

# **Gutachtliche Stellungnahme zur Standorteignung von Windenergieanlagen im Windpark**

## **Kannemoor-Norderwisch**

Erstellt im Auftrag für

Bürgerwind Südermarsch II GmbH & Co. KG, Friedrichskoog

WindPlan Witthohn + Frauen GmbH & Co. KG, Heide

Revision 4

Hamburg, 05.11.2019

<b>Revision</b>	<b>Datum</b>	<b>Änderung</b>
0	27.03.2017	Erste Ausgabe
1	05.04.2017	Einarbeitung der standortspezifischen Lastvergleiche
2	04.05.2017	Aufheben des Vorbehalts durch Vorliegen einer gültigen Typenprüfung
3	23.07.2019	Änderung der Windparkkonfiguration
3	05.11.2019	Redaktionell: Anpassung des Namen eines Vorhabenträgers

**Gegenstand:** Ermittlung der effektiven Turbulenzintensitäten am Standort sowie weiterer Windbedingungen zur Beurteilung der Standorteignung von Windenergieanlagen innerhalb des Windparks Kannemoor-Norderwisch

**Referenz-Nr.:** 2019-WND-043-CXLX-R4

**Auftraggeber:** Bürgerwind Südermarsch II GmbH & Co. KG  
Klinkerstr. 2  
25718 Friedrichskoog, Deutschland

und

WindPlan Witthohn + Frauen GmbH & Co. KG  
Teichkoppel 12  
25746 Heide, Deutschland

**Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen:**

- Lageplan des Windparks /24/
- Koordinaten der zu berücksichtigenden WEA /24/  
(Koordinatensystem: UTM ETRS89, Zone 32)
- WEA-Spezifikationen inkl. jeweiliger Angabe zu Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung der zu berücksichtigenden WEA /24/
- Ergänzende Angaben zur Standortbeschreibung /24/
- Extremwindabschätzung /26/
- Standortspezifische Lastvergleiche /27/, /28/

**Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:**

Verfasser	Dr. rer. nat. M. Polster Sachverständige	Hamburg, 05.11.2019
Geprüft durch	Dipl.-Ing. (FH) O. Röglin Sachverständiger	Hamburg, 05.11.2019

**Für weitere Auskünfte:**

TÜV NORD EnSys 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](mailto:mopolster@tuev-nord.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	<i>Nachweis durch vereinfachten Vergleich der Windbedingungen</i>	8
2.2	<i>Nachweis durch Vergleich der Lasten</i>	11
<b>3</b>	<b>Randbedingungen</b>	<b>12</b>
3.1	<i>Windparkkonfiguration</i>	12
3.2	<i>Windbedingungen der Auslegung</i>	16
3.3	<i>Winddaten am Standort</i>	17
<b>4</b>	<b>Durchgeführte Untersuchungen</b>	<b>18</b>
4.1	<i>Standortbesichtigung</i>	18
4.2	<i>Komplexität des Geländes</i>	19
4.3	<i>50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe</i>	20
4.4	<i>Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe</i>	21
4.5	<i>Umgebungsturbulenzintensität</i>	22
4.6	<i>Effektive Turbulenzintensität</i>	23
4.7	<i>Weitere Windbedingungen</i>	27
4.7.1	<i>Mittlerer Höhenexponent</i>	28
4.7.2	<i>Mittlere Luftdichte</i>	28
4.7.3	<i>Neigung der Anströmung</i>	28
4.8	<i>Modell- und Datenunsicherheiten</i>	29
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Bewertung</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Literatur- und Quellenangaben</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung aller Windbedingungen</b>	<b>40</b>

## 1 Aufgabenstellung

Am Standort Kannemoor-Norderwisch (Schleswig-Holstein) planen die Auftraggeber die Errichtung von vier Windenergieanlagen (WEA 48 bis 51). In der Nähe zu den geplanten WEA sind 47 weitere WEA (WEA 1 bis 47) zu berücksichtigen, siehe hierzu Tabelle 1 bzw. Abbildung 1.

Im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme ist der Einfluss durch den Zubau der geplanten WEA 48 bis 51 zu bewerten. Alle weiteren WEA am Standort (siehe Tabelle 1) gehen gemäß der vom Auftraggeber vorgegebenen Windparkkonfiguration /24/ 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 EnSys GmbH & Co. KG ist am 29.05.2019 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 Nachlaufsituationen 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. Darüber hinaus ist nach /5/ der Ermittlung der Standortbedingungen eine Standortbesichtigung zu Grunde zu legen.

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. Im Rahmen der nachfolgenden Bewertung der Standorteignung

wird unterstellt, dass die jeweilige Entwurfslebensdauer aller zu bewertenden WEA noch nicht überschritten ist.

WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 50m sind genehmigungsbedürftige Anlagen gem. § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) /13/ in Verbindung mit Ziff. 1.6 Spalte 2 des Anhangs zur vierten Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) /14/. 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 /13/.

## 2 Grundlagen

WEA sind Umweltbedingungen und elektrischen Einflüssen ausgesetzt, welche die Belastung, die 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 Standortbeachtung 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 für den Nachweis der Integrität der Konstruktion 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  $\alpha$  für das exponentielle Windprofil,
- mittlere Dichte der Luft  $\rho$  für Windgeschwindigkeiten  $\geq v_{Nenn}$ ,
- Neigung der Anströmung  $\varphi_{Inkl.}$ ,
- 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 standort-spezifischen 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 standortspezifischen 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 den Zubau die Turbulenzbelastung an WEA, die nach /5/ zu betrachten und zu bewerten sind und 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 Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{50}$  bzw. 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 /15/ ist das Verfahren nach Frandsen (2007) beschrieben, um den Einfluss mehrerer, unterschiedlich weit entfernter WEA unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Nachlaufsituationen zu bewerten. Das dort verwendete Modell wird sowohl im nationalen als auch im internationalen Regelwerk empfohlen /4/, /5/ bzw. /8/, /9/. Die Bewertung in /15/ erfolgt mit Hilfe einer effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  und stellt für jede Windgeschwindigkeit die mittlere Turbulenzintensität dar, die über die gesamte Lebensdauer der WEA die gleiche Materialermüdung verursacht, wie die am Standort auftretenden variierenden Turbulenzintensitäten. Sie bewertet die Belastung durch die Umgebungsturbulenzintensität und die zusätzlich durch Nachlaufeffekte induzierte Belastung. Die effektive Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  ist eine materialspezifische Ersatzgröße und somit abhängig vom zu Grunde gelegten materialspezifischen Exponenten der Wöhlerlinie  $m$ .

Bei der Bestimmung der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  ist nach /4/, /5/ bzw. /8/ für die Umgebungsturbulenz eine entsprechende Unsicherheit zu berücksichtigen (siehe Kapitel 4.5).

Gegenüber der in /15/ 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 /8/ bzw. /15/ 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 Turbulenzinten-

sität  $I_T$ ) 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. Die berechneten oder gemessenen Schubbeiwerte  $c_T$  werden uns seitens des WEA-Herstellers zur Verfügung gestellt und werden von uns als richtig vorausgesetzt. Liegen uns für insbesondere ältere WEA keine Schubbeiwerte  $c_T$  vor, so verwenden wir den in /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 Nachlaufsituation, die nach /8/ bzw. /15/ 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 Nachlaufsituation 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. /17/, /18/). Die Ausdehnung des Nachlaufs basiert auf einem in /15/ 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 /8/ ist 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. Bei einer größeren Entfernung als  $10D$  muss somit nicht mehr von einem turbulenz erhöhenden Einfluss ausgegangen werden. Für jede WEA wird ein turbulenz erhöhender Einfluss daher nur von benachbarten WEA mit einer geringeren Entfernung als  $10D$  berücksichtigt.

Nach unseren Erfahrungen liefern die zur Anwendung kommenden Modelle zur Berechnung der Turbulenzintensität bei WEA-Abständen unterhalb von etwa 2,5D nur begrenzt belastbare Ergebnisse an den der erhöhten Turbulenz der Nachlaufströmung ausgesetzten benachbarten WEA. Bei Einhaltung entsprechender Kriterien können bei Unterschreitungen von 2,5D im Einzelfall dennoch belastbare Aussagen zur Standorteignung getroffen werden. 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 standortspezifischen Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten und/oder auf Basis eines standortspezifischen Lastvergleiches der Extremlasten nachzuweisen. 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 Standsicherheit, also auch die Standorteignung der WEA, lastseitig gewährleistet. Sollten die standortspezifischen Lasten oberhalb der Auslegungslasten der Typenprüfung liegen, kann die Standorteignung der betroffenen WEA nicht nachgewiesen werden.

Neben den windgeschwindigkeitsabhängig 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 den Lastvergleich 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.i 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, können die Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität  $I_{eff}$  bei zu geringen WEA-Abständen nach unseren Erfahrungen nur noch begrenzt belastbar sein. Wird dies durch unsere Einzelfallprüfung bestätigt, empfehlen wir, die von uns ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten am Standort nicht im Rahmen eines standortspezifischen Lastvergleiches 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 für WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, nach DIN EN 61400-1:2011 /8/ als orografisch komplex anzusehen, so ist der Nachweis der Standorteignung für WEA durch den Nachweis der Integrität der Konstruktion nach /8/ durchzuführen. 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 /24/.

