

**Gutachtliche Stellungnahme zur
Standorteignung von Windenergieanlagen
im Windpark
Alt-Madlitz**

Erstellt im Auftrag für

GBB Windpark Madlitz GmbH & Co. KG

Briesen (Mark)

Revision 2

Hamburg, 13.06.2023

Revision	Datum	Änderung
0	23.11.2017	Erste Ausgabe
1	30.11.2018	Änderung des Auftraggebers
2	13.06.2023	Änderung des geplanten WEA-Typs

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

Referenz-Nr.: 2023-WND-091-CXLXVI-R2

Auftraggeber: GBB Windpark Madlitz GmbH & Co. KG
Schlossstraße 32
15518 Briesen (Mark), Deutschland

Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen:

- Koordinaten und WEA-Spezifikation (Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung) der zu berücksichtigenden WEA /24/
- Informationen zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit (A- und k-Parameter der Weibullverteilung) /25/
- Dokumentation zur Besichtigung des Standortes /26/

Hinweis zum verwendeten Koordinatensystem:

In dieser gutachtlichen Stellungnahme wird das Koordinatensystem UTM ETRS89, Zone 33 verwendet.

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	M.Sc. J.-A. Maschmann Sachverständige	Hamburg, 13.06.2023
Geprüft durch	Dr. rer. nat. M. Polster Sachverständige	Hamburg, 13.06.2023

Für weitere Auskünfte:

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
M.Sc. J.-A. Maschmann
Große Bahnstraße 31
22525 Hamburg

Tel.: +49 40 8557 1389

Fax: +49 40 8557 2552

E-Mail: jmaschmann@tuev-nord.de

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	5
2	Grundlagen	6
2.1	<i>Nachweis durch vereinfachten Vergleich der Windbedingungen</i>	8
2.2	<i>Nachweis durch Vergleich der Lasten</i>	11
3	Randbedingungen	12
3.1	<i>Windparkkonfiguration</i>	12
3.2	<i>Windbedingungen der Auslegung</i>	13
3.3	<i>Winddaten am Standort</i>	14
4	Durchgeführte Untersuchungen	16
4.1	<i>Standortbesichtigung</i>	16
4.2	<i>Komplexität des Geländes</i>	16
4.3	<i>50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe</i>	17
4.4	<i>Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe</i>	18
4.5	<i>Umgebungsturbulenzintensität</i>	19
4.6	<i>Effektive Turbulenzintensität</i>	21
4.7	<i>Weitere Windbedingungen</i>	22
4.7.1	<i>Mittlerer Höhenexponent</i>	23
4.7.2	<i>Mittlere Luftdichte</i>	23
4.7.3	<i>Neigung der Anströmung</i>	23
4.8	<i>Modell- und Datenunsicherheiten</i>	24
5	Zusammenfassung und Bewertung	24
6	Rechtliche Hinweise	26
7	Formelzeichen und Abkürzungen	27
8	Literatur- und Quellenangaben	29
9	Zusammenfassung aller Windbedingungen	31

1 Aufgabenstellung

Am Standort Alt-Madlitz (Brandenburg) plant der Auftraggeber die Errichtung von fünf Windenergieanlagen (WEA 1 bis 5), siehe hierzu Tabelle 1 bzw. Abbildung 1.

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG ist am 23.05.2023 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 gelten die Ergebnisse für diese WEA nur unter Vorbehalt. Dieser Vorbehalt entfällt, 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 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 50 m 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 $0,4v_{ref}$ (bzw. v_m bis $2v_m$ nach /10/),
- Turbulenzintensität der Umgebung und der im Nachlauf benachbarter WEA auf Nabenhöhe von 0,2 bis $0,4v_{ref}$ (bzw. v_m bis $2v_m$ nach /10/),
- Höhenexponent α für das exponentielle Windprofil,
- mittlere Dichte der Luft ρ für Windgeschwindigkeiten $\geq v_{Nenn}$,
- Neigung der Anströmung $\varphi_{Inkl.}$,
- extreme Turbulenzintensität.

Für den Nachweis der Integrität der WEA in Bezug auf den Auslegungswert der Turbulenzintensität nach /8/ bzw. /10/ ist in aller Regel ein Windgeschwindigkeitsbereich von 5 bis 20 m/s für alle Windzonen gemäß Windzonenkarte /6/ abdeckend. Sollte sich nach einer der beiden Richtlinien /8/ bzw. /10/ ein größerer Windgeschwindigkeitsbereich ergeben, werden die effektiven Turbulenzintensitäten entsprechend für den erweiterten Bereich betrachtet. Auch der Bereich der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit (Dichtefunktion) erfolgt abdeckend für beide Richtlinien.

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 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 wird für WEA, die als Vorbelastung in die Berechnung eingehen und nach /5/ zu betrachten und zu bewerten sind, ein abdeckender Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} bzw. ein abdeckender Lastvergleich der Extremlasten vorausgesetzt.

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 werden dabei konservativ immer die Ergebnisse im Einflussbereich bis $8D$, bezogen auf den jeweils größeren Rotordurchmesser der benachbarten WEA, ausgewiesen.

