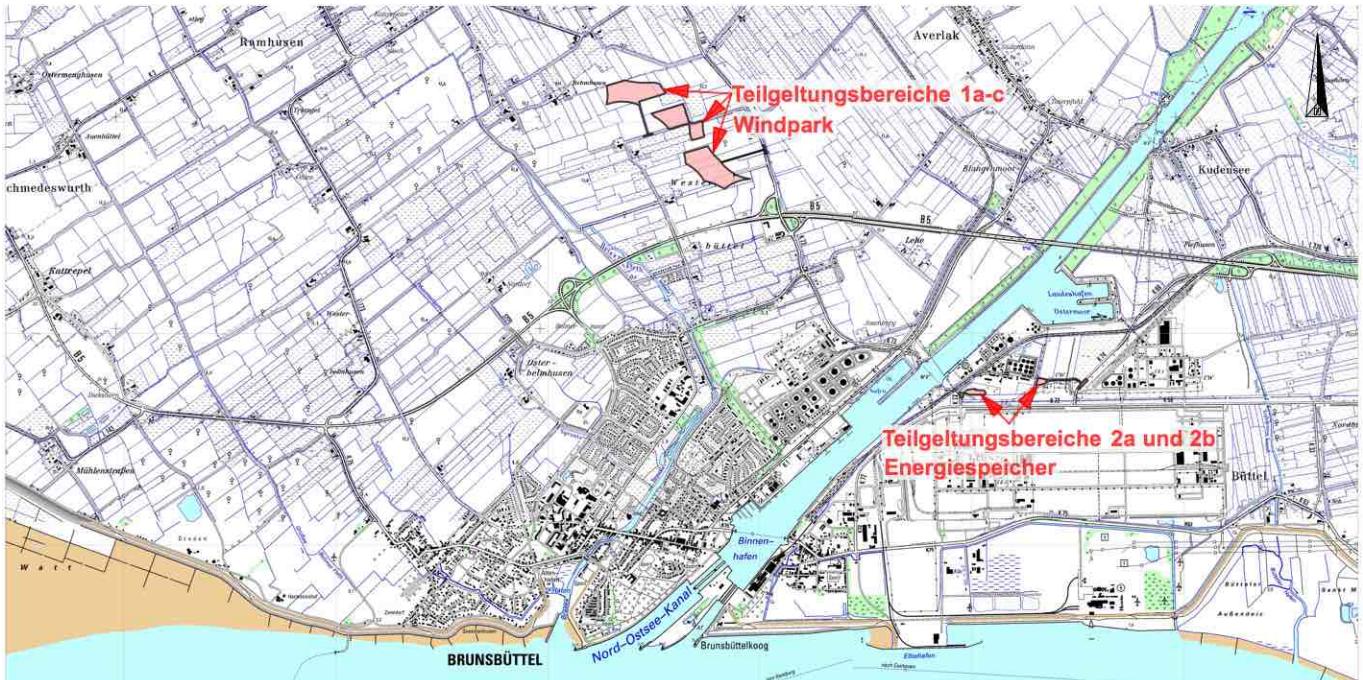


Stadt Brunsbüttel

Vorhabenbezogener B-Plan 77

VEP 4.4: Gutachtliche Stellungnahme zur Standorteignung im Windpark Westerbüttel



Vorhabenträger:



WIND TO GAS
Südermarsch

Planungsgesellschaft Wind to Gas
Brunsbüttel GmbH & Co. KG
Süderstraße 40
25709 Marne

Stand:

November 2016
Satzungsbeschluss

Gutachtliche Stellungnahme zur Standorteignung von Windenergieanlagen im Windpark

Westerbüttel

Erstellt im Auftrag für

Planungsgesellschaft Wind to Gas Brunsbüttel GmbH & Co. KG

Marne

Revision 1

Hamburg, 21.12.2015

Revision	Datum	Änderung
0	23.11.2015	Erste Ausgabe
1	21.12.2015	Einarbeitung der Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten für den Standort

Gegenstand: Ermittlung der effektiven Turbulenzintensitäten am Standort sowie weiterer Windbedingungen zur Beurteilung der Standorteignung von Windenergieanlagen innerhalb des Windparks Westerbüttel

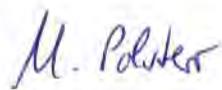
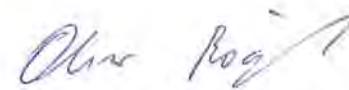
Referenz-Nr.: 2015-WND-123-CXXI-R1

Auftraggeber: Planungsgesellschaft Wind to Gas
Brunsbüttel GmbH & Co. KG
Süderstraße 40
25709 Marne, Deutschland

Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen:

- Lageplan der geplanten WEA /23/
- Koordinaten der geplanten, fremdgeplanten und bestehenden WEA (UTM, WGS84, Zone 32) /23/
- WEA-Spezifikationen inkl. jeweiliger Angabe zu Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung der geplanten, fremdgeplanten und bestehenden WEA /23/
- Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten für den Standort /30/

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	 Dr. rer. nat. M. Polster Sachverständige	Hamburg, 21.12.2015
Geprüft durch	 Dipl.-Ing. (FH) O. Rögl Sachverständiger	Hamburg, 21.12.2015

Für weitere Auskünfte:

TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG

Dr. rer. nat. M. Polster

Große Bahnstraße 31

22525 Hamburg

Tel.: +49 40 8557 2091

Fax: +49 40 8557 2552

E-Mail: mopolster@tuev-nord.de

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	5
2	Grundlagen	6
2.1	<i>Nachweis durch vereinfachten Vergleich der Windbedingungen</i>	8
2.2	<i>Nachweis durch Vergleich der Lasten</i>	10
3	Randbedingungen	12
3.1	<i>Windparkkonfiguration.....</i>	12
3.2	<i>Windbedingungen der Auslegung.....</i>	15
3.3	<i>Winddaten am Standort.....</i>	15
4	Durchgeführte Untersuchungen.....	17
4.1	<i>Standortbesichtigung.....</i>	17
4.2	<i>Komplexität des Geländes.....</i>	18
4.3	<i>50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe.....</i>	19
4.4	<i>Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe</i>	19
4.5	<i>Umgebungsturbulenzintensität</i>	20
4.6	<i>Effektive Turbulenzintensität</i>	22
4.7	<i>Weitere Windbedingungen</i>	24
4.7.1	<i>Mittlerer Höhenexponent</i>	24
4.7.2	<i>Mittlere Luftdichte</i>	25
4.7.3	<i>Neigung der Anströmung</i>	25
4.8	<i>Modell- und Datenunsicherheiten</i>	25
5	Zusammenfassung und Bewertung	26
6	Formelzeichen und Abkürzungen	29
7	Literatur- und Quellenangaben.....	31
8	Zusammenfassung aller Windbedingungen	34

1 Aufgabenstellung

Am Standort Westerbüttel (Schleswig-Holstein) plant der Auftraggeber die Errichtung von fünf Windenergieanlagen (WEA 1 bis 5) innerhalb eines bestehenden Windparks mit elf anderen zu berücksichtigenden WEA (WEA 14 bis 24) sowie neun weiteren zu berücksichtigenden, fremdgeplanten WEA (WEA 6 bis 13 und 25), siehe hierzu Tabelle 1 bzw. Abbildung 1.

Im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme ist der Einfluss durch den Zubau der geplanten WEA 1 bis 5 zu bewerten. Alle weiteren WEA am Standort (siehe Tabelle 1) gehen gemäß der vom Auftraggeber vorgegebenen Windparkkonfiguration /23/ als Vorbelastung in die Berechnung ein und sind bei Unterschreitung der in /4/, /5/ festgelegten WEA-Abstände ebenfalls zu bewerten. Es ist daher unerheblich, ob die WEA bereits bestehen oder ob sie sich in der Planungs-, der Genehmigungs- oder in der Bauphase befinden.

Die TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG ist am 28.09.2015 per E-Mail beauftragt worden, die Standorteignung von WEA gemäß Kapitel 16 der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten. Insbesondere ist hierbei der zusätzlich zur Umgebungsturbulenzintensität wirkende Einfluss der Nachlausituationen der WEA am Standort untereinander zu untersuchen. Des Weiteren ist bei WEA, für die eine Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vorliegt bzw. anzunehmen ist, ein Vergleich weiterer Windbedingungen am Standort mit den jeweiligen zu Grunde liegenden Auslegungswerten der Typen- bzw. Einzelprüfung durchzuführen.

Der Standort wurde von dem Mitarbeiter der TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG Herrn J. Armbröster am 15.10.2015 besichtigt und die Gegebenheiten vor Ort entsprechend aufgenommen und dokumentiert /25/.

Nach /5/ wird für eine Prüfung der Standorteignung von WEA das Vorliegen einer gültigen Typen- bzw. Einzelprüfung vorausgesetzt. Die Typen- bzw. Einzelprüfung dient als Standsicherheitsnachweis von Turm und Gründung einer WEA und wird ausgestellt, wenn die in den jeweiligen DIBt-Richtlinien /3/, /4/, /5/ geforderten Dokumente und Berechnungen des Herstellers (insbesondere die Berechnungen der auf Turm und Gründung wirkenden Lasten) durch eine akkreditierte Zertifizierungsstelle geprüft und bestätigt werden. Sollte zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine Typen- bzw. Einzelprüfung für einen bestimmten WEA-Typ vorliegen, so weisen wir unsere Ergebnisse für diese WEA nur unter Vorbehalt aus. Dieser Vorbehalt kann dann entfallen, wenn die in dieser gutachtlichen Stellungnahme zu Grunde gelegten Auslegungswerte durch die Auslegungswerte der mit der Genehmigung eingereichten Typen- bzw. Einzelprüfung abgedeckt werden. Im Folgenden wird nicht mehr ausdrücklich zwischen einer Typen- oder Einzelprüfung unterschieden, sondern vereinfachend nur noch von einer Typenprüfung gesprochen.

Die zu untersuchenden Windbedingungsparameter sind in den jeweiligen DIBt-Richtlinien /3/, /4/, /5/ bzw. /7/, /8/ festgelegt und Bestandteil der Typenprüfung einer WEA. Diese gehen als Basis in die zu berechnenden Auslegungslasten ein, wobei

hierbei die Entwurfslebensdauer einer WEA nach /3/, /4/, /5/ mit mindestens 20 Jahren anzunehmen ist.

WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 50m sind genehmigungsbedürftige Anlagen gem. § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) /12/ in Verbindung mit Ziff. 1.6 Spalte 2 des Anhangs zur vierten Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) /13/. Aufgrund fehlender Kriterien für einen Immissionsgrenzwert für die durch Nachbar-WEA erhöhte Turbulenzbelastung einer WEA können ersatzweise die Kriterien der Standorteignung für eine Turbulenz-Immissionsprognose im Rahmen eines BImSchG-Antrages herangezogen werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Reduktion der Lebensdauer von WEA und deren zusätzliche strukturelle Ermüdung infolge von Immissionen zumutbar sind, solange die Standorteignung der WEA hinsichtlich der Auslegungswerte nachzuweisender Windbedingungen oder hinsichtlich der nachzuweisenden Auslegungslasten gewährleistet bleibt.

