## 16.1.4 Windenergieanlagen: Standsicherheit

Anlagen:

- 2018-11-15 Gutachtliche Stellungnahme TB Hollenstede (Fläche 18) Rev 4 -....pdf

**TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG**
Energie- und Systemtechnik

# Gutachtliche Stellungnahme zur Standorteignung von Windenergieanlagen im Windpark

# Hollenstede (Fläche 18)

Erstellt im Auftrag für

Windenergie Hollenstede 18 Planungsgesellschaft mbH

Fürstenau / OT Hollenstede

Revision 4

Hamburg, 15.11.2018

| Revision | Datum | Änderung |
|---|---|---|
| 0 | 28.02.2017 | Erste Ausgabe |
| 1 | 14.03.2017 | Änderung der Windparkkonfiguration |
| 2 | 24.04.2018 | Änderung der Windparkkonfiguration |
| 3 | 26.10.2018 | Änderung der Windparkkonfiguration |
| 4 | 15.11.2018 | Änderung des WEA-Typs |

| | |
|---|---|
| **Gegenstand:** | Ermittlung der effektiven Turbulenzintensitäten am Standort sowie weiterer Windbedingungen zur Beurteilung der Standorteignung von Windenergieanlagen innerhalb des Windparks Hollenstede (Fläche 18) |
| **Referenz-Nr.:** | 2018-WND-089b-CXLX-R4 |
| **Auftraggeber:** | Windenergie Hollenstede 18 Planungsgesellschaft mbH<br>Zur Dasslage 11<br>49584 Fürstenau / OT Hollenstede, Deutschland |

**Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen /21/:**

- Lageplan des Windparks
- Koordinaten der zu berücksichtigenden WEA
  (Koordinatensystem: UTM ETRS89, Zone 32)
- WEA-Spezifikation inkl. Angabe zu Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung der zu berücksichtigenden WEA
- Ergänzende Angaben zur Standortbeschreibung

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

| | | |
|---|---|---|
| Verfasser | Dipl.-Ing. (FH) O. Röglin<br>Sachverständiger | Hamburg,<br>15.11.2018 |
| Geprüft durch | Dr. rer. nat. M. Polster<br>Sachverständige | Hamburg,<br>15.11.2018 |

**Für weitere Auskünfte**:

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Dipl.-Ing. (FH) O. Röglin
Große Bahnstraße 31
22525 Hamburg

Tel.: +49 40 8557 2098
Fax: +49 40 8557 2552
E-Mail: oroeglin@tuev-nord.de

## Inhaltsverzeichnis

**1 Aufgabenstellung ..... 5**

**2 Grundlagen ..... 6**

*2.1 Nachweis durch vereinfachten Vergleich der Windbedingungen ..... 7*

*2.2 Nachweis durch Vergleich der Lasten ..... 11*

**3 Randbedingungen ..... 12**

*3.1 Windparkkonfiguration ..... 12*

*3.2 Windbedingungen der Auslegung ..... 13*

*3.3 Winddaten am Standort ..... 14*

**4 Durchgeführte Untersuchungen ..... 16**

*4.1 Standortbesichtigung ..... 16*

*4.2 Komplexität des Geländes ..... 17*

*4.3 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe ..... 18*

*4.4 Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe ..... 18*

*4.5 Umgebungsturbulenzintensität ..... 19*

*4.6 Effektive Turbulenzintensität ..... 20*

*4.7 Weitere Windbedingungen ..... 22*

*4.8 Modell- und Datenunsicherheiten ..... 23*

**5 Zusammenfassung und Bewertung ..... 23**

**6 Formelzeichen und Abkürzungen ..... 26**

**7 Literatur- und Quellenangaben ..... 28**

# 1 Aufgabenstellung

Am Standort Hollenstede (Fläche 18) (Niedersachsen) plant der Auftraggeber die Errichtung von vier Windenergieanlagen (WEA 1 bis 4), siehe hierzu Tabelle 1 bzw. Abbildung 1.

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG ist am 22.10.2018 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. Des Weiteren 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.

WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 50m sind genehmigungsbedürftige Anlagen gem. § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) /12/ in Verbindung mit Ziff. 1.6 Spalte 2 des Anhangs zur vierten Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) /13/. Aufgrund fehlender Kriterien für einen Immissionsgrenzwert für die durch Nachbar-WEA erhöhte Turbulenzbelastung einer WEA können ersatzweise die Kriterien der Standorteignung für eine Turbulenz-Immissionsprognose im Rahmen eines BImSchG-Antrages herangezogen werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Reduktion der Lebensdauer von WEA

und deren zusätzliche strukturelle Ermüdung infolge von Immissionen zumutbar sind, solange die Standorteignung der WEA hinsichtlich der Auslegungswerte nachzuweisender Windbedingungen oder hinsichtlich der nachzuweisenden Auslegungslasten gewährleistet bleibt.

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

# 2 Grundlagen

WEA sind Umweltbedingungen und elektrischen Einflüssen ausgesetzt, 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 Standortbesichtigung zu Grunde zu legen. Beide vereinfachten Vergleiche dürfen gemäß /5/ nur dann angewandt werden, sofern der Standort nach DIN EN 61400-1:2011 /8/ als nicht orografisch komplex anzusehen ist. Ist der Standort hingegen orografisch komplex, so sind 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 0,4$v_{ref}$,
- Turbulenzintensität der Umgebung und der im Nachlauf benachbarter WEA auf Nabenhöhe von 0,2 bis 0,4$v_{ref}$,
- Höhenexponent $\alpha$ für das exponentielle Windprofil,
- mittlere Dichte der Luft $\rho$ für Windgeschwindigkeiten ≥ $v_{Nenn}$,
- 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 standortspezifischen Windbedingungen mit den Windbedingungen der Auslegung gemäß Typenprüfung erfolgen:

- mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe $v_m$,
- effektive Turbulenzintensität $I_{eff}$ auf Nabenhöhe zwischen Windgeschwindigkeiten von 0,2 und 0,4$v_{ref}$,
- 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 benachbarter 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 setzten 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 ($v_{50} \geq 45$m/s) kleiner gleich fünf und für typische Binnenstandorte ($v_{50} \leq 40$m/s) kleiner gleich acht beträgt. In der Betrachtung der Turbulenzbelastung weisen wir dabei konservativ immer die Ergebnisse im Einflussbereich bis 8D, bezogen auf den jeweils größeren Rotordurchmesser der benachbarten WEA, aus.

In /14/ ist 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 /14/ erfolgt mit Hilfe einer effektiven Turbulenzintensität $I_{eff}$ 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 $I_{eff}$ ist eine materialspezifische Ersatzgröße und somit abhängig vom zu Grunde gelegten materialspezifischen Exponenten der Wöhlerlinie m.

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

Gegenüber der in /14/ 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. /14/ beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Turbulenzintensität im Nachlauf der WEA einen Schätzwert für den anlagenspezifischen Parameter $c_T$ (Schubbeiwert der WEA). Für die Ermittlung der maximalen Turbulenz im Nachlauf einer WEA auf Nabenhöhe (totale Turbulenzintensität $I_T$) nach dem Modell von Frandsen (2007), berücksichtigen wir abweichend hierzu die anlagenspezifischen Schubbeiwerte der jeweiligen WEA. Neben einer besseren Abbildung der realen Verhältnisse wird damit auch eine Unterschätzung der im Nachlauf produzierten Turbulenz in bestimmten Fällen vermieden, da nach unseren Untersuchungen insbesondere für Multi-Megawatt-WEA der Schätzwert für den Schubbeiwert $c_T$ im Bereich des Erreichens der Nennwindgeschwindigkeit $v_{Nenn}$ in der Regel nicht abdeckend ist. 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. /14/ 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. /16/, /17/). Die Ausdehnung des Nachlaufs basiert auf einem in /14/ beschriebenen Nachlaufmodell von Frandsen, bei dem sich der Nachlauf in Abhängigkeit des WEA-spezifischen Schubbeiwertes $c_T$ und somit auch windgeschwindigkeitsabhängig erweitert. Insbesondere bei niedrigen Windgeschwindigkeiten weist der Nachlauf im unmittelbaren Nahbereich bereits eine deutlich größere Ausdehnung als der Rotor selbst auf.