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 Betriebsbeschränkungen von WEA berücksichtigt.

Ifd. WEA-Nr.	WEA-Bezeichnung	Koordinaten [m]		WEA-Typ	P <sub>Nenn</sub> [MW]	D [m]	NH [m]
		Rechtswert	Hochwert				
 1	STM_1	505850	5981289	Senvion MM82	2,000	82,0	80,0
 2	STM_5	505569	5981207	Vestas V39	0,600	39,0	53,0
 3	STM_6	505778	5981492	Vestas V44	0,600	44,0	53,0
 4	STM_8	505536	5981631	Senvion MM82	2,050	82,0	80,0
 5	STM_9	505316	5981772	Senvion MM92	2,000	92,5	80,0
 6	STM_10	506003	5981742	Senvion MM82	2,050	82,0	80,0
 7	STM_11	505756	5981916	Senvion MM92	2,000	92,5	80,0

Ifd. WEA- Nr.	WEA- Bezeich- nung	Koordinaten [m]		WEA-Typ	P <sub>Nenn</sub> [MW]	D [m]	NH [m]
		Rechts- wert	Hoch- wert				
 8	STM_12	506157	5982008	Senvion MM92 Evolution	2,050	92,5	80,0
 9	STM_13	505999	5982245	Senvion 3.4M104	3,370	104,0	98,0
 10	STM_14	505522	5982147	Vestas V112	3,075	112,0	94,0
 11	STM_15	505085	5982077	Vestas V112	3,075	112,0	94,0
 12	STM_16	505042	5982442	Vestas V112	3,075	112,0	84,0
 13	STM_17	505476	5982520	Senvion 3.4M104	3,370	104,0	98,0
 14	STM_18	505947	5982547	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 15	STM_19	505277	5982735	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 16	STM_20	503058	5983588	Vestas V39	0,500	39,0	40,5
 17	STM_21	505739	5982758	Senvion 3.4M114	3,370	114,0	93,0
 18	STM_22	506124	5981450	ENERCON E-92	2,350	92,0	104,0
 19	STM_23	506293	5981760	ENERCON E-92	2,350	92,0	104,0
 20	STM_24	506397	5981504	ENERCON E-92	2,350	92,0	104,0
 21	BAR_8	504637	5984541	ENERCON E-101	3,050	101,0	99,0
 22	BAR_9	505006	5984531	ENERCON E-101	3,050	101,0	99,0
 23	BAR_10	505285	5984584	ENERCON E-101	3,050	101,0	99,0
 24	BAR_11	504599	5984159	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 25	BAR_12	505479	5984209	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 26	BAR_13	504362	5983845	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 27	BAR_14	504761	5983821	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 28	BAR_15	505189	5983955	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 29	BAR_16	505584	5983915	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0

Ifd. WEA- Nr.	WEA- Bezeich- nung	Koordinaten [m]		WEA-Typ	P <sub>Nenn</sub> [MW]	D [m]	NH [m]
		Rechts- wert	Hoch- wert				
 30	BAR_17	505768	5983091	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 31	BAR_18	505721	5983498	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 32	BAR_19	504565	5983531	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 33	BAR_20	504162	5983577	Senvion 3.2M114	3,170	114,0	93,0
 34	BAR_21	504280	5983200	ENERCON E-101	3,050	101,0	99,0
 35	BAR_22	503858	5983256	ENERCON E-101	3,050	101,0	99,0
 36	BAR_24	505894	5984532	Senvion 3.4M114	3,370	114,0	93,0
 37	BAR_25	505983	5984190	Senvion 3.4M114	3,370	114,0	93,0
 38	BAR_26	506244	5984454	Senvion 3.4M114	3,370	114,0	93,0
 39	HEL_2	501799	5981833	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 40	HEL_3	502048	5982376	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 41	HEL_4	502378	5982576	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 42	HEL_5	502470	5982166	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 43	HEL_6	502147	5981997	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 44	HEL_7	502551	5981803	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 45	HEL_8	502248	5981644	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 46	HEL_9	501931	5981457	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 47	HEL_10	502863	5981707	ENERCON E-115	3,000	115,7	92,0
 48	KANN 01	504021	5982371	ENERCON E-115 EP3 E3	2,990	115,7	92,0
 49	KANN 02	504282	5982394	ENERCON E-115 EP3 E3	2,990	115,7	92,0
 50	NW 01	505096	5981493	Nordex N149/4.5	4,500	149,1	125,0
 51	NW 02	505119	5981142	Nordex N149/4.5	4,500	149,1	105,0

**Tabelle 1:** Windparkkonfiguration (Koordinatensystem: UTM ETRS89, Zone 32)

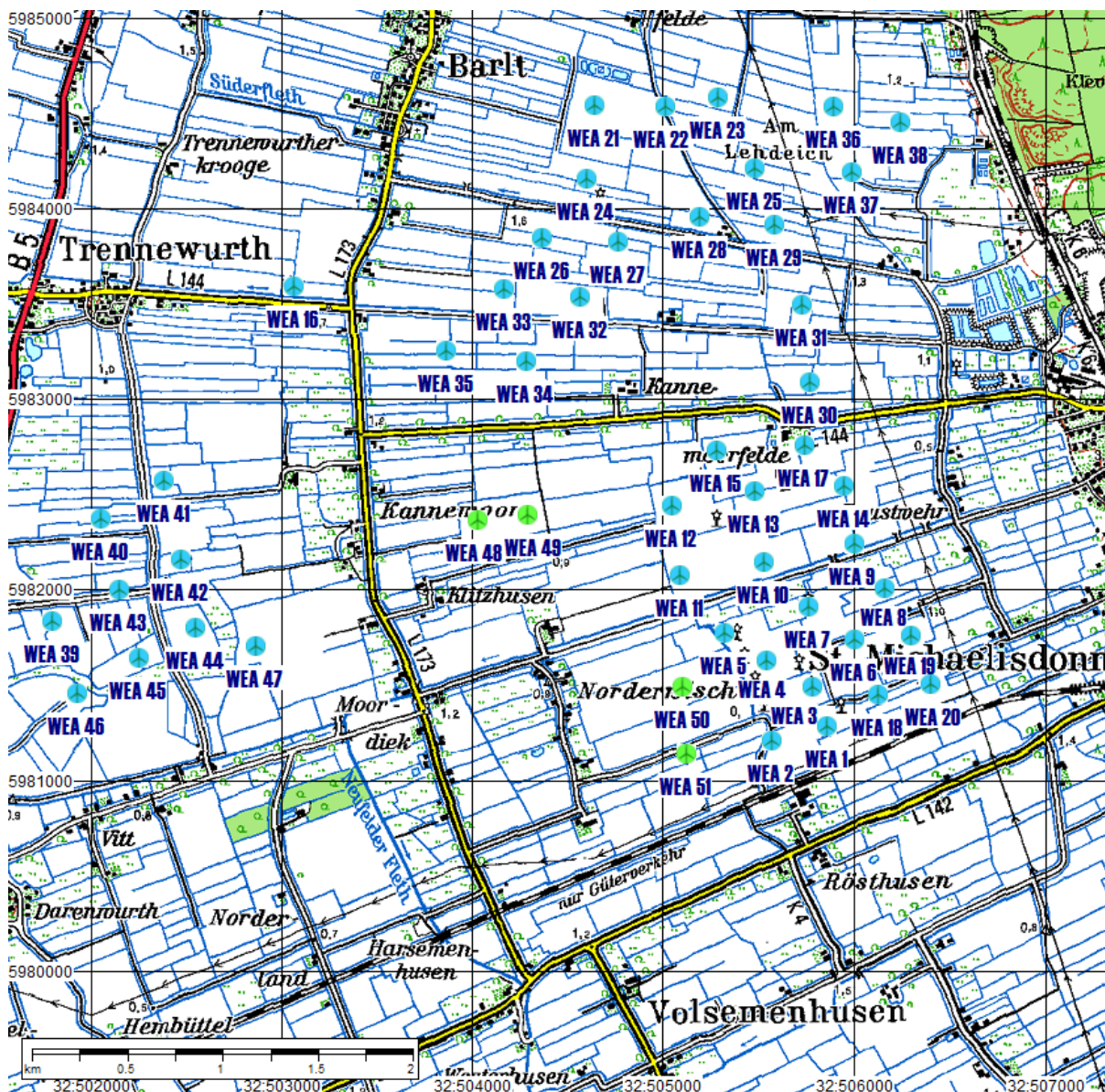


Abbildung 1: Lage des Windparks, Auszug topografische Karte 1:50.000 (vergrößerte Darstellung) /17/

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  $2,26D_{ENERCON E-115 EP3 E3}$ . Dies betrifft die WEA 48 und 49 mit einem Abstand von ca. 261m.

Es werden alle WEA mit einem auf den jeweils größeren Rotordurchmesser  $D$  bezogenen dimensionslosen Abstand  $s_i$  von kleiner  $8D$  zu den neu geplanten WEA in die nachfolgenden Betrachtungen einbezogen (siehe Kapitel 2.1). In die Berechnung der effektiven Turbulenzintensität gehen alle WEA aus Tabelle 1 ein. Der Abstand der WEA 14 bis 17, 19 bis 33 und 36 bis 47 zu den neu geplanten WEA 48 bis 51 ist

größer acht Rotordurchmesser. Demzufolge erfolgt für diese WEA keine Bewertung der Standorteignung.