Die vorliegende gutachtliche Stellungnahme zur Standorteignung ist daher gleichzeitig eine Turbulenz-Immissionsprognose im Sinne des BImSchG /12/.

2 Grundlagen

WEA sind Umweltbedingungen und elektrischen Einflüssen ausgesetzt, die Belastung, Haltbarkeit und den Betrieb beeinträchtigen können. Die Umweltbedingungen werden weiter in Wind- und andere Umweltbedingungen unterteilt. Für die Integrität der Konstruktion zählen die Windbedingungen zu den primären äußeren Einwirkungen.

Für die Auslegung der WEA im Rahmen einer Typenprüfung nach der jeweils zu Grunde liegenden DIBt-Richtlinie /3/, /4/, /5/ werden Windzonen (WZ) gemäß Windzonenkarte /6/ sowie Turbulenzkategorien gemäß /7/ bzw. /8/ definiert. In Abhängigkeit der gewählten Windzone werden u.a. der Auslegungswert der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit v_m als auch der Auslegungswert des extremen 10-min-Mittelwertes der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren (im Folgenden nur noch 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} genannt) definiert.

Durch Definition der Windzone und der Turbulenzkategorie ergeben sich die Windbedingungen der Auslegung und somit auch die Auslegungslasten, die im Rahmen einer Typenprüfung zu Grunde gelegt werden. Die Parameter für die Windgeschwindigkeit und die Turbulenz sind so gewählt, dass sie die meisten Anwendungsfälle erfassen sollen, jedoch bilden sie nicht die genaue Darstellung eines spezifischen Standortes ab. Im Rahmen des Prüfverfahrens können daher durchaus auch Fälle eintreten, in denen die Auslegungslasten der Typenprüfung nicht die standortspezifischen Lasten abdecken und die Typenprüfung folglich nicht mehr anwendbar ist. In diesen Fällen kann ggf. ein neuer Standsicherheitsnachweis für Turm und Gründung im Rahmen einer Einzelprüfung geführt werden.

Im Rahmen einer Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ sind die Auslegungswerte der Turbulenzintensität mindestens für die Turbulenzkategorie A nach DIN EN 61400-1:2004 /7/ nachzuweisen. In der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ wird die im Vergleich zu /4/ (bzw. /7/) nahezu identische Turbulenzkategorie A nach DIN EN 61400-1:2011 /8/ nur noch empfohlen. Im Rahmen einer Typenprüfung können daher auch grundsätzlich andere Auslegungswerte der Turbulenzintensität, wie z.B. die niedrigeren Auslegungswerte der Turbulenzkategorien B oder C, zu Grunde gelegt werden. Darüber hinaus können WEA für Fälle mit besonderen Wind- oder externen Bedingungen als S-Klasse definiert werden, in der die Auslegungswerte gesondert vom WEA-Hersteller anzugeben sind.

Die Bewertung der Standorteignung nach /5/ ist für WEA anzuwenden, für die eine Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vorliegt bzw. anzunehmen ist. Ziel dieser Bewertung ist es, die Anwendbarkeit der Typenprüfung auf den konkreten Standort bereits vor der Errichtung einer WEA nachzuweisen. Für diesen Nachweis werden gemäß Kapitel 16.2 der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zwei vereinfachte Vergleiche als Alternative zu dem in der DIN EN 61400-1:2011 /8/ genannten Verfahren beschrieben:

1. Nachweis durch Vergleich der Windbedingungen am Standort mit den jeweiligen Windbedingungen der Typenprüfung (siehe Kapitel 2.1).
2. Nachweis durch Vergleich der standortspezifischen Betriebsfestigkeitslasten und/oder der Extremlasten mit den Auslegungslasten der Typenprüfung (siehe Kapitel 2.2).

Des Weiteren ist nach /5/ der Ermittlung der Standortbedingungen eine Standortbesichtigung zu Grunde zu legen. Beide vereinfachten Vergleiche dürfen gemäß /5/ nur dann angewandt werden, sofern der Standort nach DIN EN 61400-1:2011 /8/ als nicht orografisch komplex anzusehen ist. Ist der Standort hingegen orografisch komplex, so sind mindestens die folgenden Windbedingungen für den Standort zu ermitteln /8/:

- 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} ,
- Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit (Dichtefunktion) im Bereich von 0,2 bis $0,4v_{ref}$,
- Turbulenzintensität der Umgebung und der im Nachlauf benachbarter WEA auf Nabenhöhe von 0,2 bis $0,4v_{ref}$,
- Höhenexponent α für das exponentielle Windprofil,
- mittlere Dichte der Luft ρ für Windgeschwindigkeiten $\geq v_{Nenn}$,
- Neigung der Anströmung $\varphi_{\text{Inkl.}}$,
- extreme Turbulenzintensität.

Bei WEA, für die eine Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ vorliegt, erfolgt gemäß Kapitel 6.3.3 der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ die Bewertung der Standorteignung allein durch den Nachweis der Standsicherheit hinsichtlich der Auslegungswerte der

Turbulenzintensität. Verglichen mit dem Verfahren nach /4/ ist eine Bewertung nach /5/ somit deutlich umfangreicher.

2.1 Nachweis durch vereinfachten Vergleich der Windbedingungen

Ist der Standort nach DIN EN 61400-1:2011 als nicht orografisch komplex anzusehen, so kann die Standorteignung von WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, nach dem Verfahren gemäß Kapitel 16.2.b der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ durch einen vereinfachten Vergleich der folgenden standortspezifischen Windbedingungen mit den Windbedingungen der Auslegung gemäß Typenprüfung erfolgen:

- mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_m ,
- effektive Turbulenzintensität I_{eff} auf Nabenhöhe zwischen Windgeschwindigkeiten von 0,2 und $0,4v_{ref}$,
- Windzone des Standortes gemäß Windzonenkarte /6/ oder falls diese nicht durch die Windzone der Auslegung gemäß Typenprüfung abgedeckt wird die 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} .

Der Ermittlung dieser Standortbedingungen ist für WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, eine Standortbesichtigung zu Grunde zu legen /5/ (siehe Kapitel 4.1).

Werden die Windbedingungen am Standort durch die Windbedingungen der Typenprüfung abgedeckt, ist die Standorteignung der WEA (auch hinsichtlich des Einflusses der WEA untereinander) nachgewiesen. Sollten hingegen eine oder mehrere Windbedingungen am Standort die Windbedingungen der Typenprüfung nicht abdecken, so kann die Standorteignung der WEA ggf. auf Basis eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten und/oder auf Basis eines Lastvergleiches der Extremlasten nachgewiesen werden (siehe Kapitel 2.2).

Die Bewertung der Standorteignung bei WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ zu betrachten und zu bewerten sind oder für die eine Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 1995 /3/ vorliegt, kann weiterhin gemäß Kapitel 6.3.3 der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ durchgeführt werden. Für diese WEA ist demnach standortspezifisch zu untersuchen, ob durch lokale Turbulenzerhöhungen infolge der Einflüsse benachbarter WEA die Auslegungswerte der Turbulenzintensität überschritten werden, also ob die Standsicherheit hinsichtlich der Auslegungswerte der Turbulenzintensität gewährleistet ist. Je nach Bewertungsstatus der WEA wird von uns hierbei eine aufgrund der Komplexität des Geländes erhöhte Umgebungsturbulenz berücksichtigt oder nicht (siehe Kapitel 4.2).

Benachbarte WEA üben untereinander nur auf die Turbulenzintensität und nicht auf die übrigen Windbedingungen einen lasterhöhenden Einfluss aus. Von daher liegt es nahe, dass für WEA, die als Vorbelastung in die Berechnung eingehen und nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, analog zur DIBt-Richtlinie 2004 /4/ nur die lokalen Turbulenzerhöhungen infolge der Einflüsse be-

nachbarter WEA zu bewerten sind. Genau genommen deckt die Turbulenzintensität die im vereinfachten Verfahren der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ genannten Betriebsfestigkeitslasten jedoch nicht vollständig ab. Gesetzt den Fall, dass sich durch einen Zubau die Turbulenzbelastung an WEA, die als Vorbelastung in die Berechnung eingehen erhöht, ist demnach auch die Bestimmung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit v_m erforderlich. In Hinsicht auf Extremlasten setzen wir für WEA, die als Vorbelastung in die Berechnung eingehen und nach /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, einen abdeckenden Lastvergleich der Extremlasten voraus.

Während die Windgeschwindigkeit am Standort durch benachbarte WEA nicht erhöht wird, nimmt die Belastung infolge lokaler Turbulenzerhöhungen, die auf die einzelne WEA im Windpark einwirkt, zu. Dieser Einfluss ist dann nach /4/ bzw. /5/ zu berücksichtigen, wenn der auf den Rotordurchmesser D bezogene dimensionslose Abstand s_i der jeweils größeren WEA zur benachbarten WEA für typische küstennahe Standorte ($v_{50} \geq 45\text{m/s}$) kleiner gleich fünf und für typische Binnenstandorte ($v_{50} \leq 40\text{m/s}$) kleiner gleich acht beträgt. In der Betrachtung der Turbulenzbelastung weisen wir dabei konservativ immer die Ergebnisse im Einflussbereich bis 8D, bezogen auf den jeweils größeren Rotordurchmesser der benachbarten WEA, aus.

In /14/ ist ein Verfahren beschrieben, um den Einfluss mehrerer, unterschiedlich weit entfernter WEA unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Nachlaufsituationen zu bewerten. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe einer effektiven Turbulenzintensität I_{eff} gemäß den Empfehlungen aus /4/, /5/ bzw. /8/. Die effektive Turbulenzintensität I_{eff} ist eine Ersatzgröße, welche über die gesamte Lebensdauer der WEA anzusetzen ist. Sie bewertet die Belastung durch die Umgebungsturbulenzintensität und die zusätzlich durch Nachlaufeffekte induzierte Belastung. Das Verfahren wird auch im internationalen Regelwerk /9/ empfohlen. Bei der Bestimmung der effektiven Turbulenzintensität I_{eff} ist nach /4/, /5/ bzw. /8/ für die Umgebungsturbulenz eine entsprechende Unsicherheit zu berücksichtigen (siehe Kapitel 4.5).

Gegenüber der in /4/, /5/ bzw. /8/ dargestellten Form des Berechnungsverfahrens verwenden wir das dort beschriebene Verfahren nach Frandsen (2007) zur Ermittlung der Turbulenzerhöhungen in der Nachlaufströmung benachbarter WEA mit zwei Modifikationen, welche im Folgenden erläutert werden.