Nach /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 turbulenzerhöhenden Einfluss ausgegangen werden. Für jede WEA wird ein turbulenzerhöhender 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 /21/.

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.

| Lfd. WEA-Nr. | | WEA-Bezeichnung | Koordinaten [m] | | WEA-Typ | $P_{Nenn}$ [MW] | D [m] | NH [m] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Rechtswert | Hochwert | | | | |
| | 1 | WEA 18_01 | 411682 | 5814008 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 |
| | 2 | WEA 18_02 | 411992 | 5813886 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 |
| | 3 | WEA 18_03 | 411288 | 5813534 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 |
| | 4 | WEA 18_04 | 411624 | 5813436 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 |

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

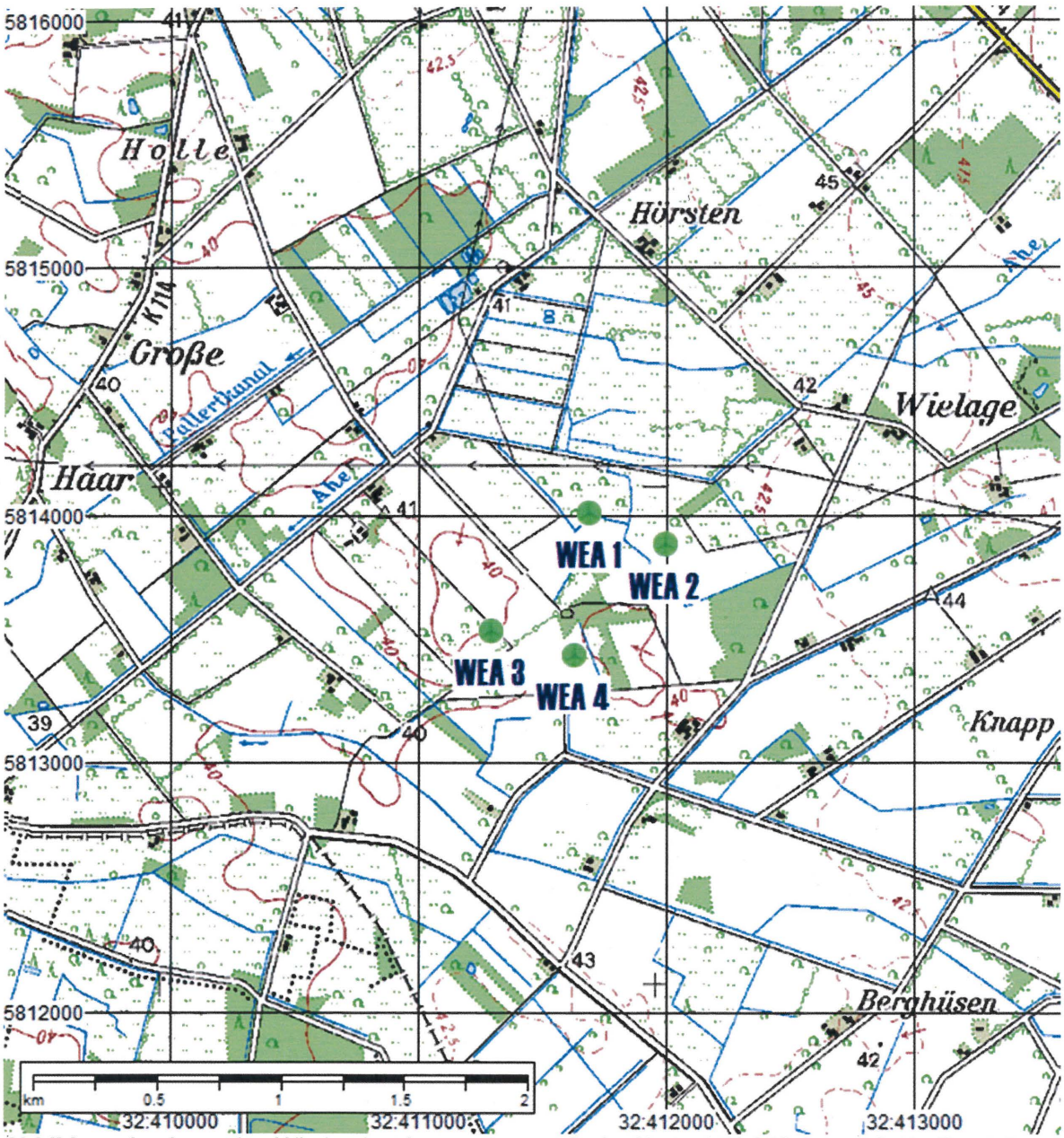


**Abbildung 1:** Lage des Windparks, Auszug topografische Karte 1:50.000 (vergrößerte Darstellung) /16/

Der geringste auf den jeweils größeren Rotordurchmesser bezogene dimensionslose Abstand $s_i$ zwischen zwei WEA, von denen mindestens eine WEA vom Auftraggeber neu geplant ist, liegt bei 2,40$D_{ENERCON\ E\text{-}138\ EP3\ E2}$. Dies betrifft die WEA 1 und 2 mit einem Abstand von ca. 333m.

## 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-138 EP3 E2, 4,20MW mit 160,0m NH (WEA 1 bis 4) liegt derzeit noch keine gültige Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vor. Die angegebenen Auslegungswerte gelten somit unter Vorbehalt. In Tabelle 2 sind die betroffenen WEA entsprechend markiert (#).