### 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 am Standort 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. Die in Kapitel 7 zitierten Quellenangaben der verwendeten Windbedingungen der Auslegung können ggf. von den Dokumenten, die im späteren Genehmigungsverfahren bei der zuständigen Genehmigungsstelle eingereicht werden, abweichen. Werden die in Tabelle 2 zu Grunde gelegten Auslegungswerte jedoch weiterhin durch die Auslegungswerte der mit der Genehmigung eingereichten Typenprüfung abgedeckt, behalten die in dieser gutachtlichen Stellungnahme getroffenen Aussagen zur Standorteignung von WEA weiterhin Ihre Gültigkeit.

Für die WEA des Typs ENERCON E-115 EP3 E3, 2,99MW mit 92,0m NH (WEA 48 und 49) liegt derzeit noch keine gültige Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vor. Diese Auslegungswerte gelten daher nur vorbehaltlich. In Tabelle 2 sind die betroffenen WEA 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.
 18	IEC IIA /8/, WZ 4, GK I/II /6/	A	8,50	42,50	/29/ /30/
 48#	IEC S /8/, WZ 4, GK I+II /5/	A	8,12	45,13	/31/
 49#	IEC S /8/, WZ 4, GK I+II /5/	A	8,12	45,13	/31/
 50	WZ S, GK S	gem. WEA-Hersteller	7,20	39,00	/33/



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.
 51	WZ S, GK S	gem. WEA-Hersteller	7,20	38,20	/32/

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

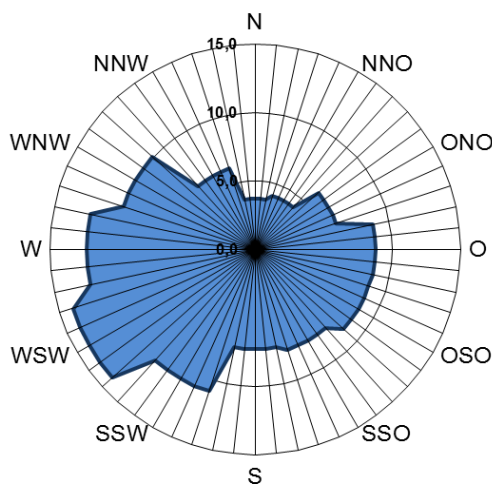
### 3.3 Winddaten am Standort

In /25/ sind die Winddaten für die Referenzpunkte an den Standorten der WEA 48 bis 51 auf jeweiliger Nabenhöhe der WEA angegeben. Außerdem liegen am Standort der WEA 11 die Winddaten für sieben Höhen (53,0m, 80,0m, 84,0m, 94,0m, 98,0m, 99,0m und 104,0m) vor und werden in unseren Berechnungen dementsprechend verwendet. Zusätzlich liegen an den Standorten der WEA 48 bis 51 mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten  $v_m$  sowie die mittleren Parameter der Weibullverteilung auf verschiedenen Höhen zur Bestimmung des mittleren Höhenexponenten  $\alpha$  vor. Die Winddaten sind in Tabelle 3 bzw. Abbildung 2 beispielhaft für den Referenzpunkt am Standort der WEA 49 für eine Höhe von 92,0m ü. Grund dargestellt.

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, und erfolgt im vorliegenden Fall auf Basis der Winddaten /25/.

Richtungssektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 $\cong$ 100%)	Weibullverteilung	
		A [m/s]	k [-]
N	0,037	5,8	2,12
NNO	0,041	6,1	2,10
ONO	0,062	7,0	2,35
O	0,088	7,7	2,51
OSO	0,087	6,9	2,77
SSO	0,077	6,5	2,42
S	0,073	6,6	2,20
SSW	0,109	8,9	2,68
WSW	0,140	9,2	2,24
W	0,123	9,3	2,09
WNW	0,101	8,8	2,27
NNW	0,062	7,3	2,15
<b>Gesamt (alle Sektoren)</b>	<b>1,000</b>	<b>7,9</b>	<b>2,13</b>
<b>mittlere Jahreswindgeschwindigkeit <math>v_m</math> [m/s]</b>		<b>7,02</b>	

**Tabelle 3:** Winddaten am Standort Kannemoor-Norderwisch (Bezugshöhe 92,0m ü. Grund) /25/



**Abbildung 2:** Relative Häufigkeit der Windrichtung am Standort Kannemoor-Norderwisch in Prozent (Bezugshöhe 92,0m ü. Grund) /25/

## 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) nach DIN EN 1991-1-4/NA /6/ bestimmt werden. Zu den ausgeprägten Hindernissen, die bei der Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität 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 EnSys GmbH & Co. KG Herr S. Reh am 07.03.2017 durchgeführt und die Gegebenheiten vor Ort entsprechend aufgenommen und dokumentiert /25/. Hierbei wurden in der unmittelbaren Umgebung des Standortes keine ausgeprägten Hindernisse festgestellt. In ergänzenden Angaben zur Standortbeschreibung /24/ haben die Auftraggeber bestätigt, dass es seit Durchführung der Standortbesichtigung weder am Standort noch in

der unmittelbaren Umgebung signifikante Veränderungen hinsichtlich der Landschaftsform bzw. –nutzung und der Bebauung gegeben hat.

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 der nachfolgenden Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität erfolgt die Bewertung der Komplexität des Geländes für alle zu bewertenden WEA nach der aktuellen, im Februar 2019 in Kraft getretenen, IEC 61400-1, Ed. 4 /10/. Diese wird die derzeit gültige DIN EN 61400-1:2011 /8/ (bzw. IEC 61400-1, Ed. 3 /9/) ablösen.

In orografisch strukturiertem Gelände können große Höhendifferenzen und Geländesteigungen zu erhöhten Umgebungsturbulenzen führen. Die Kriterien zur Bewertung der Komplexität des Geländes durch Definition von insgesamt 37 an das Gelände angenäherten Ebenen sind in der IEC 61400-1, Ed. 4 /10/ erläutert. In Abhängigkeit der Neigung der angenäherten Ebenen und der vertikalen Abweichung zwischen den angenäherten Ebenen und der tatsächlichen Geländeorografie sowie des jeweiligen Anteils der Windenergie aus diesem Sektor, ergeben sich Indizes für die Geländeneigung und für die vertikale Geländeabweichung. Überschreitet mindestens einer der Indizes die in Tabelle 4 aufgeführten Grenzwerte, so gilt das Gelände als komplex und es 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 /10/. Je nachdem, welches Limit hierbei überschritten wird, ergibt sich eine Komplexitätskategorie von L, M oder H, der ein entsprechender Turbulenzstrukturparameter von  $C_{CT} = 1,05$  (L), 1,10 (M) oder 1,15 (H) zuzuordnen ist.

Radius der Kreisfläche um die WEA	Sektoramplitude der an das Gelände angenäherten Ebene	Grenzwert (unteres Limit)					
		Index für Geländeneigung			Index für vertikale Geländeabweichung		
		L	M	H	L	M	H
$5 \cdot z_{hub}$	$360^\circ$	10°	15°	20°	2 %	4 %	6 %
$5 \cdot z_{hub}$	30°						
$10 \cdot z_{hub}$							
$20 \cdot z_{hub}$							

**Tabelle 4:** Bewertungskriterien der Komplexität des Geländes /10/

Zur Bewertung nach den in Tabelle 4 genannten Kriterien werden auf Basis von Höhendaten /17/ an die Orografie angenäherte geneigte Ebenen nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate definiert.

Die Bewertung der Komplexität des Geländes erfolgt für alle zu bewertenden WEA, 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, 4 bis 13, 18, 34, 35 und 48 bis 51 eine Bewertung der Komplexität des Geländes nach /10/.

Am Standort Kannemoor-Norderwisch werden an den WEA 1, 4 bis 13, 18, 34, 35 und 48 bis 51 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, die im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ betrachtet und bewertet werden, 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, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ betrachtet und bewertet werden und nicht für WEA, die als Vorbelastung in die Berechnung eingehen.

Der Standort Kannemoor-Norderwisch (Schleswig-Holstein) liegt nach /21/ in der Windzone 4 gemäß Windzonenkarte /6/. Die Geländekategorie lässt sich gemäß Kapitel 4.1 in GK II einordnen.

In Tabelle 2 sind die Windzonen der Auslegung der nachzuweisenden WEA angegeben. Die Windzone der Auslegung der WEA 50 und 51 des Typs Nordex N149/4.5, 4,50MW mit 125,0m bzw. 105,0m NH ist gesondert als S-Klasse angegeben, so dass ein Vergleich mit der Windzone des Standortes nicht durchgeführt werden kann. Für die WEA 50 und 51 ist somit die 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_{50}$  zu ermitteln.

In /26/ ist die 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{50}$  nahe der Standorte der WEA 50 und 51 für eine Höhe von 115,0m bzw. 125,0m auf Basis des anemos Windatlas für

Deutschland angegeben und wird als richtig und repräsentativ vorausgesetzt. In der nachfolgenden Tabelle 5 ist die in /26/ ermittelte 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_{50}$  dargestellt.

