



Gutachten zur Standorteignung von Windenergieanlagen  
nach DIBt 2012 für den Windpark Fürstenberg

Deutschland

Bericht-Nr.: I17-SE-2023-431



Gutachten zur Standorteignung von WEA nach DIBt 2012 für den  
Windpark Fürstenberg

Bericht-Nr.: I17-SE-2023-431

Auftraggeber: Lackmann Flocke GbR  
Renker Weg 1  
D-33175 Bad Lippspringe

Auftragnehmer: I17-Wind GmbH & Co. KG  
Robert-Koch-Straße 29  
D-25813 Husum  
Tel.: 04841 – 87596 – 0  
E-Mail: [mail@i17-wind.de](mailto:mail@i17-wind.de)  
Internet: [www.i17-wind.de](http://www.i17-wind.de)

Datum: 10. Oktober 2023

## Haftungsausschluss und Urheberrecht

Das vorliegende Gutachten wurde unabhängig, unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen nach derzeitigem Stand der Technik erstellt. Für vom Auftraggeber und vom Anlagenhersteller bereitgestellte Daten, die nicht von der I17-Wind GmbH & Co. KG erhoben oder ermittelt wurden, kann keine Gewähr für deren Korrektheit übernommen werden. Diese werden als richtig vorausgesetzt.

Urheber des vorliegenden Gutachtens zur Standorteignung von WEA nach DIBt 2012 ist die I17-Wind GmbH & Co. KG. Der Auftraggeber erhält nach § 31 Urheberrechtsgesetz das einfache Nutzungsrecht, welches nur durch Zustimmung des Urhebers übertragen werden kann. Eine Bereitstellung zum uneingeschränkten Download in elektronischen Medien ist ohne gesonderte Zustimmung des Urhebers nicht gestattet.

## Akkreditierung

Die I17-Wind GmbH & Co. KG ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 durch die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAKKS) für die Bereiche „Erstellen von Schallimmissionsprognosen für Windenergieanlagen; Erstellen von Schattenwurfimmissionsprognosen für Windenergieanlagen; Prüfung der Standorteignung von Windenergieanlagen mittels Berechnung (Turbulenzgutachten)“ akkreditiert. Die Registriernummer der Urkunde lautet D-PL-21268-01-00. Diese kann angefragt, oder in der Datenbank der akkreditierten Stellen der DAKKS eingesehen werden.

Die I17-Wind GmbH & Co. KG ist Mitglied im Sachverständigenbeirat des Bundesverbandes WindEnergie (BWE) e.V.

## Anmerkung zu Typenprüfung und Anlagenparametern der WEA

Wenn zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung die Typenprüfung oder Einzelprüfung für die geplanten WEA noch nicht vorlag, wurde der Vergleich auf Basis vom Hersteller übermittelter Auslegungswerte der geplanten WEA durchgeführt. Es besteht die Möglichkeit, dass die im Genehmigungsverfahren eingereichten Dokumente bezüglich der Auslegungswerte der betrachteten WEA nicht mit den im vorliegenden Gutachten zitierten Dokumenten übereinstimmen. Die zitierten Dokumente entsprechen dem aktuellen Stand zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung. Bei abweichenden Dokumenten behält das vorliegende Gutachten dennoch seine Gültigkeit, wenn die im Gutachten berücksichtigten Auslegungswerte durch die im Rahmen des Genehmigungsverfahrens eingereichten Auslegungswerte abgedeckt sind. Im Folgenden ist der Begriff Einzelprüfung stets durch den Begriff Typenprüfung mit abgedeckt, auch wenn dies nicht explizit erwähnt wird.

Änderungen der berücksichtigten Anlagenparameter wie  $c_t$ -Kurve und Schnelllaufzahl  $\lambda$  sind dem Anlagenhersteller vorbehalten und bedürfen einer neuen Berechnung und Bewertung. Bei einer Änderung der Anlagenparameter gegenüber dem Stand zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung verliert das vorliegende Gutachten seine Gültigkeit.

---

Revisionsnummer	Datum	Änderung	Verfasser
0	10.10.2023	Erste Ausgabe	Pauls

---

**Verfasser:**

B. Eng. Heiko Pauls, Sachverständiger

Husum, 10.10.2023



**Gepüft:**

Dipl.-Ing. (FH) Christian Kebbel, Sachverständiger

Husum, 11.10.2023



**Freigegeben:**

M. Sc. Lisa Fiebelkorn

Husum, 11.10.2023



---

Dieses Dokument wurde digital signiert und die Integrität des Dokuments wurde überprüft. Das zugehörige Zertifikat kann von der I17-Wind GmbH & Co. KG auf Anfrage gerne zur Verfügung gestellt werden.

## Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung.....	7
1.1	Allgemeines .....	7
1.2	Geführte Nachweise.....	7
1.2.1	Nachweis der Standorteignung an topografisch nicht komplexen Standorten durch Vergleich der Windbedingungen.....	8
1.2.2	Nachweis der Standorteignung an topografisch komplexen Standorten durch Vergleich der Windbedingungen.....	8
1.2.3	Verfahren bei Überschreitungen – Nachweis durch Vergleich der Lasten .....	9
1.3	Hinweise zu den zu Grunde gelegten Richtlinien.....	10
1.4	Qualität der zu Grunde gelegten Daten und Modelle.....	12
2	Aufgabenstellung und Standort .....	13
2.1	Umfang des Gutachtens .....	13
2.2	Standortbeschreibung.....	13
2.3	Auslegungswindbedingungen der geplanten WEA .....	13
3	Vergleich der Windbedingungen.....	18
3.1	Grundlagen.....	18
3.2	Vergleich $v_{ave}$ und $v_{m50}$ .....	19
3.2.1	Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeit $v_{ave}$ .....	19
3.2.2	Vergleich der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit $v_{m50}$ .....	19
3.3	Vergleich der effektiven Turbulenzintensität $I_{eff}$ .....	20
3.3.1	Auslegungswindbedingungen hinsichtlich der Turbulenzintensität .....	20
3.3.2	Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität .....	22
3.3.3	Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität $I_{eff}$ .....	24
3.4	Schräganströmung $\delta$ .....	31
3.5	Höhenexponent $\alpha$ .....	31
3.6	Luftdichte $\rho$ .....	32
3.7	Extreme Turbulenzintensität $I_{ext}$ .....	33
4	Zusammenfassung.....	34
4.1	Neu geplante WEA .....	34
4.2	Bestehende WEA.....	35
4.2.1	Nachweis der Standorteignung durch den Vergleich mit den Auslegungswerten .....	35
4.2.2	Zusammenfassung.....	36
5	Standortbesichtigung .....	37
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	38
	Literaturverzeichnis.....	40