| Lfd. WEA-Nr. | | Windzone (WZ) und Geländekategorie (GK) der Typenprüfung | Turbulenzkategorie nach DIN EN 61400-1:2011 | $v_m$ [m/s] | $v_{ref}$ [m/s] | Ref. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1# | WZ 2, GK II /6/ | A | 7,71 | 38,93 | /23/ |
| | 2# | WZ 2, GK II /6/ | A | 7,71 | 38,93 | /23/ |
| | 3# | WZ 2, GK II /6/ | A | 7,71 | 38,93 | /23/ |
| | 4# | WZ 2, GK II /6/ | A | 7,71 | 38,93 | /23/ |

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

## *3.3 Winddaten am Standort*

In /22/ sind die Winddaten an bzw. in unmittelbarer Nähe der Standorte der WEA 1 bis 4 für eine Höhe von 159,64m angegeben und werden in unseren Berechnungen dementsprechend verwendet. Zusätzlich liegen für den Referenzpunkt mit den Koordinaten 411544 / 5813402 (Koordinatensystem: UTM, ETRS89, Zone 32) mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten $v_m$ auf verschiedenen Höhen zur Bestimmung des mittleren Höhenexponenten $\alpha$ vor. Die Winddaten sind in Tabelle 3 bzw. Abbildung 2 beispielhaft für den Standort nahe der WEA 3 und für eine Höhe von 159,64m 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. Für deren Bestimmung können ggf. Windgutachten oder Auszüge daraus herangezogen werden, wenn diese keine relevanten Abweichungen zur technischen Richtlinie für Windenergieanlagen (TR6) aufweisen. Hierbei sollten Referenzpunkte der Winddaten den Standort der zu bewertenden WEA charakterisieren und Höhendifferenzen von ca. 5m zwischen der Referenzhöhe der Winddaten und der Nabenhöhe der betroffenen WEA nicht überschritten werden.