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_{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 /15/ dargestellten Form des Berechnungsverfahrens wird das dort beschriebene Verfahren nach Frandsen (2007) zur Ermittlung der Turbulenzerhöhungen in der Nachlaufströmung benachbarter WEA mit zwei Modifikationen verwendet, 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 Turbulenzintensität I_T) nach dem Modell von Frandsen (2007), werden abweichend hierzu die anlagenspezifischen Schubbeiwerte der jeweiligen WEA berücksichtigt. Neben einer besseren Abbildung der realen Verhältnisse wird damit auch eine Unterschätzung

der im Nachlauf produzierten Turbulenz in bestimmten Fällen vermieden, da nach 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 seitens des WEA-Herstellers zur Verfügung gestellt und werden als richtig vorausgesetzt. Eine Änderung der Schubbeiwerte erfordert eine Neubewertung der Turbulenzbelastung. Liegen für insbesondere ältere WEA keine Schubbeiwerte c_T vor, so wird der in /8/ als allgemeingültig definierte windgeschwindigkeitsabhängige Wert von $c_T = 7 \text{ m/s} / v$ verwendet. 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 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 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. Ebenso werden bei verschiedenen Nabenhöhen benachbarter WEA die resultierenden Unterschiede der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in Abhängigkeit von der Windscherung (bzw. dem Windprofil) berücksichtigt.

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.

Erfahrungsgemäß liefern die zur Anwendung kommenden Modelle zur Berechnung der Turbulenzintensität bei WEA-Abständen unterhalb von $2,3D$ nur begrenzt belastbare Ergebnisse an den der erhöhten Turbulenz der Nachlaufströmung ausgesetzten benachbarten WEA. Grund hierfür ist unter anderem, dass nur die jeweiligen Schubbeiwerte und nicht die exakte Geometrie des Rotorblattes in die Berechnungen einfließen und somit insgesamt rein theoretische Modellannahmen getroffen werden müssen. Bei Einhaltung entsprechender Kriterien wie z.B. der Energieanteil des Nachlaufsektors und die Komplexität des WEA-Standortes können bei Unterschreitungen von $2,3D$ im Einzelfall dennoch belastbare Aussagen zur Standorteignung getroffen werden. Sollte aus Sicht der nachlaufverursachenden WEA ein WEA-Abstand von ca. $2,0D$ unterschritten werden, so stellen sich erfahrungsgemäß die Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensität als signifikant unplausibel dar und werden nicht mehr ausgewiesen.

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 $0,4v_{\text{ref}}$ 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 erfahrungsgemäß nur begrenzt belastbar sein. Wird dies durch eine Einzelfallprüfung bestätigt, sollten die ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten am Standort nicht im Rahmen eines standortspezifischen Lastvergleiches verwendet werden.

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 $\varphi_{\text{Inkl.}}$ 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. Die Angabe aller Koordinaten in dieser gutachtlichen Stellungnahme erfolgt im Koordinatensystem UTM ETRS89, Zone 33.

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 1	450078	5801839	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0
 2	WEA 2	450367	5801483	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0
 3	WEA 3	450861	5801965	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0
 4	WEA 4	450814	5801504	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0

Lfd. WEA-Nr.	WEA-Bezeichnung	Koordinaten [m]		WEA-Typ	P _{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
		Rechtswert	Hochwert				
 5	WEA 5	451398	5802170	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0