Lfd. WEA-Nr.	WEA-Typ	$P_{Nenn}$ [MW]	D [m]	NH [m]	$v_{50}$ [m/s]
 50	Nordex N149/4.5	4,500	149,1	125,0	36,53
 51	Nordex N149/4.5	4,500	149,1	105,0	< 36,13






**Tabelle 5:** 50-Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe  $v_{50}$  für nachzuweisende WEA am Standort Kannemoor-Norderwisch /26/

#### 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 Bestimmung von  $v_m$  erfolgt für WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ betrachtet und bewertet werden.

Die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_m$  wird auf Basis der Winddaten /25/ direkt entnommen bzw. bei geringfügigen Höhendifferenzen umgerechnet (siehe Kapitel 3.3).

In der nachfolgenden Tabelle 6 sind für WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ betrachtet und bewertet werden, die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe  $v_m$  und die dazugehörigen mittleren Formparameter der Weibullverteilung  $k$  dargestellt.

Lfd. WEA-Nr.	WEA-Typ	$P_{Nenn}$ [MW]	D [m]	NH [m]	$v_m$ [m/s]	$k$ [-]
 18	ENERCON E-92	2,350	92,0	104,0	7,22	2,15
 48	ENERCON E-115 EP3 E3	2,990	115,7	92,0	7,03	2,13
 49	ENERCON E-115 EP3 E3	2,990	115,7	92,0	7,02	2,13
 50	Nordex N149/4.5	4,500	149,1	125,0	7,67	2,13
 51	Nordex N149/4.5	4,500	149,1	105,0	7,25	2,15

**Tabelle 6:** mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe  $v_m$  und zugehörige mittlere Formparameter der Weibullverteilung  $k$  für nachzuweisende WEA am Standort Kannemoor-Norderwisch /25/

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 mittlere Formparameter der Weibullverteilung  $k \geq 2$  ist hingegen auch eine größere mittlere Jah-

reswindgeschwindigkeit erlaubt, wenn diese noch unterhalb dem Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung liegt.

#### **4.5 Umgebungsturbulenzintensität**

Die Turbulenzintensität definiert allgemein das Verhältnis der Standardabweichung  $\sigma$  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 /11/ 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 Karten /17/ erfolgen bzw. angepasst werden. Den einzelnen Geländeabschnitten werden anschließend Rauigkeitsklassen gemäß den Empfehlungen des für die Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten Europäischen Windatlanten /16/ 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 /20/ 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 7 sind beispielhaft die Werte der charakteristischen und re-

präsentativen 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	10,7	11,2
NNO	11,3	11,8
ONO	11,4	11,9
O	11,7	12,2
OSO	10,8	11,3
SSO	10,6	11,1
S	10,3	10,8
SSW	10,5	11,0
WSW	10,7	11,2
W	10,4	10,9
WNW	10,3	10,8
NNW	10,5	11,0

**Tabelle 7:** Beispielhafte Werte der charakteristischen und repräsentativen Turbulenzintensität am Standort Kannemoor-Norderwisch für die Koordinaten 504630 / 5981850 (Koordinatensystem: UTM ETRS89, Zone 32), Bezugswerte:  $v = 15\text{m/s}$ ,  $z = 92,0\text{m}$

#### 4.6 Effektive Turbulenzintensität

Das verwendete Berechnungsverfahren für die effektive Turbulenzintensität auf Nabenhöhe ist in Kapitel 2.1 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  $m = 10$  /19/ für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) mit einem Fasergehalt von mindestens 30 Vol.-% und höchstens 55 Vol.-% /12/. 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 /12/. Bei hiervon abweichenden Fasergehalten oder Matrixharzen müssen ggf. herstellereinspezifische 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. In den Tabellen 8 und 9 sind WEA, für die ein von  $m = 10$  abweichender materialspezifischer Exponent zu Grunde gelegt wird, entsprechend markiert ( $m = x$ ).

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 18 und 48 bis 51, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird bzw. unter Vorbehalt unterstellt werden kann, sind die windgeschwindigkeitsabhängigen Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität in Tabelle 8 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 1 bis 13, 34 und 35, 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 9 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 8 und 9 farblich markiert.

Der Nachweis der Integrität der WEA in Bezug auf den Auslegungswert der Turbulenzintensität ist nach /5/ bzw. /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 8 und 9 aufgeführt.

Der Nachlauf direkt hinter einer WEA wird hauptsächlich durch die Geometrie des Rotorblattes, den Rotordurchmesser sowie durch die windgeschwindigkeitsabhängigen Schubbeiwerte der jeweiligen WEA bestimmt /15/. Da unter anderem die exakte Geometrie des Rotorblattes nicht in die Berechnungen einfließt, und insgesamt rein theoretische Modellannahmen getroffen werden müssen /8/ (siehe Kapitel 4.8), können nach unseren Erfahrungen die zur Anwendung kommenden Berechnungsmodelle bei WEA-Abständen unterhalb von etwa 2,5D nur begrenzt belastbare Ergebnisse an den der erhöhten Turbulenz der Nachlaufströmung ausgesetzten benachbarten WEA liefern (siehe Kapitel 2.1 und 2.2). Im Rahmen von Einzelfallprüfungen wird von









uns auf Basis entsprechender Kriterien entschieden, ob im Rahmen der nachfolgenden Auswertung belastbare Aussagen zur Standorteignung getroffen werden können. Einige wesentliche Kriterien hierfür sind z.B. der Energieanteil des Nachlaufsektors und die Komplexität des WEA-Standortes. Wird im Rahmen der Einzelfallprüfungen festgestellt, dass die Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität  $I_{eff}$  nur begrenzt belastbar sind, werden diese in den Tabellen 8 und 9 entsprechend markiert (\*). Die mit (\*) markierten Werte empfehlen wir nicht als Eingangsgröße im Rahmen eines standortspezifischen Lastvergleiches.

























Für die WEA des Typs ENERCON E-115 EP3 E3, 2,99MW mit 92,0m NH (WEA 48 und 49) liegt derzeit noch keine gültige Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vor. Des Weiteren liegen für diese WEA nur vorläufige, anlagenspezifische Parameter (Schubbeiwert  $c_T$ ) vor. In den Tabellen 8 und 9 sind die betroffenen WEA entsprechend markiert (#).

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 8 und 9 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 neu geplanten WEA einbezogen (siehe Kapitel 3.1).

DIBt-Richtlinie	DIBt 2012							
Windgeschwindigkeit [m/s]	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Auslegungswert [%] IEC, Ed. 3 /8/ (Kurve A)	29,9	24,8	22,0	20,1	18,9	18,0	17,3	16,7
Auslegungswert [%] Nordex N149/4.5 /32/,/33/	28,0	24,4	21,5	19,1	17,3	15,8	14,5	13,4
lfd. WEA-Nr.	Ergebnisse [%] auf NH der WEA							
<b>vor</b> dem Zubau der WEA 48 bis 51								
 18	25,1	22,9	21,5	<b>20,3</b>	17,9	16,2	14,5	13,2
<b>nach</b> dem Zubau der WEA 48 bis 51								
 18	25,2	23,0	21,5	<b>20,3</b>	17,9	16,3	14,5	13,3
 48#	26,7	<b>25,0</b>	<b>23,4</b>	<b>20,3</b>	17,0	14,3	12,2	10,8
 49#	26,0	24,6	<b>23,5</b>	<b>21,1</b>	18,8	17,0	15,7	14,7
 50 ( $m = 14$ )	26,5	<b>24,7</b>	<b>23,6</b>	<b>21,5</b>	<b>18,8</b>	15,8	13,5	11,9
 51 ( $m = 14$ )	25,7	23,6	<b>21,6</b>	18,8	15,9	13,4	11,7	10,7

**Tabelle 8:** Ergebnisse für die effektiven Turbulenzintensitäten auf Nabenhöhe (DIBt 2012 /5/)

DIBt-Richtlinie		DIBt 2004							
Windgeschwindigkeit [m/s]		4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Auslegungswert [%] IEC, Ed. 2 /7/ (Kurve A)		30,0	24,9	22,0	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7
lfd. WEA-Nr.		Ergebnisse [%] auf NH der WEA							
<b>vor</b> dem Zubau der WEA 48 bis 51									
	1	23,2	20,7	18,9	17,4	15,0	13,4	12,2	11,4
	2	22,9	20,2	18,7	16,1	13,8	12,1	11,3	10,9
	3	25,7	23,3	21,7	18,6	15,9	13,9	12,5	11,6
	4	24,0	22,0	21,0	19,3	16,5	14,6	13,1	12,0
	5	24,1	21,9	20,4	17,9	14,7	12,6	11,4	10,6
	6	25,6	23,4	21,8	20,0	16,9	14,5	13,1	12,0
	7	24,8	22,6	21,4	19,4	16,6	14,6	13,2	12,1
	8	25,0	23,0	21,7	20,2	17,3	15,1	13,5	12,4
	9	24,9	22,4	21,1	19,4	16,5	14,4	13,0	12,1
	10	24,1	21,6	20,4	18,8	16,0	14,1	12,8	12,0
	11	23,2	20,7	19,3	17,3	14,3	12,1	10,8	10,1
	12	23,9	21,5	19,9	17,7	14,7	12,5	11,0	10,2
	13	25,7	23,5	<b>22,6</b>	<b>21,1</b>	18,4	15,9	14,1	12,8
	34	22,4	20,1	19,0	17,9	15,1	13,4	12,3	11,7
	35	21,9	19,6	18,3	16,9	13,7	11,7	10,4	9,8
<b>nach</b> dem Zubau der WEA 48 bis 51									
	1	23,4	21,0	19,2	17,7	15,4	13,7	12,7	12,0
	2	24,5	22,3	20,5	17,7	15,7	14,4	13,5	12,6
	3	25,9	23,5	21,9	18,7	16,1	14,3	13,0	12,1
	4	25,0	23,1	21,8	19,9	17,3	15,5	14,0	13,0
	5	26,0	24,5	<b>22,8</b>	<b>20,4</b>	17,5	15,4	13,5	12,3
	6	25,6	23,5	21,9	20,1	16,9	14,6	13,2	12,2
	7	24,9	22,7	21,5	19,5	16,7	14,7	13,3	12,3
	8	25,1	23,0	21,7	20,2	17,3	15,1	13,6	12,5
	9	24,9	22,4	21,1	19,4	16,6	14,4	13,0	12,2