Die Bestimmung der standortspezifischen, mittleren Jahreswindgeschwindigkeit $v_m$ erfolgt im vorliegenden Fall für WEA, die nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, auf Basis der Winddaten /22/.

| Richtungssektoren | Relative Häufigkeit [-] (1 ≙ 100%) | Weibullverteilung | |
|---|---|---|---|
| | | A [m/s] | k [-] |
| N | 0,047 | 6,8 | 2,25 |
| NNO | 0,049 | 6,2 | 2,19 |
| ONO | 0,078 | 6,2 | 2,43 |
| O | 0,086 | 7,5 | 2,37 |
| OSO | 0,039 | 6,8 | 2,28 |
| SSO | 0,056 | 7,9 | 2,61 |
| S | 0,119 | 7,7 | 2,41 |
| SSW | 0,143 | 9,2 | 2,49 |
| WSW | 0,159 | 10,1 | 2,78 |
| W | 0,099 | 9,0 | 2,53 |
| WNW | 0,075 | 8,6 | 2,43 |
| NNW | 0,049 | 7,1 | 2,30 |
| **Gesamt (alle Sektoren)** | **0,999** | **8,2** | **2,29** |
| **mittlere Jahreswindgeschwindigkeit $v_m$ [m/s]** | | **7,27** | |

**Tabelle 3:** Winddaten am Standort Hollenstede (Fläche 18) (Bezugshöhe 159,64m ü. Grund) /22/

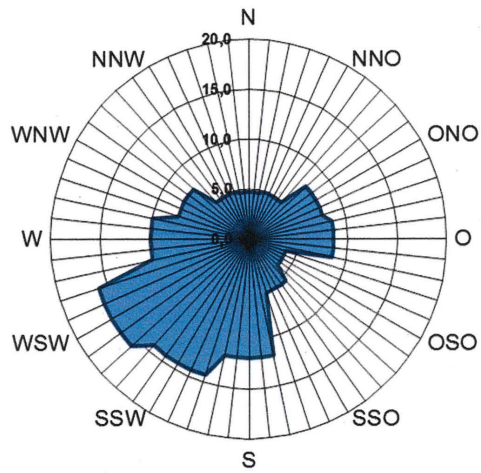


**Abbildung 2:** Relative Häufigkeit der Windrichtung am Standort Hollenstede (Fläche 18) in Prozent (Bezugshöhe 159,64m ü. Grund) /22/

# 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 SysTec GmbH & Co. KG Herrn S. Reh am 22.06.2016 durchgeführt und die Gegebenheiten vor Ort entsprechend aufgenommen und dokumentiert /22/. Hierbei wurden in der unmittelbaren Umgebung des Standortes keine ausgeprägten Hindernisse festgestellt. In ergänzenden Angaben zur Standortbeschreibung /21/ hat der 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 orografisch strukturiertem Gelände können große Höhendifferenzen und Geländesteigungen zu erhöhten Umgebungsturbulenzen führen. Die Kriterien zur Bewertung der Komplexität des Geländes durch Definition von insgesamt 25 durch den Fußpunkt des Turmes verlaufenden angenäherten Ebenen an das Gelände sind in DIN EN 61400-1:2011 /8/ erläutert. Demnach gilt das Gelände an einem Standort, das nicht alle in Tabelle 4 aufgeführten Einschränkungen erfüllt, als komplex. Kommt mehr als 5% der Windenergie aus einem als orografisch komplex anzusehenden Richtungssektor, so muss für den Nachweis der Integrität der Konstruktion mit Bezug auf die Winddaten für diesen Sektor eine Erhöhung der longitudinalen Komponente der Umgebungsturbulenzintensität durch Multiplikation mit einem Turbulenzstrukturparameter $C_{CT}$ erfasst werden /8/. Der Maximalwert dieses $C_{CT}$ von 1,15 wird erreicht, sobald der summierte Windenergieanteil aus orografisch komplexen Richtungssektoren bei 15% oder mehr liegt. Zwischen einem Windenergieanteil von 5 und 15% variiert $C_{CT}$ dementsprechend zwischen 1 und 1,15.

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

**Tabelle 4:** Bewertungskriterien der Komplexität des Geländes /8/

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

Die Bewertung der Komplexität des Geländes erfolgt für alle 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 bis 4 eine Bewertung der Komplexität des Geländes nach /8/.