In seiner allgemeinen Definition enthält das in /4/, /5/ bzw. /8/ beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Turbulenzintensität im Nachlauf der WEA einen Schätzwert für den anlagenspezifischen Parameter c_T (Schubbeiwert der WEA). Für die Ermittlung der maximalen Turbulenz im Nachlauf einer WEA auf Nabenhöhe (totale Turbulenzintensität I_T) nach dem Modell von Frandsen (2007), berücksichtigen wir abweichend hierzu die anlagenspezifischen Schubbeiwerte der jeweiligen WEA. Neben einer besseren Abbildung der realen Verhältnisse wird damit auch eine Unterschätzung der im Nachlauf produzierten Turbulenz in bestimmten Fällen vermieden, da nach unseren Untersuchungen insbesondere für Multi-Megawatt-WEA der Schätzwert für den Schubbeiwert c_T im Bereich des Erreichens der Nennwindgeschwindigkeit v_{Nenn} in der Regel nicht abdeckend ist. Liegen uns für insbesondere ältere WEA keine Schubbeiwerte c_T vor, so verwenden wir den in /4/, /5/ bzw. /8/ als allgemeingültig

definierten windgeschwindigkeitsabhängigen Wert von $c_T = 7\text{m/s}$ / v. In /2/ sind eine Reihe von weiteren Modellen zur Ermittlung der totalen Turbulenzintensität beschrieben. Diese decken jedoch im Gegensatz zum Modell von Frandsen (2007) die in /2/ durchgeführten Messungen nur teilweise ab und werden daher nicht von uns verwendet. Des Weiteren wird in /4/, /5/ bzw. /8/ bisher nur das Verfahren nach Frandsen empfohlen.

Die zweite Modifikation betrifft die Häufigkeit der jeweiligen Nachlausituations, die nach /4/, /5/ bzw. /8/ mit 6% angenommen werden kann. Dieser konstanten Häufigkeit liegt die Annahme eines voll ausgebildeten mit erhöhten Turbulenzintensitäten behafteten Nachlaufs (far wake) zu Grunde, der sich typischerweise drei bis fünf Rotordurchmesser hinter der WEA einstellt. Um auch für geringe WEA-Abstände konservative Werte zu erhalten, wird die Häufigkeit der jeweiligen Nachlausituations von uns davon abweichend auf Basis der realen geometrischen Verhältnisse im Windpark und unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit berechnet.

Unter Beachtung eines sich ausdehnenden Nachlaufs wird auch die Verminderung der geometrischen Nachlaufwahrscheinlichkeit aufgrund resultierender Höhenunterschiede zwischen benachbarten WEA berücksichtigt. Die Ermittlung der Höhenunterschiede in vertikaler Richtung erfolgt nach einem konservativen Ansatz unter gleichzeitiger Einbeziehung der WEA-Nabenhöhen sowie der vorhandenen Höhendaten (z.B. /16/, /17/). Die Ausdehnung des Nachlaufs basiert auf einem in /14/ beschriebenen Nachlaufmodell von Frandsen, bei dem sich der Nachlauf in Abhängigkeit des WEA-spezifischen Schubbeiwertes c_T und somit auch windgeschwindigkeitsabhängig erweitert. Insbesondere bei niedrigen Windgeschwindigkeiten weist der Nachlauf im unmittelbaren Nahbereich bereits eine deutlich größere Ausdehnung als der Rotor selbst auf.

Nach /4/, /5/ bzw. /8/ ist weiterhin eine Reduktion der mittleren Windgeschwindigkeit innerhalb des Windparks, und somit auch die hieraus resultierenden lokalen Turbulenzerhöhungen, nur bei WEA-Abständen von weniger als 10D in den Berechnungen zu berücksichtigen. In unseren Berechnungen gehen stets alle WEA des zusammenhängenden Windparks (siehe Tabelle 1) ein.

Nach unseren Erfahrungen liefern die zur Anwendung kommenden Modelle zur Berechnung der Turbulenzintensität bei WEA-Abständen von kleiner 2,5D nur begrenzt belastbare Ergebnisse an den der erhöhten Turbulenz der Nachlaufströmung ausgesetzten benachbarten WEA. Sollte aus Sicht der nachlaufverursachenden WEA ein WEA-Abstand von ca. 2,0D unterschritten werden, weisen wir die Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität für diese benachbarte WEA nicht mehr aus.

2.2 Nachweis durch Vergleich der Lasten

Werden eine oder mehrere standortspezifische Windbedingungen nicht durch die Windbedingungen der Typenprüfung abgedeckt, so ist es gemäß Kapitel 16.2.c der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ ggf. möglich, die Standorteignung der WEA auf Basis eines

Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten und/oder auf Basis eines Lastvergleiches der Extremlasten nachweisen zu lassen. Dieser ist verglichen zum Nachweis durch einen vereinfachten Vergleich der Windbedingungen (siehe Kapitel 2.1) im Allgemeinen sehr aufwändig. Für den Fall, dass die standortspezifischen Lasten unterhalb oder auf dem Niveau der Auslegungslasten liegen, die bei der jeweiligen Typenprüfung der WEA zu Grunde gelegt wurden, ist die lastseitige Standsicherheit, also auch die Standorteignung der WEA, gewährleistet. Sollten die standortspezifischen Lasten oberhalb der Auslegungslasten der Typenprüfung liegen, kann die Standorteignung der betroffenen WEA nicht nachgewiesen werden.

Neben den in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten I_{eff} gehen gemäß Kapitel 16.2.a der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ weitere Windbedingungen (u.a. auch die standortspezifische, mittlere Jahreswindgeschwindigkeit v_m) als Eingangsgrößen in die Berechnung des Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten ein. Sind die übrigen Windbedingungen am Standort niedriger als die Windbedingungen der Auslegung, so ist ein Nachweis der Standorteignung trotz Überschreitungen der Auslegungswerte der Turbulenzintensitäten oft möglich. Gemäß Kapitel 16.2.c der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ müssen im Falle eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten für WEA, die nach /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, die effektiven Turbulenzintensitäten I_{eff} mindestens von v_{in} bis $0,4v_{50}$ vorliegen. Für Windgeschwindigkeiten, bei denen die effektiven Turbulenzintensitäten I_{eff} in dieser gutachtlichen Stellungnahme nicht abgedeckt sind, müssen diese für die Bestimmung der Betriebsfestigkeitslasten als konstant mit dem Wert für die größte ermittelte Windgeschwindigkeit angenommen werden.

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, sind die Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität I_{eff} bei zu geringen WEA-Abständen nach unseren Erfahrungen nur noch begrenzt belastbar. Wir empfehlen daher bei WEA-Abständen unterhalb von etwa 2,5D, die von uns ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten am Standort nicht im Rahmen eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten zu verwenden.

Ist für WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, ein Lastvergleich auf Basis der Betriebsfestigkeitslasten durchzuführen, sind hierfür die in Kapitel 16.2.a der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ aufgeführten Windbedingungen zu ermitteln. Für einen Lastvergleich auf Basis der Extremlasten sind hingegen extreme Windbedingungen zu ermitteln. Ist der Standort nach DIN EN 61400-1:2011 /8/ als orografisch komplex anzusehen, so ist die Standorteignung der WEA nach /8/ nachzuweisen. Als ein weiterer zu den in Kapitel 16.2.a der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ genannten Windbedingungen muss hierfür die Neigung der Anströmung $\varphi_{Inkl.}$ sowie die extreme Turbulenzintensität ermittelt werden.

Bei WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ zu Grunde gelegt wird, darf der Lastvergleich der Betriebsfestigkeitslasten, unabhängig von der Komplexität des Geländes, nach /7/ durchgeführt werden.

3 Randbedingungen

3.1 Windparkkonfiguration

In Tabelle 1 bzw. Abbildung 1 sind die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur Windparkkonfiguration dargestellt.

Die Bezeichnung der einzelnen WEA in dieser gutachtlichen Stellungnahme bezieht sich auf die laufende Nummer, die aus Tabelle 1 ersichtlich ist.

Im Rahmen der nachfolgenden Bewertung werden keine Leistungsreduzierungen oder sektorelle Abschaltregelungen von WEA berücksichtigt.

Lfd. WEA- Nr.	WEA- Bezeich- nung	Koordinaten [m]		WEA-Typ	P _{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
		Rechts- wert	Hoch- wert				
1	WEA 1	508615	5976247	ENERCON E-115	3,00	115,7	92,0
2	WEA 2	508950	5976325	ENERCON E-101	3,05	101,0	99,0
3	WEA 3	509206	5976057	ENERCON E-101	3,05	101,0	99,0
4	WEA 4	509371	5975633	ENERCON E-115	3,00	115,7	92,0
5	WEA 5	509655	5975442	ENERCON E-115	3,00	115,7	92,0
6	WKA1 G10/201 4/147	507473	5975551	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0
7	WKA2 G10/201 4/148	507463	5975236	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0
8	WKA3 G10/201 4/149	507784	5975256	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0
9	WKA4 G10/201 4/150	507221	5974963	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0

Lfd. WEA- Nr.	WEA- Bezeich- nung	Koordinaten [m]		WEA-Typ	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
		Rechts- wert	Hoch- wert				
10	WKA 1 G10/201 4/183	507868	5975625	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0
11	WKA 2 G10/201 4/184	508202	5975756	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0
12	WKA 3 G10/201 4/185	508100	5975367	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0
13	WKA 4 G10/201 4/186	508498	5975297	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0
14	WKA G10/201 3/137	507063	5975264	ENERCON E-101	3,05	101,0	99,6
15	WKA 10	506850	5976338	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
16	WKA 9	506587	5976235	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
17	WKA 8	506357	5976107	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
18	WKA 1	506117	5975955	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
19	WKA 7	506538	5975926	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
20	WKA 2	506311	5975797	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
21	WKA 6	506804	5975689	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
22	WKA 3	506518	5975637	Vestas V80	2,00	80,0	60,0

Lfd. WEA- Nr.	WEA- Bezeich- nung	Koordinaten [m]		WEA-Typ	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
		Rechts- wert	Hoch- wert				
23	WKA 5	506990	5975522	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
24	WKA 4	506772	5975360	Vestas V80	2,00	80,0	60,0
25	WEA 25	507681	5974939	Senvion 3.2M114	3,17	114,0	93,0

Tabelle 1: Windparkkonfiguration (Koordinatensystem: UTM, WGS84, Zone 32)