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration (Übersicht); Kartenmaterial: [19.1, 19.2]. 16

Abbildung 2.2: Zu untersuchende Windparkkonfiguration (Detail); Kartenmaterial: [19.1, 19.2] ..... 17

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration ..... 14

Tabelle 2.2: Auslegungswindbedingungen der neu geplanten WEA ..... 15

Tabelle 3.1: Windverhältnisse am Standort WV 1/1 [22.1] ..... 18

Tabelle 3.2: Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$  auf Nabenhöhe der geplanten WEA.. 19

Tabelle 3.3: Vergleich der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit  $v_{m50}$  auf Nabenhöhe der geplanten WEA 20

Tabelle 3.4: Richtlinienabhängige Auslegungswindbedingungen hinsichtlich der Turbulenzintensität 21

Tabelle 3.5: Komplexitätskriterien und  $C_{CT}$  nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6]..... 23

Tabelle 3.6: Repräsentative Turbulenzintensität für einen Standort..... 24

Tabelle 3.7: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten  $I_{eff}$  (vor Zubau) ..... 27

Tabelle 3.8: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten  $I_{eff}$  (nach Zubau – Teil 1) ..... 28

Tabelle 3.9: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten  $I_{eff}$  (nach Zubau – Teil 2) ..... 29

Tabelle 3.10: Geforderte Betriebsbeschränkungen zum Schutz von W15 ..... 30

Tabelle 3.11: Geforderte Betriebsbeschränkungen zum Schutz von W16 ..... 30

Tabelle 3.12: Geforderte Betriebsbeschränkungen zum Schutz von W69 ..... 30

Tabelle 3.13 Standortmittelwert der Schräganströmung  $\delta_{NH}$  der neu geplanten WEA..... 31

Tabelle 3.14 Standortmittelwert des Höhenexponenten  $\alpha_{NH}$  der neu geplanten WEA..... 31

Tabelle 3.15: Standortmittelwert der Luftdichte  $\rho_{NH}$  der neu geplanten WEA..... 32

Tabelle 3.16: Ermittelte extreme Turbulenzintensitäten  $I_{ext, NH}$  ..... 33

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse geplante WEA..... 34

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Ergebnisse Bestands-WEA..... 36

# 1 Vorbemerkung

## 1.1 Allgemeines

Das Deutsche Institut für Bautechnik DIBt hat Anfang des Jahres 2013 die Fassung Oktober 2012 der „Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“ veröffentlicht und im März 2015 eine korrigierte Fassung herausgegeben [1.1], auf deren Grundlage das vorliegende Gutachten erstellt wurde.

Aufgrund fehlender Kriterien für einen Immissionsgrenzwert für die durch benachbarte Windenergieanlagen verursachten erhöhten Turbulenzbelastungen an einer WEA, können ersatzweise die Kriterien der Standorteignung bezüglich der effektiven Turbulenzintensität für eine Turbulenzimmissionsprognose im Rahmen eines Antrages nach dem Bundes-Immissionsschutz-Gesetz (BImSchG) herangezogen werden. Eine Reduktion der Lebenszeit und der zusätzliche Verschleiß der WEA sind zumutbar, solange die Standorteignung hinsichtlich der Auslegungswerte der Turbulenzintensität oder hinsichtlich der Auslegungslasten gewährleistet bleibt. Somit stellt das vorliegende Gutachten zur Standorteignung von WEA zusätzlich eine Turbulenzimmissionsprognose im Sinne des BImSchG dar und kann als Bestandteil der Antragsstellung nach dem BImSchG verwendet werden.

## 1.2 Geführte Nachweise

Die Richtlinie DIBt 2012 [1.1] fordert in Kapitel 16 ein alternatives, vereinfachtes Verfahren zum Nachweis der Standorteignung von WEA, das jedoch nur angewendet werden darf, wenn die Standorte der geplanten WEA nach DIN EN 61400-1:2011-08 [7] als nicht topografisch komplexe Standorte zu bezeichnen sind. Im Dezember 2019 wurde die Norm DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] veröffentlicht, welche die Norm DIN EN 61400-1:2011-08 [7] ersetzt. Entsprechend der Richtlinie DIBt 2012 [1.1] ist die jeweils angewendete Ausgabe der Norm DIN EN (IEC) 61400-1, entsprechend [6] oder [7], in Ihrer Gesamtheit anzuwenden, weshalb auch die Ermittlung der topografischen Komplexität im vorliegenden Gutachten nach [6] erfolgt. Sind vereinzelte Standorte neu geplanter WEA als topografisch komplex zu bezeichnen, wird der vereinfachte Nachweis der Standorteignung nach [1.1] um die Kriterien nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6], Abschnitt 11.9, erweitert. Die Vergleiche der Auslegungswerte für die zu untersuchenden Größen mit den im Rahmen dieses Gutachtens ermittelten Werten sind nach der DIBt Richtlinie Fassung Oktober 2012 nur für neu geplante Anlagen zu führen [1.1]. Für bestehende Anlagen, die nach der DIBt 1993 [3] oder DIBt 2004 [2] typengeprüft wurden, darf im Falle einer Parkänderung / -erweiterung der Nachweis der Standorteignung auch weiterhin nach dem Verfahren der DIBt 2004 erbracht werden [1.1].