Am Standort Hollenstede (Fläche 18) werden an den WEA 1 bis 4 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 Hollenstede (Fläche 18) (Niedersachsen) liegt nach /20/ in der Windzone 2 gemäß Windzonenkarte /6/. Die Geländekategorie lässt sich gemäß Kapitel 4.1 in GK II einordnen.

## *4.4 Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe*

Für den in /5/ aufgeführten vereinfachten Vergleich der Windbedingungen am Standort mit den jeweiligen Auslegungswerten zur Beurteilung der Standorteignung, ist gemäß Kapitel 16.2.b.i die Bestimmung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe $v_m$ notwendig. Die 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 im vorliegenden Fall auf Basis der Winddaten /22/ direkt entnommen bzw. bei geringfügigen Höhendifferenzen umgerechnet (siehe Kapitel 3.3).

In der nachfolgenden Tabelle 5 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 [-] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 | 7,26 | 2,29 |
| | 2 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 | 7,26 | 2,29 |
| | 3 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 | 7,28 | 2,29 |
| | 4 | ENERCON E-138 EP3 E2 | 4,20 | 138,6 | 160,0 | 7,27 | 2,30 |

**Tabelle 5:** mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe $v_m$ und zugehörige mittlere Formparameter der Weibullverteilung k für nachzuweisende WEA am Standort Hollenstede (Fläche 18) /22/

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

## *4.5 Umgebungsturbulenzintensität*

Die Turbulenzintensität definiert allgemein das Verhältnis der Standardabweichung $\sigma$ 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 /10/ durch Multiplikation der mittleren Umgebungsturbulenzintensität mit dem Faktor 1,2. Die in /5/ definierte repräsentative Turbulenzintensität $I_{rep}$ (90%-Quantil) ergibt sich aus der Addition der mittleren Umgebungsturbulenzintensität und der 1,28fachen Standardabweichung. Dies entspricht der Multiplikation der rechnerisch ermittelten mittleren Umgebungsturbulenzintensität mit dem Faktor 1,256.

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

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

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

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

**Tabelle 6:** Beispielhafte Werte der charakteristischen und repräsentativen Turbulenzintensität am Standort der WEA 3 in Hollenstede (Fläche 18), Bezugswerte: v = 15m/s, z = 160,0m

## *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 /18/ für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) mit einem Fasergehalt von mindestens 30 Vol.-% und höchstens 55 Vol.-% /11/. Für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit einem Fasergehalt von mindestens 50 Vol.-% und höchstens 60 Vol.-% und einer Epoxidharzmatrix wird ein Wert von m = 14 vorgeschlagen /11/. Bei hiervon abweichenden Fasergehalten oder Matrixharzen müssen ggf. herstellerspezifische materialspezifische Exponenten der Wöhlerlinie verwendet werden. Ebenso können WEA-Hersteller nachweisen, dass auch unter Verwendung geringerer materialspezifischer Exponenten der Wöhlerlinie der Vergleich der Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensitäten mit den Auslegungswerten für einen strukturellen Ermüdungsnachweis zulässig ist.

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

Für die WEA 1 bis 4, 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 7 maßgeblich für eine Bewertung der Standorteignung hinsichtlich der Auslegungswerte der Turbulenzintensität. Als Teil der Auslegung bezieht sich die DIBt-Richtlinie 2012 /5/ bzw. /8/ auf die repräsentative Turbulenzintensität $I_{rep}$.

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 Tabelle 7 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 den Standort Hollenstede (Fläche 18) ist dabei für alle in dieser Berechnung betrachteten Nabenhöhen ein Windgeschwindigkeitsbereich von 5 bis 20m/s abdeckend und wird entsprechend in Tabelle 7 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 /14/. 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 Tabelle 7 entsprechend markiert (*). Die mit (*) markierten Werte empfehlen wir nicht als Eingangsgröße im Rahmen eines standortspezifischen Lastvergleiches.