Tabelle 1: Windparkkonfiguration

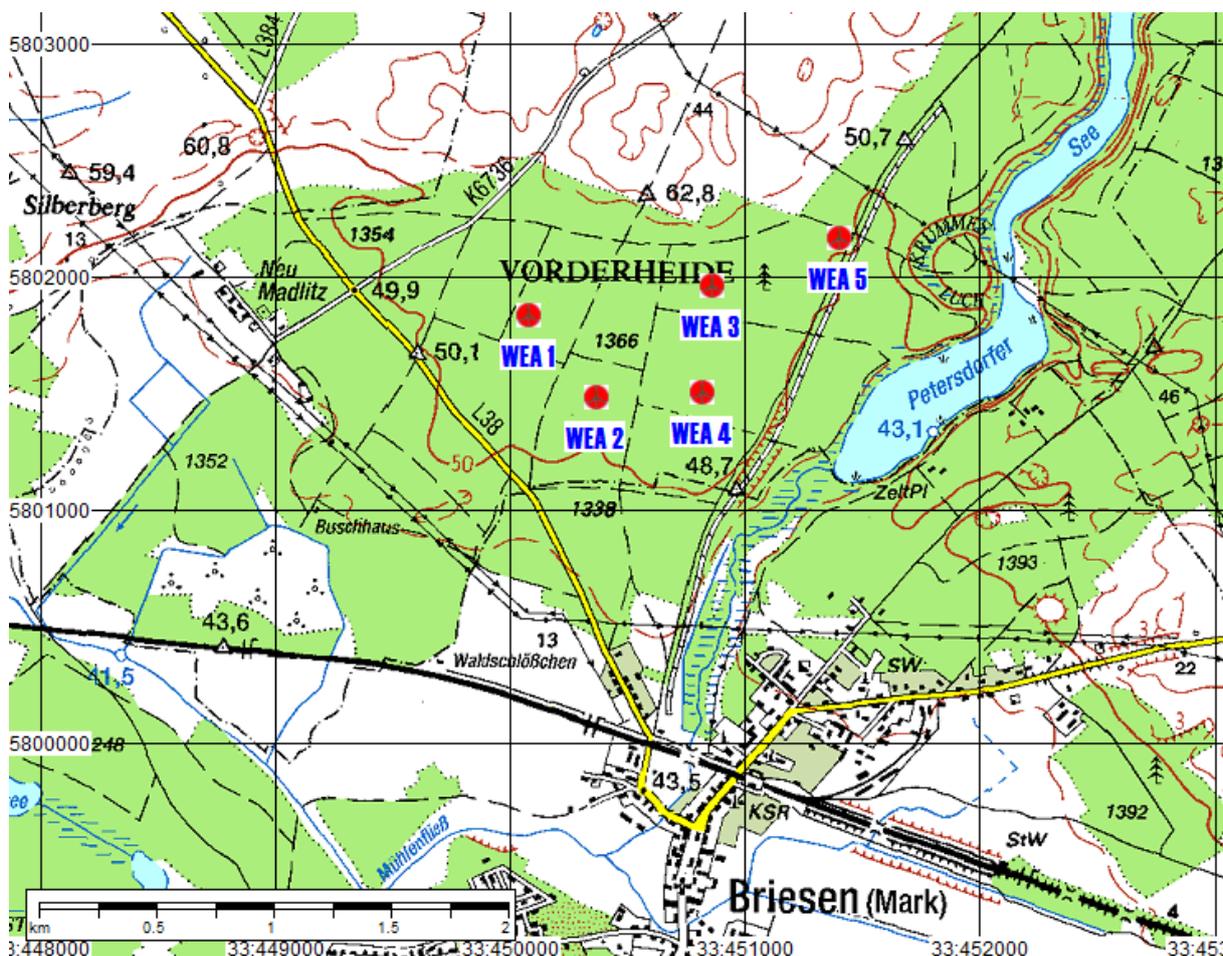


Abbildung 1: Lage des Windparks, Auszug topografische Karte 1:50.000 (vergrößerte Darstellung) /17/

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 $3,00D_{\text{Nordex N149/5.X}}$. Dies betrifft die WEA 2 und 4 mit einem Abstand von ca. 447 m.

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 Windzonen-

karte /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 auf Basis von Dokumente des jeweiligen WEA-Herstellers dargestellt. Die in Kapitel 8 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.

Die Entwurfslebensdauer der geplanten WEA 1 bis 5 des Typs Nordex N149/5.X, 5,7 MW mit 164,0 m NH beträgt 20 Jahre.

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 S	gem. WEA-Hersteller	7,50	42,00	/27/
 2	WZ S	gem. WEA-Hersteller	7,50	42,00	/27/
 3	WZ S	gem. WEA-Hersteller	7,50	42,00	/27/
 4	WZ S	gem. WEA-Hersteller	7,50	42,00	/27/
 5	WZ S	gem. WEA-Hersteller	7,50	42,00	/27/

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

3.3 Winddaten am Standort

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und die Weibullverteilung wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt /25/ und werden als richtig und repräsentativ für die freie Anströmung am Standort Alt-Madlitz vorausgesetzt.

In /25/ sind die Winddaten am Standort der WEA 4 für eine Höhe von 164,0 m angegeben und werden in den Berechnungen dementsprechend verwendet. Die Winddaten sind in Tabelle 3 bzw. Abbildung 2 dargestellt.

Die Bestimmung der standortspezifischen, mittleren Jahreswindgeschwindigkeit v_m 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 $\hat{=}$ 100%)	Weibullverteilung	
		A [m/s]	k [-]
N	0,037	6,60	2,120
NNO	0,048	6,70	2,400
ONO	0,051	6,30	2,270
O	0,091	7,60	2,950
OSO	0,080	7,10	3,180
SSO	0,058	6,40	3,040
S	0,074	6,90	2,950
SSW	0,108	7,40	2,810
WSW	0,150	8,10	2,400
W	0,148	8,00	2,370
WNW	0,097	7,30	2,390
NNW	0,056	5,90	2,310
Gesamt (alle Sektoren)	0,998	7,29	2,481
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit v_m [m/s]		6,47	

Tabelle 3: Winddaten am Standort Alt-Madlitz (Bezugshöhe 164,0 m ü. Grund) /25/

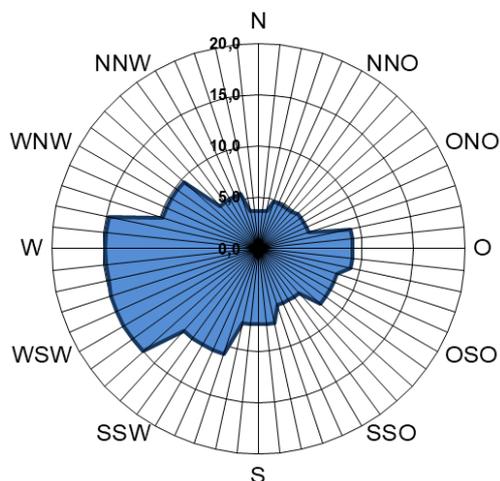


Abbildung 2: Relative Häufigkeit der Windrichtung am Standort Alt-Madlitz in Prozent (Bezugshöhe 164,0 m ü. Grund) /25/

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 einem Mitarbeiter der Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH am 31.05.2023 durchgeführt und die Gegebenheiten vor Ort entsprechend aufgenommen und dokumentiert /26/. Hierbei wurden in der unmittelbaren Umgebung des Standortes keine ausgeprägten Hindernisse mit relevanter Größe bzw. Entfernung festgestellt.

Das Gelände am Standort lässt sich nach DIN EN 1991-1-4 bzw. DIN EN 1991-1-4/NA /6/ in GK III 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 IEC 61400-1, Ed. 4 /10/.