Die Richtlinie DIBt 2012 [1.1] lässt folgende Möglichkeiten, bzw. mögliche auftretende Konfigurationen, in Bezug auf die Typenprüfung und die dieser zu Grunde gelegten Richtlinie, unberücksichtigt:

- i. Der geplanten Anlage liegt eine Typenprüfung nach der Richtlinie DIBt 2004 [2] zu Grunde.
- ii. Einer oder mehrerer zu berücksichtigender Bestandsanlagen liegt eine Typenprüfung nach der DIBt 2012 [1.1] Richtlinie zu Grunde.

Für diese zwei beschriebenen Fälle, die nicht durch die DIBt 2012 [1.1] abgedeckt sind, werden folgende Verfahrensweisen gemäß [1.2] als Quasistandard angewandt:

- i. Liegt einer neu geplanten Anlage eine Typenprüfung gemäß DIBt 2004 [2] zu Grunde, wird der Nachweis der Standorteignung basierend auf dem vereinfachten Verfahren nach DIBt 2012 [1.1], beschrieben in Abschnitt 1.2.1, geführt. Dieser Nachweis entspricht den Mindestanforderungen der zum Nachweis der Standorteignung der Typenprüfung nach DIBt 2004 [2] zu Grunde gelegten Richtlinie DIN EN 61400-1:2004 [8], bzw. IEC 61400-1 ed.2 [4].
- ii. Da davon auszugehen ist, dass für bereits genehmigte, bzw. bestehende Anlagen mit einer Typenprüfung nach DIBt 2012 [1.1] die Standorteignung in deren Genehmigungsverfahren

nachgewiesen wurde, werden nur durch hinzukommende Anlagen beeinflusste Parameter geprüft und mit den Auslegungswerten verglichen. Dies entspricht lediglich der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$ , welche durch einen Zubau erhöht werden kann.

Nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [9] ist bei zylindrischen Bauwerken die Untersuchung von Interferenzeffekten oder wirbelerregten Schwingungen zu führen, wenn deren Abstand untereinander den in [9] definierten Mindestabstand unterschreitet. Diese Untersuchung ist nicht Bestandteil der Richtlinie DIBt 2012 [1.1] und wird daher im vorliegenden Gutachten nicht durchgeführt, sondern hat durch einen dritten unabhängigen Gutachter oder Prüfstatiker zu erfolgen.

### **1.2.1 Nachweis der Standorteignung an topografisch nicht komplexen Standorten durch Vergleich der Windbedingungen**

Der nach der DIBt Richtlinie Fassung 2012 [1.1] vereinfachte Nachweis zur Standorteignung verlangt folgende Nachweise der Windbedingungen auf Nabenhöhe der geplanten WEA:

- i. Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeit.
  - (1) Die mittlere Windgeschwindigkeit am Standort ist um mindestens 5 % kleiner als gemäß Typen-/Einzelprüfung, oder
  - (2) die mittlere Windgeschwindigkeit ist kleiner als gemäß Typen-/Einzelprüfung und für den Formparameter  $k$  der Weibull-Funktion gilt:  $k \geq 2$ .
- ii. Vergleich der effektiven Turbulenzintensität nach DIN EN 61400-1:2011-08 [7] zwischen  $0.2 v_{m50}(h)$  und  $0.4 v_{m50}(h)$  mit der Auslegungsturbulenz nach NTM.
- iii. Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit.
  - (1) Die Windzone gemäß Typen-/Einzelprüfung deckt die Windzone des betrachteten Standortes entsprechend der Windzonenkarte ab (die detaillierten Regelungen gemäß DIN EN 1991-1-4, Absatz 4.3.3 einschließlich NA [9] für nicht ebene Geländelagen sind ggf. zu beachten), oder
  - (2) die 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{m50}(h)$  gemäß Typen-/Einzelprüfung deckt die 50-Jahreswindgeschwindigkeit am Standort ab (z.B. Nachweis durch eine Extremwindabschätzung).

### **1.2.2 Nachweis der Standorteignung an topografisch komplexen Standorten durch Vergleich der Windbedingungen**

Handelt es sich nach Abschnitt 11.2 der DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] um einen als topografisch komplex zu bezeichnenden Standort der Kategorie L, M oder H und liegt der zu untersuchenden WEA eine Typenprüfung nach DIBt 2012 [1.1] zu Grunde, wird der vereinfachte Nachweis zur Standorteignung nach Abschnitt 1.2.1 um folgende Nachweise der Windbedingungen auf Nabenhöhe der geplanten WEA, basierend auf DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] erweitert.

- i. Der windenergiegewichtete Mittelwert aller Richtungen der Schräganströmung  $\delta$  darf den vorgegebenen Wert von  $\pm 8^\circ$ , bzw. den in der Typenprüfung angegebenen Wert, nicht überschreiten bzw. unterschreiten.
- ii. Der über alle Richtungen und Windgeschwindigkeiten energiegewichtete Standortmittelwert des Höhenexponenten  $\alpha$  darf den Wert von  $0.05 \leq \alpha \leq 0.25$ , bzw. den in der Typenprüfung angegebenen Wert nicht überschreiten bzw. unterschreiten.
- iii. Der Standortmittelwert der Luftdichte  $\rho$  darf bei allen Windgeschwindigkeiten größer gleich der Nennwindgeschwindigkeit  $v_r$  den Wert  $1.225 \text{ kg/m}^3$  oder den in der Typenprüfung angegebenen Wert nicht überschreiten. Alternativ kann eine Luftdichte über dem Wert von  $1.225 \text{ kg/m}^3$  oder dem in der Typenprüfung angegebenen Wert durch Einhaltung der folgenden Ungleichung nachgewiesen werden:

$$\rho_{\text{Auslegung}} * v_{\text{ave,Auslegung}}^2 \geq \rho_{\text{Standort}} * v_{\text{ave,Standort}}^2$$

- iv. Es ist der Nachweis zu erbringen, dass die Auslegungswerte des ETM auch unter Berücksichtigung der Nachlaufsituation mit der höchsten Nachlaufturbulenz im Zentrum des Nachlaufs, nicht überschritten werden.

