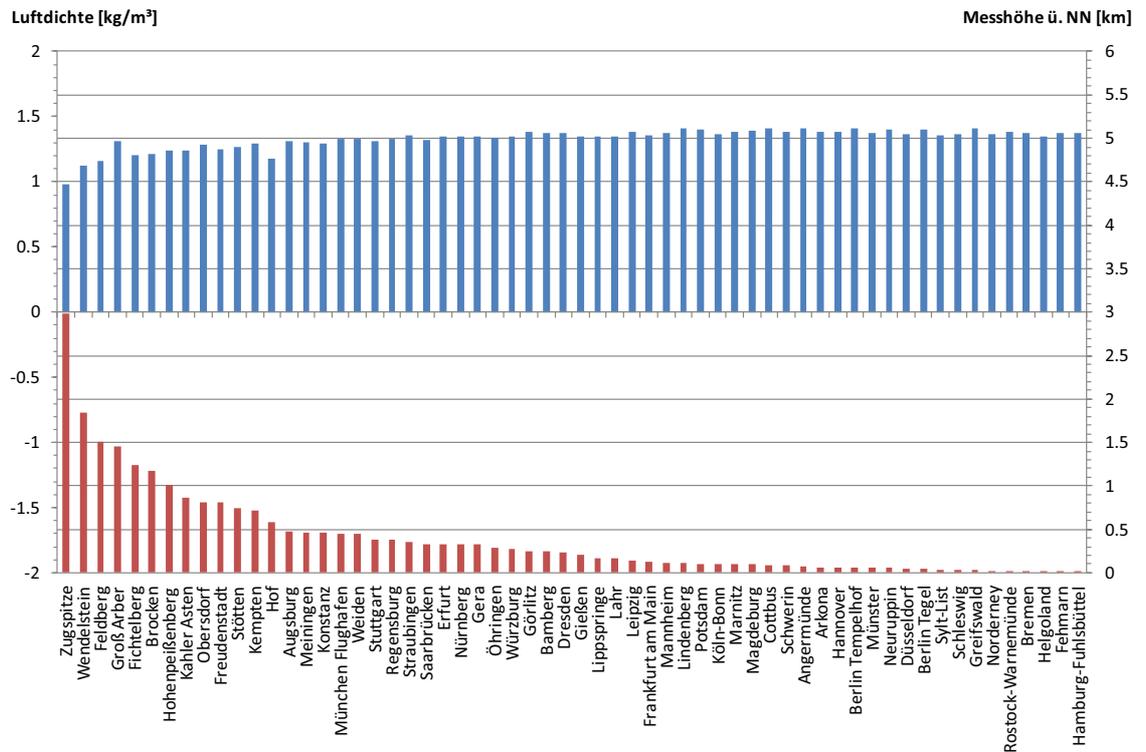


Abbildung 4.41: Maximale Luftdichte (alle Daten)

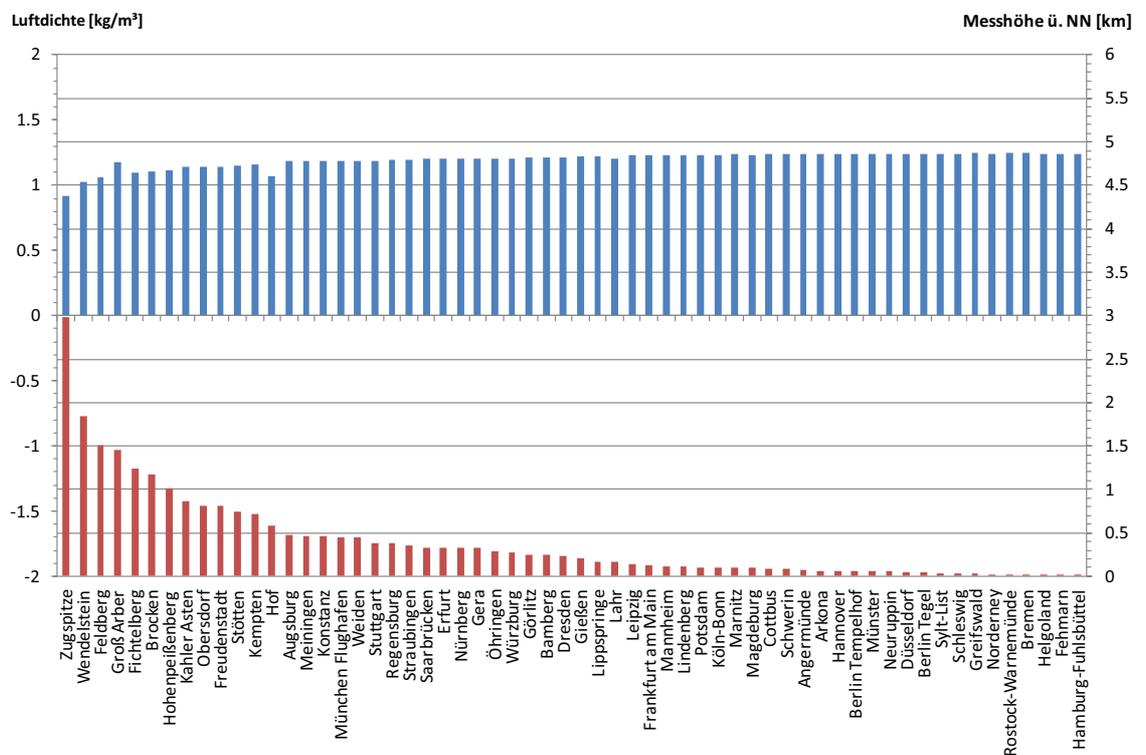


Abbildung 4.42: Mittlere Luftdichte (alle Daten)

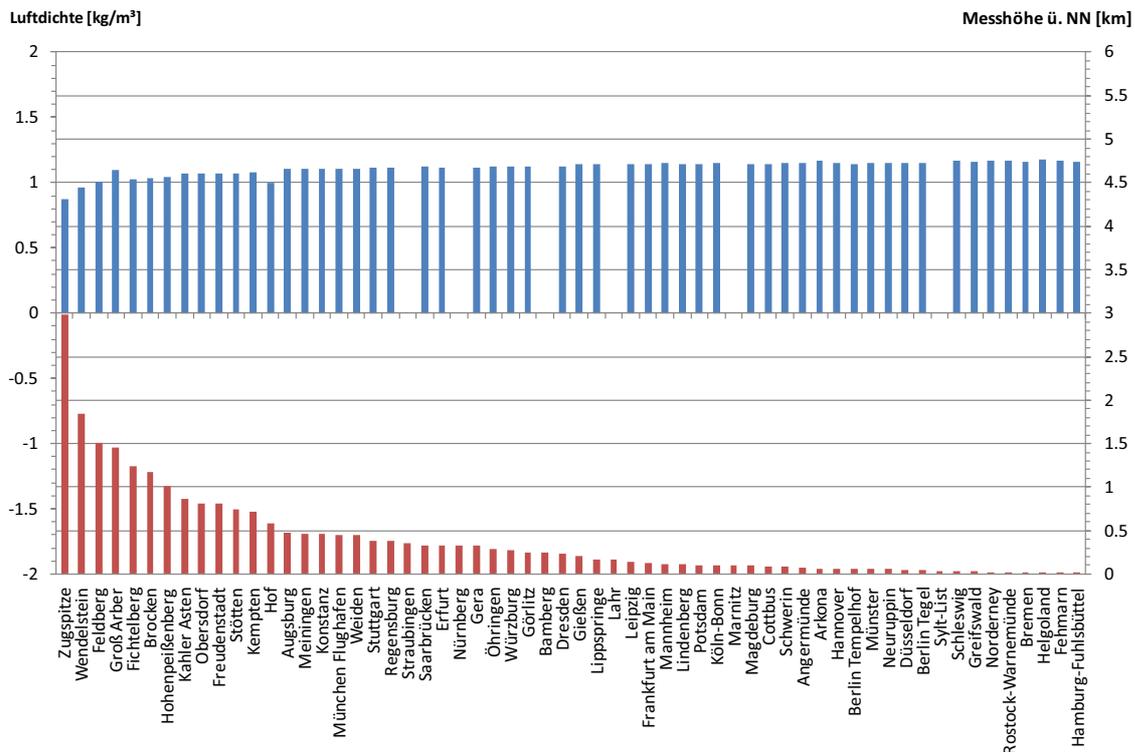


Abbildung 4.43: Minimale Luftdichte (alle Daten)

Bei der Auswertung der minimalen Luftdichte (Abbildung 4.43) sind einige Standorte, aufgrund fehlerhafter Messungen, nicht in die Auswertung der Ergebnisse einbezogen worden.

In Abbildung 4.44 bis 4.46 sind die maximale, mittlere und minimale Luftdichte für Eisansatzbedingungen, für alle ausgewerteten Standorte dargestellt. Im oberen Teil ist in blau die Luftdichte und im unteren Teil in rot die jeweilige Messhöhe eingetragen. Die Luftdichte berechnet sich für die Luftfeuchtigkeits-Situation auf Basis der Tagesmittelwerte der freien DWD-Daten.

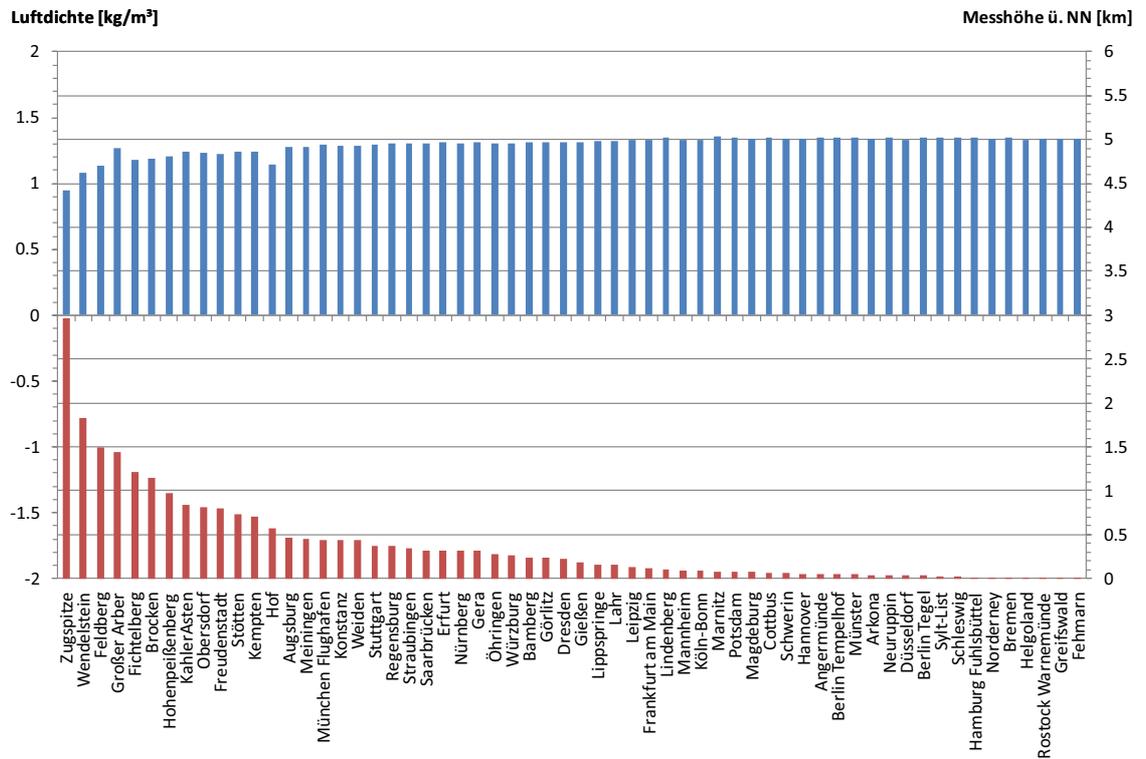


Abbildung 4.44: Maximale Luftdichte (Luftfeuchtigkeit)

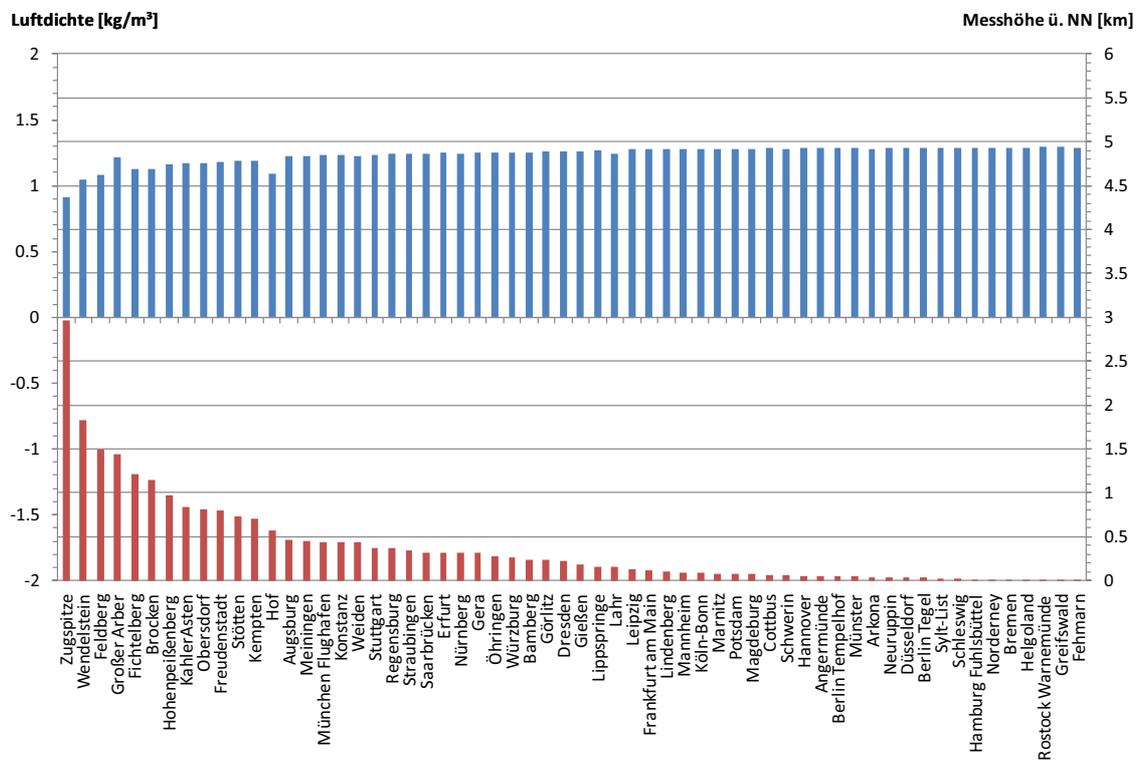


Abbildung 4.45: Mittlere Luftdichte (Luftfeuchtigkeit)

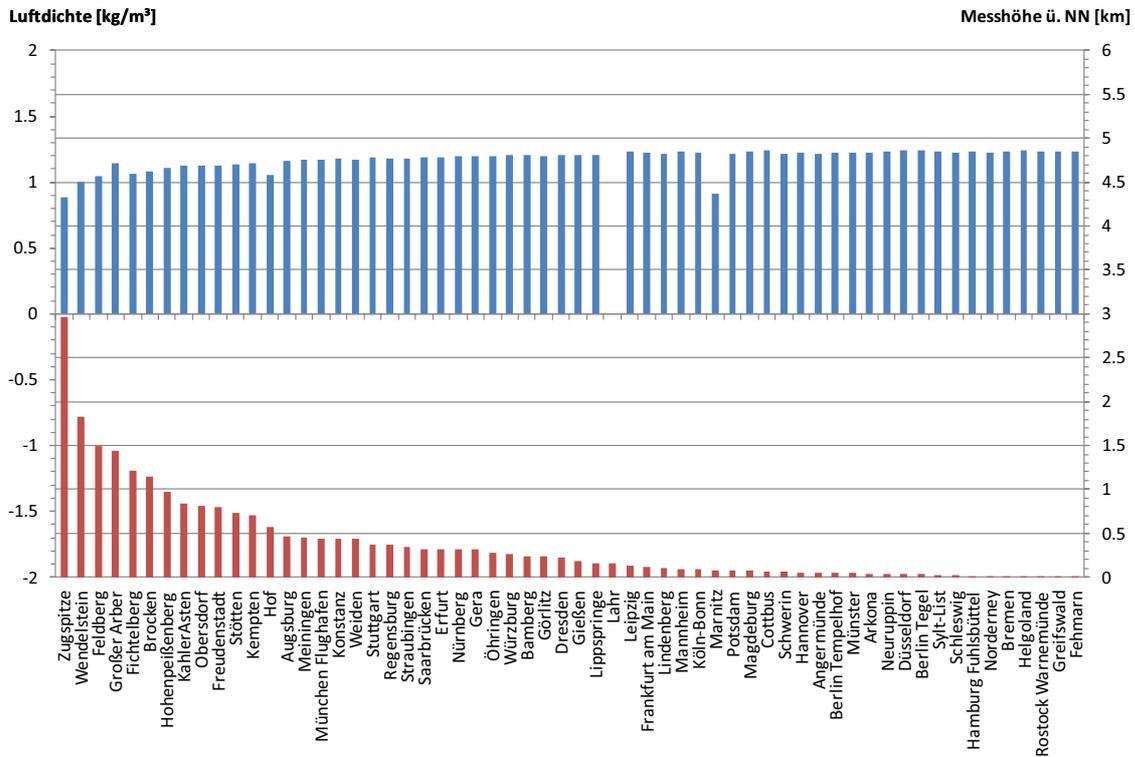


Abbildung 4.46: Minimale Luftdichte (Luftfeuchtigkeit)

Bei der Auswertung der minimalen Luftdichte für Eisansatzbedingungen (Abbildung 4.46) wurde der Standort Lahr, aufgrund fehlerhafter Messungen, in der Auswertung nicht berücksichtigt.