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 kom-

plex 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 • Z_{hub}	360°	10°	15°	20°	2 %	4 %	6 %
5 • Z_{hub}	30°						
10 • Z_{hub}							
20 • 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 die WEA 1 bis 5 nach /10/.

Am Standort Alt-Madlitz werden an den WEA 1 bis 5 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 von 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 Alt-Madlitz (Brandenburg) liegt nach /21/ in der Windzone 2 gemäß Windzonenkarte /6/. Die Geländekategorie lässt sich gemäß Kapitel 4.1 in GK III einordnen.

Bei WEA, deren Windzone der Auslegung gemäß Typenprüfung (siehe Tabelle 2) nicht die Windzone des Standortes gemäß Windzonenkarte /6/ abdecken bzw. deren Windzone der Auslegung gesondert als S-Klasse angegeben ist, wird die 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe nach /6/ ermittelt.

In der nachfolgenden Tabelle 5 ist für nachzuweisende WEA die ermittelte 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe dargestellt.

Lfd. WEA-Nr.	WEA-Typ	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]	v_{50} [m/s]
 1	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	35,6
 2	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	35,6
 3	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	35,6
 4	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	35,6
 5	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	35,6

Tabelle 5: 50-Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe nach /6/ für nachzuweisende WEA am Standort Alt-Madlitz; WZ 2, GK III

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/ 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. Bei Umrechnung des mittleren Formparameters der Weibullverteilung k auf andere Höhen wird angenommen, dass sich dieser mit der Höhe nicht verändert.

Lfd. WEA-Nr.	WEA-Typ	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]	v_m [m/s]	k [-]
 1	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	6,47	2,48
 2	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	6,47	2,48
 3	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	6,47	2,48
 4	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	6,47	2,48
 5	Nordex N149/5.X	5,70	149,1	164,0	6,47	2,48

Tabelle 6: mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe v_m und zugehörige mittlere Formparameter der Weibullverteilung k für nachzuweisende WEA am Standort Alt-Madlitz /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 Jahreswindgeschwindigkeit erlaubt, wenn diese noch unterhalb dem Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung liegt.

4.5 Umgebungsturbulenzintensität

Die Turbulenzintensität definiert allgemein das Verhältnis der Standardabweichung σ der zeitlichen Windgeschwindigkeitsverteilung zu ihrem Mittelwert bezogen auf ein Intervall von 600 s (10 min). 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, wird die charakteristische Turbulenzintensität gemäß /11/ durch Multiplikation der mittleren Umgebungsturbulenzintensität mit dem Faktor 1,2 gebildet. 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 25 km 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 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 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	10,9	11,4
NNO	11,7	12,2
ONO	13,4	14,0
O	12,6	13,2
OSO	11,9	12,5
SSO	13,8	14,4
S	14,4	15,1
SSW	14,1	14,8
WSW	14,8	15,5
W	13,9	14,5
WNW	12,5	13,1
NNW	11,5	12,0

Tabelle 7: Beispielhafte Werte der charakteristischen und repräsentativen Turbulenzintensität am Standort Alt-Madlitz für die Koordinaten 450704 / 5801792, Bezugswerte: $v = 15$ m/s, $z = 164,0$ 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. 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. In den Ergebnistabellen für die effektiven Turbulenzintensitäten sind WEA, für die ggf. 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 1 bis 5, 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} .

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 8 farblich 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 8 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	
Auslegungswert [%] Nordex N149/5.7 /27/	25,3	21,9	20,0	18,8	17,9	17,3	16,9	16,5	
Lfd. WEA-Nr.	Ergebnisse [%] auf NH der WEA								
<u>nach</u> dem Zubau der WEA 1 bis 5									
 1 (m = 14)	27,3	24,3	22,0	19,0	16,2	14,9	14,4	14,1	
 2 (m = 14)	27,1	24,6	23,1	21,0	18,5	16,1	14,8	14,3	
 3 (m = 14)	28,5	25,4	23,5	21,2	19,0	17,3	16,2	15,5	
 4 (m = 14)	28,7	25,9	24,6	23,1	21,4	19,6	18,1	17,1	
 5 (m = 14)	27,2	24,1	22,6	21,2	19,8	18,3	17,2	16,3	

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

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 α sowie die mittlere Dichte der Luft ρ 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, wird diese auch für die Fälle ermittelt, in denen der Standort nicht als orografisch komplex anzusehen ist.

Die Ermittlung weiterer standortspezifischer Windbedingungen erfolgt für WEA, deren Standorteignung ggf. gesondert mittels standortspezifischer Lastvergleiche der Betriebsfestigkeitslasten nachgewiesen werden kann, um auf sektorielle Betriebsbeschränkungen verzichten zu können. Diese Daten sind in Kapitel 9 ausgewiesen.

4.7.1 Mittlerer Höhenexponent

Es werden die auf die jeweiligen Nabenhöhen bezogenen mittleren Höhenexponenten α für alle nachzuweisenden WEA am Standort ermittelt und in Kapitel 9 ausgewiesen. Sofern die Auslegungswerte nicht gesondert vom WEA-Hersteller angegeben sind (S-Klasse), ist der mittlere Höhenexponent α im Auslegungsfall gemäß /8/ mit 0,2 anzunehmen. Die Ermittlung der standortspezifischen mittleren Höhenexponenten α zur Beschreibung der Windscherung erfolgt auf Basis der am Standort ermittelten Rauigkeitsklassifizierung (siehe Kapitel 4.5).