### 1.2.3 Verfahren bei Überschreitungen – Nachweis durch Vergleich der Lasten

Kann der vereinfachte Nachweis der Windbedingungen nach DIBt 2012 [1.1] aus Abschnitt 1.2.1 nicht geführt werden, da die zu prüfenden Parameter mittlere Windgeschwindigkeit  $v_{\text{ave}}$  oder effektive Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  nicht eingehalten werden, kann die Standorteignung durch einen Lastvergleich (Vergleich der standortspezifischen Lasten mit den Lastannahmen der Typenprüfung) der Betriebsfestigkeitslasten nachgewiesen werden. In diesem Fall ist der Nachweis der Standorteignung der jeweiligen WEA auf Basis eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten (DLC 1.2) zu führen. Wird der Auslegungswert  $v_{m50}$  nicht eingehalten, kann die Standorteignung auf Basis eines Lastvergleiches der Extremlasten nachgewiesen werden. In diesem Fall ist der Nachweis der Standorteignung der jeweiligen WEA auf Basis eines Lastvergleiches der Extremlasten (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 6.1, und DLC 6.2) zu führen.

Kann der Nachweis der Windbedingungen an einem als topografisch komplex zu bezeichnenden Standort nach Abschnitt 1.2.1 und Abschnitt 1.2.2 nicht geführt werden, da einer oder mehrere der zu prüfenden Werte nicht eingehalten werden, kann die Standorteignung entsprechend DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] auf Basis eines Lastvergleiches unter Berücksichtigung der standortspezifischen Windbedingungen aus Abschnitt 1.2.1 und Abschnitt 1.2.2 durchgeführt werden. Demnach ist der Nachweis der Standorteignung der jeweiligen WEA auf Basis eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten (DLC 1.2) und/oder der Extremlasten (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 6.1, und DLC 6.2) zu führen.

In beiden Fällen werden die der Typenprüfung zu Grunde gelegten Auslegungslasten mit den standortspezifischen Lasten, die auf Basis der standortspezifischen Windbedingungen aus dem vorliegenden Gutachten ermittelt werden, verglichen. Wenn sich zeigt, dass die standortspezifischen Lasten die Auslegungslasten nicht überschreiten oder diese einhalten, ist eine Standorteignung durch den Vergleich der Lasten nachgewiesen. Werden die Auslegungslasten nicht eingehalten, muss die Anlage gegebenenfalls mit einer sektoriellen Betriebseinschränkung betrieben werden, um die Lasten soweit zu reduzieren, dass sie innerhalb der Auslegungslasten liegen, oder die Standorteignung kann nicht durch einen Vergleich der Lasten nachgewiesen werden.

Die Berechnung der standortspezifischen Lasten erfolgt in der Regel durch den Hersteller der betrachteten WEA. Der zugehörige Bericht zur durchgeführten Lastberechnung wird der I17-Wind GmbH & Co. KG im Rahmen einer Geheimhaltungsvereinbarung vorgelegt. Zudem ist es möglich die Betriebsfestigkeits- und Extremlasten einer WEA basierend auf einem generischen Anlagenmodell zu ermitteln und mit den Auslegungslasten, welche mittels des identischen generischen Anlagenmodells ermittelt werden, zu vergleichen. Diese Berechnungen erfolgen in der Regel nicht durch den Anlagenhersteller, sondern durch einen dritten unabhängigen Gutachter. Die Berichte werden von der I17-Wind GmbH & Co. KG dahingehend überprüft, dass die Eingangsdaten korrekt übernommen und angesetzt wurden. Das Ergebnis einer Lastberechnung wird als richtig vorausgesetzt. Eine Haftung für die Richtigkeit einer Lastrechnung, sowohl eines Anlagenherstellers als auch eines dritten, unabhängigen Gutachters, wird nicht übernommen.

### 1.3 Hinweise zu den zu Grunde gelegten Richtlinien

Folgende, von der DIBt 2012 Richtlinie [1.1] und der DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] abweichende, jedoch konservativ abdeckende, Verfahren wurden für das vorliegende Gutachten zur Standorteignung von WEA gewählt:

- I. Entsprechend der DIBt 2012 [1.1] ist es für eine Prüfung der Standorteignung Voraussetzung, dass für die WEA eine Typenprüfung bzw. eine Einzelprüfung vorliegt. Ist dies nicht der Fall, wird der Vergleich auf Basis von vorläufigen Auslegungswerten, für die die Typenprüfung voraussichtlich angestrebt wird, durchgeführt. Somit behält das vorliegende Gutachten im Falle einer Typenprüfung bzw. Einzelprüfung, welche die zu Grunde gelegten Auslegungsparameter abdeckt, seine Gültigkeit.
- II. Es wird davon ausgegangen, dass jede im Gutachten betrachtete WEA die Ihrer Typenprüfung zu Grunde gelegte Auslegungslebensdauer  $\tau_{TP}$  noch nicht überschritten hat.
- III. Der Vergleich des Standortwertes der mittleren Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_{ave}$  mit dem Auslegungswert kann nur nach [1.1] erfolgen, wenn die Auslegungswerte der zu betrachtenden WEA einen Formparameter  $k$  der Weibullverteilung von  $k = 2.0$  ausweisen. Wenn die Auslegungswerte der zu betrachtenden WEA einen Formparameter  $k \neq 2.0$  ausweisen, kann der in [1.1] geforderte Vergleich nicht mehr erfolgen. In diesem Fall wird das Verfahren nach [6] gewählt, welches einen Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $pdf_{NH}$  der standortspezifischen Windgeschwindigkeiten mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $pdf_{TP}$  der Typenprüfung in einem Bereich von  $v_{ave} - 2v_{ave}$  fordert. Zusätzlich wird der Bereich von  $0.2v_{ref} - 0.4v_{ref}$  nach [7] herangezogen und stets der konservativ abdeckende Bereich dem Vergleich zu Grunde gelegt. In dem zu untersuchenden Bereich muss die Bedingung  $pdf_{NH} \leq pdf_{TP}$  erfüllt sein. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $pdf_{NH}$  und  $pdf_{TP}$  erfolgt entsprechend [6] auf Basis der Standortmittelwerte  $A_{NH}$  und  $k_{NH}$  bzw. der Auslegungswerte  $A_{TP}$  und  $k_{TP}$  der zu untersuchenden WEA.