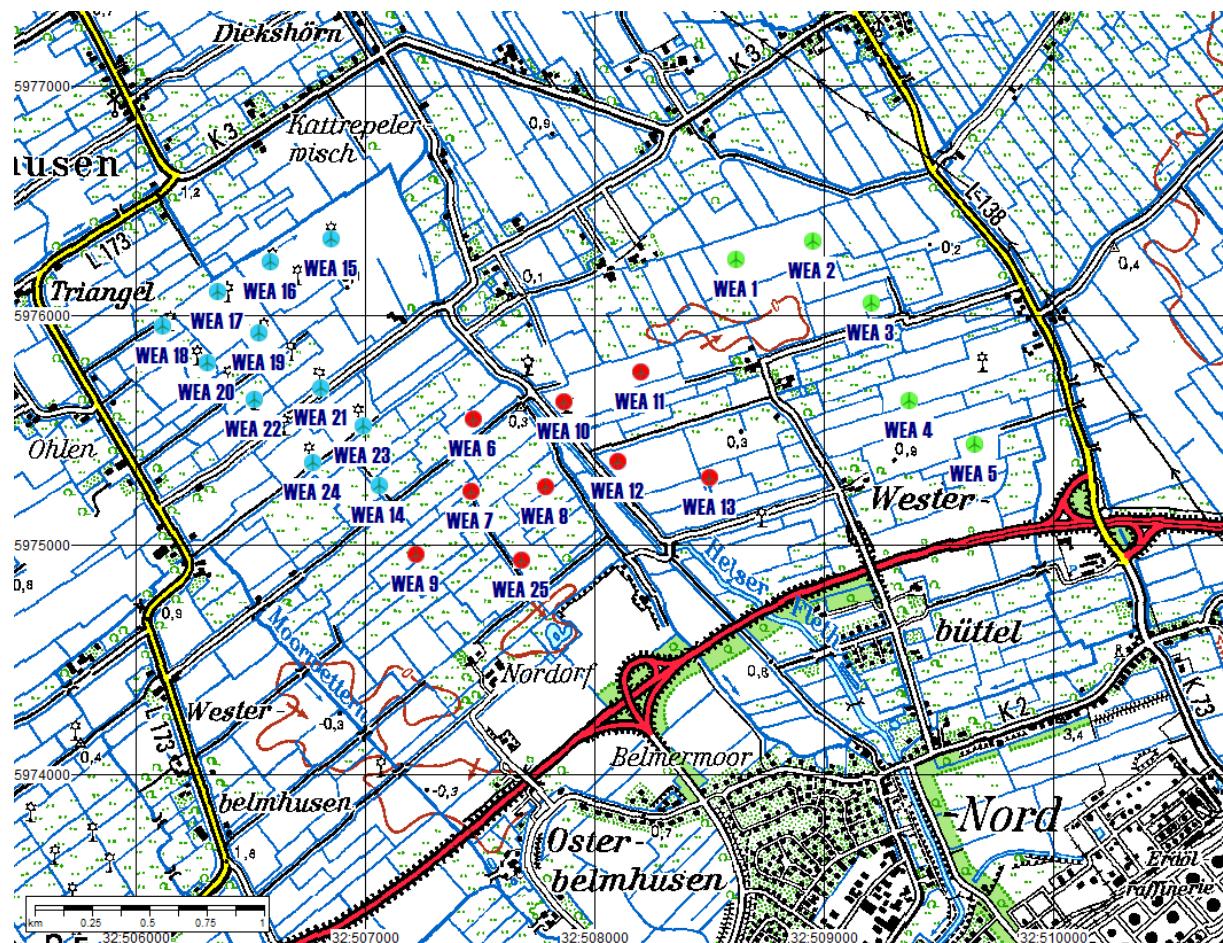


Abbildung 1: Lage des Windparks, Auszug topografische Karte 1:50.000 (vergrößerte Darstellung)
 /16/

Der geringste auf den jeweils größeren Rotordurchmesser bezogene dimensionslose Abstand s_i zwischen zwei WEA, von denen mindestens eine WEA vom Auftraggeber neu geplant ist, liegt bei $2,96D_{ENERCON\ E-115}$. Dies betrifft die WEA 4 und 5 mit einem Abstand von ca. 342m.

3.2 Windbedingungen der Auslegung

Gemäß des in Kapitel 16.2.b der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ beschriebenen vereinfachten Vergleichs der Windbedingungen am Standort auf jeweiliger Nabenhöhe sind für geplante WEA neben der effektiven Turbulenzintensität I_{eff} auch die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit v_m sowie die Windzone des Standortes gemäß Windzonenkarte /6/ bzw. die 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} mit den jeweiligen Auslegungswerten der Typenprüfung zu vergleichen (siehe Kapitel 2.1). Die Ermittlung und Bewertung dieser Windbedingungen erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

In Tabelle 2 sind für die WEA, deren Standorteignung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu beurteilen ist, die für den vereinfachten Vergleich notwendigen Windbedingungen der Auslegung dargestellt. Hierbei beziehen wir uns wenn möglich auf Dokumente des jeweiligen WEA-Herstellers, denen die jeweiligen Windbedingungen der Auslegung direkt entnommen werden können. Liegen uns keine Werte vor, so werden diese von uns anhand der vom Hersteller angegebenen Windzone und ggf. der zugehörigen Geländekategorie (GK) gemäß der in /5/ bzw. /6/ beschriebenen Verfahren ermittelt und die betroffenen Ergebnisse in Tabelle 2 entsprechend markiert (*).

Sofern nicht anders bekannt, wird bei allen WEA mit einer gültigen Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ die Turbulenzkategorie A nach DIN EN 61400-1:2004 /7/ (bzw. nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/) als Auslegungswert der Turbulenzintensität zu Grunde gelegt (siehe Kapitel 2 und 4.6).

Lfd. WEA-Nr.	Windzone (WZ) und Geländekategorie (GK) der Typenprüfung	Turbulenzkategorie nach DIN EN 61400-1:2011	v_m [m/s]	v_{ref} [m/s]	Ref.
1	IEC IIA /8/, DIBt WZ 4, GK I/II /6/	A	8,12	45,12	/26/
4	IEC IIA /8/, DIBt WZ 4, GK I/II /6/	A	8,12	45,12	/26/
5	IEC IIA /8/, DIBt WZ 4, GK I/II /6/	A	8,12	45,12	/26/
6 bis 13	WZ 3 /4/	A	8,33	46,25	/27/, /28/
25	WZ 4, GK I /6/	A	8,33	45,19	/29/

Tabelle 2: Auslegungswerte für die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu beurteilenden WEA

3.3 Winddaten am Standort

In /24/ sind die Winddaten für insgesamt sechs Referenzpunkte an den Standorten der WEA 1 bis 5 und WEA 11 auf entsprechender Nabenhöhe angegeben und werden in unseren Berechnungen dementsprechend verwendet. Die Winddaten sind in Tabelle 3 bzw. Abbildung 2 beispielhaft für den Referenzpunkt am Standort der

WEA 1 mit den Koordinaten 508615 / 5976247 und für eine Höhe von 92,0m dargestellt.

Der Vergleich der vorliegenden Winddaten in Hinblick auf die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit mit den Nabenhöhen der zu bewertenden WEA und denen, die sich im Umkreis von 8D zu diesen WEA befinden, zeigt, dass die von uns empfohlene Höhendifferenz von etwa 20m nicht überschritten wird. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass Ungenauigkeiten bei deren Umrechnung auf andere Höhen für die Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität am Standort vernachlässigbar sind.

Die Bestimmung der standortspezifischen, mittleren Jahreswindgeschwindigkeit v_m am Standort ist für WEA erforderlich, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten sind. Für deren Bestimmung können ggf. Windgutachten oder Auszüge daraus herangezogen werden, wenn diese konform nach der technischen Richtlinie für Windenergieanlagen (TR6) sind. Hierbei sollten Höhendifferenzen von ca. 5m zwischen der Referenzhöhe der Winddaten und der Nabenhöhe der betroffenen WEA nicht überschritten werden. Wird dieses Kriterium nicht erfüllt, so erfolgt die Bestimmung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit v_m nach dem tendenziell konservativen Verfahren gemäß der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ und der DIN EN 1991-1-4 bzw. DIN EN 1991-1-4/NA /6/. Sind die Winddaten nicht nachweislich konform gemäß TR6, so erfolgt der Vergleich des Auslegungswertes der zu Grunde gelegten Typenprüfung konservativ mit der größeren bestimmten mittleren Jahreswindgeschwindigkeit v_m aus /24/ bzw. nach /5/ und /6/, auch bei Höhendifferenzen von weniger als 5m.

Die Bestimmung der standortspezifischen, mittleren Jahreswindgeschwindigkeit v_m kann im vorliegenden Fall für WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, auf Basis der Winddaten /24/ erfolgen.

Richtungssektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≈ 100%)	Weibullverteilung	
		A [m/s]	k [-]
N	0,037	5,2	2,06
NNO	0,041	5,5	2,03
ONO	0,062	6,5	2,29
O	0,088	7,6	2,51
OSO	0,088	6,6	2,73
SSO	0,078	5,9	2,35
S	0,071	5,8	2,13
SSW	0,108	8,5	2,64
WSW	0,143	8,8	2,18
W	0,124	8,7	2,01
WNW	0,099	7,8	2,21

Richtungssektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≤ 100%)	Weibullverteilung	
		A [m/s]	k [-]
NNW	0,061	6,6	2,12
Gesamt (alle Sektoren)	1,000	7,4	2,07
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit v_m [m/s]		6,56	

Tabelle 3: Winddaten am Standort Westerbüttel (Bezugshöhe 92,0m ü. Grund) /24/

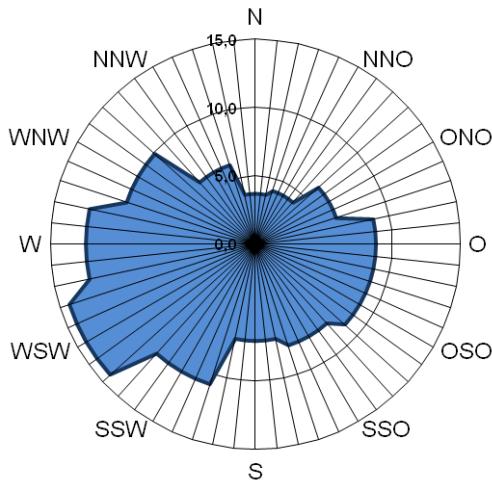


Abbildung 2: Relative Häufigkeit der Windrichtung am Standort Westerbüttel in Prozent (Bezugs-
höhe 92,0m ü. Grund) /24/

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Standortbesichtigung

Gemäß der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ ist der Ermittlung der Standortbedingungen eine Standortbesichtigung zu Grunde zu legen. Die Gegebenheiten vor Ort müssen entsprechend aufgenommen und anhand von Fotos der Standortumgebung (360° Rundumansicht) dokumentiert werden.