4.7.2 Mittlere Luftdichte

Es wird die mittlere Luftdichte ρ auf Nabenhöhe für alle nachzuweisenden WEA am Standort ermittelt und in Kapitel 9 ausgewiesen. Sofern die Auslegungswerte nicht gesondert vom WEA-Hersteller angegeben sind (S-Klasse), ist ihr Wert im Rahmen der Auslegung mit $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ anzunehmen /8/. Die mittlere Luftdichte ρ am Standort soll sich auf Windgeschwindigkeiten oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit ($v \geq v_{\text{Nenn}}$) beziehen /8/. Für deren Ermittlung werden langjährige Messzeitreihen der Temperatur und Luftdichte der DWD-Messstationen verwendet und mit Hilfe des in der Software WASP implementierten Air Density Calculator /22/ auf den zu beurteilenden Standort übertragen. Die in Kapitel 9 ausgewiesenen, mittleren Luftdichten ergeben sich entsprechend der Höhe des Standortes ü. NN zzgl. Nabenhöhe, berechnet auf Basis der meteorologischen DWD-Messstation Lindenberg (Entfernung ca. 19,0 km, 104,0 m Höhe ü. NN., mit einer Temperatur von 8,9°C im Jahresmittel (1951 – 2014)) /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 9 ausgewiesen. Sofern die Auslegungswerte nicht gesondert vom WEA-Hersteller angegeben sind (S-Klasse), ist gemäß /8/ der Einfluss einer Schräganströmung von bis zu 8° anzunehmen. Abweichend zum Verfahren nach der DIN EN 61400-1:2011 /8/, wird für deren Ermittlung nicht die omnidirektionale angenäherte Ebene mit einem Radius von $5 \cdot \text{NH}$ zu Grunde gelegt (diese umfasst alle Sektoren zusammen, d.h. 360°), sondern diese sektoriell in zwölf 30°-Abschnitte unterteilt. 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 Alt-Madlitz (Brandenburg) plant der Auftraggeber die Errichtung von fünf WEA (WEA 1 bis 5).

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG ist am 23.05.2023 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.

Im Nachfolgenden werden für die zu bewertenden WEA die Auslegungswerte mit den standortspezifischen Windbedingungen verglichen. Bei WEA, für die noch keine gültige Typenprüfung vorliegt, gelten die Auslegungswerte als vorläufig und die Aussagen zur Standorteignung unter Vorbehalt (siehe Kapitel 3.1).

Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_{50}

Für die geplanten WEA 1 bis 5 zeigt sich im Vergleich mit der 50-Jahreswindgeschwindigkeit am Standort v_{50} auf Nabenhöhe, dass diese durch den Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.3).

Vergleich der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe v_m

Für die WEA 1 bis 5, 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 Auslegungswert der zu Grunde gelegten Typenprüfung abgedeckt wird (siehe Kapitel 4.4).

Vergleich der effektiven Turbulenzintensität auf Nabenhöhe I_{eff}

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 5 Überschreitungen (siehe Tabelle 8).

Sektorielle Betriebsbeschränkungen

Für die geplante Windparkkonfiguration (siehe Tabelle 1) wurden zusätzliche Berechnungen unter Berücksichtigung sektorieller Abschaltregelungen durchgeführt. Befinden sich geplante WEA in der Nachlaufströmung benachbarter WEA, so kann die Standorteignung der geplanten WEA bei Auftreten der entsprechenden Nachlaufsituation durch eine sektorielle Abschaltung der geplanten WEA selbst nachgewiesen werden, da die Lasten bei einer abgeschalteten WEA (Trudelbetrieb) auch in der erhöhten Turbulenz der Nachlaufströmung der benachbarten WEA geringer sind als im Betrieb bei ungestörter Anströmung. Die erforderlichen sektoriellen Betriebsbeschränkungen sind in der nachfolgenden Tabelle 9 dargestellt.

Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden sektoriellen Betriebsbeschränkungen werden zum Teil vereinfacht konservativ abdeckende Sektoren und / oder Windgeschwindigkeitsbereiche ausgewiesen.

Betriebsbeschränkte WEA	Benachbarte WEA	Sektor der Betriebsbeschränkung ($0^\circ \triangleq$ geografisch Nord)	Windgeschwindigkeitsbereich [m/s]	Art der sektoriellen Betriebsbeschränkung
Sektorielle Betriebsbeschränkungen, um an den geplanten WEA 1 bis 5 Überschreitungen der Auslegungswerte der Turbulenzintensität zu verhindern				
WEA 1	WEA 2	$140,4^\circ \pm 23,5^\circ$ ($116,9^\circ - 163,9^\circ$)	< 11,5	Abschaltung
WEA 2	WEA 1	$320,3^\circ \pm 23,5^\circ$ ($296,8^\circ - 343,8^\circ$)	< 13,5	Abschaltung
WEA 2	WEA 4	$86,7^\circ \pm 24,0^\circ$ ($62,7^\circ - 110,7^\circ$)	< 13,5	Abschaltung
WEA 3	-	$218,2^\circ \pm 56,2^\circ$ ($162,0^\circ - 274,4^\circ$)	< 14,5	Abschaltung
WEA 4	WEA 2	$266,7^\circ \pm 24,0^\circ$ ($242,7^\circ - 290,7^\circ$)	gesamt	Abschaltung
WEA 4	WEA 1	$293,9^\circ \pm 13,7^\circ$ ($280,2^\circ - 307,6^\circ$)	7,5 - 10,5	Abschaltung
WEA 5	WEA 3	$248,5^\circ \pm 18,9^\circ$ ($229,6^\circ - 267,4^\circ$)	< 17,5	Abschaltung
WEA 5	WEA 4	$220,7^\circ \pm 12,7^\circ$ ($208,0^\circ - 233,4^\circ$)	< 4,5	Abschaltung

Tabelle 9: Sektorielle Betriebsbeschränkungen

Die in Tabelle 9 dargestellten sektoriellen Betriebsbeschränkungen wurden keiner Prüfung hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit unterzogen.