Kann der Vergleich des Standortwertes der mittleren Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe  $v_{ave}$  mit dem Auslegungswert nach DIBt Richtlinie Fassung 2012 [1.1] nicht erbracht werden, wird sich zur Definition von sektoriellen Betriebsbeschränkungen vorbehalten den Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der standortspezifischen Windgeschwindigkeiten  $pdf_{NH}$  nach [6] durchzuführen, da dieses Verfahren das in [1.1] geforderte Verfahren konservativ mit abdeckt.

- IV. Erfolgt der Nachweis der Standorteignung durch den Vergleich der Windbedingungen nach Abschnitt 1.2.1 und 1.2.2, hat der Vergleich der standortspezifischen effektiven Turbulenzintensität und der Auslegungsturbulenz nach NTM in dem Bereich zwischen  $0.2v_{m50}(h)$  und  $0.4v_{m50}(h)$  zu erfolgen [1.1]. Liegt einer zu betrachtenden WEA keine Auslegungsturbulenz nach NTM vor, erfolgt der Vergleich mit der in der Typenprüfung aufgeführten Auslegungsturbulenz. Entsprechend [6] hat der Vergleich in dem Bereich zwischen  $v_{ave}$  und  $2v_{ave}$  zu erfolgen. Erfolgt der Nachweis der Standorteignung durch den Vergleich der Lasten nach Abschnitt 1.2.3, sind der Lastberechnung nach [1.1] mindestens die standortspezifischen effektiven Turbulenzintensitäten von  $v_{in}$  bis  $0.4v_{m50}(h)$  bzw. von  $v_{in}$  bis  $v_{out}$  entsprechend DLC 1.2 nach [6] zu Grunde zu legen. Im vorliegenden Gutachten werden die standortspezifischen effektiven Turbulenzintensitäten mindestens im Windgeschwindigkeitsbereich von 5 m/s bis 25 m/s (bzw.  $v_{out}$  wenn  $v_{out} < 25$  m/s) ausgewiesen, was die oben beschriebenen Anforderungen für den Nachweis der Standorteignung durch den Vergleich der Windbedingungen nach [1.1], [6] und auch [7] abdeckt. Erfolgt der Nachweis der Standorteignung durch den Vergleich der Lasten, werden dem Anlagenhersteller grundsätzlich die standortspezifischen effektiven Turbulenzintensitäten in dem Bereich von  $v_{in}$  bis  $v_{out}$  zur Verfügung gestellt. Liegt einer zu prüfenden WEA eine Typenprüfung nach [2] zu Grunde,

erfolgt der Vergleich mit der Turbulenzkurve für Turbulenzkategorie A nach [1.1], da dieser Verlauf den nach [2] anzusetzenden mit abdeckt.

- V. Bezüglich der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  werden grundsätzlich alle Anlagen im Umkreis des 10fachen Rotordurchmessers  $D$  der geplanten Anlage(n) in die Betrachtung einbezogen und nachgewiesen. Dieses Kriterium deckt alle Kriterien nach [1.1], [6] und [7] ab.
- VI. Der standortspezifische Mittelwert der Luftdichte  $\rho$  wird abdeckend für alle Windgeschwindigkeiten angegeben.
- VII. Hinsichtlich der Auslegungswindbedingungen des ETM werden die Werte der höchsten Turbulenz im Zentrum des Nachlaufs ausgewiesen. Da eine Überschreitung der Auslegungswindbedingungen bezüglich des ETM in der Regel mit einer Überschreitung der effektiven Turbulenzintensität einhergeht, kann davon ausgegangen werden, dass eine Überschreitung der extremen Turbulenzintensität nur in solchen Fällen eintritt, in denen die Standorteignung durch eine Lastrechnung des Herstellers nachgewiesen werden muss, was dann auf Basis der ausgewiesenen Werte für die Extremturbulenz erfolgt. Aus diesem Grund wird der Vergleich der Auslegungswindbedingungen des ETM mit den Standortbedingungen nicht geführt.
- VIII. Auf Grund der verwendeten Berechnungsprogramme und deren Zahlenausgabeformat, werden die im vorliegenden Gutachten ausgewiesenen Ergebnisse in der Regel mit dem Dezimaltrennzeichen „Punkt“ versehen.
- IX. Auf Grund der unterschiedlichen Begrifflichkeiten und Bezeichnungen identischer Größen in den zu Grunde gelegten Richtlinien und Normen, werden im vorliegenden Gutachten teilweise Begriffe und Bezeichnungen gewählt bzw. eingeführt, die, soweit möglich, eine Ähnlichkeit zu den jeweiligen Begriffen und Bezeichnungen in den Richtlinien und Normen aufweisen, um sie diesen zuordnen zu können. Die korrekte Umsetzung der in den Richtlinien und Normen geforderten Vergleiche bleibt davon unberührt.

## 1.4 Qualität der zu Grunde gelegten Daten und Modelle

Alle im Rahmen des vorliegenden Gutachtens ermittelten Ergebnisse und Zwischenergebnisse basieren einerseits auf Angaben, die vom Auftraggeber übermittelt wurden und andererseits auf Berechnungsergebnissen, die durch die I17-Wind GmbH & Co. KG ermittelt wurden. Zu den Unsicherheiten der den Eingangsdaten vom Auftraggeber zu Grunde gelegten Berechnungsmodellen kann seitens der I17-Wind GmbH & Co. KG keine Aussage getroffen werden. Diese Eingangsdaten werden im Weiteren als richtig und repräsentativ für den betrachteten Standort vorausgesetzt.