Während der Standortbesichtigung sollen einzelne, ausgeprägte Hindernisse in der nahen Umgebung der zu bewertenden WEA, die sich in Form erhöhter Turbulenzen auf benachbarte WEA auswirken können und durch eine übliche Rauigkeitsklassifizierung (siehe Kapitel 4.5) i.d.R. nicht erfasst werden können, aufgenommen werden. Des Weiteren muss zur Ermittlung der 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_{50} die Geländekategorie (GK) bestimmt werden. Zu den ausgeprägten Hindernissen, die bei der Ermittlung der Umgebungs-turbulenzintensität gesondert zu bewerten sind, zählen insbesondere

- große Einzelstrukturen (z.B. Gebäude, Türme, o.ä.),
- ausgeprägte Waldkanten,
- steile bzw. grobe Geländekanten (z.B. Abhänge, Tagebau, o.ä.).

Die Standortbesichtigung wurde von dem Mitarbeiter der TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG Herrn J. Armbröster am 15.10.2015 durchgeführt und die Gegebenheiten vor Ort entsprechend aufgenommen und dokumentiert /25/. Hierbei wurden in der unmittelbaren Umgebung des Standortes keine ausgeprägten Hindernisse festgestellt.

Das Gelände am Standort lässt sich nach DIN EN 1991-1-4 bzw. DIN EN 1991-1-4/NA /6/ in GK II einordnen.

4.2 Komplexität des Geländes

In orografisch strukturiertem Gelände können große Höhendifferenzen und Gelände steigungen zu erhöhten Umgebungsturbulenzen führen. Die Kriterien zur Bewertung der Komplexität des Geländes durch Definition von insgesamt 25 durch den Fußpunkt des Turmes verlaufenden angenäherten Ebenen an das Gelände sind in DIN EN 61400-1:2011 /8/ erläutert. Demnach gilt das Gelände an einem Standort, das nicht alle in Tabelle 4 aufgeführten Einschränkungen erfüllt, als komplex. Kommt mehr als 5% der Windenergie aus einem als orografisch komplex anzusehenden Richtungssektor, so muss für den Nachweis der Integrität der Konstruktion mit Bezug auf die Winddaten für diesen Sektor eine Erhöhung der longitudinalen Komponente der Umgebungsturbulenzintensität durch Multiplikation mit einem Turbulenzstrukturparameter C_{CT} erfasst werden /8/. Der Maximalwert dieses C_{CT} von 1,15 wird erreicht, sobald der summierte Windenergieanteil aus orografisch komplexen Richtungssektoren bei 15% oder mehr liegt. Zwischen einem Windenergieanteil von 5 und 15% variiert C_{CT} dementsprechend zwischen 1 und 1,15.

Abstand von der WEA	Sektor-amplitude	Größte Neigung der angenäherten Ebene	Größte vertikale Gelände-abweichung	
< $5 \cdot z_{hub}$	360°	< 10°	< $0,3 \cdot z_{hub}$	max. zulässige Fläche mit Überschreitung der Abweichung: jeweils $5 \cdot (z_{hub})^2$
< $10 \cdot z_{hub}$	30°		< $0,6 \cdot z_{hub}$	
< $20 \cdot z_{hub}$	30°		< $1,2 \cdot z_{hub}$	

Tabelle 4: Bewertungskriterien der Komplexität des Geländes /8/

Zur Bewertung nach den in Tabelle 4 genannten Kriterien werden auf Basis von Höhendaten /16/ an die Orografie angenäherte geneigte Ebenen nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate definiert.

Die Bewertung der Komplexität des Geländes erfolgt für alle WEA aus Tabelle 1, für die eine Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vorliegt bzw. anzunehmen ist. Darüber hinaus bewerten wir die Komplexität des Geländes für geplante WEA, denen eine Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ zu Grunde liegt und für

bestehende WEA mit einer Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/, bei denen im damaligen Genehmigungsverfahren eine Bewertung der Komplexität des Geländes erfolgt ist. Kann anhand der vom Auftraggeber eingereichten Unterlagen die damalige Bewertungsgrundlage von bestehenden WEA nicht oder nur unvollständig festgestellt werden, nehmen wir im konservativen Ansatz eine Bewertung der Komplexität des Geländes ebenso für diese WEA vor.

In unserer nachfolgenden Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität erfolgt für die WEA 1 bis 14 und 25 eine Bewertung der Komplexität des Geländes nach /8/.

Am Standort Westerbüttel werden an den WEA 1 bis 14 und 25 keine der in der Tabelle 4 genannten Komplexitätskriterien überschritten, so dass kein erhöhter Turbulenzstrukturparameter C_{ct} zur Erhöhung der Umgebungsturbulenzintensität berücksichtigt wird. Des Weiteren darf der Nachweis der Standorteignung für WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, nach dem in /5/ beschriebenen vereinfachten Vergleich durchgeführt werden.

4.3 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe

Gemäß Kapitel 16.2.b.iii der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ ist der Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_{50} zunächst durch einen Vergleich der Windzone des Standortes gemäß Windzonenkarte /6/ mit der Windzone der Auslegung gemäß Typenprüfung möglich. Wird die Windzone des Standortes nicht abgedeckt, so ist die direkte Bestimmung von v_{50} erforderlich. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, erfolgt ein Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_{50} nur für geplante WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird und nicht für WEA, die als Vorbelastung in die Berechnung eingehen.

Der Standort Westerbüttel (Schleswig-Holstein) liegt nach /20/ in der Windzone 4 gemäß Windzonenkarte /6/. Die Geländekategorie lässt sich gemäß Kapitel 4.1 in GK II einordnen.

4.4 Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe

Für den in /5/ aufgeführten vereinfachten Vergleich der Windbedingungen am Standort mit den jeweiligen Auslegungswerten zur Beurteilung der Standorteignung, ist gemäß Kapitel 16.2.b.i die Bestimmung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_m notwendig.

Die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_m kann im vorliegenden Fall auf Basis der eingereichten Winddaten /24/ direkt entnommen bzw. bei geringfügigen Höhendifferenzen umgerechnet werden (siehe Kapitel 3.3).

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind für WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe v_m dargestellt.

Lfd. WEA-Nr.	WEA-Typ	P _{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]	v _m [m/s]
1	ENERCON E-115	3,00	115,7	92,0	6,56
4	ENERCON E-115	3,00	115,7	92,0	6,53
5	ENERCON E-115	3,00	115,7	92,0	6,52
6 bis 13	Nordex N100/3300	3,30	99,8	100,0	6,70
25	Senvion 3.2M114	3,17	114,0	93,0	6,58

Tabelle 5: ermittelte mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe v_m für nachzuweisende WEA am Standort Westerbüttel; WZ 4, GK II /24/

Gemäß Kapitel 16.2.b.i der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ muss die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_m der WEA um mindestens 5% kleiner als gemäß dem Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung sein. Für Formparameter der Weibullverteilung $k > 2$ ist hingegen auch eine größere mittlere Jahreswindgeschwindigkeit erlaubt, wenn diese noch unterhalb dem Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung liegt.

4.5 Umgebungsturbulenzintensität

Die Turbulenzintensität definiert allgemein das Verhältnis der Standardabweichung σ der zeitlichen Windgeschwindigkeitsverteilung zu ihrem Mittelwert bezogen auf ein Intervall von 600s (10min). Die Umgebungsturbulenzintensität beschreibt dabei ausschließlich die Turbulenz der freien Strömung ohne den Einfluss von WEA.

Für die spätere Berechnung der effektiven Turbulenzintensität ist nicht die mittlere Umgebungsturbulenzintensität sondern die charakteristische Turbulenzintensität I_{char} /4/ bzw. die repräsentative Turbulenzintensität I_{rep} /5/ zu Grunde zu legen. Die charakteristische Turbulenzintensität ergibt sich dabei aus der Addition der mittleren Umgebungsturbulenzintensität und der Standardabweichung der Umgebungsturbulenzintensität. Da die mittlere Umgebungsturbulenzintensität im Folgenden rechnerisch ermittelt wird, bilden wir die charakteristische Turbulenzintensität gemäß /10/ durch Multiplikation der mittleren Umgebungsturbulenzintensität mit dem Faktor 1,2. Die in /5/ definierte repräsentative Turbulenzintensität I_{rep} (90%-Quantil) ergibt sich aus der Addition der mittleren Umgebungsturbulenzintensität und der 1,28fachen Standardabweichung. Dies entspricht der Multiplikation der rechnerisch ermittelten mittleren Umgebungsturbulenzintensität mit dem Faktor 1,256.

Im Bereich der atmosphärischen Bodengrenzschicht ergibt sich die zu berücksichtigende Umgebungsturbulenzintensität im Wesentlichen aus dem Einfluss der Rauigkeitselemente des Bodens wie Bäumen, Büschen, Bauwerken etc. Hierzu erfolgt eine Typisierung von Geländeoberflächen hinsichtlich ihres Bewuchses, ihrer Bebauung und Nutzung auf Basis detaillierter Satellitendaten zur Bodenbedeckung /1/, wobei Geländeabschnitte bis 25km Entfernung um jeden WEA-Standort einbezogen werden. Ggf. kann die Typisierung auf Basis der amtlichen topografischen Kar-

ten /16/ erfolgen bzw. angepasst werden. Den einzelnen Geländeabschnitten werden anschließend Rauigkeitsklassen gemäß den Empfehlungen des für die Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten Europäischen Windatlanten /15/ zugeordnet. Der Einfluss der verschiedenen Geländeabschnitte wird abhängig vom Abstand zum jeweiligen WEA-Standort in zwölf Richtungssektoren à 30° bewertet, wodurch sich gewichtete mittlere Werte für die Rauigkeiten in den jeweiligen Sektoren ergeben.

Auf Grundlage dieser Rauigkeitsklassifizierung werden von uns die charakteristischen bzw. repräsentativen Turbulenzintensitäten auf Basis der Empfehlungen aus /19/ für jeden einzelnen WEA-Standort bestimmt. Die charakteristischen und repräsentativen Turbulenzintensitäten sind im Gegensatz zu den Rauigkeiten nicht nur richtungsabhängig, sondern auch abhängig von der Windgeschwindigkeit und Höhe über Grund und werden entsprechend programmintern für die verschiedenen Richtungen, Windgeschwindigkeiten und Nabenhöhen ermittelt. Der Windgeschwindigkeitsverlauf orientiert sich dabei am Normalen Turbulenzmodell (NTM) /8/. In der nachfolgenden Tabelle 6 sind beispielhaft die Werte der charakteristischen und repräsentativen Turbulenzintensität für eine Nabenhöhe und Windgeschwindigkeit aufgeführt. Diese Werte berücksichtigen noch keinen ggf. anzusetzenden Turbulenzstrukturparameter C_{CT} für orografisch komplex anzusehende Standorte zur Erhöhung der Umgebungsturbulenz (siehe Kapitel 4.2).