4.4.4 Auswertung der potentiellen Vereisungstage

Abbildung 4.47 zeigt die potentiellen Vereisungstage pro Jahr. Diese ergeben sich aus der Auswertung der Luftfeuchtigkeits-Situation. Im oberen Teil des Diagramms sind die Vereisungstage in blau und im unteren Teil die Stationshöhen in rot für die ausgewerteten Standorte eingetragen. In Abbildung 4.48 sind die Vereisungstage pro Jahr auf der Deutschlandkarte vermerkt. Die Anzahl pro Jahr steht fettgedruckt hinter der jeweiligen Stationsnummer aus Tabelle 4.1.

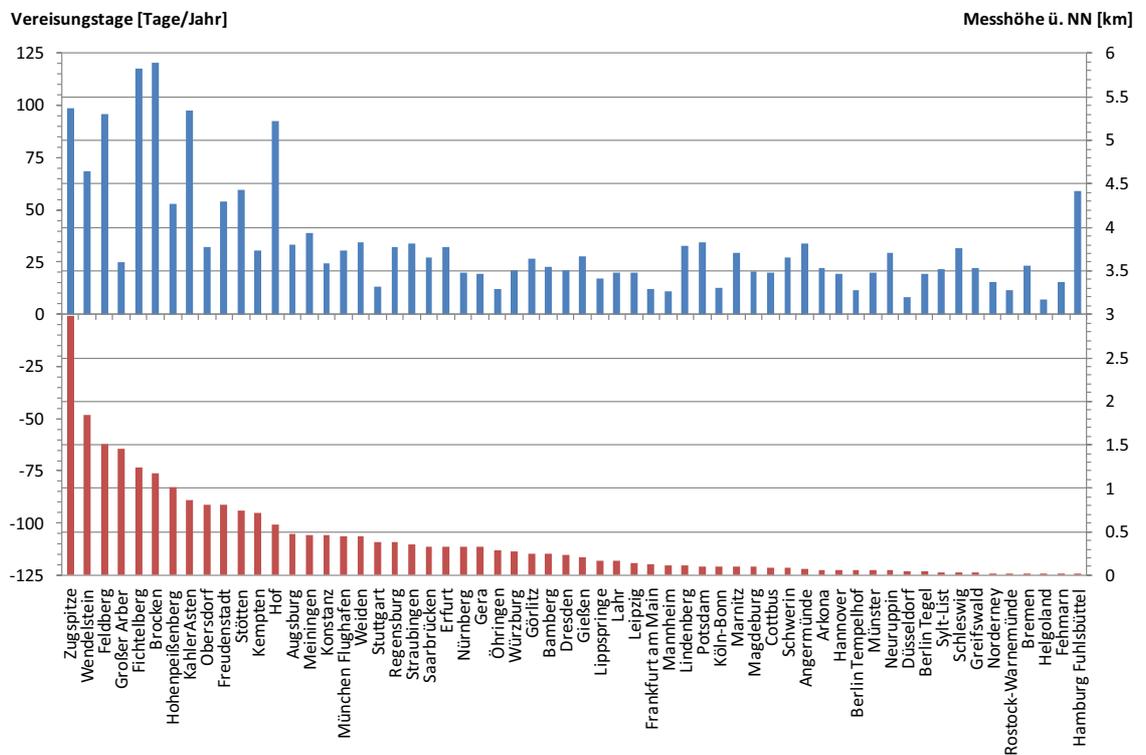


Abbildung 4.47: Vereisungstage pro Jahr

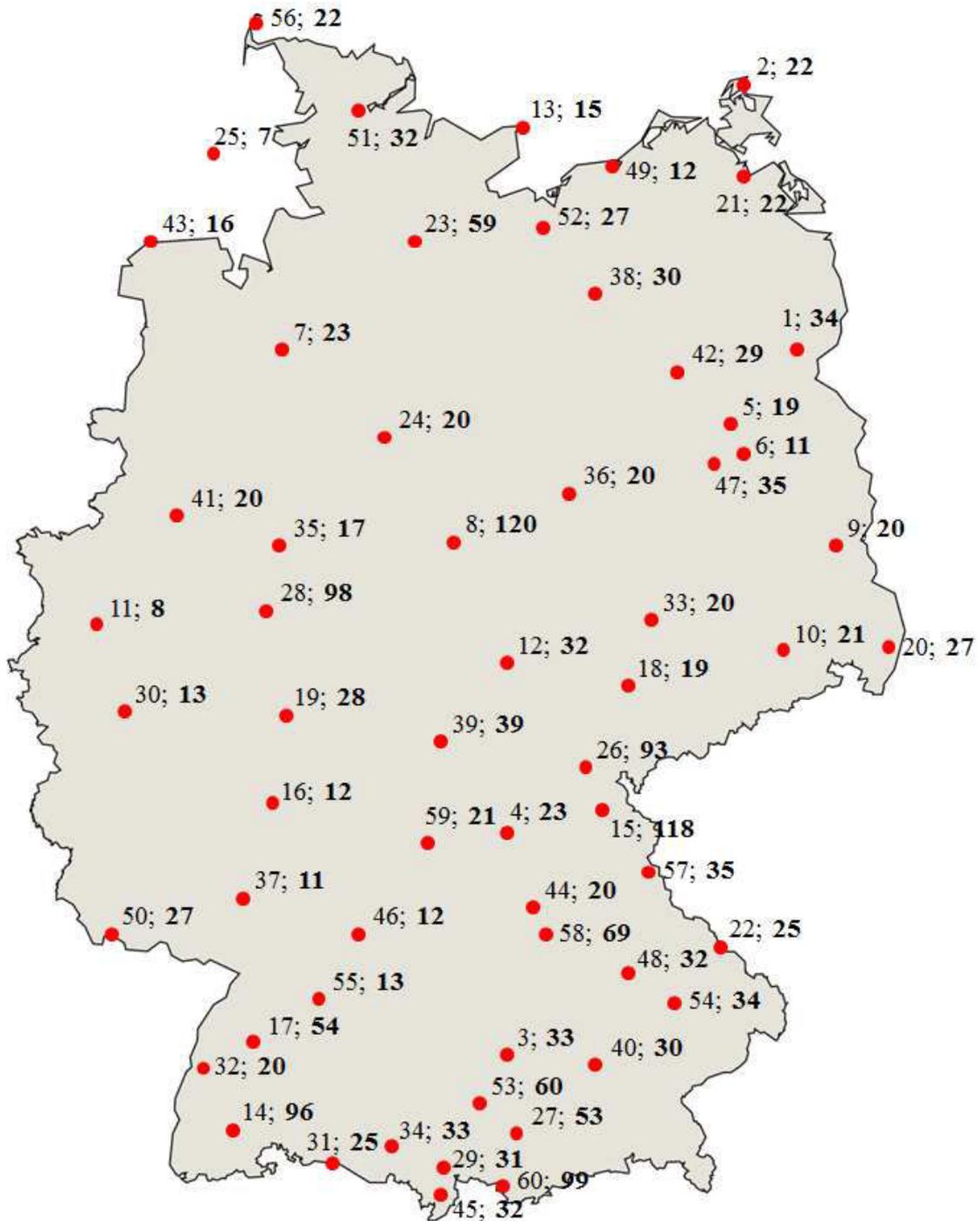


Abbildung 4.48: Deutschlandkarte mit Stationen und Vereisungstagen

5 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Auswertungsergebnisse eingeordnet und diskutiert. Wird im Folgenden von der Änderung eines Bewertungsparameters (siehe Abschnitt 3.3) gesprochen, dann handelt es sich immer um die Änderung des Bewertungsparameters der jeweiligen Situation zum gesamten Datensatz (Jahresmittel).

5.1 Windgeschwindigkeit

Der Vergleich des 99,9% Quantils der empirischen Daten (Abbildung 4.32) mit dem 99,9% Quantil der geschätzten Weibullverteilung (Abbildung 4.36) zeigt, dass die Ergebnisse auf Basis der geschätzten Verteilung stabiler sind als die empirischen Daten. Bei der Bewertung des 99,9% Quantils, der Luftfeuchtigkeitssituation, wird die Schwankung besonders deutlich. Der Grund dafür liegt in der geringeren Menge der empirischen Daten gegenüber dem gesamten Datensatz. Daraus folgt, dass die Bewertung der Ergebnisse, der Tagesmittelwerte und der maximalen Windgeschwindigkeit auf Basis der geschätzten Weibullverteilung vorgenommen wird.

Beim Vergleich der zwei Bewertungsparameter Median und Mittelwert zeigt sich für die geschätzte Weibullverteilung, dass die Änderung des Medianwertes gegenüber der Änderung des Mittelwertes sehr ähnliche Ergebnisse liefert. Deutlich wird der Zusammenhang beim Vergleich der Abbildung 4.33 mit der Abbildung 9.7. In der Windenergie ist eine Bewertung der mittleren Windgeschwindigkeit üblich. Die Auswertung der mittleren Windgeschwindigkeit wird in der weiteren Bewertung den Ergebnissen der Median Auswertung vorgezogen.

5.1.1 Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit

Abbildung 4.33 zeigt die Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit für die „Winter-Situation“. Hier wird deutlich, dass die mittlere Windgeschwindigkeit der Wintermonate, bei fast allen betrachteten Standorten, höher ausfällt als die mittlere Windgeschwindigkeit des Jahresmittels. Dies Begründet sich aus der Wahl des Bewertungszeitraums. Mit der Wahl des Zeitraums von Oktober bis März wird der komplette Sommer nicht mit berücksichtigt. Das heißt, die vorrangig im Herbst auftretenden Stürme werden

durch die eher windschwächeren Sommermonate nicht ausgeglichen. Eine Abweichung von diesem Ergebnis ist nur beim Standort Obersdorf beobachtet worden.

In Tabelle 5.1 sind die wichtigsten Änderungsparameter ausgewiesen, welche die Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit aus Abbildung 4.33 beschreiben. Der Standort Obersdorf wurde in dieser Auswertung nicht mit berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die mittlere Windgeschwindigkeit im Winter im Durchschnitt ca. 10% höher ist als die mittlere Windgeschwindigkeit des Jahresmittels. Da die Windgeschwindigkeit mit der dritten Potenz in die Berechnung der im Wind enthaltenen Leistung eingeht (siehe Gleichung (3.3)), lässt sich eine höhere Priorität der Wintermonate für die Nutzung der Windenergie ableiten.

Parameter	Änderung [%]	Standort
Maximum	19,32	Görlitz
Mittelwert	10,26	-
Minimum	4,25	Kempten

Tabelle 5.1: Änderungsparameter, mittleren Windgeschwindigkeit, Situation-Winter

Für die Auswertung des 99,9% Quantils ergibt sich, wie in Abbildung 4.34 zu sehen ist, ein ähnliches Bild wie bei der Auswertung der mittleren Windgeschwindigkeit der Wintermonate. Tabelle 5.2 zeigt die wichtigsten Änderungsparameter des 99,9% Quantils.

Parameter	Änderung [%]	Standort
Maximum	21,36	Lahr
Mittelwert	12,66	-
Minimum	4,77	Fehmarn

Tabelle 5.2: Änderungsparameter, 99,9% Quantil, Situation-Winter

Für die Temperatur-Situation ist, bezüglich der ausgewerteten Tagesmittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeiten, keine eindeutige Aussage abzuleiten. In Abbildung 9.3 bis 9.5 sowie Abbildung 9.8 bis 9.10 zeigt sich kein aussagekräftiges Verhalten der Änderungen. Daraus folgt, dass die Auswertung der Temperatur-Situation keine weiterführenden Erkenntnisse liefert. Es können keine Aussagen bezüglich der Windgeschwindigkeit bei Vereisungsbedingungen auf Basis der Temperatur-Situation getroffen werden. Aus diesem Grund wird die Temperatur-Situation, auch für die Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit, nicht weiter berücksichtigt.

In Abbildung 4.35 ist die Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit für die Luftfeuchtigkeits-Situation dargestellt, ausgewertet für die Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit der einzelnen Messstationen. Die Luftfeuchtigkeits-Situation repräsentiert die Bedingungen für Eisansatz (siehe Abschnitt 4.2). Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Windbedingungen an Vereisungstagen. In Abbildung 4.35 zeigt sich, dass die Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit von der Stationshöhe abhängig ist. Aus diesem Grund wird auf die Ergebnisse ein Höhenfilter angewendet, welcher alle Werte unterhalb von 500m über Normalnull auswählt. In Abbildung 4.35 liegen alle Werte Rechts vom Standort Augsburg innerhalb des Höhenfilters. Für die gefilterten Werte ergibt sich ein einheitliches Bild der Änderungen, mit Ausnahme des Standorts Helgoland. Für diesen Standort gelten, als Hochseestandort, andere Gesetzmäßigkeiten für die Abhängigkeit von Eisansatzbedingung und Windgeschwindigkeit, eine Höhenabhängigkeit ist hier nicht festzustellen. Aus diesem Grund wird der Standort Helgoland in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Tabelle 5.3 zeigt Mittel-, Maximal- und Minimalwert der Änderungen für die Stationen innerhalb des Höhenfilters. Daraus folgt, dass der Wind bei Eisansatzbedingungen für alle betrachteten Standorte unterhalb von 500 Höhenmetern, im Mittel um 17,29% abnimmt.

Parameter	Änderung [%]	Standort
Maximum	-30,68	Lahr
Mittelwert	-17,29	-
Minimum	-5,14	Arkona

Tabelle 5.3: *Änderungsparameter, mittlere Windgeschwindigkeit, Situation-Luftfeuchtigkeit*

In Abbildung 4.35 liegen 13 Standorte oberhalb von 500 Höhenmetern. Dabei zeigt sich bei 10 Standorten eine Erhöhung, bei zwei Standorten eine Abnahme und bei einem Standort gar keine Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit. Eine allgemein gültige Aussage über die Änderung der Windgeschwindigkeit bei Eisansatzbedingungen, für Standorte oberhalb von 500 Höhenmetern, ist auf Basis dieser Auswertung nicht möglich. Es ist nur eine Tendenz hin zu einer Erhöhung der Windgeschwindigkeiten bei Eisansatzbedingungen zu erkennen.

Abbildung 4.36 zeigt die Änderung des 99,9% Quantils für Eisansatzbedingungen. Standorte innerhalb des Höhenfilters weisen dieselbe Abnahme der Windgeschwindigkeit aus, wie die Auswertung der mittleren Windgeschwindigkeit in Abbildung 4.35. Die Auswertung des 99,9% Quantils unterstützt die Aussage, dass die Windgeschwindigkeit bei Eisansatzbedingungen abnimmt, wie sie auf Basis der mittleren Windgeschwindigkeit getroffen wurde. In Tabelle 5.4 sind Maximal-, Mittel- und Minimalwert der Änderungen für alle Standorte unterhalb von 500 Höhenmetern eingetragen.

Parameter	Änderung [%]	Standort
Maximum	-30,90	Berlin Tegel
Mittelwert	-15,93	-
Minimum	-3,32	Öhringen

Tabelle 5.4: Änderungsparameter, 99,9% Quantil, Situation-Luftfeuchtigkeit

5.1.2 Maximale Windgeschwindigkeit

Die Bewertung der maximalen Windgeschwindigkeit erfolgt auf Basis derselben Maßstäbe wie die Bewertung der mittleren Windgeschwindigkeit. Es wird für die mittlere maximale Windgeschwindigkeit und das 99,9% Quantil, die Änderungen die sich aus der geschätzten Weibullverteilung ergibt bewertet.

Eine Bewertung der mittleren maximalen Windgeschwindigkeit für die Winter-Situation ist nicht möglich. Die Ergebnisse der Änderungen ergeben kein eindeutiges Bild (siehe Abbildung 9.19). Die Auswertung des 99,9% Quantils liefert für die Winter-Situation ein klares Bild. An allen Standorten zeigt sich eine Erhöhung des 99,9%

Quantils der maximalen Windgeschwindigkeit, bezogen auf die Ganzjahresauswertung (siehe Abbildung 9.21). Daraus lässt sich ableiten, dass sich die höchsten Windgeschwindigkeiten im Winterhalbjahr befinden. Die Auswertung des 99,9% Quantils für die maximale Windgeschwindigkeit der Winter-Situation stützt die Ergebnisse der Wintersituation aus Abschnitt 5.1.1.

Für die Bewertung der Luftfeuchtigkeits-Situation, welche die Windgeschwindigkeit an potenziellen Eisbildungstagen repräsentiert, wird wie in Abschnitt 5.1.1 der Höhenfilter angewendet. Der Hochseestandort Helgoland wird ebenfalls aus der Bewertung genommen. Abbildung 4.39 zeigt, wie sich die mittlere maximale Windgeschwindigkeit an potenziellen Eisbildungstagen gegenüber dem Jahresmittelwert der maximalen Windgeschwindigkeit verhält. Hier zeigt sich dieselbe Änderung wie für die mittlere Windgeschwindigkeit der Tagesmittelwerte. An allen Standorten unterhalb von 500 Höhenmetern ist die mittlere maximale Windgeschwindigkeit bei Eisansatzbedingungen geringer gegenüber dem Jahresmittel. In Tabelle 5.5 sind die maximale, minimale und mittlere Änderung für die Standorte innerhalb des Höhenfilters eingetragen. Der Mittelwert der Änderung ergibt sich zu -22,42%. Er liegt damit in derselben Größenordnung wie die Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit der Tagesmittelwerte bei Eisansatzbedingungen (siehe Abschnitt 5.1.1).

Parameter	Änderung [%]	Standort
Maximum	-36,78	Mannheim
Mittelwert	-22,42	-
Minimum	-6,57	Arkona

Tabelle 5.5: *Änderungsparameter, mittlere maximalen Windgeschwindigkeit, Situation-Luftfeuchtigkeit (mW)*

Die Änderungen des 99,9% Quantils der maximalen Windgeschwindigkeiten sind in Abbildung 4.40 dargestellt. Es zeigt sich dieselbe Höhenabhängigkeit wie beim 99,9% Quantil der Tagesmittelwerte (siehe Abschnitt 5.1.1). Für alle Standorte unterhalb von 500 Höhenmetern, ausgenommen dem Standort Arkona, nimmt das 99,9% Quantil bei Eisansatzbedingungen ab. In Tabelle 5.6 ist die maximale, minimale und mittlere Änderung für die Standorte innerhalb des Höhenfilters eingetragen. Im Durchschnitt ergibt

sich eine Abnahme des 99,9% Quantils von 16,56%. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie die Änderung des 99,9% Quantils der Tagesmittelwerte.