Die in den Berechnungen herangezogenen Anlagenparameter, Schubbeiwert  $c_t$  und Schnelllaufzahl  $\lambda$ , werden in der Regel vom Anlagenhersteller bereitgestellt. Diese Werte werden als richtig vorausgesetzt. Die berücksichtigten Werte entsprechen dem Stand zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung. Änderungen sind dem Anlagenhersteller vorbehalten und bedürfen einer neuen Berechnung und Bewertung. Bei Anlagen, für die keine Informationen vorliegen, werden konservativ abdeckende, generische Anlagenparameter angesetzt, wobei keine Haftung für die Richtigkeit der ermittelten Werte übernommen wird.

Die im vorliegenden Gutachten angegebenen Nabhöhen der geplanten WEA entsprechen stets der aktuell vorliegenden Dokumentation. In der Entwicklungsphase einer WEA sind geringfügige Änderungen der Nabhöhe ohne eine Änderung der zu Grunde gelegten Auslegungswindbedingungen möglich, sodass die im vorliegenden Gutachten betrachtete Nabhöhe von der in den Antragsunterlagen ausgewiesenen Nabhöhe geringfügig abweichen kann. Das Gleiche gilt für die in den Genehmigungen dokumentierten Nabhöhen bestehender WEA, die ebenfalls geringfügig von aktuellen Werten abweichen können. Bei einer Abweichung der Nabhöhe von maximal  $\pm 1$  m behält das vorliegende Gutachten seine vollumfängliche Gültigkeit, wenn die im Gutachten berücksichtigten Auslegungswindbedingungen, durch die im Rahmen des Genehmigungsverfahrens eingereichten Auslegungswindbedingungen, abgedeckt sind.

Den von der I17-Wind GmbH & Co. KG ermittelten Ergebnissen liegen unterschiedliche, vereinfachte physikalische Modelle zu Grunde, die nur annähernd die Realität abbilden, jedoch als konservativ zu bewerten sind. Des Weiteren werden bei den Berechnungen teilweise vereinfachende Annahmen getroffen, die jedoch allesamt ebenfalls als konservativ zu bewerten sind.

## 2 Aufgabenstellung und Standort

### 2.1 Umfang des Gutachtens

Da im geplanten Windpark kein Anlagenstandort einer nach DIBt 2012 typengeprüften neu geplanten Anlage nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] als topografisch komplexer Standort zu bezeichnen ist, findet für alle WEA das vereinfachte Verfahren nach Abschnitt 1.2.1 Anwendung.

### 2.2 Standortbeschreibung

Der Auftraggeber plant die Errichtung von fünf WEA des Typs Vestas V172-7.2 MW auf 175.0 m Nabenhöhe am Standort Fürstenberg in Nordrhein-Westfalen.

Die I17-Wind GmbH & Co. KG wurde damit beauftragt, ein Gutachten zur Standorteignung von WEA nach der DIBt 2012 Richtlinie [1.1] unter Berücksichtigung der in Tabelle 2.1 aufgeführten [21] und in Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 dargestellten WEA zu erstellen. Tabelle 2.1 führt neben den Spezifikationen der WEA am Standort auch die der Typenprüfung zu Grunde gelegten, bzw. bei fehlender Information unterstellten, Richtlinien auf. Des Weiteren wird aufgeführt, welcher Wöhlerlinienkoeffizient  $m$  und welcher Betriebsmodus für die Berechnung der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  herangezogen wurde. Die Ergebnisse in 3.3.3 berücksichtigen den jeweiligen Wöhlerlinienkoeffizienten aus Tabelle 2.1. Wenn über den Betriebsmodus keine Informationen in den Eingangsdaten vorliegen, wird stets mit dem Betriebsmodus gerechnet, der die konservativsten Ergebnisse liefert, was dem offenen, nicht leistungsreduzierten Betriebsmodus entspricht.

Die Spalte „Innerhalb 10  $D$ “ weist aus, welche WEA sich innerhalb eines Umkreises von 10  $D$  um die geplanten WEA befinden. Für diese WEA hat nach [6] und [7] eine Bewertung der topografischen Komplexität und der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  zu erfolgen.

Im vorliegenden Gutachten beziehen sich alle Bezeichnungen auf die interne, laufende W-Nummer. Wird eine Größe mit dem Index  $_{\text{TP}}$  bezeichnet, handelt es sich um den Auslegungswert der zu betrachtenden WEA. Eine Bezeichnung mit dem Index  $_{\text{NH}}$  weist auf den standortspezifischen Wert der betrachteten Anlage hin.

Im vorgegeben Windparklayout ergibt sich der geringste relative Abstand  $s$  einer neu geplanten WEA zu einer anderen WEA von 2.03, bezogen auf den größeren Rotordurchmesser  $D$ . Dies betrifft die WEA W4 und W15.

### 2.3 Auslegungswindbedingungen der geplanten WEA

Die Auslegungswindbedingungen werden entweder der Typenprüfung entnommen oder vom Hersteller übermittelt. Da der Vergleich der Auslegungswindbedingungen, abgesehen von  $I_{\text{eff}}$ , mit den standortspezifischen Bedingungen nur für neu geplante WEA zu führen ist, werden in Tabelle 2.2 nur die Auslegungswindbedingungen der neu geplanten WEA aufgeführt.