Für die WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 E2, 4,20MW mit 160,0m NH (WEA 1 bis 4) liegt derzeit noch keine gültige Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ vor. Des Weiteren liegen für diese WEA nur vorläufige, anlagenspezifische Parameter (Schubbeiwert $c_T$) und Auslegungswerte vor. In Tabelle 7 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 Tabelle 7 jeweils fett und kursiv gedruckt.

| **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** |
| **Lfd. WEA-Nr.** | | **Ergebnisse [%] auf NH der WEA** | | | | | | | |
| | 1# | 24,4 | 22,3 | 20,4 | 18,1 | 15,9 | 13,8 | 12,5 | 11,6 |
| | 2# | 24,6 | 23,0 | 21,6 | 19,8 | 17,9 | 15,8 | 14,3 | 13,2 |
| | 3# | 24,0 | 21,8 | 19,9 | 17,6 | 15,2 | 12,9 | 11,4 | 10,4 |
| | 4# | 24,3 | 22,5 | 21,1 | 19,3 | 17,3 | 15,2 | 13,8 | 12,6 |

**Tabelle 7:** Ergebnisse für die effektiven Turbulenzintensitäten auf Nabenhöhe (DIBt 2012 /5/)

## *4.7 Weitere Windbedingungen*

Ist der Standort nach DIN EN 61400-1:2011 /8/ als orografisch komplex anzusehen, so muss der Nachweis der Standorteignung für WEA, für die eine Typenprüfung auf Basis der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ 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 standort-

spezifischen 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) $\varphi_{Inkl.}$ sowie die extreme Turbulenzintensität zu ermitteln. Da die Neigung der Anströmung $\varphi_{Inkl.}$ in Lastvergleichen üblicherweise als weiterer Parameter mit einbezogen wird, ermitteln wir diese auch für die Fälle, in denen der Standort nicht als orografisch komplex nach /8/ anzusehen ist.

### *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 Hollenstede (Fläche 18) (Niedersachsen) plant der Auftraggeber die Errichtung von vier WEA (WEA 1 bis 4).

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG ist am 22.10.2018 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 /12/. Das bedeutet, dass die Immissionen auf WEA zumutbar sind, solange die Standorteignung der WEA hinsichtlich der Auslegungswerte nachzuweisender Windbedingungen oder hinsichtlich der nachzuweisenden Auslegungslasten, nachgewiesen ist.

Für die WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 E2, 4,20MW mit 160,0m 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.

Für die geplanten WEA 1 bis 4 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 WEA 1 bis 4, 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).

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 1 bis 4 keine Überschreitungen (siehe Tabelle 7).

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Standorteignung der am Standort Hollenstede (Fläche 18) betrachteten WEA 1 bis 4 vom Typ ENERCON E-138 EP3 E2, 4,20MW mit 160,0m NH bis zum Vorliegen einer gültigen Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ unter Vorbehalt nachgewiesen ist.

Der Vorbehalt für die Ergebnisse in unserer gutachtlichen Stellungnahme für die geplanten WEA 1 bis 4 bezieht sich ausschließlich auf das Nicht-Vorliegen einer gültigen Typenprüfung nach der DIBt-Richtlinie 2012 /5/ (siehe Kapitel 1). Werden die in dieser gutachtlichen Stellungnahme 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 urheber-

rechtsfähigen 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 | |
| $P_{Nenn}$ | 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 | [-] |
| $I_{eff}$ | Effektive Turbulenzintensität auf Nabenhöhe | [-] |
| $I_{char}$ | Charakteristische Turbulenzintensität bei 15m/s | [-] |
| $I_{rep}$ | Repräsentative Turbulenzintensität bei 15m/s | [-] |
| $I_T$ | Maximale Turbulenzintensität im Nachlauf einer WEA auf Nabenhöhe (totale Turbulenzintensität) | [-] |
| A | Skalierungsparameter der Weibullverteilung | [m/s] |
| k | Formparameter der Weibullverteilung | [-] |
| m | Exponent der Wöhlerlinie | [-] |
| v | Windgeschwindigkeit (allgemein) | [m/s] |
| $v_m$ | Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe | [m/s] |
| $v_{50}$ | Extremer 10-min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren am Standort | [m/s] |
| $v_{ref}$ | Auslegungswert für $v_{50}$ auf Nabenhöhe | [m/s] |
| $v_{in}$ | Einschaltwindgeschwindigkeit | [m/s] |