Parameter	Änderung [%]	Standort
Maximum	-29,94	Lahr
Mittelwert	-16,56	
Minimum	-1,78	Öhringen

Tabelle 5.6: *Änderungsparameter, 99,9% Quantil, Situation-Luftfeuchtigkeit (mW)*

Für Standorte oberhalb von 500 Höhenmetern tendieren die Änderungen bei Eisansatzbedingungen zu einer Erhöhung der maximalen Windgeschwindigkeiten. Auf Basis der Auswertungen, die in Abbildung 4.39 und 4.40 dargestellt sind, ist keine eindeutige Aussage über die Windbedingungen an potentiellen Vereisungstagen oberhalb von 500 Höhenmetern möglich.

Die maximale Windgeschwindigkeit ist für Berechnung der größtmöglichen Flugweite eines Eisobjets die entscheidende Größe. Das Ergebnis der Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit an potentiellen Eistagen ist, dass die maximale Windgeschwindigkeit für Standorte unterhalb von 500 Höhenmetern bei Eisansatzbedingungen niedriger ist, als die maximale Windgeschwindigkeit bei Betrachtung des Jahresmittels.

5.2 Luftdichte

Aus der Gleichung (3.57) für die Luftdichte ergibt sich, dass die Dichte proportional zum Druck ist. Außerdem nimmt der Luftdruck mit zunehmender Höhe ab. Daraus ergibt sich, dass die Luftdichte von der Höhe des Standortes abhängt. Diese Höhenabhängigkeit ist in den Abbildung 4.41 bis 4.43 gut zu sehen. Für maximale, mittlere, und minimale Luftdichte nehmen die Werte mit steigender Höhe ab.

Auf die Auswertung der Luftdichte wird der Höhenfilter angewendet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 5.7 dargestellten Ergebnisse. Die maximale Luftdichte liegt im Bereich unterhalb von 500 Höhenmetern. Sie wurde am Standort Angermünde mit $1,41 \text{ kg/m}^3$ gemessen. Im Mittel liegt die Luftdichte unterhalb von 500 Höhenmetern bei $1,22 \text{ kg/m}^3$ und oberhalb bei $1,10 \text{ kg/m}^3$. Die niedrigste Luftdichte wurde oberhalb von 500 Höhenmetern auf der Zugspitze gemessen und lag bei $0,88 \text{ kg/m}^3$.

Höhenfilter	Parameter	Luftdichte [kg/m ³]	Standort	Höhe über NN [m]
Außerhalb	Maximum	1,31	Groß Arber	1456
Innerhalb	Maximum	1,41	Angermünde	72
Außerhalb	Mittelwert	1,10	-	-
Innerhalb	Mittelwert	1,22	-	-
Außerhalb	Minimum	0,88	Zugspitze	2980
Innerhalb	Minimum	1,10	Konstanz	459

Tabelle 5.7: Luftdichte (alle Daten)

Die Abbildung 4.44 bis 4.46 zeigen die Auswertungsergebnisse der Luftdichte für Eisansatzbedingungen. Auch hier ist deutlich die Höhenabhängigkeit der maximalen, mittleren und minimalen Luftdichte zu sehen. Aus diesem Grund wird für die Einordnung der Ergebnisse ebenfalls der Höhenfilter angewendet.

Aus der Auswertung der Luftdichte bei Eisansatzbedingungen, ergibt sich das in Tabelle 5.8 dargestellt Ergebnis. Die maximale Luftdichte liegt innerhalb des Höhenfilters, sie wurde am Standort Marnitz mit $1,35 \text{ kg/m}^3$ gemessen. Wie beim gesamten Datensatz wurde die niedrigste Luftdichte oberhalb von 500 Höhenmetern an der Zugspitze mit

0,89 kg/m³ detektiert. Die mittlere Luftdichte bei Eisansatzbedingungen wurde innerhalb des Höhenfilters zu 1,27 kg/m³ und oberhalb zu 1,13 kg/m³ berechnet. Aus dem Vergleich zwischen Tabelle 5.7 und 5.8 wird deutlich, dass die mittlere Luftdichte unterhalb von 500 Höhenmetern für die Auswertung bei Eisansatzbedingungen größer ist als beim gesamten Datensatz. Oberhalb von 500 Höhenmetern steigt die mittlere Luftdichte für Eisansatzbedingungen gegenüber dem gesamten Datensatz. Die minimale und maximale Luftdichte sinkt unterhalb von 500 Höhenmetern für Eisansatzbedingungen gegen über dem ganzen Datensatz. Für die Standorte oberhalb von 500 Höhenmetern ist keine klare Aussage möglich.

Höhenfilter	Parameter	Luftdichte [kg/m ³]	Standort	Höhe über NN [m]
Außerhalb	Maximum	1,27	Großer Arber	1446
Innerhalb	Maximum	1,35	Marnitz	81
Außerhalb	Mittelwert	1,13	-	-
Innerhalb	Mittelwert	1,27	-	-
Außerhalb	Minimum	0,89	Zugspitze	2964
Innerhalb	Minimum	0,91	Marnitz	81

Tabelle 5.8: Luftdichte (Luftfeuchtigkeit)

5.3 Vereisungstage

Für die Auswertung der potentiellen Vereisungstage pro Jahr, dargestellt in Abbildung 4.47, ergibt sich für die Messstationen unterhalb von 500 Höhenmetern ein einheitliches Bild. Bei der Bewertung der Ergebnisse wurde der Hochseestandort Helgoland nicht mit berücksichtigt. Auffällig ist der Maximal Wert der Vereisungstage mit 59 Tagen pro Jahr am Standort Hamburg-Fuhlsbüttel, hier wurde eher eine mittlere Anzahl der Vereisungstage erwartet. Der Mittelwert der Vereisungstage pro Jahr liegt für die Standorte unterhalb von 500 Höhenmetern bei 24 Tagen. Die wenigsten Vereisungstage wurden am Standort Düsseldorf detektiert.

Für die Standorte oberhalb von 500 Höhenmetern schwanken die Werte stark. Es ist eine Tendenz hin zu mehr Vereisungstagen pro Jahr zu erkennen, je höher der Standort liegt. Eine eindeutige Aussage lassen die Messwerte aber nicht zu. Es kann nur vermutet werden, dass die Vereisungstage mit der Höhe zunehmen. Hier sind für jeden Standort die lokalen Bedingungen zu bewerten.

Die potenziellen Vereisungstage geben einen Anhaltspunkt, wie oft im Jahr Eisansatzbedingungen an einem Standort vorliegen. Vergleicht man die Anzahl der Vereisungstage mit der Europäischen Eiskarte (siehe Abbildung 3.4), so fällt auf, dass die Ergebnisse voneinander abweichen. Dies begründet sich mit der unterschiedlichen Auswahl der Vereisungstage, bei der Europäischen Eiskarte wurden neben der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit auch die Wolkenhöhe und die Windgeschwindigkeit mit berücksichtigt. Angaben zu Wolkenhöhen sind für die ausgewerteten Standorte in den freien Wetterdaten des DWD nicht verfügbar.

Höhenfilter	Parameter	Vereisungstage	Standort	Höhe über NN [m]
Außerhalb	Maximum	120	Brocken	1169
Innerhalb	Maximum	59	Hamburg-Fuhlsbüttel	11
Außerhalb	Mittelwert	73	-	-
Innerhalb	Mittelwert	24	-	-
Außerhalb	Minimum	25	Großer Arber	1456
Innerhalb	Minimum	8	Düsseldorf	47

Tabelle 5.9: Potentielle Vereisungstage

6 Fazit

Für Standorte unterhalb von 500 Höhenmetern ist eine eindeutige Aussage für die Änderung der Windgeschwindigkeit bei Eisansatzbedingungen möglich. Auch für die Anzahl der Vereisungstage konnte eine klare Aussage abgeleitet werden. Die Windgeschwindigkeit ist bei Eisansatzbedingungen geringer als der Ganzjahresmittelwert. Daraus folgt, dass die Verwendung der über das ganze Jahr gemittelten Verteilung für die Bewertung des Risikos des Eisabfalls konservative Ergebnisse liefert.

Bei Standorte oberhalb von 500 Höhenmetern war für die Windbedingungen an Vereisungstagen und die Anzahl der Vereisungstage keine eindeutige Aussage möglich. Hier müssen die einzelnen Standorte bezüglich der lokalen orografischen und meteorologischen Bedingungen gesondert bewertet werden. Eine genaue Analyse der Standorte oberhalb von 500 Höhenmetern war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Aus der Diskussion der Ergebnisse ergibt sich für die Auswertung der einzelnen Bewertungsparameter mittlere Windgeschwindigkeit und 99,9% Quantil ein ähnliches Bild. Dasselbe gilt für den Vergleich zwischen empirischer und theoretischer Verteilung. Die theoretische Verteilung ist stabiler gegenüber extremen Werten bei Datensätzen mit geringerer Messwertanzahl. Für eine schnelle Abschätzung der Windbedingungen an Vereisungstagen ist der empirische Mittelwert gut zu gebrauchen. Die Extremwertabweichungen fallen erst bei der Betrachtung der Randbereiche der Verteilung ins Gewicht. Liegen für einen Standort keine Messungen vor, sondern es sind nur die A- und k-Parameter der Weibullverteilung bekannt, so ist auf dieser Basis eine gute Aussage über die Windbedingungen am Standort möglich, die mit den Messwerten am Standort im Einklang steht.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die ausgewerteten Windgeschwindigkeiten in wenigen Metern über dem Boden gemessen wurden. Für Übertragung der Ergebnisse auf WEA-Höhe sind weiterführenden Untersuchungen nötig. Hierfür wären Messungen der meteorologischen Parameter auf Höhe der WEA hilfreich. Solche Daten liegen allerdings nur den Betreibern von WEA vor und sind kein frei zugängliches Datenmaterial.

Während der Arbeit hat sich gezeigt, dass beim Vergleich von Auswertungen der empirischen Windverteilung, auf Basis von Tagesmittelwerten und Stundenmittelwerten ein Unterschied besteht. Wird die Weibullverteilung einmal auf Basis der Tagessmittelwer-

te und einmal aus den Stundenmittelwerten geschätzt, so stimmen die mittlere Windgeschwindigkeit und der A-Parameter gut überein. Der k-Parameter wird allerdings, bei der Auswertung der Tagesmittelwerte gegen über der Auswertung der Stundenmittelwerte, überschätzt. Die Begründung liegt hier im Filterverhalten der Tagesmittelung, gegen über den Stundenmittelwerten. Bei der Bildung der Tagesmittelwerte, werden hohe und niedrige Windgeschwindigkeiten raus gemittelt. An diesem Punkt kann eine weiterführende Untersuchung mit höher aufgelösten Daten die Ergebnisse dieser Arbeit Verfeinern.

7 Zusammenfassung

Mit der wachsenden Bedeutung der Windenergie in Deutschland hat der Ausbau an Land ein Volumen erreicht durch das windreiche Standorte knapp werden. Immer öfter finden sich Windenergieanlagen in unmittelbarer Umgebung von Straßen oder auf Betriebsgeländen von Industriebetrieben. Hier besteht im Winter eine Gefahr durch herabfallende Eisstücke. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Frage beantwortet, wie sich die Windbedingungen bei Eisansatz gegenüber dem Ganzjahresmittelwert, verändern. Für die Analyse wurden, über ganz Deutschland verteilt, mehrere Wetterstationen ausgewertet. Das Ergebnis ist eindeutig für Standorte, die unterhalb von 500 Höhenmetern liegen. Bei diesen Standorten ist die Windgeschwindigkeit bei Eisansatzbedingungen geringer als das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit. Daraus folgt, dass die Verwendung des Jahresmittels für die Bewertung der Flugweite von Eisansatz, eine eher konservative Annahme ist. Oberhalb von 500 Höhenmetern ist keine klare Aussage zur Veränderung der Windbedingungen an Vereisungstagen möglich.

8 Literaturangaben

- /1/ Hau, E.; Windkraftanlagen, Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit; 4. Vollständig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, München April 2008
- /2/ Heier, S.; Windkraftanlagen Systemauslegung, Netzintegration und Regelung; 5. Auflage, Vieweg und Teubner, Wiesbaden 2009
- /3/ Hauschild, Dr.-Ing. J., Böhme, Dr. rer. nat. E., Raupach, Dipl.-Ing. O.; Monte-Carlo-Simulation zur proballistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen, Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage; VDI Bericht 2146, 25. Fachtagung Technische Zuverlässigkeit 2011
- /4/ www.dwd.de; Deutscher Wetterdienst, frei verfügbare Wetterdaten, Stand: 20.02.2012
- /5/ Greulich, W.; Lexikon der Physik, zweiter Band; Spektrum Akademischer Verlag, 1999 Heidelberg
- /6/ Meschede, D.; Gerthsen Physik; 24. überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2010
- /7/ Atkins, P. W., Beran, J. A.; Chemie einfach alles; 2. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1998
- /8/ ISO 12949: Atmospheric Icing of Structures (IW AIS 2005). Montreal, Canada, June 2005
- /9/ Cost-727, Atmospheric Icing on Structures: 2006, Measurements and data collection on icing: State of the Art; Publication of MeteoSwiss, 75, 110pp., Schweiz, Zürich 2007
- /10/ Warneck, G.; Meteorologie und Umwelt: Eine Einführung; 2. bearbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin, Springer-Verlag 1997
- /11/ Seifert, H., Tammelin, B.; Icing of Wind Turbines; Jou2-CT93-0366, Joul II Wind Energy Joint Meeting in Havell, Oxfordshire 1994
- /12/ Tammelin, B., Cavaliere, M., Holttinen, H., Morgan, C., Seifert, H., Säntti, K.; Wind Engery Production in Cold Climate (WECO); Finnish Meteorological Institute, Finnland Dezember 1998
- /13/ Laasko, T., Ronsten, G., Tallhaug, L., Horbaty, R., Baring-Glound,I., Lacroix, A., Peltola, E., Durstewitz, M., Wallenius, T.; State-of-the-art of wind energy in cold climates; VTT Technical Research Center of Finnland, Oktober 2010
- /14/ Seifert, H.; Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen, Ergebnisse und Empfehlungen aus einem EU – Forschungsprojekt; DEWI, Wilhelmshaven, Oktober 1999
- /15/ BOKU-Met; Pospichal, B., Formayer, H.; Bedingungen für Eisansatz an Windkraftanlagen in Nordösterreich, Meteorologische Bedingungen und klimatologische Betrachtungen; Universität für Bodenkulturen Wien, August 2010

-
- /16/ Seifert H.; Eiszeit am Standort, Ice Conditions for Wind Turbines; DEWI Wilhelmshaven, DEWI Magazin Nr. 26, Februar 2005
- /17/ Foken, T.; Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden; 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- /18/ Laasko, T., Holttinen, H., Ronsten, G., Tallhaug, L., Horbaty, R., Baring-Glud, I., Lacroix, A., Peltola, E., Tammelin, B.; State-of-the-art of wind energy in cold climates; April 2003
- /19/ Linjequist, G. H., Cehak, K.; Allgemeine Meteorologie; 3. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig 1984
- /20/ Seifert, H.; Technical Requirements for Rotor Blades Operating in Cold Climate; BOREAS VI, 9 to 11 April 2003, Pyhä, Finland
- /21/ Bertsche, B., Lechner, G.; Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau, Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten; Springer Verlag, 3. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart 2004
- /22/ Meyna, A., Pauli, B.; Zuverlässigkeitstechnik Quantitative Bewertungsverfahren; Carl Hanser Verlag München Wien, 2. Auflage, März 2010
- /23/ Kleppmann, W.; Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren; Hanser Verlag, München Mai 1998
- /24/ Papula, L.; Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3; 4. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden Mai 2001
- /25/ Nielsen, P.; WindPRO 2.7 Handbuch; EDM International A/S, 2. Auflage, Dänemark Oktober 2010
- /26/ Morgan, C., Bossanyi, E.; Wind Turbine Icing and Public Safety – A Quantifiable Risk?; Garrad Hassan and Partners Limited, Bristol UK
- /27/ Bamberg, G., Baur, F.; Statistik; 8. Auflage, Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschaft- und Sozialwissenschaft, Oldenbourg 1993
- /28/ Germanischer Lloyd; Vorschriften und Richtlinien Industriedienst IV, Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen; Hamburg, Juli 2010
- /29/ Deutscher Wetterdienst; S. Traup, B. Kruse: Wind und Windenergiepotenziale in Deutschland - Winddaten für Windenergienutzer; Deutschland 1996
- /30/ Deutscher Wetterdienst; Sebecker, J., Deutschländer, Dr. T., Wichura, Dr. B., Behrens, U.; Winddaten für Windenergienutzer, 2. Auflage, Version 6, Potsdam Januar 2012
- /31/ World Meteorological Organisation; WMO Guide to Meteorological Instruments and Methodes of Observation; WMO No. 8, 7. Auflage, 2008, Genf, Schweiz
- /32/ Shigeo K.; The effect of airfoil motion on the shapes of ice acceration on an airfoile; BOREAS IV, 31 March - 2 April 1998; Hetta, Finland

9 Anhang

9.1 Ergebnisanhang

Im Ergebnisanhang werden die Auswertungsergebnisse aller untersuchten Standorte zusammengefasst, hier werden alle Ergebnisse die nicht im laufenden Text der Arbeit ausgewiesen wurden als Diagramme dargestellt. Für die Tagesmittelwerte und die maximalen Windgeschwindigkeiten sind die Auswertungen auf die einzelnen Situationen aufgeteilt.