Tabelle 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration

Interne W-Nr.	Bezeichnung Auftraggeber	Neu / Bestand	Innerhalb 10 D	Topografische Komplexität		UTM ETRS89 Zone 32		Hersteller	WEA Typ	NH <sup>1</sup> [m]	D [m]	Betriebsmodus	FEH [m]	P <sub>N</sub> [kW]	Prüfgrundlage DIBt	TK	Auslegungsdauer τ <sub>TP</sub> [a]	m <sub>max, TP</sub> [-]
				Komplex	Kategorie	X [m]	Y [m]											
W1	WEA11	Neu	Ja	Nein	-	485554	5705831	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	172.0	PO7200	0.0	7200	2012	S	25	10
W2	WEA12	Neu	Ja	Nein	-	485793	5706151	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	172.0	PO7200	0.0	7200	2012	S	25	10
W3	WEA13	Neu	Ja	Nein	-	486205	5706282	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	172.0	PO7200	0.0	7200	2012	S	25	10
W4	WEA15	Neu	Ja	Nein	-	485770	5706688	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	172.0	PO7200	0.0	7200	2012	S	25	10
W5	WEA16	Neu	Ja	Nein	-	486306	5706667	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	172.0	PO7200	0.0	7200	2012	S	25	10
W6	40041-23 (WEA 04)	Bestand	Nein	-	-	487992	5704732	Enercon	E-160 EP5 E3 / 5.560 kW	166.6	160.0	OM 0s	0.0	5560	2012	B	25	10
W7	40041-23 (WEA 05)	Bestand	Nein	-	-	487541	5704780	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W8	40041-23 (WEA 06)	Bestand	Ja	Nein	-	486781	5705033	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W9	40041-23 (WEA 07)	Bestand	Ja	Nein	-	486919	5704759	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	130.1	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W10	40041-23 (WEA 09)	Bestand	Nein	-	-	487597	5704446	Enercon	E-160 EP5 E3 / 5.560 kW	166.6	160.0	OM 0s	0.0	5560	2012	B	25	10
W11	40041-23 (WEA 08)	Bestand	Nein	-	-	487131	5704490	Enercon	E-138 EP3 E3 / 4.260 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4260	2012	A	25	10
W12	40965-21 (WEA 01)	Bestand	Ja	Nein	-	487106	5705591	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W13	41360-16, 40966-2102 (WEA 02)	Bestand	Ja	Nein	-	487360	5705150	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	130.1	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W14	40041-23 (WEA 03)	Bestand	Nein	-	-	487781	5705060	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W15	00181-13-14 (1)	Bestand	Ja	Nein	-	485460	5706529	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	82.0	BM 0s	0.0	2300	2004	A	20	10
W16	00181-13-14 (2)	Bestand	Ja	Nein	-	485439	5706277	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	82.0	BM 0s	0.0	2300	2004	A	20	10
W17	00299-11-14 D	Bestand	Nein	-	-	486930	5709284	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	82.0	BM 0s	0.0	2300	2004	A	20	10
W18	Essentho 1	Bestand	Nein	-	-	487937	5703813	Tacke	TW 600	50.0	43.0	Standard	0.0	600	1993	A	20	10
W19	Essentho 2	Bestand	Nein	-	-	488033	5704027	Enercon	E-40 / 5.40	50.0	40.3	BM 0	0.0	500	1993	A	20	10
W20	E70 Jesper	Bestand	Nein	-	-	490327	5704741	Enercon	E-70 E4 / 2.000 kW	64.0	71.0	BM II 2000kW	0.0	2000	2004	A	20	10
W21	40118-2012	Bestand	Nein	-	-	488569	5707028	Enercon	E-53 / 800 kW	73.3	52.9	BM 0s	0.0	800	2004	A	20	10
W22	G07/08	Bestand	Nein	-	-	487843	5707949	Enercon	E-53 / 800 kW	73.3	52.9	BM 0s	0.0	800	2004	A	20	10
W23	00299-11-14 C	Bestand	Ja	Nein	-	485888	5708332	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	82.0	BM 0s	0.0	2300	2004	A	20	10
W24	00299-11-14 A	Bestand	Nein	-	-	485679	5708716	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	82.0	BM 0s	0.0	2300	2004	A	20	10
W25	00299-11-14 B	Bestand	Nein	-	-	486259	5708749	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	82.0	BM 0s	0.0	2300	2004	A	20	10
W26	G100/06	Bestand	Nein	-	-	486759	5708783	Enercon	E-82 / 2.000 kW	98.3	82.0	BM 2000kW	0.0	2000	2004	A	20	10
W27	40166-2015 (M1)	Bestand	Nein	-	-	489262	5706966	Enercon	E-126 EP4 / 4.200 kW	135.0	127.0	BM 0s	0.0	4200	2012	A	20	10
W28	40590-2018 (HR1)	Bestand	Nein	-	-	488119	5706515	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W29	40946-16 (SH1)	Bestand	Nein	-	-	488473	5705480	Enercon	E-115 EP3 E3 / 4.200 kW	149.0	115.7	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W30	40947-16 (SH2)	Bestand	Nein	-	-	488324	5704959	Enercon	E-115 EP3 E3 / 4.200 kW	149.0	115.7	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W31	40422-2018 (HR2)	Bestand	Nein	-	-	488596	5706432	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W32	40392-2018 (HR3)	Bestand	Nein	-	-	489239	5706502	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W33	40519-2018 (HR4)	Bestand	Nein	-	-	488940	5705950	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W34	40407-2018 (HR5)	Bestand	Nein	-	-	489427	5706092	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W35	40438-2018 (HR6)	Bestand	Nein	-	-	489341	5705519	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W36	40560-2018 (HR7)	Bestand	Nein	-	-	488852	5705195	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W37	40522-2018 (HR8)	Bestand	Nein	-	-	489078	5704835	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W38	40046-2019 (HR9)	Bestand	Nein	-	-	488541	5706054	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W39	40569-2018 (HR10)	Bestand	Nein	-	-	488572	5704712	Enercon	E-103 EP2 / 2.350 kW	138.4	103.0	BM 0s	0.0	2350	2012	A	25	14
W40	40494-2018 (HR12)	Bestand	Nein	-	-	489890	5705598	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10
W41	40787-16 (01)	Bestand	Ja	Nein	-	487413	5707474	Enercon	E-115 / 3.000 kW	149.0	115.7	BM 0s	0.0	3000	2004	A	20	10