DIBt-Richtlinie		DIBt 2004							
Windgeschwindigkeit [m/s]		4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Auslegungswert [%] IEC, Ed. 2 /7/ (Kurve A)		30,0	24,9	22,0	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7
Ifd. WEA-Nr.		Ergebnisse [%] auf NH der WEA							
	10	24,2	21,7	20,5	18,9	16,1	14,2	12,9	12,0
	11	23,6	21,1	19,6	17,5	14,5	12,4	11,0	10,3
	12	24,0	21,5	20,0	17,8	14,9	12,8	11,4	10,8
	13	25,7	23,5	<b>22,6</b>	<b>21,1</b>	18,4	15,9	14,1	12,8
	34	22,5	20,1	19,0	18,0	15,2	13,5	12,4	11,7
	35	22,0	19,7	18,3	17,0	13,7	11,7	10,4	9,8

Tabelle 9: Ergebnisse für die effektiven Turbulenzintensitäten auf Nabenhöhe (DIBt 2004 /4/)

#### 4.7 Weitere Windbedingungen

Ist der Standort gemäß den in Kapitel 4.2 durchgeführten Untersuchungen als orografisch komplex anzusehen, so muss der Nachweis der Standorteignung für WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, durch den Nachweis der Integrität der Konstruktion nach /8/ durchgeführt werden. Hierfür sind die in Kapitel 2 dargestellten Windbedingungen für den Standort zu ermitteln. 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 standortspezifischen Lastvergleiches durchgeführt werden soll. Für diesen Vergleich der standortspezifischen Lasten zu den Lastannahmen der Typenprüfung müssen zusätzlich der mittlere Höhenexponent  $\alpha$  sowie die mittlere Dichte der Luft  $\rho$  am Standort bestimmt werden. Bei komplexem Gelände ist für WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu Grunde gelegt wird, 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 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. Ebenso erfolgt die Ermittlung weiterer Windbedingungen für WEA, deren Standorteignung ggf. gesondert mittels standortspezifischer Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten nachgewiesen werden kann, damit evtl. vorliegende betriebseinschränkende Maßnahmen (z.B. sektorische Abschalt- bzw. Abregelungen) möglicherweise

entfallen können. 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  $\alpha$  für alle nachzuweisenden WEA am Standort ermittelt und in Kapitel 8 ausgewiesen. Gemäß /8/ ist der mittlere Höhenexponent  $\alpha$  im Auslegungsfall mit 0,2 anzunehmen. Die Ermittlung der standortspezifischen mittleren Höhenexponenten  $\alpha$  zur Beschreibung der Windscherung erfolgt unter Verwendung der in /25/ ausgewiesenen mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten  $v_m$  für mehrere Referenzhöhen.

#### **4.7.2 Mittlere Luftdichte**

Es wird die mittlere Luftdichte  $\rho$  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  $\rho$  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 /22/ 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. 27,0km, 5,0m Höhe ü. NN., mit einer Temperatur von 9,4°C im Jahresmittel (1981 – 1990)) /23/.

#### **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  $5 \cdot NH$  zu Grunde (diese umfasst alle Sektoren zusammen, d.h. 360°), sondern unterteilen diese sektoriell 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 sektoriellen Energieflussdichten. Diese werden auf Basis des in /16/ beschriebenen Verfahrens unter Nutzung der sektoriellen Winddaten am Standort /25/ bestimmt. Der Einfluss thermischer Effekte auf die Neigung der Anströmung (z.B. thermische Aufwinde) wird nicht berücksichtigt.

#### **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 durchgeführten Berechnungen wurden teils vereinfachte Annahmen und Randbedingungen getroffen. Sämtliche Vereinfachungen sind dabei stets konservativ gewählt worden.

### **5 Zusammenfassung und Bewertung**

Am Standort Kannemoor-Norderwisch (Schleswig-Holstein) planen die Auftraggeber die Errichtung von vier WEA (WEA 48 bis 51). In der Nähe zu den geplanten WEA sind 47 weitere WEA (WEA 1 bis 47) zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme ist der Einfluss durch den Zubau der geplanten WEA 48 bis 51 zu bewerten. Alle weiteren WEA am Standort gehen gemäß der vom Auftraggeber vorgegebenen Windparkkonfiguration /24/ 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 EnSys GmbH & Co. KG ist am 29.05.2019 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 standortspezifischen 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 BImSchG /13/. 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 14 bis 17, 19 bis 33 und 36 bis 47 zu den neu geplanten WEA 48 bis 51, der größer als acht Rotordurchmesser ist, werden diese WEA nicht in die Betrachtung der Standorteignung einbezogen (siehe Kapitel 2.1).

Für die WEA des Typs ENERCON E-115 EP3 E3, 2,99MW mit 92,0m NH liegt derzeit keine gültige Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vor (siehe Kapitel 3.2) und wir weisen deren Ergebnisse nur unter Vorbehalt aus. Wie von uns in Kapitel 1 beschrieben, kann dieser Vorbehalt entfallen, wenn die in Kapitel 3.2 sowie in ggf. durchgeführten standortspezifischen Lastvergleichen zu Grunde gelegten Auslegungswerte durch die Auslegungswerte der mit der Genehmigung eingereichten Typenprüfung abgedeckt werden. Des Weiteren liegen für diese WEA nur vorläufige, anlagenspezifische Parameter (Schubbeiwert  $c_T$ ) vor (siehe Kapitel 4.6), die bestätigt werden müssen.

Für die geplanten WEA 48 und 49 zeigt sich im Vergleich mit der Windzone des Standortes, dass diese durch die unter Vorbehalt angegebene Windzone der Auslegung der zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.3).

Für die geplanten WEA 50 und 51 zeigt sich im Vergleich mit der 50-Jahreswindgeschwindigkeit am Standort  $v_{50}$  auf jeweiliger Nabenhöhe, dass diese durch den Auslegungswert der jeweils zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.3). Dabei werden die im Rahmen der Extremwindabschätzung angegebenen 50-Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe  $v_{50}$  in /26/ als richtig und repräsentativ für den Standort vorausgesetzt und wurden von uns nicht geprüft.

Für die WEA 18, für die ein mittlerer Formparameter der Weibullverteilung  $k \geq 2$  vorliegt, zeigt sich im Vergleich mit der standortspezifischen mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_m$ , dass diese durch den Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.4).

Für die WEA 48 und 49, für die jeweils ein mittlerer Formparameter der Weibullverteilung  $k \geq 2$  vorliegt, zeigt sich im Vergleich mit der jeweiligen standortspezifischen mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_m$ , dass diese durch den unter Vorbehalt angegebenen Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.4).

Für die 50 und 51, für die jeweils ein mittlerer Formparameter der Weibullverteilung  $k \geq 2$  vorliegt, zeigt sich im Vergleich mit der jeweiligen standortspezifischen mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_m$ , dass diese nicht durch den Auslegungswert der jeweils zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.4).

Im Vergleich der windgeschwindigkeitsabhängigen Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensitäten  $I_{eff}$  am Standort mit den Auslegungswerten der Turbulenzintensität, die bei der jeweiligen Typenprüfung der WEA zu Grunde zu legen sind, zeigen sich an den WEA 5, 13, 18 und 48 bis 51 Überschreitungen (siehe Tabellen 8 und 9).

An den WEA 13 und 18 ergeben sich bereits aus der ursprünglichen Windparkkonfiguration Überschreitungen hinsichtlich der Auslegungswerte der Turbulenzintensität (siehe Tabellen 8 und 9). In den betroffenen Windgeschwindigkeitsbereichen an den WEA 13 und 18 steigen die Werte der effektiven Turbulenzintensität durch den Zu-

bau der WEA 48 bis 51 nicht bzw. nur geringfügig. Der Anstieg der Werte in den betroffenen Windgeschwindigkeitsbereichen wird von uns im Rahmen der Genauigkeit des Verfahrens als vernachlässigbar bewertet. Durch den Zubau der WEA 48 bis 51 treten daher an den WEA 13 und 18 keine signifikanten Erhöhungen der effektiven Turbulenzintensitäten auf.

Für die geplante Windparkkonfiguration (siehe Tabelle 1) wurden zusätzliche Berechnungen unter Berücksichtigung sektorieller Betriebsbeschränkungen (Abschaltregelungen oder Leistungsreduzierungen bzw. Blattwinkelverstellungen) durchgeführt.