9.1.1 Auswertung mittlere Windgeschwindigkeit

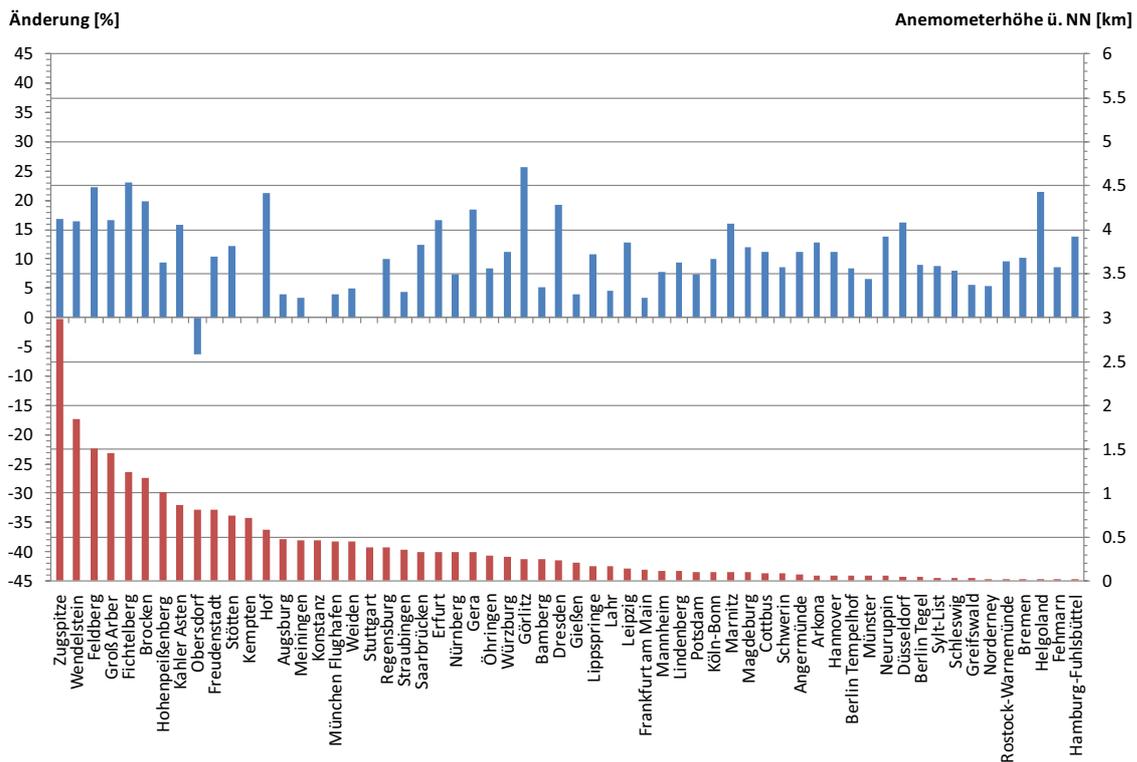


Abbildung 9.1: Winter, Median der Verteilung, empirische Daten

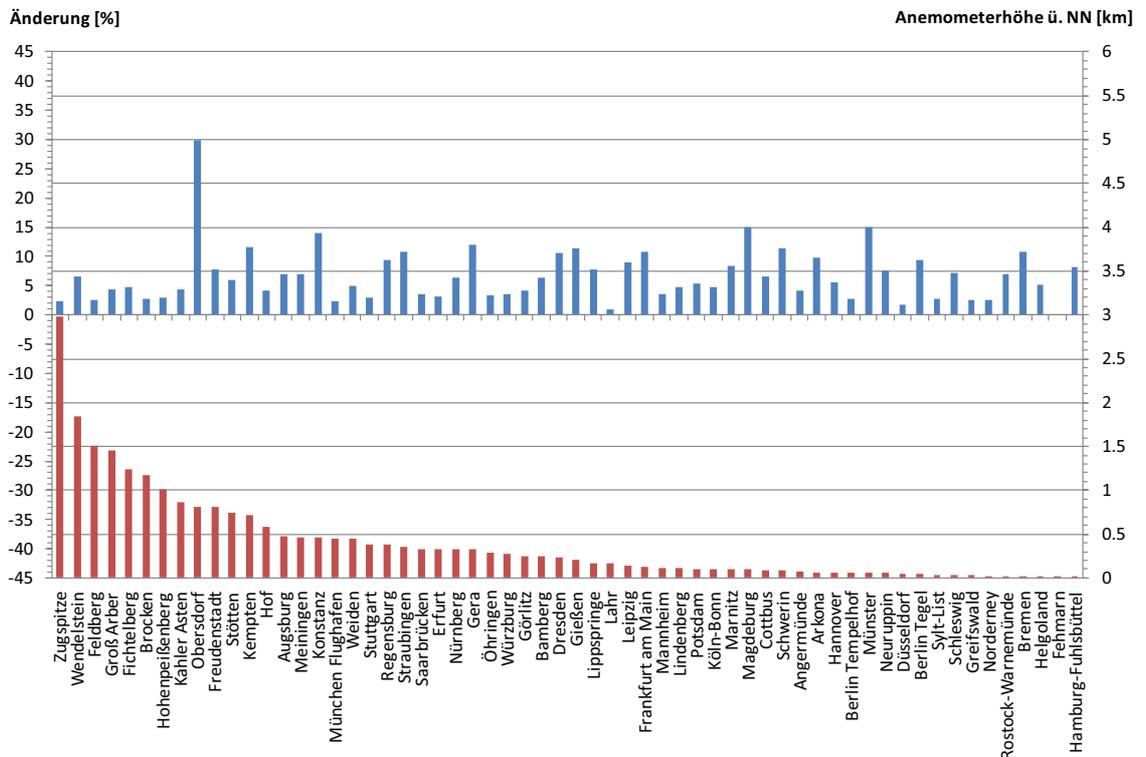


Abbildung 9.2: Winter, 99,9% Quantil, empirische Daten

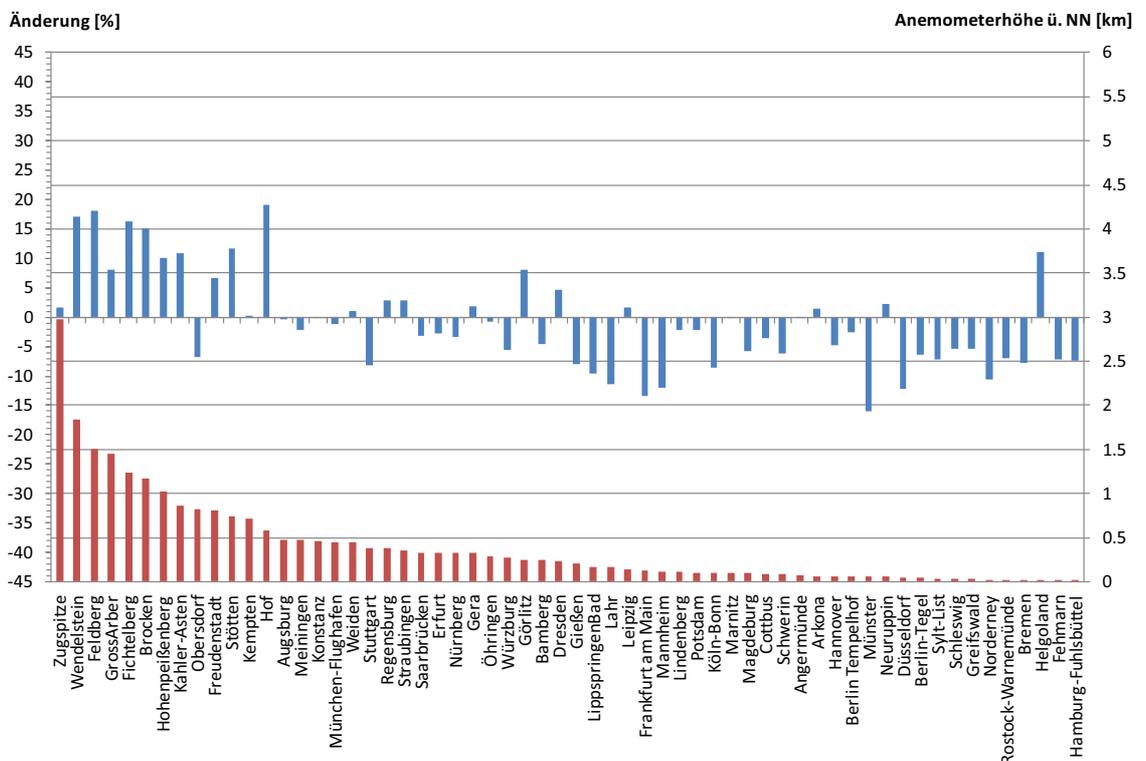


Abbildung 9.3: Temperatur, mittlere Windgeschwindigkeit, empirische Daten

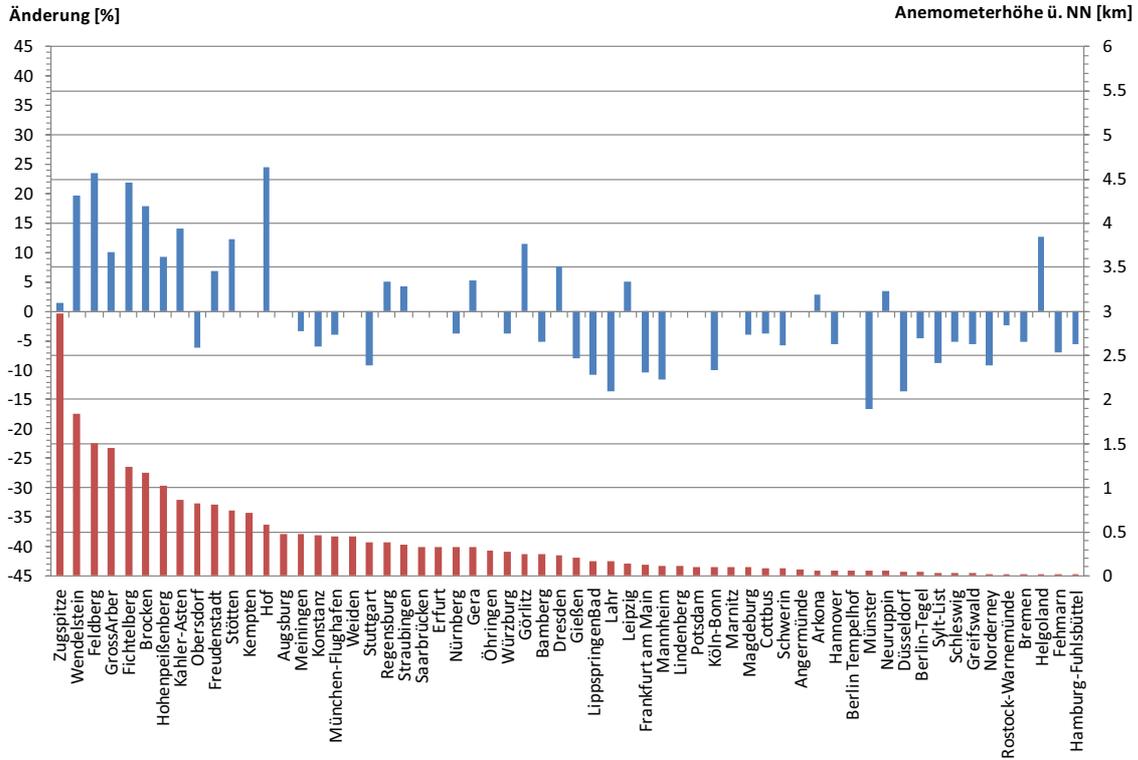


Abbildung 9.4: Temperatur, Median der Verteilung, empirische Daten

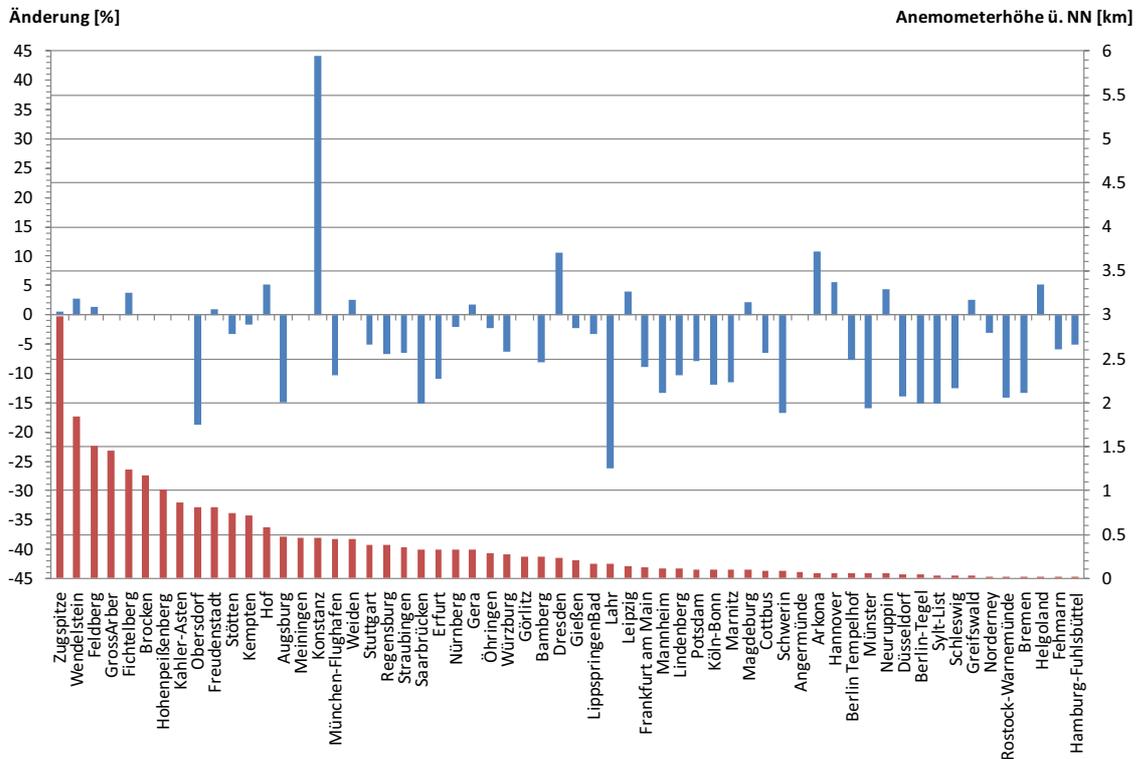


Abbildung 9.5: Temperatur, 99,9% Quantil, empirische Daten

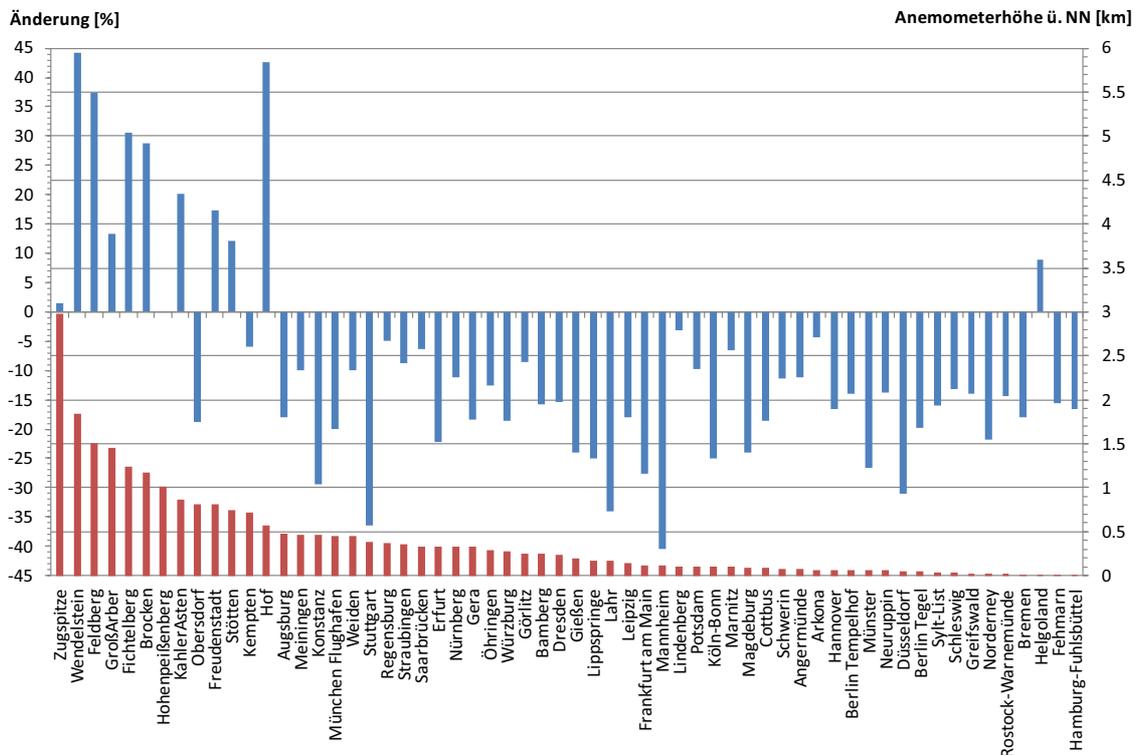


Abbildung 9.6: Luftfeuchtigkeit, Median der Verteilung, empirische Daten

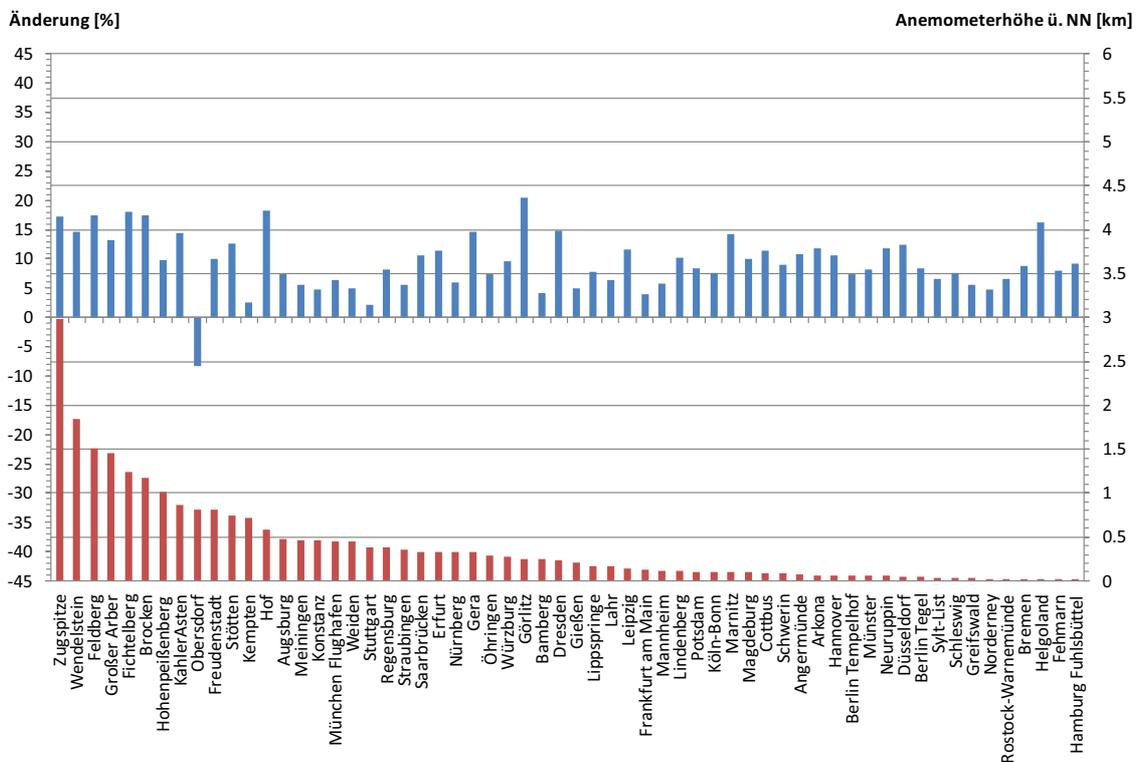