Zusammenfassung

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Standorteignung der am Standort Alt-Madlitz betrachteten WEA 1 bis 5 unter Berücksichtigung der entsprechenden sektoriellen Betriebsbeschränkungen (siehe Tabelle 9) nachgewiesen ist.

Ggf. kann die Standorteignung der am Standort Alt-Madlitz betrachteten WEA 1 bis 5 gesondert mittels standortspezifischer Lastvergleiche 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 9 ausgewiesen.

6 Rechtliche Hinweise

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 der 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 die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG dem Auftraggeber an seinen urheberrechtsfähigen Leistungen jeweils ein einfaches, nicht übertragbares sowie zeitlich und räumlich auf den Vertragszweck beschränktes Nutzungsrecht ein. Weitere Rechte werden ausdrücklich nicht eingeräumt, insbesondere ist der Auftraggeber nicht berechtigt, die Leistungen des Auftragnehmers zu bearbeiten, zu verändern oder nur auszugsweise zu nutzen.

Eine Veröffentlichung der Leistungen über den Rahmen des vertraglich vereinbarten Zwecks hinaus, auch auszugsweise, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung von der TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Eine Bezugnahme auf die 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 die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG jederzeit berechtigt, dem Auftraggeber die weitere Nutzung der Leistungen zu untersagen.

7 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	[-]
C_{CT}	Turbulenzstrukturparameter	[-]
I_{eff}	Effektive Turbulenzintensität auf Nabenhöhe	[-]
I_{char}	Charakteristische Turbulenzintensität bei 15 m/s	[-]
I_{rep}	Repräsentative Turbulenzintensität bei 15 m/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]
α	Höhenexponent für das exponentielle Windprofil	[-]
$\varphi_{\text{Inkl.}}$	Inklinationswinkel der Schräganströmung	[°]
ρ	Mittlere Dichte der Luft	[kg/m ³]
σ	Standardabweichung der mittleren Windgeschwindigkeit	[m/s]
	Altgrad (Vollkreis \triangleq 360)	[°]

8 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 02.06.2022
- /22/ Risø National Laboratory, WAsP 12 (<http://www.wasp.dk>), Dänemark, 2017
- /23/ Deutscher Wetterdienst, S. Traup, B. Kruse: Wind und Windenergiepotenziale in Deutschland - Winddaten für Windenergienutzer, Version 6, Deutschland 2011
- /24/ GELSENWASSER AG; E-Mails mit beigefügten Koordinaten und Angaben zur WEA-Spezifikation (Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung) der zu berücksichtigenden WEA; 23.05.2023 und 24.05.2023
- /25/ Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH; Auszug zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit; 20.09.2017
- /26/ Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH; Dokumentation zur Besichtigung am Standort Alt-Madlitz; 31.05.2023
- /27/ Nordex Energy SE & Co. KG; Design Information for Wind & Site Assessment N149/5.7 Delta 50Hz NCV TCS164B-01 (N21) DIBt S; Hamburg; 13.08.2021

9 Zusammenfassung aller Windbedingungen

WEA 1 (Nordex N149/5.X, 5,70 MW, 164,0 m NH) / DIBt-Richtlinie 2012									
Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA									
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	33,2	28,2	25,3	23,3	21,9	20,8	20,0	19,3	18,8
m = 14	35,3	30,1	27,3	25,6	24,3	23,3	22,0	20,6	19,0
m = 10	34,7	29,2	26,3	24,4	23,1	22,0	20,8	19,4	18,0
m = 9	34,5	29,0	26,0	24,1	22,8	21,7	20,5	19,1	17,7
m = 4	33,7	28,0	24,8	22,7	21,3	20,1	18,9	17,8	16,8
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	≥20,0
Auslegungswert [%]	18,3	17,9	17,6	17,3	17,1	16,9	16,7	16,5	16,3
m = 14	17,5	16,2	15,3	14,9	14,6	14,4	14,2	14,1	13,9
m = 10	16,7	15,8	15,2	14,8	14,5	14,3	14,2	14,0	13,9
m = 9	16,6	15,7	15,1	14,7	14,5	14,3	14,1	14,0	13,9
m = 4	16,0	15,4	14,9	14,6	14,4	14,2	14,1	13,9	13,8
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C _{CT} = 1,0)									
Richtungs-sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ± 100%)	Weibullverteilung		α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	Φ _{Inkl.} [°]		
		A [m/s]	k [-]						
N	0,037	6,6	2,12	-	10,9	11,4	0,5		
NNO	0,048	6,7	2,40	-	11,1	11,6	0,6		
ONO	0,051	6,3	2,27	-	13,1	13,7	0,4		
O	0,091	7,6	2,95	-	13,2	13,8	0,1		
OSO	0,080	7,1	3,18	-	12,6	13,2	0,1		
SSO	0,058	6,4	3,04	-	14,2	14,9	0,0		
S	0,074	6,9	2,95	-	13,8	14,4	0,2		
SSW	0,108	7,4	2,81	-	14,7	15,4	0,2		
WSW	0,150	8,1	2,40	-	14,6	15,3	0,3		
W	0,148	8,0	2,37	-	13,7	14,3	0,2		
WNW	0,097	7,3	2,39	-	12,0	12,6	0,1		
NNW	0,056	5,9	2,31	-	12,0	12,6	0,4		
Gesamt (alle Sektoren)	0,998	7,3	2,48	0,30	13,8	14,4	0,2		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,47				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					35,6				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,222				