In der geplanten Windparkkonfiguration kann die Standorteignung der WEA 5 bei Auftreten der entsprechenden Nachlaufsituation durch eine sektorielle Leistungsreduzierung der WEA 50 nachgewiesen werden. Die erforderlichen sektoriellen Betriebsbeschränkungen sind in der nachfolgenden Tabelle 10 dargestellt.

Betriebsbeschränkte WEA	Benachbarte WEA	Sektor der Betriebsbeschränkung (0° ≙ geografisch Nord)	Windgeschwindigkeitsbereich [m/s]	Art der sektoriellen Betriebsbeschränkung
Sektorielle Betriebsbeschränkungen, um Überschreitungen der Auslegungswerte der Turbulenzintensität an der WEA 5 zu verhindern				
WEA 50	WEA 5	218,3° ± 23,7° (194,6° - 242,0°)	8,5 – 9,6	Mode 11, 99,5 dB(A)
WEA 50	WEA 5	218,3° ± 23,4° (194,9° - 241,7°)	9,6 – 10,8	Mode 9, 100,5 dB(A)
WEA 50	WEA 5	218,3° ± 22,9° (195,4° - 241,2°)	10,8 – 11,9	Mode 7, 102,5 dB(A)
WEA 50	WEA 5	218,3° ± 22,5° (195,8° - 240,8°)	11,9 – 13,0	Mode 2, 105,0 dB(A)

**Tabelle 10:** Sektorielle Betriebsbeschränkungen

In den dargestellten sektoriellen Betriebsbeschränkungen (siehe Tabelle 10) wird berücksichtigt, dass sich ggf. die Nabenhöhen von sich gegenseitig beeinflussenden WEA unterscheiden. Abhängig von der Windscherung (bzw. dem Windprofil) muss der Betrieb bei WEA mit größeren Nabenhöhen demnach in höheren Windgeschwindigkeitsbereichen und bei WEA mit geringeren Nabenhöhen in dementsprechend niedrigeren Windgeschwindigkeitsbereichen sektoruell beschränkt werden. Der standortspezifische mittlere Höhenexponent  $\alpha$  zur Beschreibung der Windscherung zwischen der WEA 5 und der WEA 50 wurde unter Verwendung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten für mehrere Referenzhöhen mit  $\alpha = 0,28$  ermittelt.

Die in Tabelle 10 dargestellten sektoriellen Betriebsbeschränkungen gelten als Mindestanforderungen. Von uns wurde keine Prüfung hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit vorgenommen.

Da die Lasten bei einer abgeschalteten WEA (Trudelbetrieb) auch in der erhöhten Turbulenz der Nachlaufströmung der Nachbar-WEA geringer sind als im Betrieb bei ungestörter Anströmung, kann alternativ jeweils die benachbarte WEA sektoriell abgeschaltet werden (siehe Tabelle 11).

Betriebsbeschränkte WEA	Benachbarte WEA	Sektor der Betriebsbeschränkung (0° ≙ geografisch Nord)	Windgeschwindigkeitsbereich [m/s]	Art der sektoriellen Betriebsbeschränkung
Alternative sektorielle Betriebsbeschränkung, um Überschreitungen der Auslegungswerte der Turbulenzintensität an der WEA 5 zu verhindern				
WEA 5	WEA 50	218,3° ± 23,7° (194,6° - 242,0°)	7,5 – 11,5	Abschaltung

**Tabelle 11:** Alternative sektorielle Betriebsbeschränkung

Die Ausdehnung des mit erhöhten Turbulenzintensitäten behafteten Nachlaufs im Nahbereich hinter einer WEA basiert auf einem in /15/ beschriebenen Nachlaufmodell von Frandsen, bei dem sich der Nachlauf in Abhängigkeit des WEA-spezifischen Schubbeiwertes  $c_T$  und somit auch windgeschwindigkeitsabhängig erweitert.

Für die WEA 48 und 49 wurden mit den entsprechenden effektiven Turbulenzintensitäten und den standortspezifischen Windbedingungen als Eingangsparameter durch den WEA-Hersteller unter Vorbehalt gültige standortspezifische Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten durchgeführt und in /27/ dokumentiert. Der Vergleich der vom WEA-Hersteller ermittelten relativen schädigungsäquivalenten Einstufenkollektive mit den, für diese WEA vorläufig geltenden, Auslegungslasten am Blattanschluss-, Naben-, Turmkopf- und Turmfußsystem ist für verschiedene Momente in /27/ dargestellt. Die standortspezifischen Lastvergleiche des WEA-Herstellers ergaben für die WEA 48 und 49 nach dessen Angaben keine relevanten Überschreitungen, so dass die Standorteignung unter Vorbehalt lastseitig gewährleistet ist. Die vorliegenden standortspezifischen Lastvergleiche wurden auf Plausibilität hinsichtlich der oben genannten Eingangsparameter geprüft. Die Berechnungen des WEA-Herstellers sowie die zum Vergleich herangezogenen Auslegungslasten in /27/ wurden keiner Prüfung unterzogen und werden als richtig vorausgesetzt. Anhand der in /27/ dargestellten Ergebnisse sind die Schlussfolgerungen des WEA-Herstellers zur lastseitigen Standorteignung plausibel. Die standortspezifischen Lastvergleiche in /27/ wurden TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Rahmen einer Geheimhaltungsvereinbarung vorgelegt.

Für die WEA 50 und 51 wurden mit den entsprechenden effektiven Turbulenzintensitäten und den standortspezifischen Windbedingungen als Eingangsparameter durch den WEA-Hersteller standortspezifische Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten durchgeführt und in /28/ dokumentiert. Der relative Vergleich der vom WEA-Hersteller ermittelten standortspezifischen schadensäquivalenten Lasten mit den Auslegungslasten unter anderem an Rotorblatt, Blattanschluss, Pitchlager, Nabe, Hauptwelle und Turm ist für verschiedene Momente in /28/ dargestellt. **Dabei wurde für die WEA 50 ein Betrieb im Mode 1.b und für die WEA 51 ein Betrieb im Mode 0 an-**



**genommen.** Die standortspezifischen Lastvergleiche des WEA-Herstellers ergaben für die WEA 50 und 51 nach dessen Angaben unter Berücksichtigung der genannten Betriebsmodi keine relevanten Überschreitungen mit Ausnahme am Pitchlager der WEA 50. Laut Aussagen des Herstellers werden die Lasten am Pitchlager im Rahmen der oben genannten b-Modes permanent automatisch überwacht und ggf. durch erhöhte Pitchaktivität reduziert, so dass an der WEA 50 die Überschreitungen der Auslegungswerte an dieser Komponente von Seiten des Herstellers als nicht kritisch für die strukturelle Integrität der Konstruktion bewertet werden. Die Standorteignung der WEA 50 und 51 ist nach Aussagen des Herstellers unter Berücksichtigung der Betriebsmodi lastseitig gewährleistet. Die vorliegenden standortspezifischen Lastvergleiche wurden auf Plausibilität hinsichtlich der oben genannten Eingangsparameter geprüft. Die Berechnungen des WEA-Herstellers sowie die zum Vergleich herangezogenen Auslegungslasten in /28/ wurden keiner Prüfung unterzogen und werden als richtig vorausgesetzt. Die standortspezifischen Lastvergleiche in /28/ wurden TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Rahmen einer Geheimhaltungsvereinbarung vorgelegt.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Standorteignung der am Standort Kannemoor-Norderwisch betrachteten WEA 1 bis 4, 6 bis 12, 34 und 35 nachgewiesen ist. Des Weiteren ist die Standorteignung der WEA 5 unter Berücksichtigung der entsprechenden sektoriellen Betriebsbeschränkungen (siehe Tabelle 10) nachgewiesen. Die Standorteignung der am Standort betrachteten WEA 50 und 51 ist unter Berücksichtigung der Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten /28/ **sowie des dort genannten Modes (Betrieb der WEA 50 im Mode 1.b im gesamten Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsbereich)** nach Aussagen des Herstellers lastseitig nachgewiesen. Die Standorteignung der betrachteten WEA 48 und 49 vom Typ ENERCON E-115 EP3 E3, 2,99MW mit 92,0m NH ist bis zum Vorliegen einer gültigen Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ unter Berücksichtigung der Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten /27/ nach Aussagen des Herstellers lastseitig unter Vorbehalt nachgewiesen.

Durch den Zubau der WEA 48 bis 51 treten an den WEA 13 und 18 keine signifikanten Erhöhungen der effektiven Turbulenzintensitäten auf, so dass deren Standorteignung unter der Bedingung einer im Genehmigungsverfahren nachgewiesenen Standorteignung für diese WEA weiterhin nachgewiesen ist.

Ggf. kann die Standorteignung der am Standort Kannemoor-Norderwisch betrachteten WEA 5 gesondert mittels eines standortspezifischen Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten nachgewiesen werden, so dass möglicherweise die entsprechenden sektoriellen Betriebsbeschränkungen entfallen können. Die hierfür zu Grunde zu legenden Windbedingungen am Standort sind in Kapitel 8 ausgewiesen.