Abbildung 9.7: Winter, Median der Verteilung, geschätzte Weibullverteilung

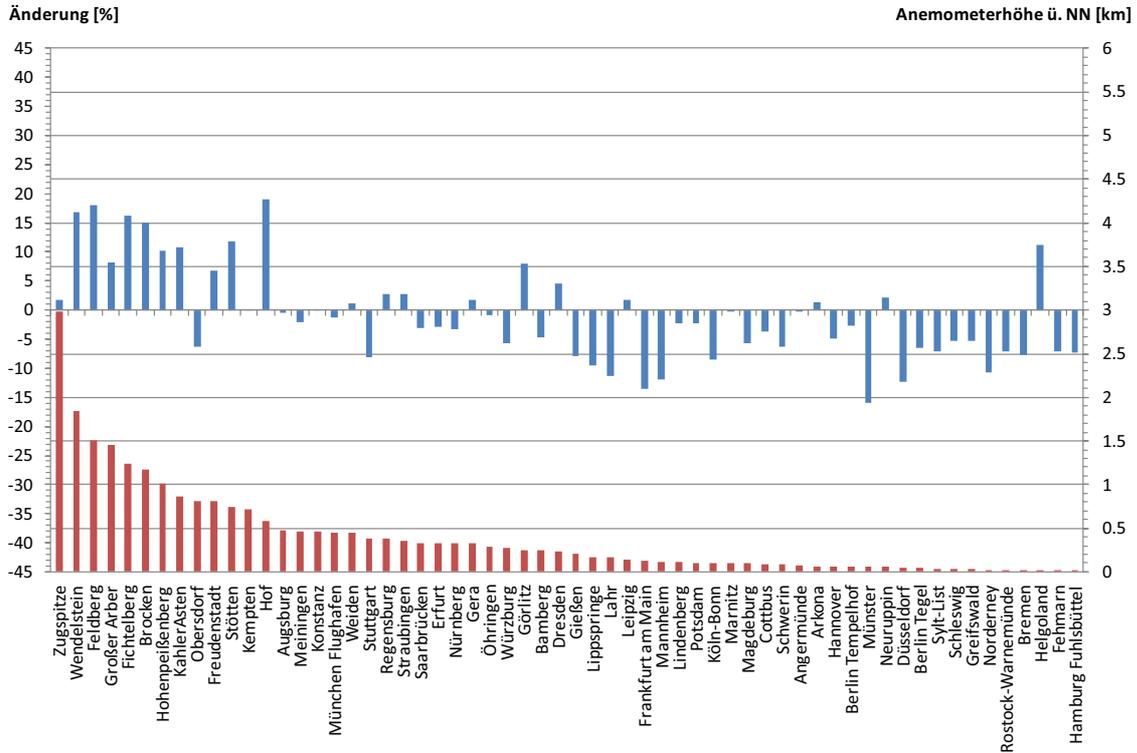


Abbildung 9.8: Temperatur, mittlere Windgeschwindigkeit, geschätzte Weibullverteilung

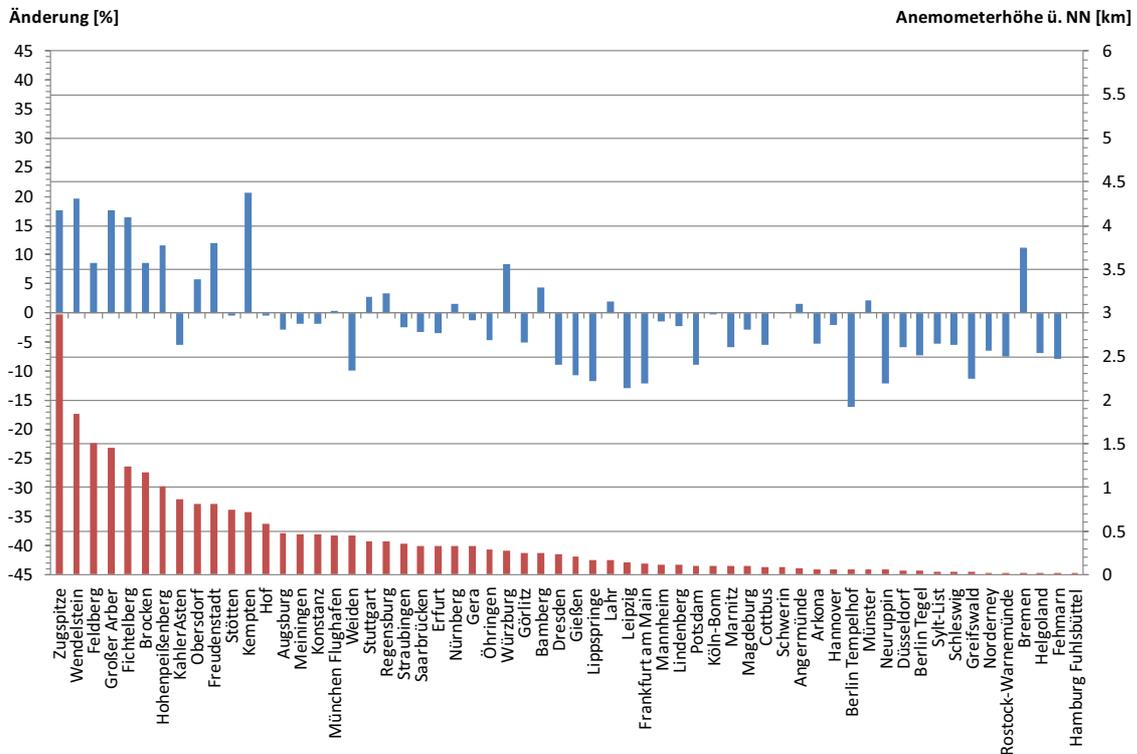


Abbildung 9.9: Temperatur, Median der Verteilung, geschätzte Weibullverteilung

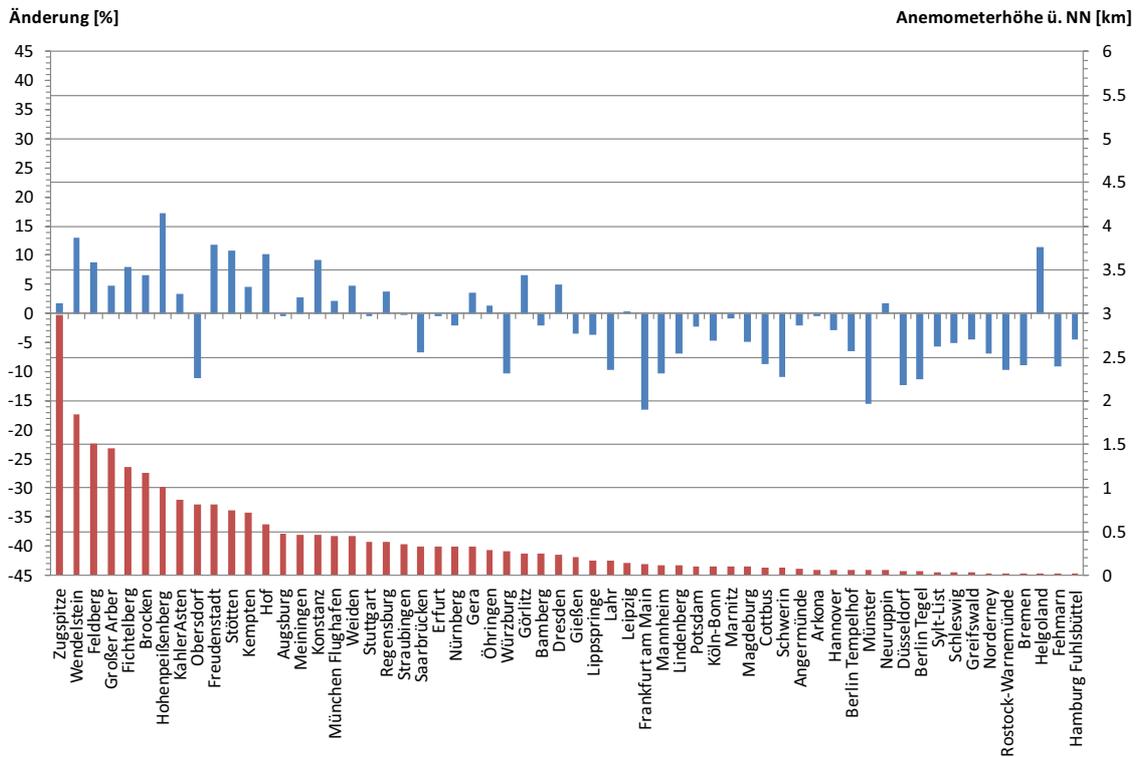


Abbildung 9.10: Temperatur, 99,9% Quantil, geschätzte Weibullverteilung

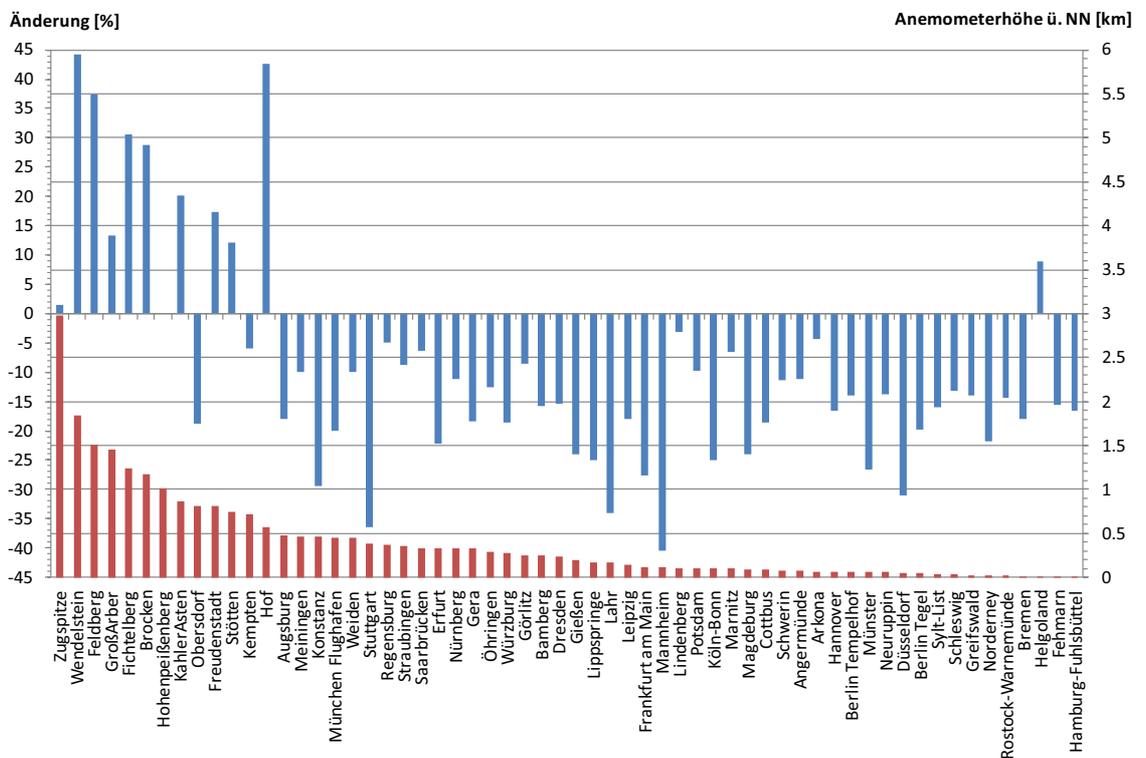


Abbildung 9.11: Luftfeuchtigkeit, Median der Verteilung, geschätzte Weibullverteilung

9.1.2 Auswertung der maximalen Windgeschwindigkeit

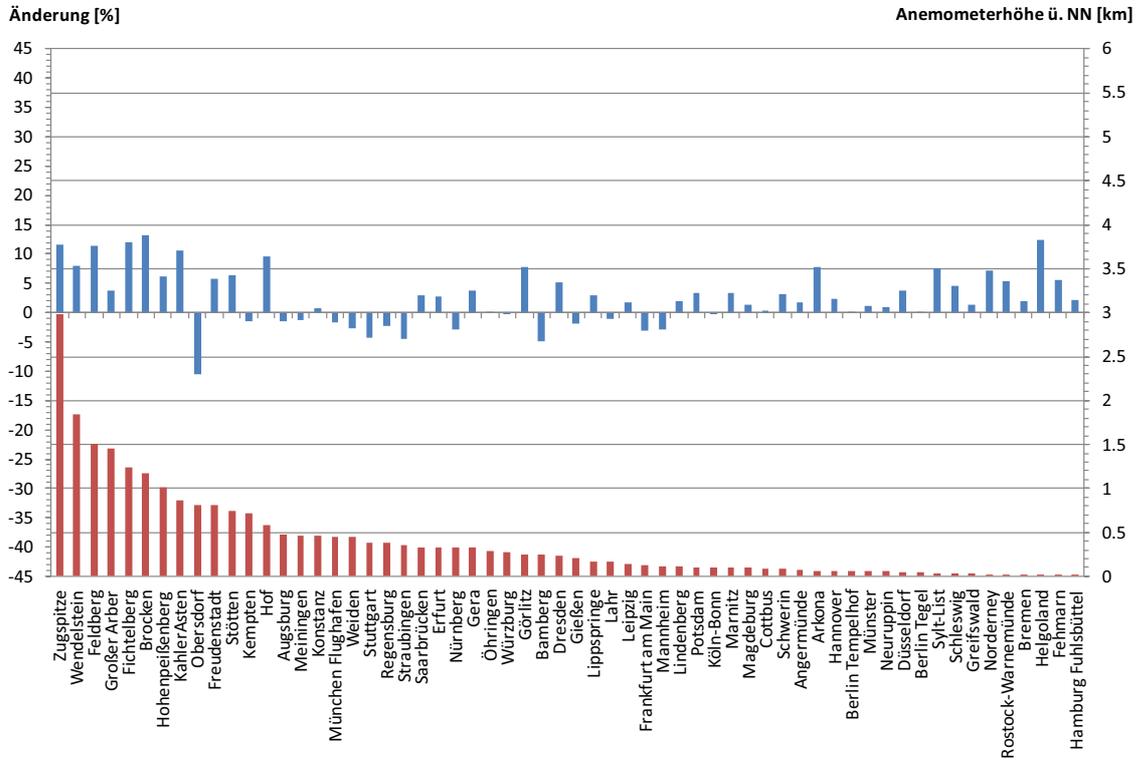


Abbildung 9.12: Winter, mittlere Windgeschwindigkeit, empirische Daten (mW)