Richtungssektoren	Charakteristische Turbulenzintensität [%]	Repräsentative Turbulenzintensität [%]
N	11,5	12,0
NNO	11,2	11,7
ONO	10,6	11,1
O	10,5	11,0
OSO	10,4	10,9
SSO	10,7	11,2
S	11,3	11,8
SSW	10,2	10,7
WSW	10,0	10,5
W	10,7	11,2
WNW	10,8	11,3
NNW	10,8	11,3

Tabelle 6: Beispieldichte Werte der charakteristischen und repräsentativen Turbulenzintensität am Standort in Westerbüttel für die Koordinaten 509159 / 5975941 (Koordinatensystem: UTM, WGS84, Zone 32), Bezugswerte: v = 15m/s, z = 92,0m

4.6 Effektive Turbulenzintensität

Das verwendete Berechnungsverfahren für die effektive Turbulenzintensität auf Nabenhöhe ist in Kapitel 2 beschrieben. Für den materialspezifischen Exponenten der Wöhlerlinie m wird die Strukturkomponente der WEA mit dem höchsten Exponenten zu Grunde gelegt. Daraus ergibt sich vereinfacht für allgemein gebräuchliche WEA ein Wert von $m = 10$ /18/ für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) mit einem Fasergehalt von mindestens 30 Vol.-% und höchstens 55 Vol.-% /11/. Für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit einem Fasergehalt von mindestens 50 Vol.-% und höchstens 60 Vol.-% und einer Epoxidharzmatrix wird ein Wert von $m = 14$ vorgeschlagen /11/. Bei hiervon abweichenden Fasergehalten oder Matrixharzen müssen ggf. herstellerspezifische materialspezifische Exponenten der Wöhlerlinie verwendet werden. Ebenso können WEA-Hersteller nachweisen, dass auch unter Verwendung geringerer materialspezifischer Exponenten der Wöhlerlinie der Vergleich der Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensitäten mit den Auslegungswerten für einen strukturellen Ermüdungsnachweis zulässig ist.

Entsprechend der Definition der Turbulenzintensität steigt ihr Wert mit abnehmender Windgeschwindigkeit an. Diesem physikalischen Umstand tragen die DIBt-Richtlinien 2004 /4/ und 2012 /5/ Rechnung, indem sie die Auslegungswerte für die Turbulenzintensität windgeschwindigkeitsabhängig definieren.

Für die WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, sind die windgeschwindigkeitsabhängigen Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität in Tabelle 7 maßgeblich für eine Bewertung der Standorteignung hinsichtlich der Auslegungswerte der Turbulenzintensität. Als Teil der Auslegung bezieht sich die DIBt-Richtlinie 2012 /5/ bzw. /8/ auf die repräsentative Turbulenzintensität I_{rep} .

Für die WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinien 2004 /4/ oder 1995 (1993) /3/ zu Grunde gelegt wird, sind gemäß /5/ die windgeschwindigkeitsabhängigen Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ in Tabelle 8 maßgeblich für eine Bewertung der Standorteignung hinsichtlich der Auslegungswerte der Turbulenzintensität. Als Teil der Auslegung bezieht sich die DIBt-Richtlinie 2004 /4/ bzw. /7/ auf die charakteristische Turbulenzintensität I_{char} . Für WEA, die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 1995 (1993) /3/ besitzen, ist entsprechend ein für alle Windgeschwindigkeiten konstanter mittlerer Auslegungswert von 20% zu Grunde zu legen. Im Gegensatz dazu vergleichen wir die Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensitäten für diese WEA stets mit den windgeschwindigkeitsabhängigen Auslegungswerten nach /4/ (Turbulenzkategorie A nach DIN EN 61400-1:2004 /7/).

Der Vergleich der Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität für WEA, die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinien 2012 /5/ oder 2004 /4/ besitzen, erfolgt mit den jeweils zu Grunde gelegten Auslegungswerten. Sollten Auslegungswerte von der Turbulenzkategorie A nach /8/ bzw. /7/ abweichen, werden die WEA in den Tabellen 9 und 10 farblich markiert.

Der Nachweis der Integrität der WEA in Bezug auf den Auslegungswert der Turbulenzintensität ist nach /8/ für den Bereich vom 0,2fachen bis zum 0,4fachen der Referenzwindgeschwindigkeit v_{ref} zu führen. Für Nabenhöhen bis 150m ist dabei ein Windgeschwindigkeitsbereich von 5 bis 20m/s für alle Windzonen gemäß Windzonenkarte /6/ abdeckend und wird entsprechend in den Tabellen 9 und 10 aufgeführt.

Im Falle von Überschreitungen der Auslegungswerte der Turbulenzintensität, die bei der jeweiligen Typenprüfung der WEA zu Grunde zu legen sind, sind diese in den Tabellen 9 und 10 jeweils fett und kursiv gedruckt.

In die Betrachtung der effektiven Turbulenzintensität werden nur WEA mit einem auf den jeweils größeren Rotordurchmesser D bezogenen dimensionslosen Abstand s_i von kleiner acht Rotordurchmesser zu den zu bewertenden WEA einbezogen (siehe Kapitel 2.1).

Zu Grunde liegende DIBt-Richtlinie	2012								
Windgeschwindigkeit [m/s]	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	
Auslegungswert [%] DIBt-Richtlinie 2012	29,9	24,8	22,0	20,1	18,9	18,0	17,3	16,7	
Lfd. WEA-Nr.	Ergebnisse [%] auf NH der WEA								
<u>vor</u> dem Zubau der WEA 1 bis 5									
	11	24,7	22,9	22,2	21,1	18,5	16,3	14,7	13,6
<u>nach</u> dem Zubau der WEA 1 bis 5									
	1	25,0	23,0	21,6	20,3	15,8	13,3	11,7	10,8
	4	26,8	24,8	22,4	19,0	14,9	12,6	11,5	10,8
	5	25,9	24,4	23,1	20,8	17,6	15,3	13,6	12,4
	11	24,9	23,0	22,2	21,1	18,5	16,3	14,7	13,6

Tabelle 7: Ergebnisse für die effektiven Turbulenzintensitäten auf Nabenhöhe (DIBt 2012)

Zu Grunde liegende DIBt-Richtlinie	2004								
Windgeschwindigkeit [m/s]	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	
Auslegungswert [%]	30,0	24,9	22,0	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7	
Lfd. WEA-Nr.	Ergebnisse [%] auf NH der WEA								
<u>nach</u> dem Zubau der WEA 1 bis 5									
	2	26,3	24,8	23,6	21,7	18,5	16,5	15,0	13,8

Zu Grunde liegende DIBt-Richtlinie	2004							
Windgeschwindigkeit [m/s]	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Auslegungswert [%]	30,0	24,9	22,0	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7
Lfd. WEA-Nr.	Ergebnisse [%] auf NH der WEA							
	3	24,7	22,5	20,8	19,5	15,6	13,5	12,1
								11,1

Tabelle 8: Ergebnisse für die effektiven Turbulenzintensitäten auf Nabenhöhe (DIBt 2004)

4.7 Weitere Windbedingungen

Ist der Standort nach DIN EN 61400-1:2011 /8/ als orografisch komplex anzusehen, so muss der Nachweis der Standorteignung für WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zugrunde gelegt wird, durch die Bestimmung weiterer Windbedingungen nach /8/ durchgeführt werden (siehe Kapitel 2). Die Bestimmung weiterer Windbedingungen kann ebenso erforderlich sein, wenn eine oder mehrere standortspezifische Windbedingungen des vereinfachten Vergleiches nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ nicht durch die Windbedingungen der Typenprüfung abgedeckt werden und die Standorteignung der WEA daher auf Basis eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeits- und/oder Extremlasten durchgeführt werden soll. Für diesen Vergleich der standortspezifischen Lasten zu den Lastannahmen der Typenprüfung, welcher im Allgemeinen durch den WEA-Hersteller erfolgt, müssen zusätzlich der mittlere Höhenexponent α sowie die mittlere Dichte der Luft ρ am Standort bestimmt werden. Bei komplexem Gelände ist darüber hinaus die Neigung der Anströmung (Inklinationswinkel) $\varphi_{\text{Inkl.}}$ sowie die extreme Turbulenzintensität zu ermitteln. Da die Neigung der Anströmung $\varphi_{\text{Inkl.}}$ in Lastvergleichen üblicherweise als weiterer Parameter mit einbezogen wird, ermitteln wir diese auch für die Fälle, in denen der Standort nicht als orografisch komplex nach /8/ anzusehen ist.

Die Ermittlung weiterer Windbedingungen erfolgt für WEA, bei denen mindestens eine der in Kapitel 16.2.b.i oder 16.2.b.ii der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ genannten Windbedingungen nicht durch die Windbedingung der Typenprüfung abgedeckt wird. Die von uns ermittelten standortspezifischen Windbedingungen sind für die nachzuweisenden WEA in Kapitel 8 ausgewiesen.

4.7.1 Mittlerer Höhenexponent

Es werden die auf die jeweiligen Nabenhöhen bezogenen mittleren Höhenexponenten α für alle nachzuweisenden WEA am Standort ermittelt und in Kapitel 8 ausgewiesen. Gemäß /8/ ist der mittlere Höhenexponent α im Auslegungsfall mit 0,2 anzunehmen. Die Ermittlung der standortspezifischen mittleren Höhenexponenten α zur Beschreibung der Windscherung erfolgt unter Verwendung der in /24/ ausgewiesenen mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten v_m für mehrere Referenzhöhen.

4.7.2 Mittlere Luftdichte

Es wird die mittlere Luftdichte ρ auf Nabenhöhe für alle nachzuweisenden WEA am Standort ermittelt und in Kapitel 8 ausgewiesen. Im Rahmen der Auslegung ist ihr Wert mit $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ anzunehmen /8/. Die mittlere Luftdichte ρ am Standort soll sich auf Windgeschwindigkeiten oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit ($v \geq v_{\text{Nenn}}$) beziehen /8/. Für deren Ermittlung werden langjährige Messzeitreihen der Temperatur und Luftdichte der DWD-Messstationen verwendet und mit Hilfe des in der Software WASP implementierten Air Density Calculator /21/ auf den zu beurteilenden Standort übertragen. Die in Kapitel 8 ausgewiesenen, mittleren Luftdichten ergeben sich entsprechend der Höhe des Standortes ü. NN. zzgl. Nabenhöhe, berechnet auf Basis der meteorologischen DWD-Messstation Cuxhaven (Entfernung ca. 30,0km, 5,0m Höhe ü. NN., mit einer Temperatur von 9,4°C im Jahresmittel (1981 – 1990)) /22/.

4.7.3 Neigung der Anströmung

Es werden die Neigungen der Anströmung (Inklinationswinkel) $\varphi_{\text{Inkl.}}$, bezogen auf eine horizontale Ebene, für nachzuweisende WEA auf Basis angenäherter Ebenen des Geländes ermittelt und in Kapitel 8 ausgewiesen. Gemäß /8/ ist im Auslegungsfall der Einfluss einer Schräganströmung von bis zu 8° anzunehmen. Abweichend zum Verfahren nach der DIN EN 61400-1:2011 /8/, legen wir für deren Ermittlung nicht die omnidirektionale angenäherte Ebene mit einem Radius von 5•NH zu Grunde (diese umfasst alle Sektoren zusammen, d.h. 360°), sondern unterteilen diese sektoriel in zwölf 30°-Abschnitte. In der anschließenden Summation zur Ermittlung der repräsentativen Neigung der Anströmung $\varphi_{\text{Inkl.}}$ erfolgt die Gewichtung der jeweiligen Neigungen unter Verwendung der sektoruellen Energieflussdichten. Diese werden auf Basis des in /15/ beschriebenen Verfahrens unter Nutzung der sektoruellen Winddaten am Standort /24/ bestimmt.