Der Vorbehalt für die Ergebnisse in unserer gutachtlichen Stellungnahme für die geplanten WEA 48 und 49 bezieht sich ausschließlich auf das Nicht-Vorliegen einer gültigen Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ (siehe Kapitel 1) und auf die für diese WEA nur vorläufigen anlagenspezifischen Parameter (Schubbeiwert  $c_T$ ). Werden die in dieser gutachtlichen Stellungnahme sowie in den Lastvergleichen der

Betriebsfestigkeitslasten /27/ zu Grunde gelegten Auslegungswerte durch die Auslegungswerte der mit der Genehmigung eingereichten Typenprüfung abgedeckt und die anlagenspezifischen Parameter (Schubbeiwert  $c_T$ ) bestätigt, kann davon ausgegangen werden, dass die durch uns berechneten Ergebnisse der standortspezifischen Windbedingungen bei unveränderten Randbedingungen (z.B. Windparkkonfiguration, Winddaten zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit oder Anlagenparameter) weiterhin Bestand haben und eine Neuberechnung nicht erforderlich ist.

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 EnSys 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 EnSys 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 EnSys GmbH & Co. KG dem Auftraggeber an seinen urheberrechtlichen 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 EnSys GmbH & Co. KG. Eine Bezugnahme auf TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG ist nur bei Verwendung der Leistung in Gänze und unverändert zulässig.

Bei einem Verstoß gegen die vorstehenden Bedingungen ist TÜV NORD EnSys 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	
$P_{\text{Nenn}}$	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	[-]
$c_T$	Schubbeiwert des Rotors	[-]
$C_{CT}$	Turbulenzstrukturparameter	[-]
$I_{\text{eff}}$	Effektive Turbulenzintensität auf Nabenhöhe	[-]
$I_{\text{char}}$	Charakteristische Turbulenzintensität bei 15m/s	[-]
$I_{\text{rep}}$	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]
$v_{50}$	Extremer 10-min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren am Standort	[m/s]
$v_{\text{ref}}$	Auslegungswert für $v_{50}$ auf Nabenhöhe	[m/s]
$v_{\text{in}}$	Einschaltwindgeschwindigkeit	[m/s]

$v_{\text{Nenn}}$	Nennwindgeschwindigkeit	[m/s]
$z$	Höhe über Grund (allgemein)	[m]
$z_{\text{hub}}$	Nabenhöhe der jeweiligen WEA	[m]
$\alpha$	Höhenexponent für das exponentielle Windprofil	[-]
$\varphi_{\text{Inkl.}}$	Inklinationswinkel der Schräganströmung	[°]
$\rho$	Mittlere Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Standardabweichung der mittleren Windgeschwindigkeit	[m/s]
	Altgrad (Vollkreis $\triangleq$ 360)	[°]

## 7 Literatur- und Quellenangaben

- /1/ European Environmental Agency, CORINE Land Cover 2012 raster data (100m) – Version 18 (12/2016); <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2012-raster>; Kopenhagen; 2016
- /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 (Korrigierte Fassung März 2015); 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/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements; Edition 4.0; Februar 2019
- /11/ Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH; Guideline for the Certification of Wind Turbines; Hamburg; Edition 2003 with Supplement 2004
- /12/ Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH; Guideline for the Certification of Wind Turbines; Hamburg; Edition 2010
- /13/ 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)

- /14/ Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 3756)
- /15/ 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
- /16/ Risø National Laboratory; European Wind Atlas; Roskilde, Dänemark; 1989
- /17/ TOP50, Amtliche topografische Karten 1:50.000, Amtliches digitales Geländemodell (Auflösung 50m); Landesvermessungsämter der Bundesländer; Deutschland; 2003/2004
- /18/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, Hole-filled seamless SRTM data V4.1, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT); 08.2008
- /19/ Kunte, A; Turbulenz-Immissionsprognosen vereinheitlicht; WIND-KRAFT Journal; Verlag Natürliche Energien, Ausgabe 4/2009, S.28 bis 30; Seevetal
- /20/ VDI 3783 Blatt 12; Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht; Verein Deutscher Ingenieure; 1999
- /21/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt); Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen; Windzonen\_nach\_Verwaltungsgrenzen.xls in der Fassung vom 20.04.2015
- /22/ Risø National Laboratory, WAsP 11 (<http://www.wasp.dk>), Dänemark, 2012
- /23/ Deutscher Wetterdienst, S. Traup, B. Kruse: Wind und Windenergiepotenziale in Deutschland - Winddaten für Windenergienutzer, Version 6, Deutschland 2011
- /24/ Christian Hoffmann Planung & Beratung und WindPlan Witthohn + Frauen GmbH & Co. KG; E-Mails mit beigefügten Koordinaten und Angaben zu WEA-Spezifikationen inkl. jeweiliger Angabe zu Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung der zu berücksichtigenden WEA, Lageplan des Windparks, ergänzende Angaben zur Standortbeschreibung; 06.02.2019, 29.05.2019 und 11.06.2019
- /25/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG; Gutachtliche Stellungnahme zur Bestimmung des Windpotenzials und des Energieertrages für zwei Windenergieanlagen im Windpark Kannemoor; Referenz-Nr.: 2017-WND-WPE-012-R0; Revision 0; Hamburg; 03.04.2017 zzgl. Auszug zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit vom 05.06.2019
- /26/ anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH; Nachberechnung zur Extremwindabschätzung auf Basis des anemos Windatlas für Deutschland am Standort Norderwisch; Berichts-Nr.: 18-181-7019300-Rev.00-EX-MW; Reppenstedt; 13.06.2019

- /27/ ENERCON GmbH; Ergebnisbericht, Standortspezifischer Lastvergleich, Standorteignung Windpark Kannemoor, Version 1.0, Rev. 0; Dokument-ID: D0844824-0; Aurich; 08.07.2019
- /28/ Nordex Energy GmbH; DD03 – Load Assessment Report Turbine Loads – Norderwisch (DE), 1 x Nordex N149/4.0-4.5 (Mode 1.b) TS125 DIBt WZ S, GK S + 1 x Nordex N149/4.0-4.5 (Mode 0) TS105 DIBt WZ S, GK S; Rev. 0; Document no.: 2001583EN; Hamburg; 21.06.2019
- /29/ ENERCON GmbH; Datenblatt ENERCON Windenergieanlagen E-92 / 2350 kW General Design Conditions; Dokument-ID D0306635-2; Aurich; 26.06.2014
- /30/ TÜV SÜD Industrie Service GmbH; Prüfbescheid zur Typenprüfung, Windenergieanlage ENERCON E-92/BF/102/17/02, 104 m Nabenhöhe, Betonfertigteilturm mit Stahlrohraufsatz der Windzone 4, Geländekategorie I+II, Turbulenzkategorie A, Erdbebenzone 3; Prüfnummer: 2157791-4-d; München; 18.08.2014
- /31/ ENERCON GmbH; Datenblatt General Design Conditions ENERCON Windenergieanlage E-115 EP3 E3 / 2990 kW; Dokument-ID: D0811866-1; Aurich; 23.05.2019
- /32/ Nordex Energy GmbH; Design Information for Wind & Site Assessment N149/4.5 Delta 50Hz NCV TS105 DIBt S; Hamburg; 23.04.2018
- /33/ Nordex Energy GmbH; Design Information for Wind & Site Assessment N149/4.5 Delta 50Hz NCV TS125 DIBt S; Hamburg; 23.04.2018

## 8 Zusammenfassung aller Windbedingungen

WEA 5		Ausgelegt nach der DIBt-Richtlinie 2004							
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	42,0	34,5	30,0	27,0	24,9	23,3	22,0	21,0	20,2
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 10	31,0	28,0	26,0	25,0	24,5	24,1	22,8	21,7	20,4
m = 8	30,7	27,7	25,6	24,5	23,9	23,5	22,2	21,2	19,9
m = 4	30,0	27,0	24,7	23,5	22,7	22,1	21,0	19,9	18,6
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	18,9	17,5	16,4	15,4	14,5	13,5	12,9	12,3	11,6
m = 8	18,4	17,1	16,0	15,0	14,1	13,1	12,6	12,0	11,4
m = 4	17,2	16,0	15,0	14,0	13,2	12,4	11,9	11,4	11,0
<b>Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C<sub>CT</sub> = 1,0)</b>									
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ± 100%) /25/	Weibullverteilung		α [-]	I <sub>char</sub> [%]	I <sub>rep</sub> [%]	Φ <sub>Inkl.</sub> [°]		
		A [m/s] /25/	k [-] /25/						
N	0,038	5,6	2,09	-	11,0	11,5	0,1		
NNO	0,041	5,8	2,06	-	11,9	12,5	0,1		
ONO	0,062	6,7	2,31	-	11,9	12,5	0,1		
O	0,088	7,4	2,47	-	12,1	12,7	0,1		
OSO	0,087	6,7	2,73	-	11,0	11,5	0,1		
SSO	0,077	6,3	2,38	-	10,9	11,4	0,0		
S	0,073	6,4	2,17	-	10,5	11,0	0,0		
SSW	0,108	8,7	2,64	-	10,6	11,1	0,1		
WSW	0,140	8,8	2,21	-	11,0	11,5	0,1		
W	0,123	9,0	2,06	-	10,7	11,2	0,1		
WNW	0,101	8,4	2,25	-	10,5	11,0	0,0		
NNW	0,062	7,0	2,12	-	10,8	11,3	0,1		
<b>Gesamt (alle Sektoren)</b>	<b>1,000</b>	<b>7,6</b>	<b>2,10</b>	<b>0,25</b>	<b>10,8</b>	<b>11,3</b>	<b>0,1</b>		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>m</sub> [m/s]					6,77 /25/				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>50</sub> [m/s]					-				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v <sub>Nenn</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]					1,239				