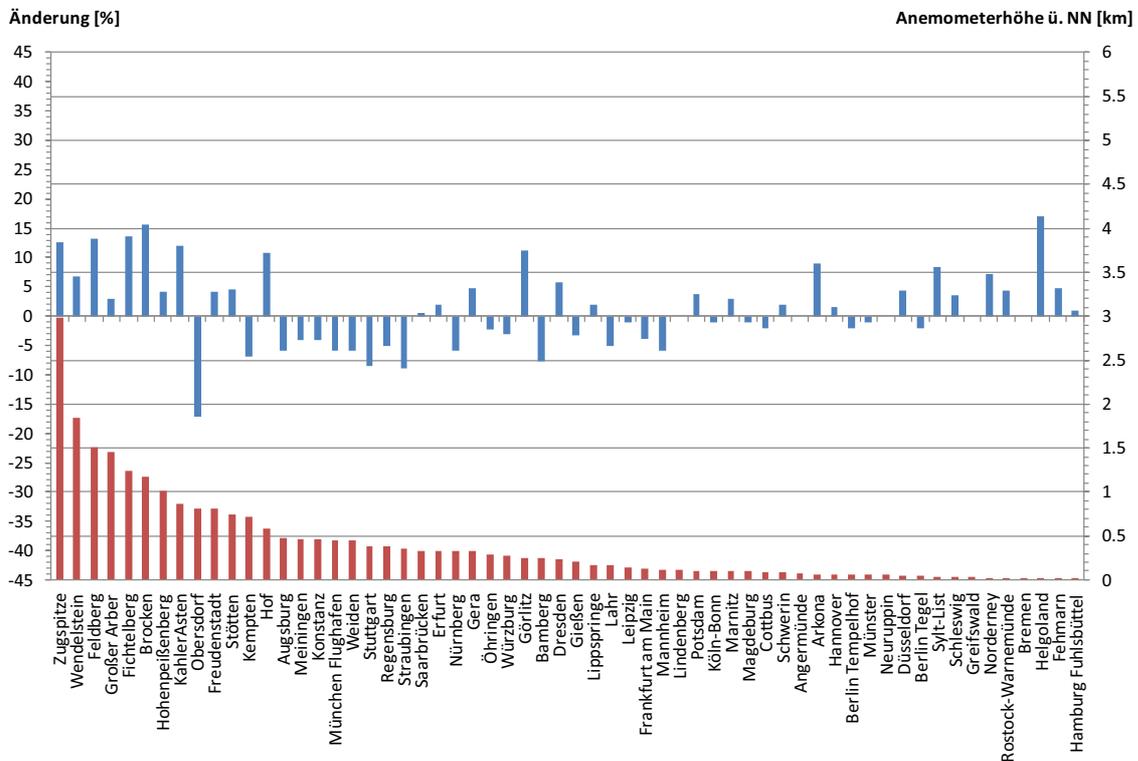


Abbildung 9.13: Winter, Median der Verteilung, empirische Daten (mW)

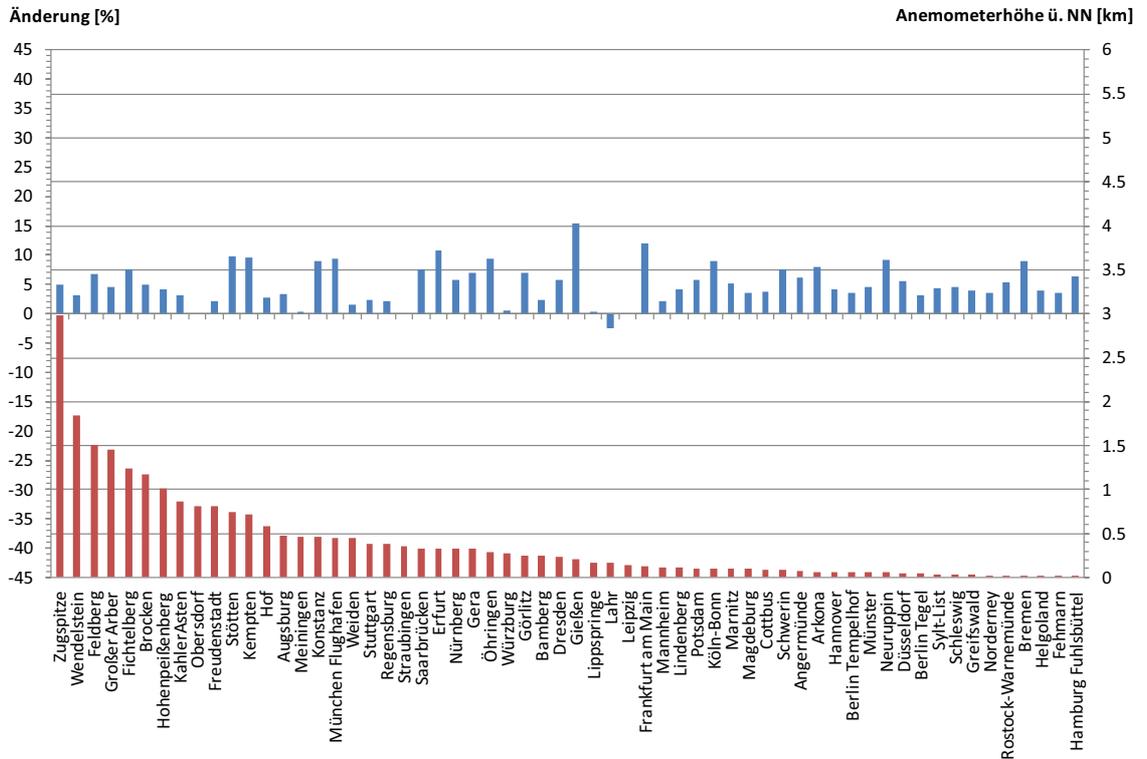


Abbildung 9.14: Winter, 99,9% Quantil, empirische Daten (mW)

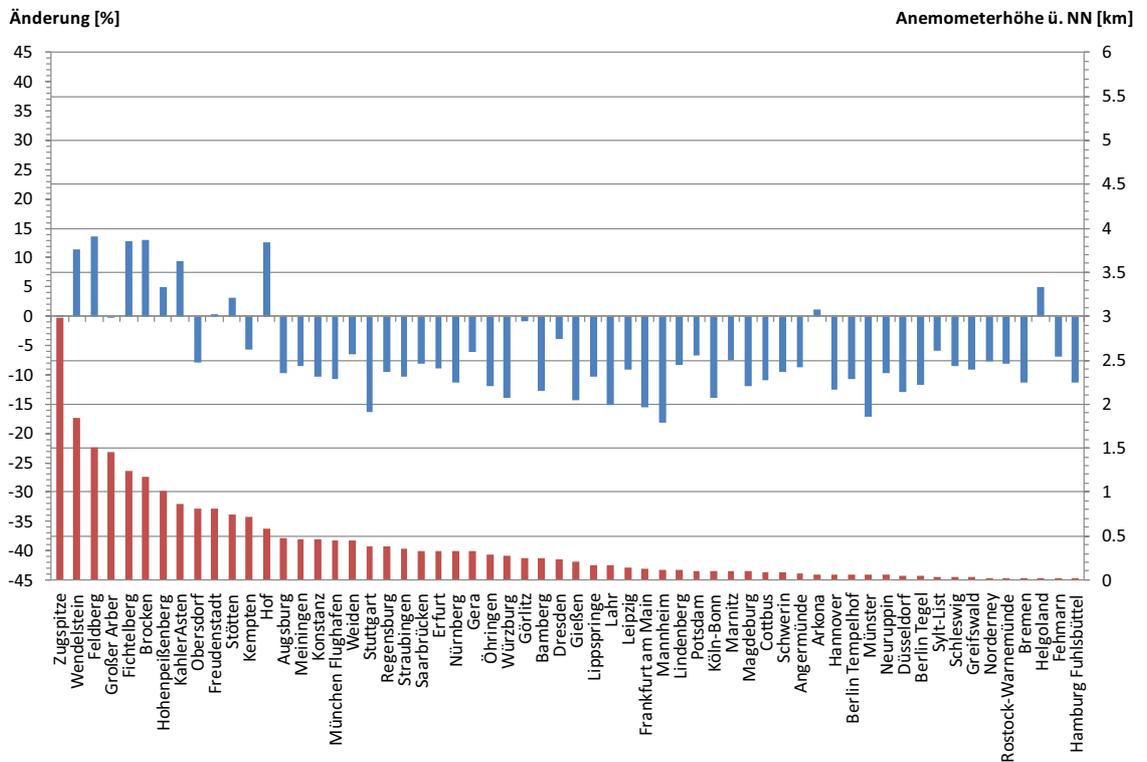


Abbildung 9.15: Temperatur, mittlere Windgeschwindigkeit, empirische Daten (mW)

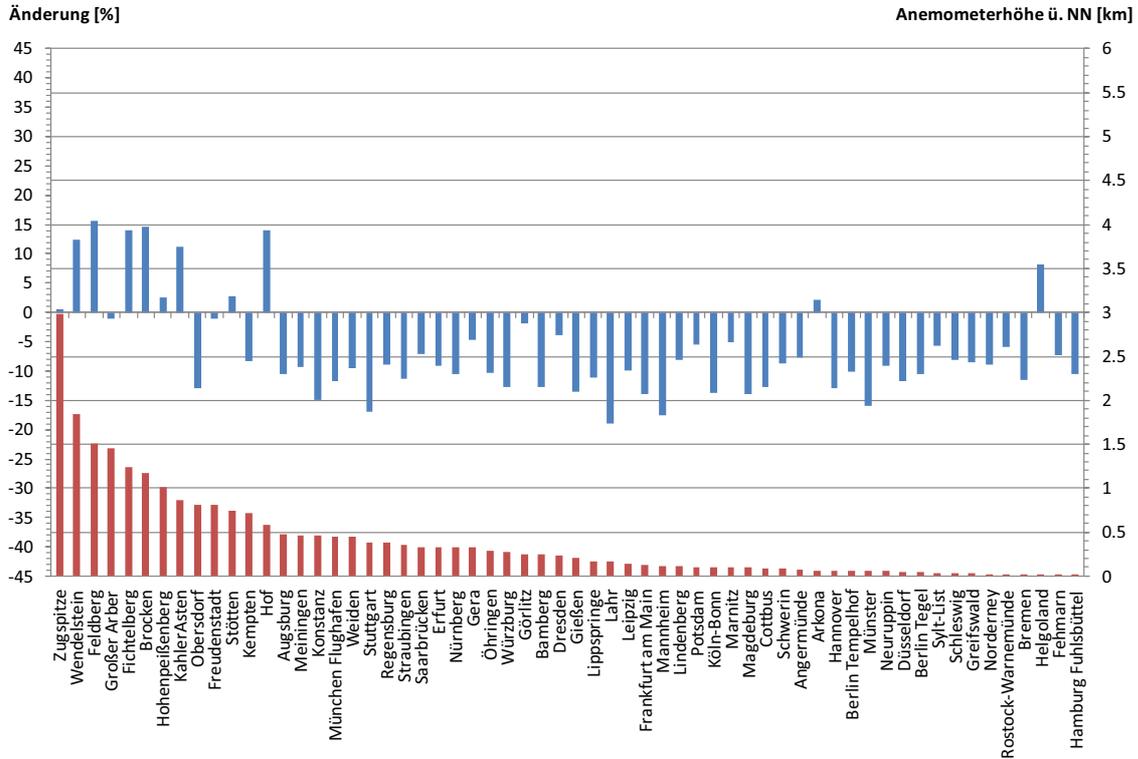


Abbildung 9.16: Temperatur, Median der Verteilung, empirische Daten (mW)

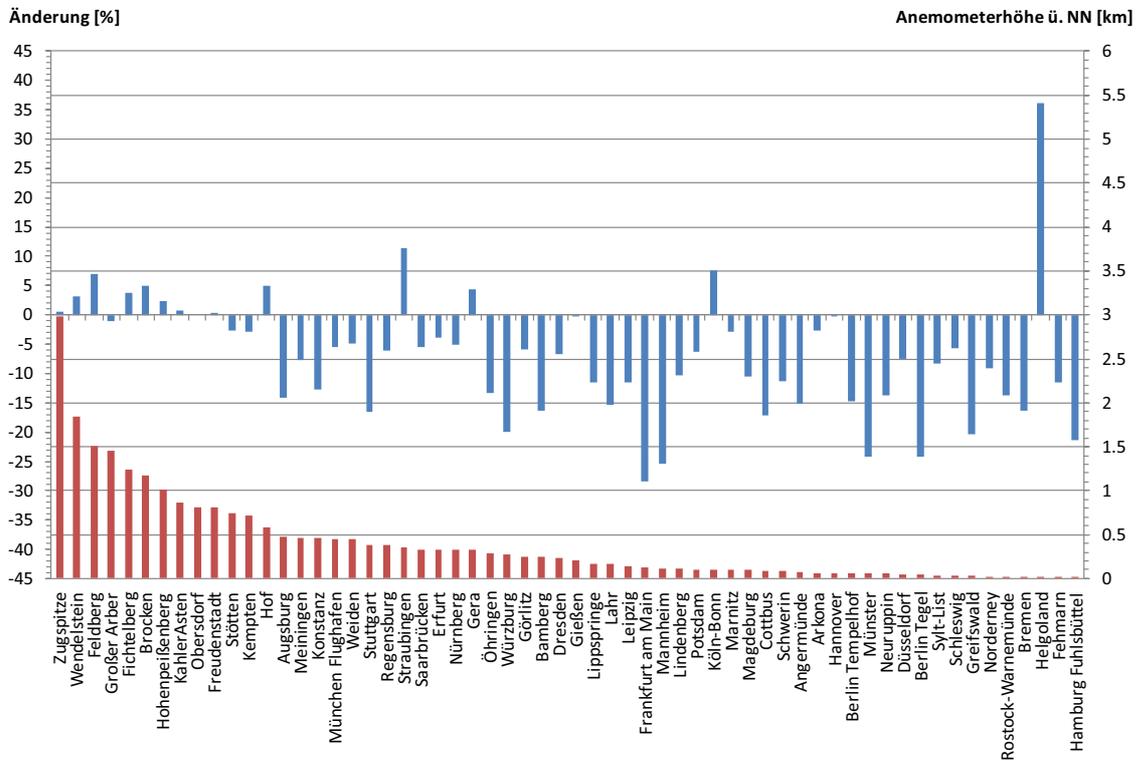


Abbildung 9.17: Temperatur, 99,9% Quantil, empirische Daten (mW)

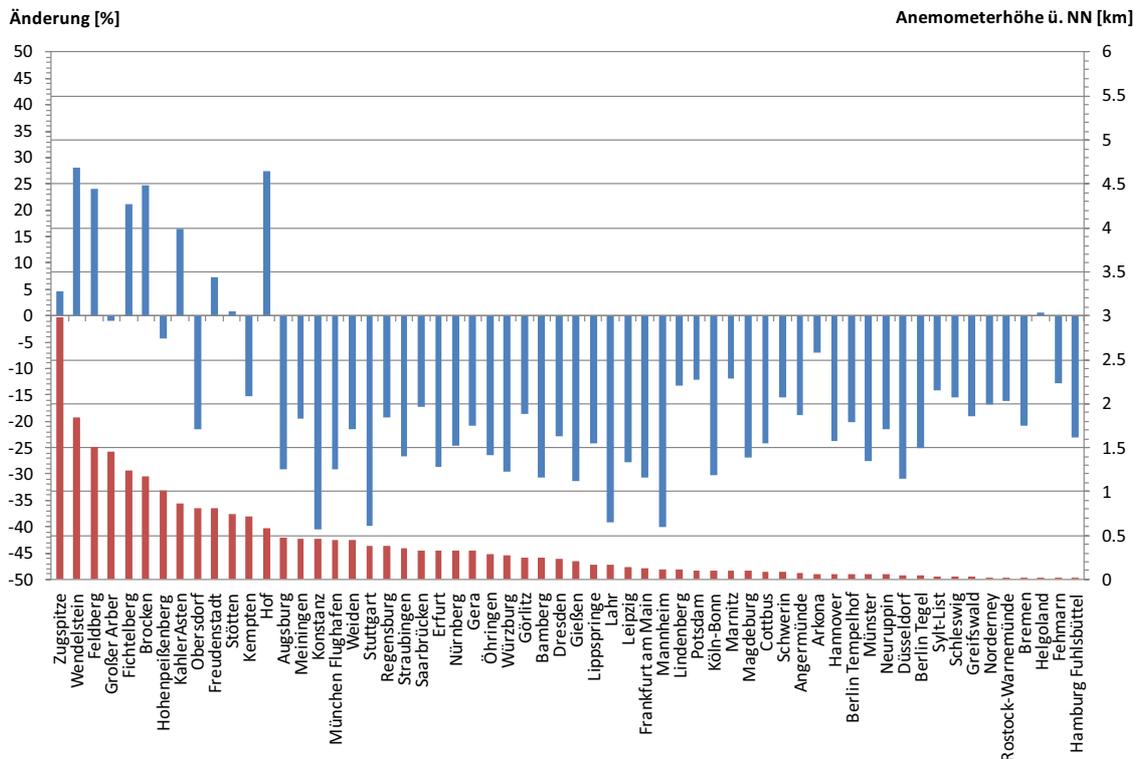


Abbildung 9.18: Luftfeuchtigkeit, Median der Verteilung, empirische Daten (mW)

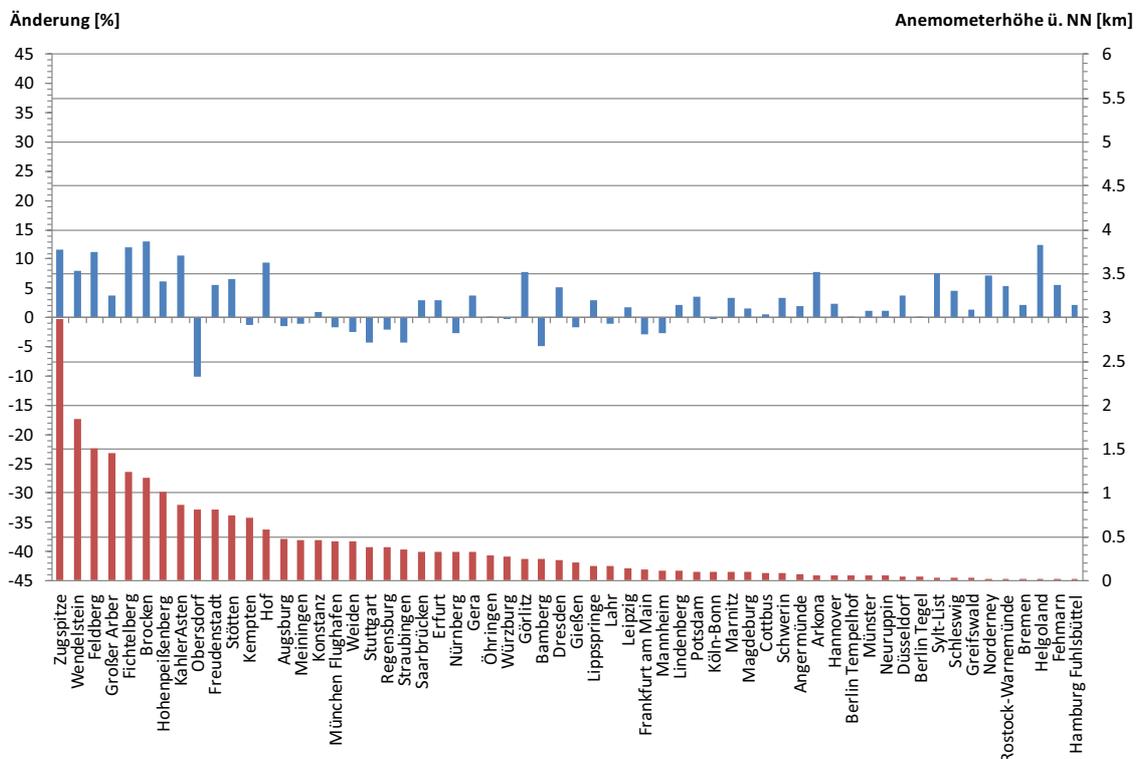


Abbildung 9.19: Winter, mittlere Windgeschwindigkeit, geschätzte Weibullverteilung (mW)