| | | |
|---|---|---|
| $v_{Nenn}$ | Nennwindgeschwindigkeit | [m/s] |
| z | Höhe über Grund (allgemein) | [m] |
| $z_{hub}$ | Nabenhöhe der jeweiligen WEA | [m] |
| $\alpha$ | Höhenexponent für das exponentielle Windprofil | [-] |
| $\varphi_{Inkl.}$ | Inklinationswinkel der Schräganströmung | [°] |
| $\rho$ | Mittlere Dichte der Luft | [kg/m³] |
| $\sigma$ | Standardabweichung der mittleren Windgeschwindigkeit | [m/s] |
| | Altgrad (Vollkreis ≙ 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; DIBt, Berlin; 2012

/6/ Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 1991-1-4 und nationaler Anhang DIN EN 1991-1-4/NA; Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010; Berlin; Dezember 2010

/7/ Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1 (VDE 0127 Teil 1), Windenergieanlagen - Teil 1: Sicherheitsanforderungen (IEC 61400-1:1999, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61400-1:2004; Berlin; August 2004

/8/ Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1 (VDE 0127-1), Windenergieanlagen - Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005 + A1:2010); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005 + A1:2010; Berlin; August 2011

/9/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind turbines - Part 1: Design requirements; Third Edition; August 2005 + Amendment 1: Oktober 2010

/10/ Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH; Guideline for the Certification of Wind Turbines; Hamburg; Edition 2003 with Supplement 2004

/11/ Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH; Guideline for the Certification of Wind Turbines; Hamburg; Edition 2010

/12/ Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943)

/13/ Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 3756)

/14/ Risø National Laboratory; Frandsen, St. T.; Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters; Wind Energy Department; Risø-R-1188(EN); Roskilde, Dänemark; Januar 2007

/15/ Risø National Laboratory; European Wind Atlas; Roskilde, Dänemark; 1989

/16/ TOP50, Amtliche topografische Karten 1:50.000, Amtliches digitales Geländemodell (Auflösung 50m); Landesvermessungsämter der Bundesländer; Deutschland; 2003/2004

/17/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, Hole-filled seamless SRTM data V4.1, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT); 08.2008

/18/ Kunte, A; Turbulenz-Immissionsprognosen vereinheitlicht; WIND-KRAFT Journal; Verlag Natürliche Energien, Ausgabe 4/2009, S.28 bis 30; Seevetal

/19/ VDI 3783 Blatt 12; Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht; Verein Deutscher Ingenieure; 1999

/20/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt); Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen; Windzonen_nach_Verwaltungsgrenzen.xls in der Fassung vom 20.04.2015

/21/ Agrowea GmbH & Co. KG; E-Mails mit beigefügten Koordinaten und Angaben zur WEA-Spezifikation inkl. Angabe zu Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung der zu berücksichtigenden WEA, Lageplan des Windparks, Ergänzende Angaben zur Standortbeschreibung; 22.10.2018 und 29.10.2018

/22/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG; Gutachtliche Stellungnahme zur Bestimmung des Windpotenzials und des Energieertrages für neun Windenergieanlagen im Windpark Hollenstede, Revision 0, Referenznummer: 2016-WND-WPE-037-R0; Hamburg; 28.07.2016 zzgl. Auszug zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit für den Standort Hollenstede (Fläche 18); Hamburg; 19.04.2018

/23/ ENERCON GmbH; E-Mail mit Informationen zu den Auslegungsbedingungen hinsichtlich der Windzone, der 50-Jahreswindgeschwindigkeit, der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit und der Turbulenzintensität für die Windenergieanlage vom Typ ENERCON E-138 EP3 E2, 4,20MW mit 160,0m NH; Aurich; 07.11.2018