Tabelle 12: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 5



WEA 48 <sup>#</sup>		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		32,1	28,5	26,7	25,7	25,0	24,4	23,4	22,0	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		18,6	17,0	15,6	14,3	13,2	12,2	11,4	10,8	10,4
<b>Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C<sub>CT</sub> = 1,0)</b>										
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ± 100%) /25/	Weibullverteilung		α [-]	I <sub>char</sub> [%]	I <sub>rep</sub> [%]	φ <sub>Inkl.</sub> [°]			
		A [m/s] /25/	k [-] /25/							
N	0,037	5,7	2,12	-	10,9	11,4	0,0			
NNO	0,041	6,1	2,10	-	11,0	11,5	0,0			
ONO	0,062	6,9	2,35	-	11,3	11,8	0,0			
O	0,088	7,7	2,51	-	11,7	12,2	0,0			
OSO	0,087	6,9	2,77	-	10,8	11,3	0,0			
SSO	0,077	6,5	2,42	-	10,6	11,1	0,0			
S	0,073	6,7	2,21	-	10,3	10,8	0,0			
SSW	0,109	8,9	2,68	-	10,8	11,3	0,0			
WSW	0,140	9,3	2,24	-	10,5	11,0	0,0			
W	0,123	9,4	2,09	-	10,4	10,9	0,0			
WNW	0,101	8,8	2,27	-	10,2	10,7	0,0			
NNW	0,062	7,3	2,15	-	10,4	10,9	0,0			
<b>Gesamt (alle Sektoren)</b>	<b>1,000</b>	<b>7,9</b>	<b>2,13</b>	<b>0,28</b>	<b>10,5</b>	<b>11,0</b>	<b>0,0</b>			
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>m</sub> [m/s]					7,03 /25/					
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>50</sub> [m/s]					-					
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v <sub>Nenn</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]					1,238					

Tabelle 13: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 48

WEA 49 <sup>#</sup>		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		31,4	27,7	26,0	25,0	24,6	24,2	23,5	22,4	21,1
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		19,9	18,8	17,8	17,0	16,3	15,7	15,2	14,7	14,3
<b>Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C<sub>CT</sub> = 1,0)</b>										
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ± 100%) /25/	Weibullverteilung		α [-]	I <sub>char</sub> [%]	I <sub>rep</sub> [%]	Φ <sub>Inkl.</sub> [°]			
		A [m/s] /25/	k [-] /25/							
N	0,037	5,8	2,12	-	10,9	11,4	0,0			
NNO	0,041	6,1	2,10	-	11,0	11,5	0,0			
ONO	0,062	7,0	2,35	-	11,3	11,8	0,0			
O	0,088	7,7	2,51	-	11,8	12,4	0,0			
OSO	0,087	6,9	2,77	-	10,8	11,3	0,0			
SSO	0,077	6,5	2,42	-	10,6	11,1	0,0			
S	0,073	6,6	2,20	-	10,3	10,8	0,0			
SSW	0,109	8,9	2,68	-	10,8	11,3	0,0			
WSW	0,140	9,2	2,24	-	10,5	11,0	0,0			
W	0,123	9,3	2,09	-	10,4	10,9	0,0			
WNW	0,101	8,8	2,27	-	10,2	10,7	0,0			
NNW	0,062	7,3	2,15	-	10,5	11,0	0,0			
<b>Gesamt (alle Sektoren)</b>	<b>1,000</b>	<b>7,9</b>	<b>2,13</b>	<b>0,28</b>	<b>10,5</b>	<b>11,0</b>	<b>0,0</b>			
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>m</sub> [m/s]					7,02 /25/					
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>50</sub> [m/s]					-					
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v <sub>Nenn</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]					1,238					

Tabelle 14: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 49

WEA 50		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 [%]	32,1	29,9	28,0	26,1	24,4	22,9	21,5	20,2	19,1
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 14	31,4	28,3	26,5	25,4	24,7	24,1	23,6	22,7	21,5
m = 10	30,5	27,2	25,3	24,0	23,2	22,6	22,0	21,1	20,0
m = 9	30,2	26,9	24,9	23,6	22,7	22,1	21,5	20,6	19,5
m = 4	28,9	25,2	22,7	21,0	19,8	18,9	18,2	17,3	16,3
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	≥20,0
Auslegungswert [%]	18,2	17,3	16,5	15,8	15,1	14,5	13,9	13,4	12,8
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 14	20,2	18,8	17,2	15,8	14,6	13,5	12,6	11,9	11,5
m = 10	18,7	17,4	15,9	14,5	13,5	12,5	11,6	11,0	10,7
m = 9	18,2	16,9	15,5	14,1	13,1	12,2	11,4	10,8	10,5
m = 4	15,2	14,2	13,1	12,2	11,6	11,0	10,6	10,3	10,1
<b>Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C<sub>CT</sub> = 1,0)</b>									
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ± 100%) /25/	Weibullverteilung		α [-]	I <sub>char</sub> [%]	I <sub>rep</sub> [%]	Φ <sub>Inkl.</sub> [°]		
		A [m/s] /25/	k [-] /25/						
N	0,038	6,3	2,11	-	10,2	10,7	0,1		
NNO	0,041	6,5	2,08	-	10,9	11,4	0,0		
ONO	0,062	7,5	2,34	-	11,1	11,6	0,0		
O	0,088	8,5	2,50	-	11,0	11,5	0,0		
OSO	0,087	7,6	2,75	-	10,3	10,8	0,0		
SSO	0,077	7,2	2,40	-	10,2	10,7	0,0		
S	0,073	7,4	2,19	-	9,9	10,4	0,0		
SSW	0,108	10,0	2,66	-	9,9	10,4	0,0		
WSW	0,140	9,9	2,22	-	10,3	10,8	0,0		
W	0,123	10,1	2,08	-	10,0	10,5	0,0		
WNW	0,101	9,6	2,25	-	9,9	10,4	0,0		
NNW	0,062	8,0	2,14	-	10,1	10,6	0,0		
<b>Gesamt (alle Sektoren)</b>	<b>1,000</b>	<b>8,7</b>	<b>2,13</b>	<b>0,30</b>	<b>10,1</b>	<b>10,6</b>	<b>0,0</b>		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>m</sub> [m/s]					7,67 /25/				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>50</sub> [m/s]					36,53				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v <sub>Nenn</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]					1,234				

Tabelle 15: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 50

WEA 51		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 [%]	32,1	29,9	28,0	26,1	24,4	22,9	21,5	20,2	19,1
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 14	30,9	27,6	25,7	24,5	23,6	22,8	21,6	20,3	18,8
m = 10	29,7	26,1	24,0	22,6	21,6	20,8	19,6	18,3	17,0
m = 9	29,4	25,6	23,4	22,0	21,0	20,1	19,0	17,7	16,4
m = 4	27,9	23,6	20,8	18,9	17,5	16,5	15,4	14,5	13,6
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	≥20,0
Auslegungswert [%]	18,2	17,3	16,5	15,8	15,1	14,5	13,9	13,4	12,8
Exponent der Wöhlerlinie	Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA								
m = 14	17,3	15,9	14,5	13,4	12,4	11,7	11,2	10,7	10,4
m = 10	15,6	14,4	13,2	12,3	11,6	11,1	10,8	10,5	10,3
m = 9	15,1	13,9	12,9	12,0	11,4	11,0	10,7	10,5	10,3
m = 4	12,8	12,3	11,7	11,3	11,0	10,7	10,5	10,4	10,2
<b>Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C<sub>CT</sub> = 1,0)</b>									
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ± 100%) /25/	Weibullverteilung		α [-]	I <sub>char</sub> [%]	I <sub>rep</sub> [%]	Φ <sub>Inkl.</sub> [°]		
		A [m/s] /25/	k [-] /25/						
N	0,038	6,0	2,13	-	10,5	11,0	0,0		
NNO	0,041	6,2	2,11	-	11,2	11,7	0,1		
ONO	0,062	7,0	2,37	-	11,5	12,0	0,0		
O	0,088	8,1	2,52	-	11,1	11,6	0,0		
OSO	0,087	7,2	2,78	-	10,6	11,1	0,0		
SSO	0,077	6,8	2,43	-	10,4	10,9	0,0		
S	0,073	6,9	2,21	-	10,1	10,6	0,0		
SSW	0,108	9,5	2,69	-	10,1	10,6	0,0		
WSW	0,140	9,4	2,25	-	10,7	11,2	0,1		
W	0,123	9,6	2,10	-	10,3	10,8	0,0		
WNW	0,101	9,0	2,28	-	10,1	10,6	0,0		
NNW	0,062	7,5	2,16	-	10,3	10,8	0,0		
<b>Gesamt (alle Sektoren)</b>	<b>1,000</b>	<b>8,2</b>	<b>2,15</b>	<b>0,30</b>	<b>10,4</b>	<b>10,9</b>	<b>0,0</b>		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>m</sub> [m/s]					7,25 /25/				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v <sub>50</sub> [m/s]					< 36,13				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v <sub>Nenn</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]					1,236				

Tabelle 16: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 51