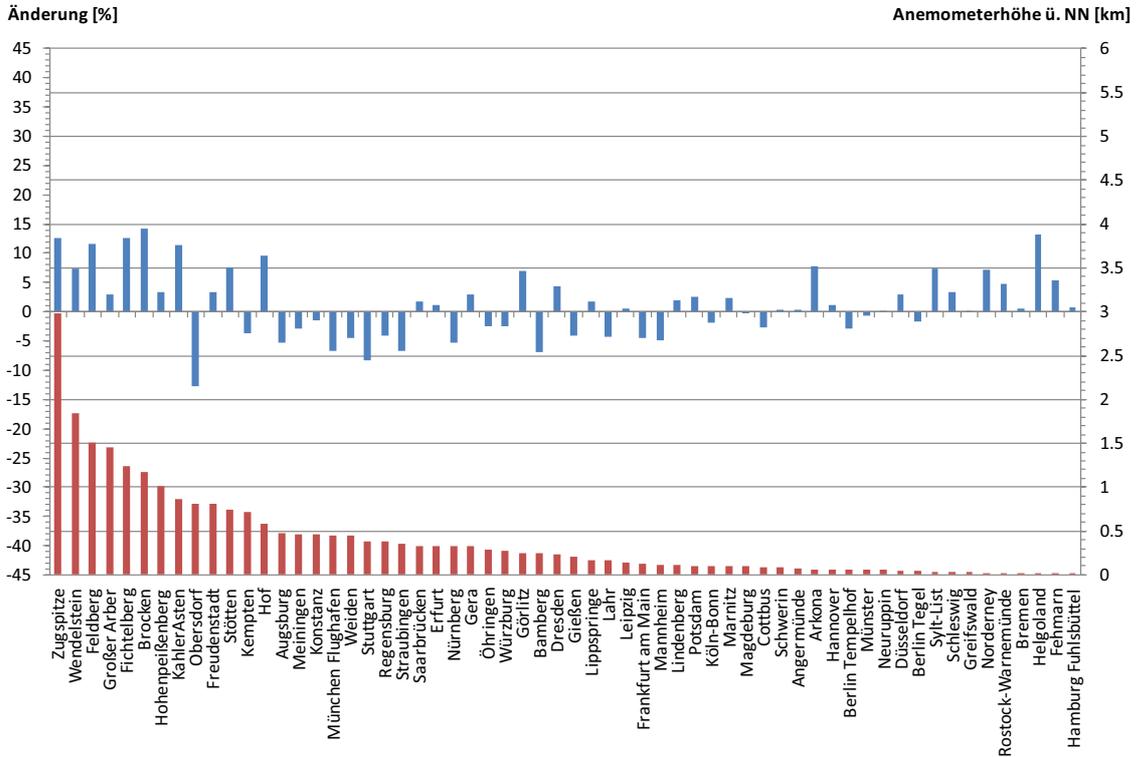


Abbildung 9.20: Winter, Median der Verteilung, geschätzte Weibullverteilung (mW)

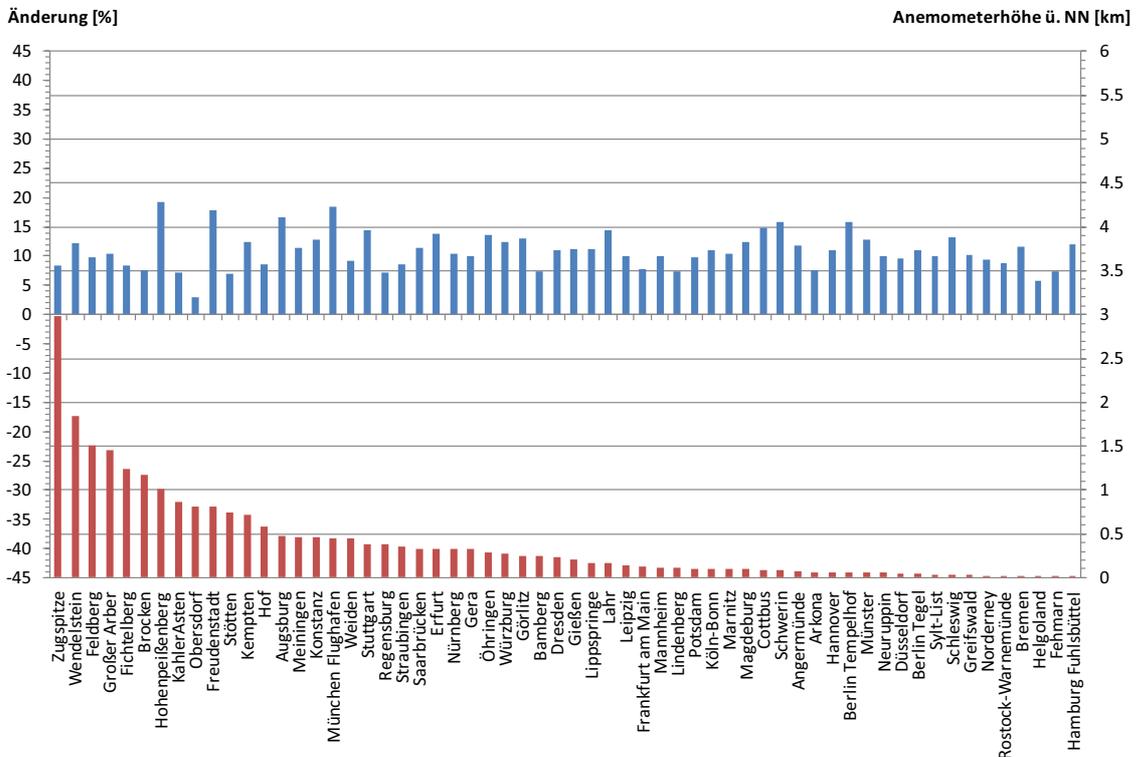


Abbildung 9.21: Winter, 99,9% Quantil, geschätzte Weibullverteilung (mW)

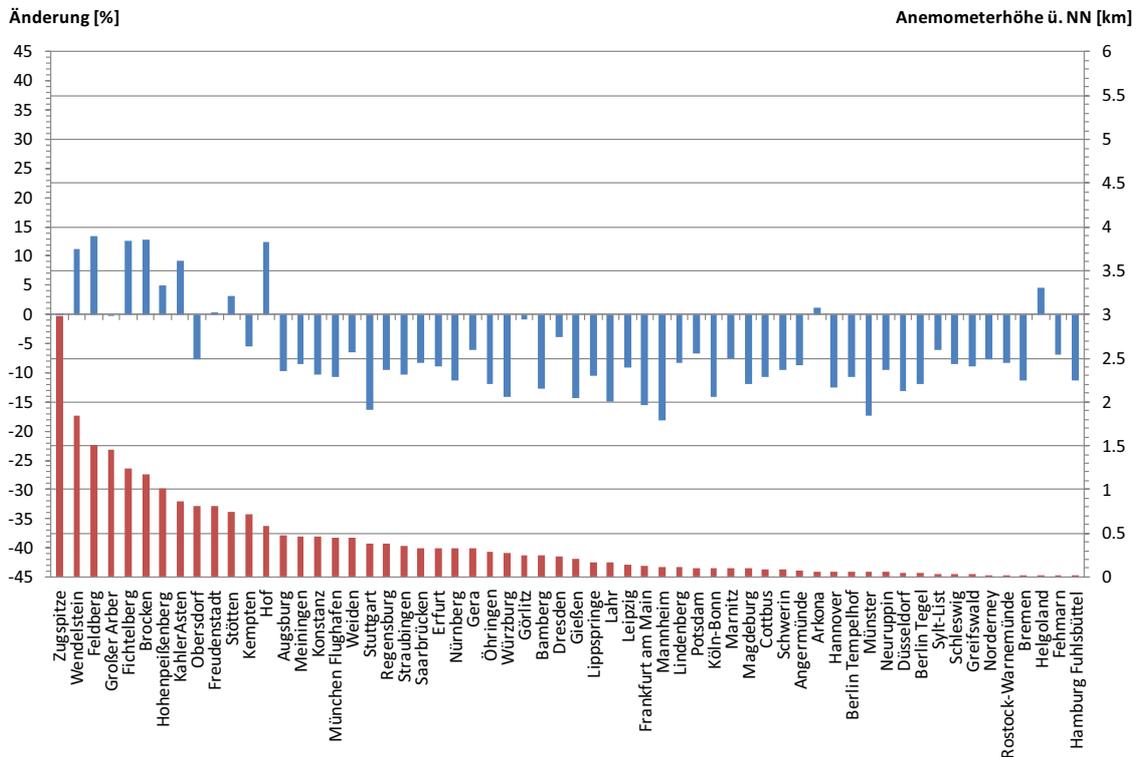


Abbildung 9.22: Temperatur, mittlere Windgeschwindigkeit, geschätzte Weibullverteilung (mW)

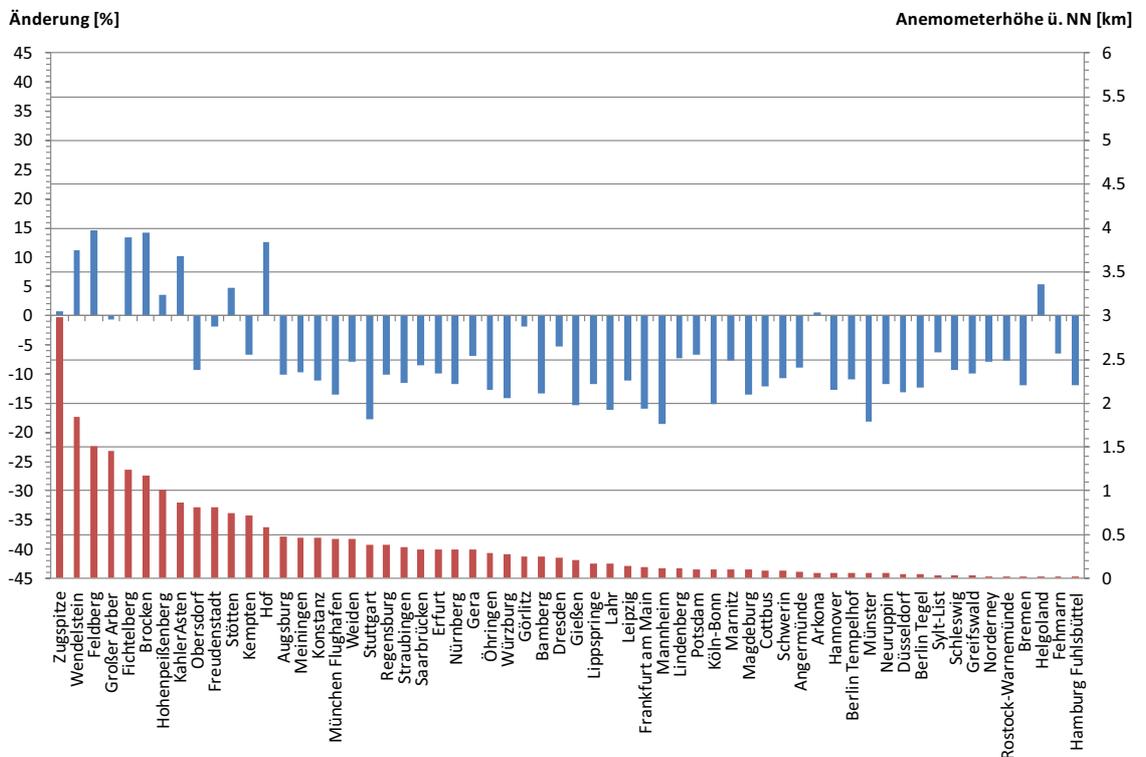


Abbildung 9.23: Temperatur, Median der Verteilung, geschätzte Weibullverteilung (mW)

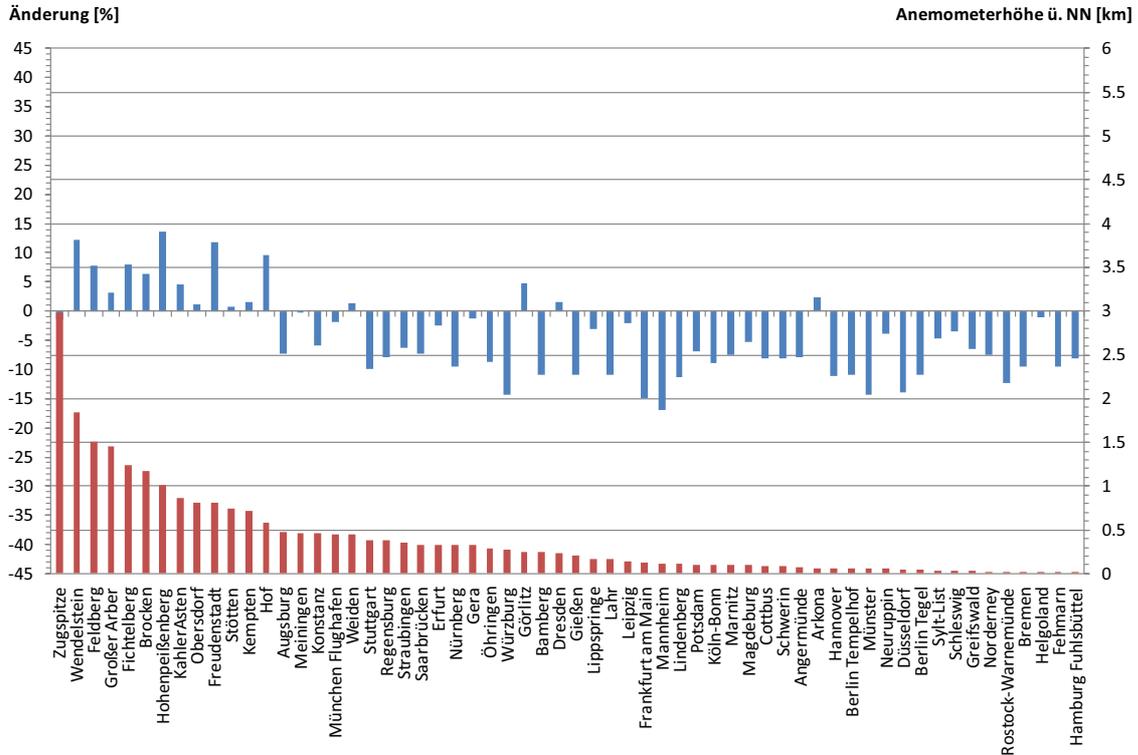


Abbildung 9.24: Temperatur, 99,9% Quantil, geschätzte Weibullverteilung (mW)

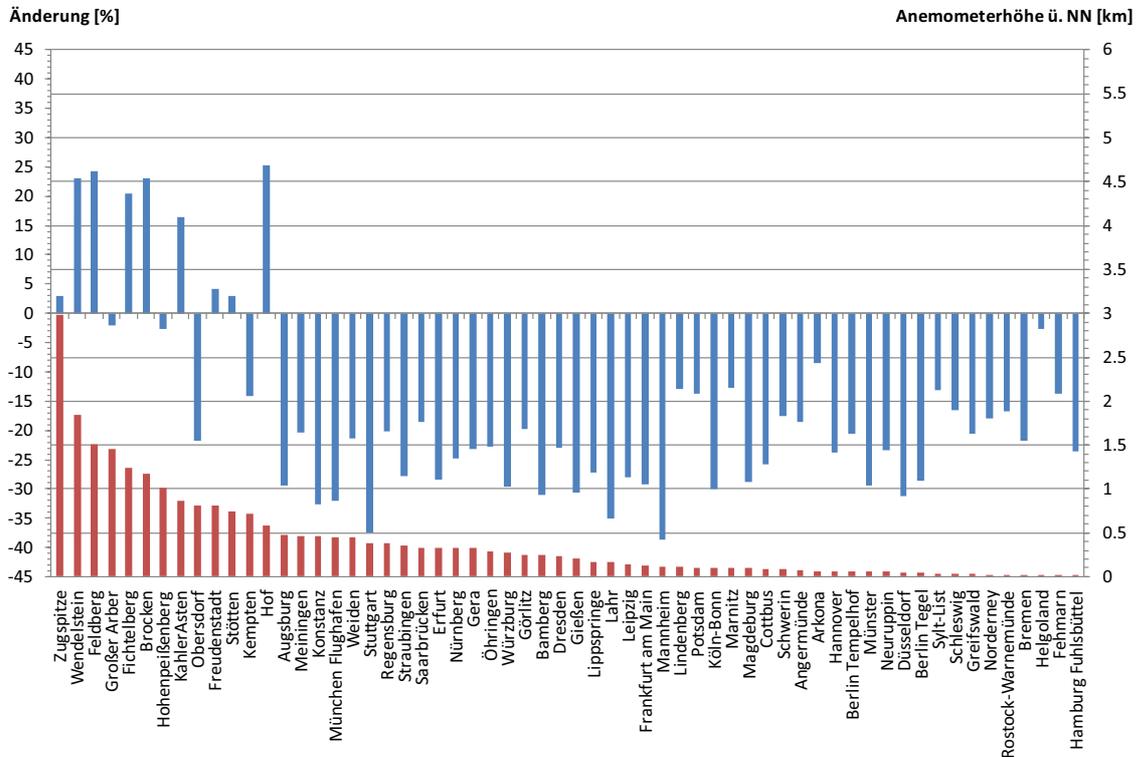


Abbildung 9.25: Luftfeuchtigkeit, Median der Verteilung, geschätzte Weibullverteilung (mW)