4.8 Modell- und Datenunsicherheiten

Generell bilden Berechnungsmodelle die Realität nur annähernd ab. Die unter den genannten Randbedingungen ermittelten Ergebnisse können daher nur als Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung verwendet werden. Insbesondere sind die Unsicherheiten der Berechnungen bei eng gewählten WEA-Abständen höher einzuschätzen (siehe Kapitel 2.1).

Im Rahmen der durchgeföhrten Berechnungen wurden teils vereinfachte Annahmen und Randbedingungen getroffen. Sämtliche Vereinfachungen sind dabei stets konservativ gewählt worden.

5 Zusammenfassung und Bewertung

Am Standort Westerbüttel (Schleswig-Holstein) plant der Auftraggeber die Errichtung von fünf WEA (WEA 1 bis 5) innerhalb eines bestehenden Windparks mit elf anderen zu berücksichtigenden WEA (WEA 14 bis 24) sowie neun weiteren zu berücksichtigenden, fremdgeplanten WEA (WEA 6 bis 13 und 25).

Im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme ist der Einfluss durch den Zubau der geplanten WEA 1 bis 5 zu bewerten. Alle weiteren WEA am Standort gehen gemäß der vom Auftraggeber vorgegebenen Windparkkonfiguration /23/ als Vorbelastung in die Berechnung ein und sind bei Unterschreitung der in /4/, /5/ festgelegten WEA-Abstände ebenfalls zu bewerten. Es ist daher unerheblich, ob die WEA bereits bestehen oder ob sie sich in der Planungs-, der Genehmigungs- oder in der Bauphase befinden.

Die TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG ist am 28.09.2015 per E-Mail beauftragt worden, die Standorteignung von WEA gemäß Kapitel 16 der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten. Die Standorteignung ist hierbei ohne weiteren Sicherheitszuschlag nachgewiesen, wenn die nachzuweisenden Windbedingungen am Standort die jeweiligen Auslegungswerte der Typenprüfung nicht überschreiten. Alternativ kann die Standorteignung der WEA auf Basis eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten und/oder der Extremlasten nachgewiesen werden (siehe Kapitel 2.2).

Der Nachweis der Standorteignung dient gleichzeitig als Turbulenz-Immissionsprognose im Sinne des BlmSchG /12/. Das bedeutet, dass die Immissionen auf WEA zumutbar sind, solange die Standorteignung der WEA hinsichtlich der Auslegungswerte nachzuweisender Windbedingungen oder hinsichtlich der nachzuweisenden Auslegungslasten, nachgewiesen ist.

Aufgrund des auf den jeweils größeren Rotordurchmesser bezogenen dimensionslosen Abstandes s_i der WEA 6 bis 10 und 12 bis 25 zu den zu bewertenden WEA 1 bis 5, der größer als acht Rotordurchmesser ist, werden diese WEA nicht in die Be trachtung der Standorteignung einbezogen (siehe Kapitel 2).

Für die geplanten WEA 1, 4 und 5 für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, zeigt sich im Vergleich mit der Windzone des Standortes, dass diese durch die Windzone der Auslegung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.3).

Für die WEA 1, 4, 5 und 11 für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, zeigt sich im Vergleich mit der standortspezifischen mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf jeweiliger Nabenhöhe v_m , dass diese durch die Auslegungswerte der zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt werden (siehe Kapitel 4.4).

Für die WEA 2 und 3, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinien 2004 /4/ oder 1995 (1993) /3/ zu Grunde gelegt wird, werden von uns die sich am Standort ergebenden effektiven Turbulenzintensitäten mit den windgeschwindigkeitsabhängigen Auslegungswerten nach der DIBt-Richtlinie 2004 /4/ für jedes Windgeschwindigkeitsintervall verglichen (siehe Kapitel 4.6).

Für die WEA 1, 4, 5 und 11 für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, werden die Auslegungswerte der Turbulenzintensität, die bei der jeweiligen Typenprüfung der WEA zu Grunde zu legen sind, für jedes Windgeschwindigkeitsintervall mit den sich am Standort ergebenden effektiven Turbulenzintensitäten verglichen.

Im Vergleich mit den windgeschwindigkeitsabhängigen Auslegungswerten der Turbulenzintensität, die bei der jeweiligen Typenprüfung der WEA zu Grunde zu legen sind, zeigen sich an den WEA 1, 2, 4, 5 und 11 Überschreitungen (siehe Tabellen 9 und 10).

Die Überschreitungen hinsichtlich der Auslegungswerte der effektiven Turbulenzintensität an der WEA 11 sind nicht auf den Zubau der WEA 1 bis 5 zurückzuführen, sondern ergeben sich bereits aus der ursprünglichen Windparkkonfiguration (siehe Tabelle 7).

Mit den effektiven Turbulenzintensitäten an der WEA 2 sowie mit den abdeckenden effektiven Turbulenzintensitäten an den WEA 1, 4 und 5 wurden durch den WEA-Hersteller in /30/ Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten durchgeführt. Hierbei erfolgt ein Vergleich der standortspezifischen Betriebsfestigkeitslasten mit den entsprechenden Auslegungslasten der zu Grunde liegenden Typenprüfung (siehe Kapitel 2.2). Die vom WEA-Hersteller ermittelten relativen schädigungsäquivalenten Einstufenkollektive sowie die gewichteten Mittelwerte für repräsentative Momente am Blattanschluss-, Nabens-, Turmkopf- und Turmfußsystem sind in /30/ dargestellt und wurden von uns eingesehen. Die Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten des WEA-Herstellers ergaben keine relevante Überschreitung, so dass nach Angaben des WEA-Herstellers die lastseitige Standorteignung nicht gefährdet ist. Es wurden von uns keine eigenen Nachrechnungen der standortspezifischen Betriebsfestigkeitslasten durchgeführt, jedoch werden die vom Hersteller durchgeführten Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten /30/ als plausibel angesehen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Standorteignung der am Standort Westerbüttel betrachteten WEA 3 nachgewiesen ist. Des Weiteren ist die Standorteignung der WEA 1, 2, 4 und 5 unter Berücksichtigung der Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten /30/ lastseitig nachgewiesen.

Die vorliegende gutachtliche Stellungnahme ist nur in ihrer Gesamtheit gültig. Die darin getroffenen Aussagen beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden überlieferten Dokumente.

Die TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit der vom Auftraggeber bzw. Dritter übermittelten Informationen und Angaben und für durch unrichtige Angaben bedingte falsche Aussagen.

Die von TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG erbrachten Leistungen (z.B. Gutachten-, Prüf- und Beratungsleistungen) dürfen nur im Rahmen des vertraglich vereinbarten Zwecks verwendet werden. Vorbehaltlich abweichender Vereinbarungen im Einzelfall, räumt TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG dem Auftraggeber an seinen urheberrechtsfähigen Leistungen jeweils ein einfaches, nicht übertragbares sowie zeitlich und räumlich auf den Vertragszweck beschränktes Nutzungsrecht ein. Weitere Rechte werden ausdrücklich nicht eingeräumt, insbesondere ist der Auftraggeber nicht berechtigt, die Leistungen des Auftragnehmers zu bearbeiten, zu verändern oder nur auszugsweise zu nutzen.

Eine Veröffentlichung der Leistungen über den Rahmen des vertraglich vereinbarten Zwecks hinaus, auch auszugsweise, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung von TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG. Eine Bezugnahme auf TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG ist nur bei Verwendung der Leistung in Gänze und unverändert zulässig.

Bei einem Verstoß gegen die vorstehenden Bedingungen ist TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG jederzeit berechtigt, dem Auftraggeber die weitere Nutzung der Leistungen zu untersagen.

6 Formelzeichen und Abkürzungen

WEA	Windenergieanlage(n)	
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung	
DWD	Deutscher Wetterdienst	
NH	Nabenhöhe	
WZ	Windzone	
GK	Geländekategorie	
NTM	Normales Turbulenzmodell	
ETM	Extremes Turbulenzmodell	
P _{Nenn}	Nennleistung der jeweiligen WEA	[MW]
D	Rotordurchmesser	[m]
s _i	der auf den Rotordurchmesser der jeweils größeren WEA bezogene dimensionslose Abstand von der Turmachse der betrachteten WEA zur Turmachse der benachbarten WEA	[-]
c _{dir}	Richtungsfaktor	[-]
c _{season}	Jahreszeitenbeiwert	[-]
c _T	Schubbeiwert des Rotors	[-]
c _{CT}	Turbulenzstrukturparameter	[-]
I _{eff}	Effektive Turbulenzintensität auf Nabenhöhe	[-]
I _{char}	Charakteristische Turbulenzintensität bei 15m/s	[-]
I _{rep}	Repräsentative Turbulenzintensität bei 15m/s	[-]
I _T	Maximale Turbulenzintensität im Nachlauf einer WEA auf Nabenhöhe (totale Turbulenzintensität)	[-]
A	Skalierungsparameter der Weibullverteilung	[m/s]
k	Formparameter der Weibullverteilung	[-]
m	Exponent der Wöhlerlinie	[-]
v	Windgeschwindigkeit (allgemein)	[m/s]
v _m	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	[m/s]
v _{b,0}	Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit, bezogen auf 10,0m Höhe über Bodenniveau für die Geländekategorie II	[m/s]
v _b	Modifizierte Basiswindgeschwindigkeit, bezogen auf 10,0m Höhe über Bodenniveau für die Geländekategorie II	[m/s]

v_{50}	Extremer 10-min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren am Standort	[m/s]
v_{ref}	Auslegungswert für v_{50} auf Nabenhöhe	[m/s]
v_{in}	Einschaltwindgeschwindigkeit	[m/s]
v_{Nenn}	Nennwindgeschwindigkeit	[m/s]
z	Höhe über Grund (allgemein)	[m]
z_{hub}	Nabenhöhe der jeweiligen WEA	[m]
α	Höhenexponent für das exponentielle Windprofil	[$-$]
$\varphi_{\text{Inkl.}}$	Inklinationswinkel der Schräganströmung	[$^{\circ}$]
ρ	Mittlere Dichte der Luft	[kg/m 3]
σ	Standardabweichung der mittleren Windgeschwindigkeit	[m/s]
	Altgrad (Vollkreis $\leqq 360$)	[$^{\circ}$]