Tabelle 10: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 1

WEA 2 (Nordex N149/5.X, 5,70 MW, 164,0 m NH) / DIBt-Richtlinie 2012									
Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA									
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	33,2	28,2	25,3	23,3	21,9	20,8	20,0	19,3	18,8
m = 14	35,2	29,9	27,1	25,5	24,6	23,9	23,1	22,1	21,0
m = 10	35,0	29,4	26,4	24,7	23,6	22,9	22,1	21,1	20,0
m = 9	34,9	29,3	26,2	24,5	23,3	22,5	21,7	20,8	19,7
m = 4	34,5	28,7	25,3	23,2	21,8	20,8	19,9	19,0	18,2
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	≥20,0
Auslegungswert [%]	18,3	17,9	17,6	17,3	17,1	16,9	16,7	16,5	16,3
m = 14	19,7	18,5	17,2	16,1	15,3	14,8	14,5	14,3	14,2
m = 10	18,8	17,7	16,6	15,7	15,1	14,7	14,5	14,3	14,1
m = 9	18,6	17,5	16,4	15,6	15,1	14,7	14,5	14,3	14,1
m = 4	17,3	16,5	15,8	15,3	14,9	14,6	14,4	14,2	14,1
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C _{CT} = 1,0)									
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≙ 100%)	Weibullverteilung		α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	Φ _{Inkl.} [°]		
		A [m/s]	k [-]						
N	0,037	6,6	2,12	-	11,2	11,7	0,2		
NNO	0,048	6,7	2,40	-	11,9	12,5	0,2		
ONO	0,051	6,3	2,27	-	13,5	14,1	0,0		
O	0,091	7,6	2,95	-	12,4	13,0	0,1		
OSO	0,080	7,1	3,18	-	12,5	13,1	0,2		
SSO	0,058	6,4	3,04	-	14,1	14,8	0,4		
S	0,074	6,9	2,95	-	13,9	14,5	0,5		
SSW	0,108	7,4	2,81	-	14,1	14,8	0,5		
WSW	0,150	8,1	2,40	-	14,7	15,4	0,3		
W	0,148	8,0	2,37	-	14,1	14,8	0,2		
WNW	0,097	7,3	2,39	-	12,4	13,0	0,1		
NNW	0,056	5,9	2,31	-	12,3	12,9	0,0		
Gesamt (alle Sektoren)	0,998	7,3	2,48	0,30	14,0	14,6	0,2		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,47				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					35,6				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,222				

Tabelle 11: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 2

WEA 3 (Nordex N149/5.X, 5,70 MW, 164,0 m NH) / DIBt-Richtlinie 2012									
Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA									
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	33,2	28,2	25,3	23,3	21,9	20,8	20,0	19,3	18,8
m = 14	36,9	31,4	28,5	26,6	25,4	24,5	23,5	22,4	21,2
m = 10	36,1	30,7	27,6	25,8	24,5	23,6	22,6	21,6	20,5
m = 9	35,9	30,4	27,4	25,5	24,3	23,3	22,4	21,3	20,3
m = 4	34,6	29,0	25,8	23,9	22,6	21,6	20,8	19,9	19,1
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	≥20,0
Auslegungswert [%]	18,3	17,9	17,6	17,3	17,1	16,9	16,7	16,5	16,3
m = 14	20,0	19,0	18,0	17,3	16,7	16,2	15,8	15,5	15,2
m = 10	19,5	18,5	17,7	17,0	16,5	16,0	15,7	15,4	15,1
m = 9	19,3	18,4	17,6	17,0	16,4	16,0	15,6	15,3	15,1
m = 4	18,4	17,7	17,1	16,5	16,1	15,7	15,4	15,1	14,9
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C _{CT} = 1,0)									
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≙ 100%)	Weibullverteilung		α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	Φ _{Inkl.} [°]		
		A [m/s]	k [-]						
N	0,037	6,6	2,12	-	10,7	11,2	0,6		
NNO	0,048	6,7	2,40	-	11,8	12,4	0,3		
ONO	0,051	6,3	2,27	-	13,3	13,9	0,2		
O	0,091	7,6	2,95	-	12,9	13,5	0,3		
OSO	0,080	7,1	3,18	-	11,6	12,1	0,4		
SSO	0,058	6,4	3,04	-	13,7	14,3	0,3		
S	0,074	6,9	2,95	-	14,5	15,2	0,1		
SSW	0,108	7,4	2,81	-	14,1	14,8	0,0		
WSW	0,150	8,1	2,40	-	14,8	15,5	0,1		
W	0,148	8,0	2,37	-	13,7	14,3	0,1		
WNW	0,097	7,3	2,39	-	12,3	12,9	0,3		
NNW	0,056	5,9	2,31	-	10,9	11,4	0,6		
Gesamt (alle Sektoren)	0,998	7,3	2,48	0,30	13,9	14,5	0,2		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,47				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					35,6				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,222				