9.1.3 Auswertung der Luftdichte

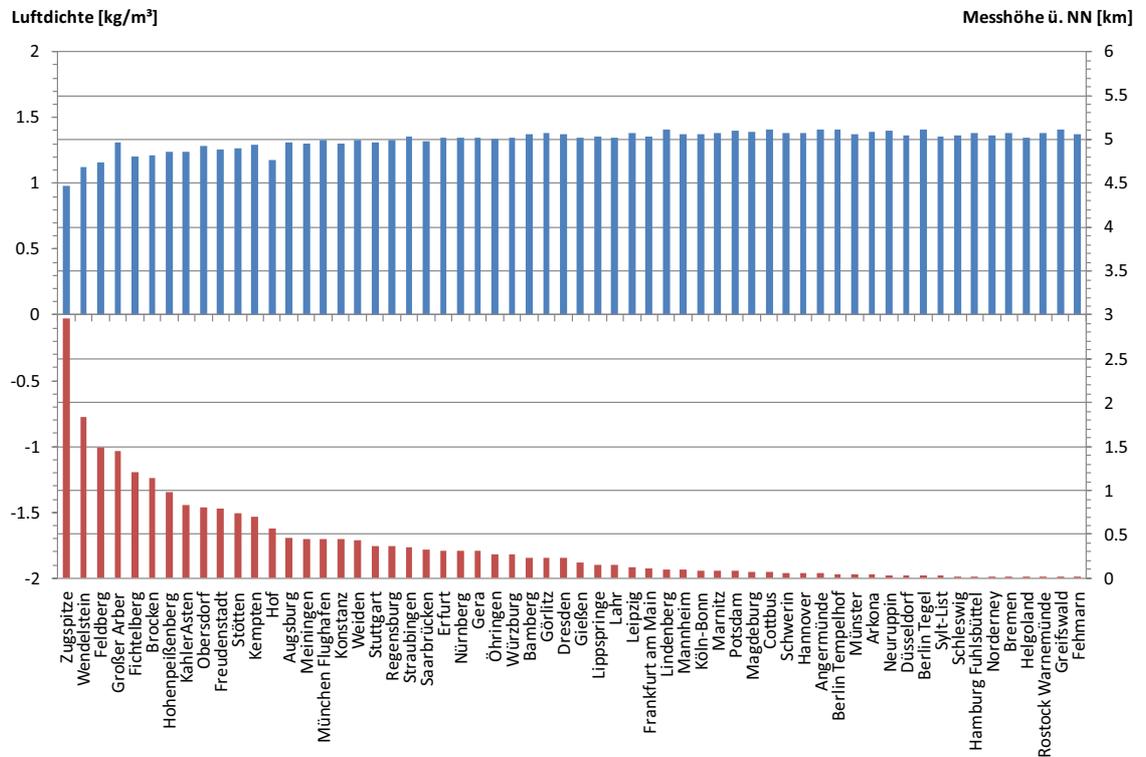


Abbildung 9.26: Maximale Luftdichte (Winter)

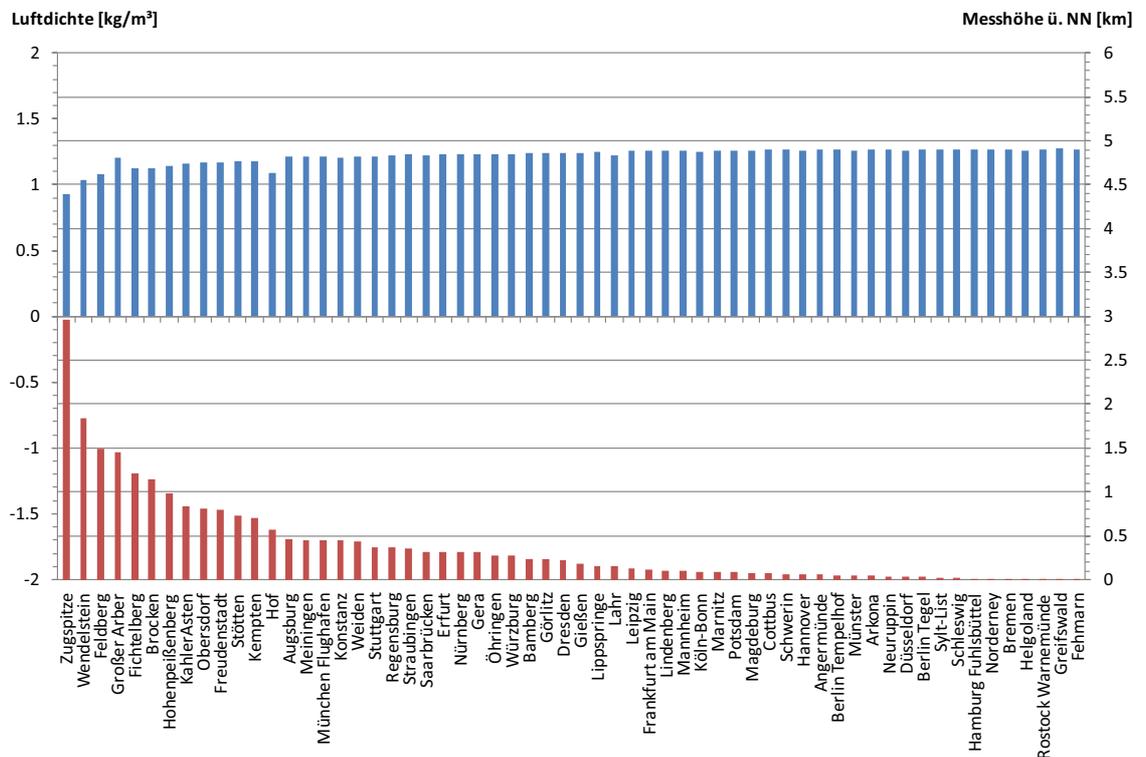


Abbildung 9.27: Mittlere Luftdichte (Winter)

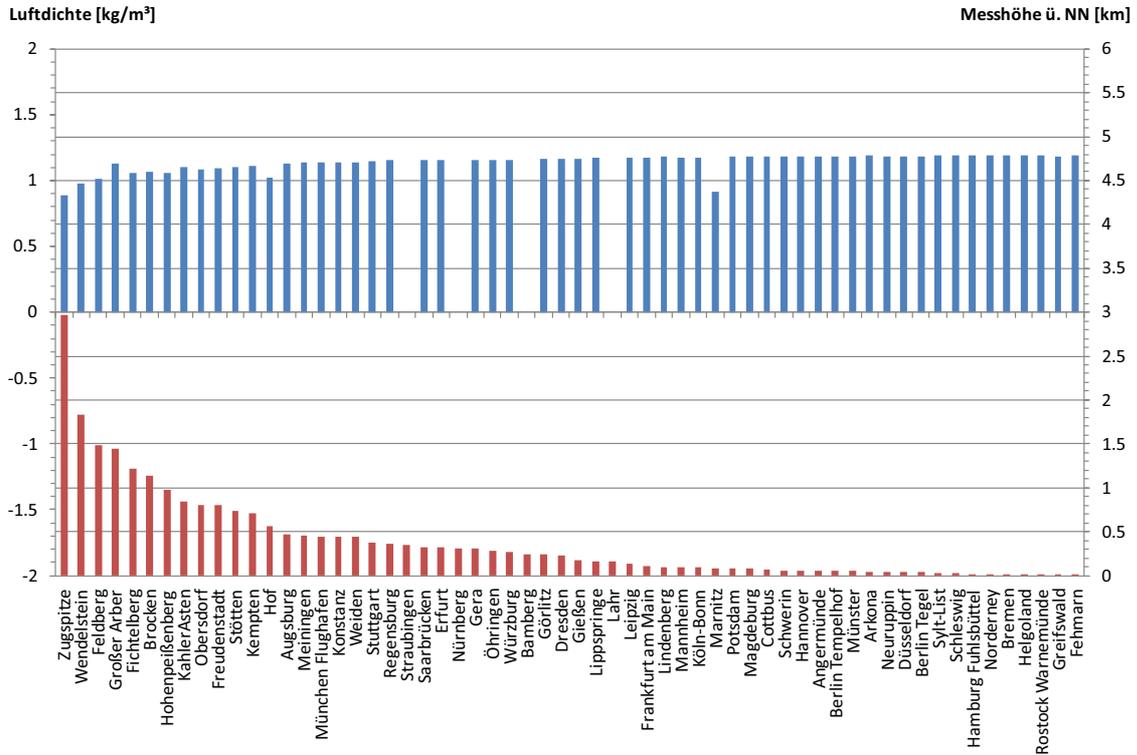


Abbildung 9.28: Minimale Luftdichte (Winter)

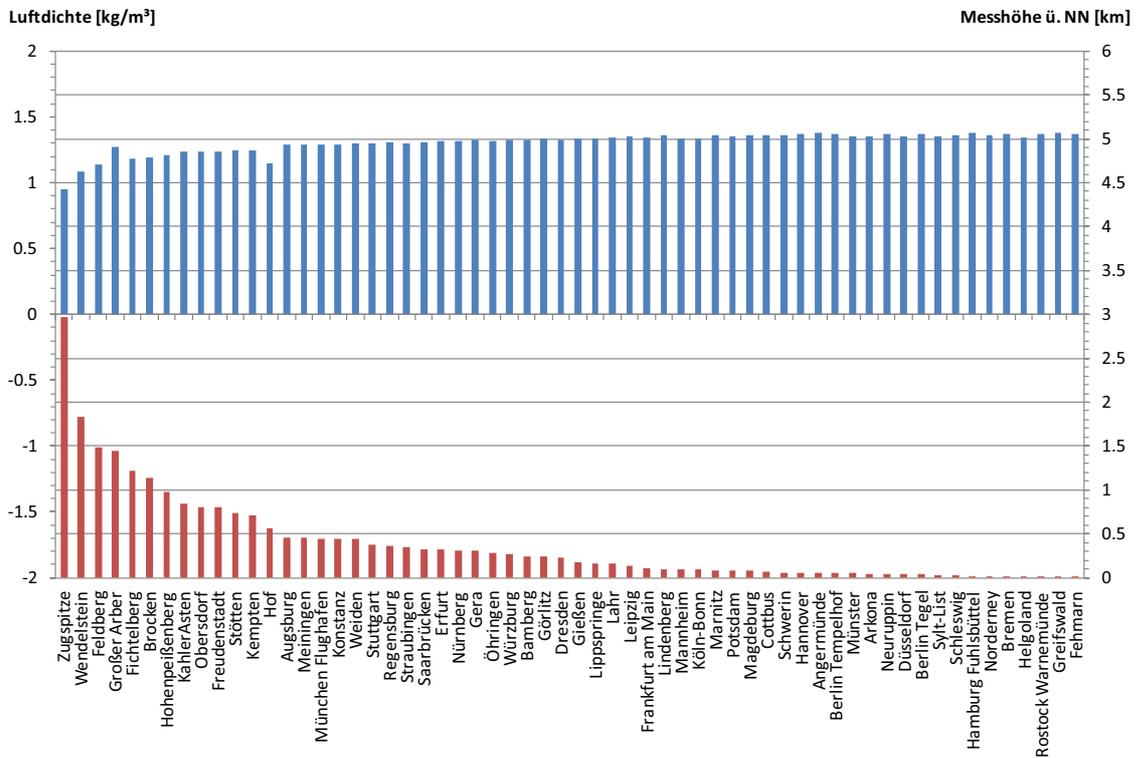


Abbildung 9.29: Maximale Luftdichte (Temperatur)

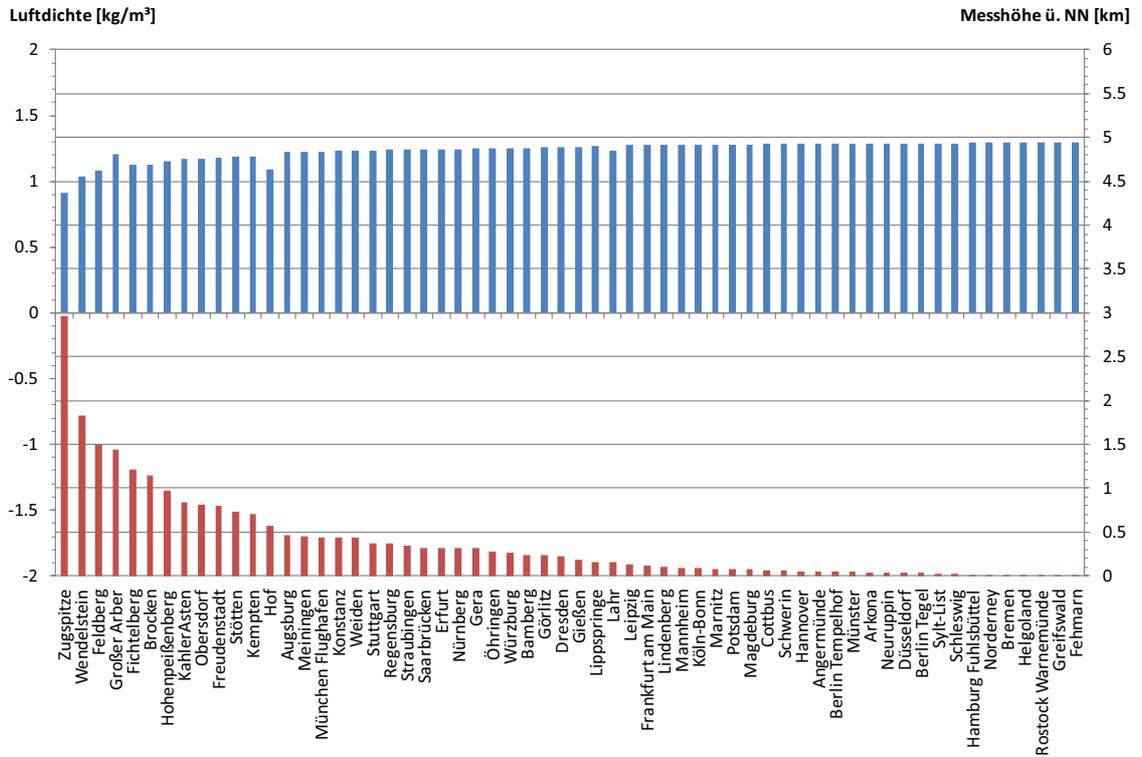


Abbildung 9.30: Mittlere Luftdichte (Temperatur)

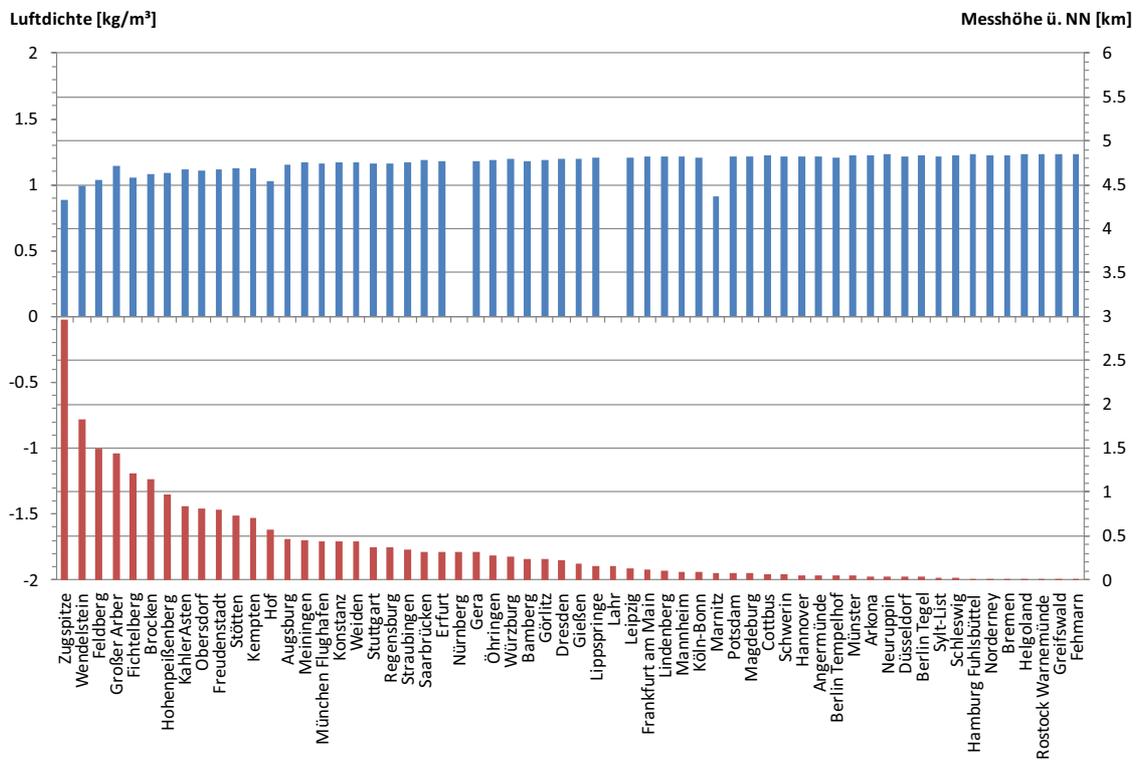


Abbildung 9.31: Minimale Luftdichte (Temperatur)