7 Literatur- und Quellenangaben

- /1/ European Environmental Agency, CORINE Land Cover 2006 raster data – version 17 (12/2013); <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3>; Kopenhagen; 2013
- /2/ Dekker, J.W.M.; Pierik, J.T.G. (Eds.); European Wind Turbine Standards II, ECN Solar & Wind Energy; Petten, Niederlande; 1998
- /3/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Richtlinie für Windkraftanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Juni 1993; DIBt, Berlin; 2. Aufl. 1995
- /4/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Richtlinie für Windenergieanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung März 2004; DIBt, Berlin; 2004
- /5/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Richtlinie für Windenergieanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Oktober 2012; DIBt, Berlin; 2012
- /6/ Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 1991-1-4 und nationaler Anhang DIN EN 1991-1-4/NA; Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010; Berlin; Dezember 2010
- /7/ Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1 (VDE 0127 Teil 1), Windenergieanlagen - Teil 1: Sicherheitsanforderungen (IEC 61400-1:1999, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61400-1:2004; Berlin; August 2004
- /8/ Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1 (VDE 0127-1), Windenergieanlagen - Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005 + A1:2010); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005 + A1:2010; Berlin; August 2011
- /9/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind turbines - Part 1: Design requirements; Third Edition; August 2005 + Amendment 1: Oktober 2010
- /10/ Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH; Guideline for the Certification of Wind Turbines; Hamburg; Edition 2003 with Supplement 2004
- /11/ Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH; Guideline for the Certification of Wind Turbines; Hamburg; Edition 2010
- /12/ Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943)
- /13/ Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BlmSchV) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 3756)

- /14/ Risø National Laboratory; Frandsen, St. T.; Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters; Wind Energy Department; Risø-R-1188(EN); Roskilde, Dänemark; Januar 2007
- /15/ Risø National Laboratory; European Wind Atlas; Roskilde, Dänemark; 1989
- /16/ TOP50, Amtliche topografische Karten, Landesvermessungsämter der Bundesländer, (der Aktualisierungsstand der digitalen Daten entspricht dem der analogen Karten); 2003/2004
- /17/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, Hole-filled seamless SRTM data V4.1, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT); 08.2008
- /18/ Kunte, A; Turbulenz-Immissionsprognosen vereinheitlicht; WIND-KRAFT Journal; Verlag Natürliche Energien, Ausgabe 4/2009, S.28 bis 30; Seevetal
- /19/ VDI 3783 Blatt 12; Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht; Verein Deutscher Ingenieure; 1999
- /20/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt); Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen; Windzonen_Version_19-07-12.xls in der Fassung vom Juli 2012
- /21/ Risø National Laboratory, WAsP 11 (<http://www.wasp.dk>), Dänemark, 2012
- /22/ Deutscher Wetterdienst, S. Traup, B. Kruse: Wind und Windenergiopotenziale in Deutschland - Winddaten für Windenergienutzer, Version 6, Deutschland 2011
- /23/ Planungsgesellschaft Wind to Gas Brunsbüttel GmbH & Co. KG; Koordinaten und Angaben zu WEA-Spezifikationen inkl. jeweiliger Angabe zu Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung der geplanten, fremdgeplanten und bestehenden WEA, Lageplan der geplanten WEA; 21.10.2015 und 10.11.2015
- /24/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG; Auszug zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit für den Standort Westerbüttel; Referenz-Nr. 2015-WND-WPE-037-R0; Hamburg; 10.11.2015
- /25/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG; Dokumentation zur Besichtigung am Standort Westerbüttel; Hamburg; 15.10.2015
- /26/ TÜV SÜD Industrie Service GmbH; Gutachtliche Stellungnahme für eine Typenprüfung - Lastannahmen, Anlage: Windenergieanlage ENERCON E-115 Rotorblatt Typ E115-1, Nabenhöhe 91,8 m (E-115/BF/90/14/01), abdeckende Lastannahmen für WEA Klasse II_A und Kaltklima Klasse S gemäß DIN EN 61400-1:2011 (IEC 61400-1:2005 + A1:2010) und für Gebiete der Windzone 4, Geländekategorien I und II, Turbulenzkategorie A, Erdbebenzone 0 gemäß DIBt:2012, hier: Turm und Fundamentlasten; Prüfnummer: 2175624-1-d; München; 14.11.2014
- /27/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG; Gutachtliche Stellungnahme für die Typenprüfung der Windenergieanlage N100/3300, Rotorblatt NR 50, Nabenhöhe

100 m, DIBt (2004) Windzone III - Lastannahmen -; TÜV NORD Bericht Nr.: 8109 130 206 - 1 D II Rev.1; Hamburg; 24.05.2013

- /28/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG; Gutachtliche Stellungnahme für die Typenprüfung der Windenergieanlage N100/3300, Rotorblatt LM 48.8, Nabenhöhe 100 m, DIBt (2004) Windzone III - Lastannahmen -; TÜV NORD Bericht Nr.: 8109 130 206 - 1 D IV Rev.1; Hamburg; 24.05.2013
- /29/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG; Gutachtliche Stellungnahme für die Typenprüfung der Windenergieanlage Senvion 3.2M, Rotorblatt RE55.8, Nabenhöhe 93 m, DIBt 2012, DIN EN 1991-1-4 Zone 4 - Lastannahmen -; TÜV NORD Bericht Nr.: 8109 663 948 - 1 D I Rev.1; Essen; 20.01.2014
- /30/ ENERCON GmbH; Ergebnisbericht, Standortspezifischer Lastvergleich, Standorteignung Windpark Westerbüttel, Version 1.0, Rev. 0; Dokument-ID: D0446440-1; Aurich; 18.12.2015

8 Zusammenfassung aller Windbedingungen

WEA 1		Ausgelegt nach der DIBt-Richtlinie 2012							
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	41,9	34,4	29,9	26,9	24,8	23,2	22,0	21,0	20,1
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 10	29,6	26,7	25,0	23,8	23,0	22,4	21,6	20,9	20,3
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
Auslegungswert [%]	19,5	18,9	18,4	18,0	17,6	17,3	17,0	16,7	16,5
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 10	17,6	15,8	14,5	13,3	12,4	11,7	11,2	10,8	10,5
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C_{CT} = 1,0)									
Richtungs-sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≤ 100%) /24/	Weibullverteilung			α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	Φ _{inkl.} [°]	
		A [m/s] /24/	k [-] /24/						
N	0,037	5,2	2,06	-	11,1	11,6	0,0		
NNO	0,041	5,5	2,03	-	11,8	12,4	0,0		
ONO	0,062	6,5	2,29	-	10,6	11,1	0,0		
O	0,088	7,6	2,51	-	10,6	11,1	0,0		
OSO	0,088	6,6	2,73	-	10,4	10,9	0,1		
SSO	0,078	5,9	2,35	-	10,9	11,4	0,1		
S	0,071	5,8	2,13	-	11,1	11,6	0,0		
SSW	0,108	8,5	2,64	-	10,1	10,6	0,1		
WSW	0,143	8,8	2,18	-	10,1	10,6	0,1		
W	0,124	8,7	2,01	-	10,7	11,2	0,0		
WNW	0,099	7,8	2,21	-	10,8	11,3	0,0		
NNW	0,061	6,6	2,12	-	10,8	11,3	0,0		
Gesamt (alle Sektoren)	1,000	7,4	2,07	0,25	10,6	11,1	0,1		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,56 /24/				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					42,79				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,238				

Tabelle 9: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 1

WEA 4		Ausgelegt nach der DIBt-Richtlinie 2012							
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	41,9	34,4	29,9	26,9	24,8	23,2	22,0	21,0	20,1
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 10	31,7	28,5	26,8	25,8	24,8	23,6	22,4	21,1	19,0
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
Auslegungswert [%]	19,5	18,9	18,4	18,0	17,6	17,3	17,0	16,7	16,5
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 10	16,6	14,9	13,6	12,6	12,0	11,5	11,1	10,8	10,6
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C _{CT} = 1,0)									
Richtungs-sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≤ 100%) /24/	Weibullverteilung			α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	$\Phi_{\text{Inkl.}}$ [°]	
		A [m/s] /24/	k [-] /24/						
N	0,037	5,1	2,06	-	11,4	11,9	0,0		
NNO	0,041	5,6	2,03	-	11,0	11,5	0,1		
ONO	0,062	6,6	2,29	-	10,5	11,0	0,1		
O	0,088	7,6	2,50	-	10,5	11,0	0,0		
OSO	0,088	6,6	2,73	-	10,4	10,9	0,0		
SSO	0,078	6,0	2,36	-	10,8	11,3	0,0		
S	0,071	5,6	2,13	-	11,2	11,7	0,1		
SSW	0,109	8,2	2,64	-	10,6	11,1	0,1		
WSW	0,143	8,8	2,19	-	9,9	10,4	0,0		
W	0,124	8,8	2,01	-	10,6	11,1	0,1		
WNW	0,099	7,8	2,21	-	10,9	11,4	0,0		
NNW	0,061	6,6	2,12	-	10,9	11,4	0,0		
Gesamt (alle Sektoren)	1,001	7,4	2,06	0,25	10,6	11,1	0,1		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,53 /24/				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					42,79				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,238				

Tabelle 10: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 4

WEA 5		Ausgelegt nach der DIBt-Richtlinie 2012							
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	41,9	34,4	29,9	26,9	24,8	23,2	22,0	21,0	20,1
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 10	31,1	27,7	25,9	25,1	24,4	23,7	23,1	22,5	20,8
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
Auslegungswert [%]	19,5	18,9	18,4	18,0	17,6	17,3	17,0	16,7	16,5
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 10	19,0	17,6	16,4	15,3	14,4	13,6	12,9	12,4	11,9
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C _{CT} = 1,0)									
Richtungs-sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≤ 100%) /24/	Weibullverteilung			α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	$\Phi_{\text{Inkl.}}$ [°]	
		A [m/s] /24/	k [-] /24/						
N	0,037	5,1	2,06	-	11,3	11,8	0,0		
NNO	0,041	5,7	2,03	-	10,9	11,4	0,0		
ONO	0,062	6,6	2,29	-	10,5	11,0	0,0		
O	0,087	7,6	2,51	-	10,4	10,9	0,1		
OSO	0,087	6,6	2,73	-	10,4	10,9	0,1		
SSO	0,078	6,0	2,36	-	10,9	11,4	0,0		
S	0,071	5,7	2,13	-	11,0	11,5	0,0		
SSW	0,109	8,0	2,64	-	11,0	11,5	0,0		
WSW	0,143	8,8	2,18	-	9,9	10,4	0,1		
W	0,124	8,8	2,01	-	10,4	10,9	0,0		
WNW	0,099	7,8	2,21	-	10,9	11,4	0,1		
NNW	0,061	6,6	2,12	-	10,9	11,4	0,1		
Gesamt (alle Sektoren)	0,999	7,4	2,07	0,25	10,6	11,1	0,1		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,52 /24/				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					42,79				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,238				

Tabelle 11: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 5