Tabelle 12: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 3

WEA 4 (Nordex N149/5.X, 5,70 MW, 164,0 m NH) / DIBt-Richtlinie 2012									
Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA									
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	33,2	28,2	25,3	23,3	21,9	20,8	20,0	19,3	18,8
m = 14	37,1	31,6	28,7	27,0	25,9	25,3	24,6	23,9	23,1
m = 10	36,3	30,7	27,7	25,9	24,8	24,2	23,6	22,9	22,3
m = 9	36,1	30,5	27,4	25,6	24,5	23,8	23,3	22,6	22,0
m = 4	35,1	29,2	25,8	23,8	22,5	21,7	21,1	20,7	20,3
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	≥20,0
Auslegungswert [%]	18,3	17,9	17,6	17,3	17,1	16,9	16,7	16,5	16,3
m = 14	22,2	21,4	20,4	19,6	18,8	18,1	17,6	17,1	16,7
m = 10	21,5	20,8	20,0	19,2	18,5	17,9	17,4	16,9	16,6
m = 9	21,3	20,6	19,9	19,1	18,4	17,8	17,3	16,9	16,5
m = 4	19,9	19,5	19,0	18,4	17,9	17,4	17,0	16,6	16,3
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C _{CT} = 1,0)									
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≙ 100%)	Weibullverteilung		α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	Φ _{Inkl.} [°]		
		A [m/s]	k [-]						
N	0,037	6,6	2,12	-	11,1	11,6	0,3		
NNO	0,048	6,7	2,40	-	12,8	13,4	0,1		
ONO	0,051	6,3	2,27	-	13,3	13,9	0,2		
O	0,091	7,6	2,95	-	12,0	12,6	0,5		
OSO	0,080	7,1	3,18	-	12,1	12,7	0,6		
SSO	0,058	6,4	3,04	-	13,7	14,3	0,6		
S	0,074	6,9	2,95	-	14,5	15,2	0,4		
SSW	0,108	7,4	2,81	-	13,7	14,3	0,3		
WSW	0,150	8,1	2,40	-	14,8	15,5	0,1		
W	0,148	8,0	2,37	-	14,3	15,0	0,0		
WNW	0,097	7,3	2,39	-	12,7	13,3	0,1		
NNW	0,056	5,9	2,31	-	11,9	12,5	0,2		
Gesamt (alle Sektoren)	0,998	7,3	2,48	0,30	14,1	14,8	0,2		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,47				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					35,6				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,222				

Tabelle 13: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 4

WEA 5 (Nordex N149/5.X, 5,70 MW, 164,0 m NH) / DIBt-Richtlinie 2012									
Effektive Turbulenzintensitäten [%] auf NH der WEA									
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Auslegungswert [%]	33,2	28,2	25,3	23,3	21,9	20,8	20,0	19,3	18,8
m = 14	36,2	30,5	27,2	25,3	24,1	23,3	22,6	21,9	21,2
m = 10	35,4	29,6	26,4	24,4	23,2	22,4	21,8	21,2	20,6
m = 9	35,1	29,3	26,1	24,1	22,9	22,2	21,5	20,9	20,4
m = 4	33,7	27,9	24,5	22,5	21,2	20,4	19,9	19,4	19,1
Windgeschwindigkeit [m/s]	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	≥20,0
Auslegungswert [%]	18,3	17,9	17,6	17,3	17,1	16,9	16,7	16,5	16,3
m = 14	20,5	19,8	19,0	18,3	17,7	17,2	16,7	16,3	16,0
m = 10	19,9	19,3	18,7	18,1	17,5	17,0	16,5	16,2	15,9
m = 9	19,8	19,2	18,6	18,0	17,4	16,9	16,5	16,1	15,8
m = 4	18,7	18,4	17,9	17,5	17,0	16,6	16,2	15,9	15,6
Sektorielle Windbedingungen (Standort ist nicht komplex: C _{CT} = 1,0)									
Richtungs- sektoren	Relative Häufigkeit [-] (1 ≙ 100%)	Weibullverteilung		α [-]	I _{char} [%]	I _{rep} [%]	Φ _{Inkl.} [°]		
		A [m/s]	k [-]						
N	0,037	6,6	2,12	-	10,8	11,3	0,6		
NNO	0,048	6,7	2,40	-	13,1	13,7	0,2		
ONO	0,051	6,3	2,27	-	13,0	13,6	0,0		
O	0,091	7,6	2,95	-	12,8	13,4	0,3		
OSO	0,080	7,1	3,18	-	11,4	11,9	0,3		
SSO	0,058	6,4	3,04	-	13,1	13,7	0,5		
S	0,074	6,9	2,95	-	14,4	15,1	0,2		
SSW	0,108	7,4	2,81	-	14,1	14,8	0,2		
WSW	0,150	8,1	2,40	-	14,9	15,6	0,3		
W	0,148	8,0	2,37	-	13,5	14,1	0,5		
WNW	0,097	7,3	2,39	-	11,6	12,1	0,8		
NNW	0,056	5,9	2,31	-	10,8	11,3	0,9		
Gesamt (alle Sektoren)	0,998	7,3	2,48	0,30	13,8	14,4	0,4		
mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v _m [m/s]					6,47				
50-Jahreswindgeschwindigkeit auf NH v ₅₀ [m/s]					35,6				
mittlere Dichte der Luft ρ auf NH für v ≥ v _{Nenn} [kg/m ³]					1,223				

Tabelle 14: Zusammenfassung der benötigten Windbedingungen für die WEA 5