<sup>1</sup> Siehe Kapitel 1.4 Absatz 3

Interne W-Nr.	Bezeichnung Auftraggeber	Neu / Bestand	Innerhalb 10 D	Topografische Komplexität		UTM ETRS89 Zone 32		Hersteller	WEA Typ	NH <sup>1</sup> [m]	D [m]	Betriebsmodus	FEH [m]	P <sub>N</sub> [kW]	Prüfgrundlage DIBt	TK	Auslegungslebensdauer τ <sub>TP</sub> [a]	m <sub>max, TP</sub> [-]
				Komplex	Kategorie	X [m]	Y [m]											
W42	40282-2019 (ME 11)	Bestand	Nein	-	-	488126	5708050	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W43	40282-2019 (ME 10)	Bestand	Nein	-	-	488509	5707988	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W44	40282-2019 (ME 9)	Bestand	Nein	-	-	488875	5707885	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W45	40428-2019 (ME 22)	Bestand	Nein	-	-	487145	5708417	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W46	40282-2019 (ME 16)	Bestand	Nein	-	-	487133	5708778	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W47	40514-2016 (ME 15)	Bestand	Nein	-	-	486757	5708430	Enercon	E-92 / 2.350 kW	138.4	92.0	BM 0s	0.0	2350	2004	A	20	10
W48	41383-16 (05)	Bestand	Nein	-	-	485682	5708501	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	82.0	BM 0s	0.0	2300	2004	A	20	10
W49	41383-16 (06)	Bestand	Nein	-	-	486498	5708544	Enercon	E-115 / 3.000 kW	149.0	115.7	BM 0s	0.0	3000	2004	A	20	10
W50	40273-2019 (ME 1)	Bestand	Nein	-	-	488805	5706937	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W51	40219-2016 (ME 2)	Bestand	Nein	-	-	488279	5706973	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W52	40219-2016 (ME 3)	Bestand	Ja	Nein	-	487856	5707032	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W53	40427-2019 (ME 8B)	Bestand	Nein	-	-	489152	5707285	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W54	40430-2019 (ME 8A)	Bestand	Nein	-	-	489127	5707602	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W55	40013-2020 (ME 7)	Bestand	Nein	-	-	488710	5707414	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W56	40013-2020 (ME 6)	Bestand	Nein	-	-	488281	5707505	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W57	40282-2019 (ME 5)	Bestand	Nein	-	-	487852	5707613	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W58	40219-2016 (ME 4)	Bestand	Ja	Nein	-	487180	5707808	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W59	40084-2018 (ME 14)	Bestand	Ja	Nein	-	486891	5708115	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W60	40082-2019 (ME 13)	Bestand	Nein	-	-	487396	5708450	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W61	40424-2019 (ME 17)	Bestand	Ja	Nein	-	487559	5707825	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W62	40429-2019 (ME 21)	Bestand	Nein	-	-	487570	5708630	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W63	40282-2019 (ME 12)	Bestand	Nein	-	-	487700	5708176	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W64	40322-2020 (ME 18)	Bestand	Nein	-	-	488584	5707684	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W65	Anlage 31	Bestand	Ja	Nein	-	487659	5707332	Enercon	E-66 / 18.70	98.0	70.0	BM 0	0.0	1800	1993	A	20	10
W66	40131-2021 (ME 20)	Bestand	Nein	-	-	488004	5707318	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 01s	0.0	4200	2012	A	25	10
W67	40397-2020 (HEU 12)	Bestand	Nein	-	-	487995	5708375	Nordex	N149/5700	164.0	149.1	Mode 0	0.0	5700	2012	S	20	14
W68	40787-16 (02)	Bestand	Ja	Nein	-	487165	5706957	Enercon	E-126 EP4 / 4.200 kW	135.0	127.0	BM 0s	0.0	4200	2012	A	20	10
W69	Kopius 1	Bestand	Ja	Nein	-	485763	5707208	Nordex	N149/5700	164.0	149.1	Mode 0	0.0	5700	2012	S	20	14
W70	Kopius 2	Bestand	Ja	Nein	-	485172	5707245	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Mode 1	0.0	6800	2012	S	25	14
W71	40042-23 (WEA KOe 01)	Bestand	Nein	-	-	485694	5708675	Enercon	E-160 EP5 E3 / 5.560 kW	166.6	160.0	OM 0s	0.0	5560	2012	B	25	10
W72	40042-23 (WEA KOe 02)	Bestand	Nein	-	-	486237	5708721	Enercon	E-160 EP5 E3 / 5.560 kW	166.6	160.0	OM 0s	0.0	5560	2012	B	25	10
W73	40083-2018 (ME8)	Bestand	Nein	-	-	489177	5707491	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	126.7	BM 0s	0.0	4000	2012	A	25	10
W74	G06/08	Bestand	Nein	-	-	488594	5707508	Enercon	E-53 / 800 kW	73.3	52.9	BM 0s	0.0	800	2004	A	20	10
W75	40426-2019 (ME13 neu)	Bestand	Nein	-	-	487343	5708129	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	138.3	OM 0s	0.0	4200	2012	A	25	10

Tabelle 2.2: Auslegungswindbedingungen der neu geplanten WEA

Interne W-Nr.	Prüfgrundlage	WZ	GK	v <sub>ave,TP</sub> [m/s]	k <sub>TP</sub> [-]	v <sub>m50,TP</sub> [m/s]	TK	δ <sub>TP</sub> [°]	α <sub>TP</sub> [-]	ρ <sub>TP</sub> [kg/m³]	Auslegungslebensdauer τ <sub>TP</sub> [a]	Quelle
W1 – W5	DIBt 2012	S	S	7.2	2.0	38.0	S	8.0	0.27	1.225	25	[24.1] [24.2] [24.3]

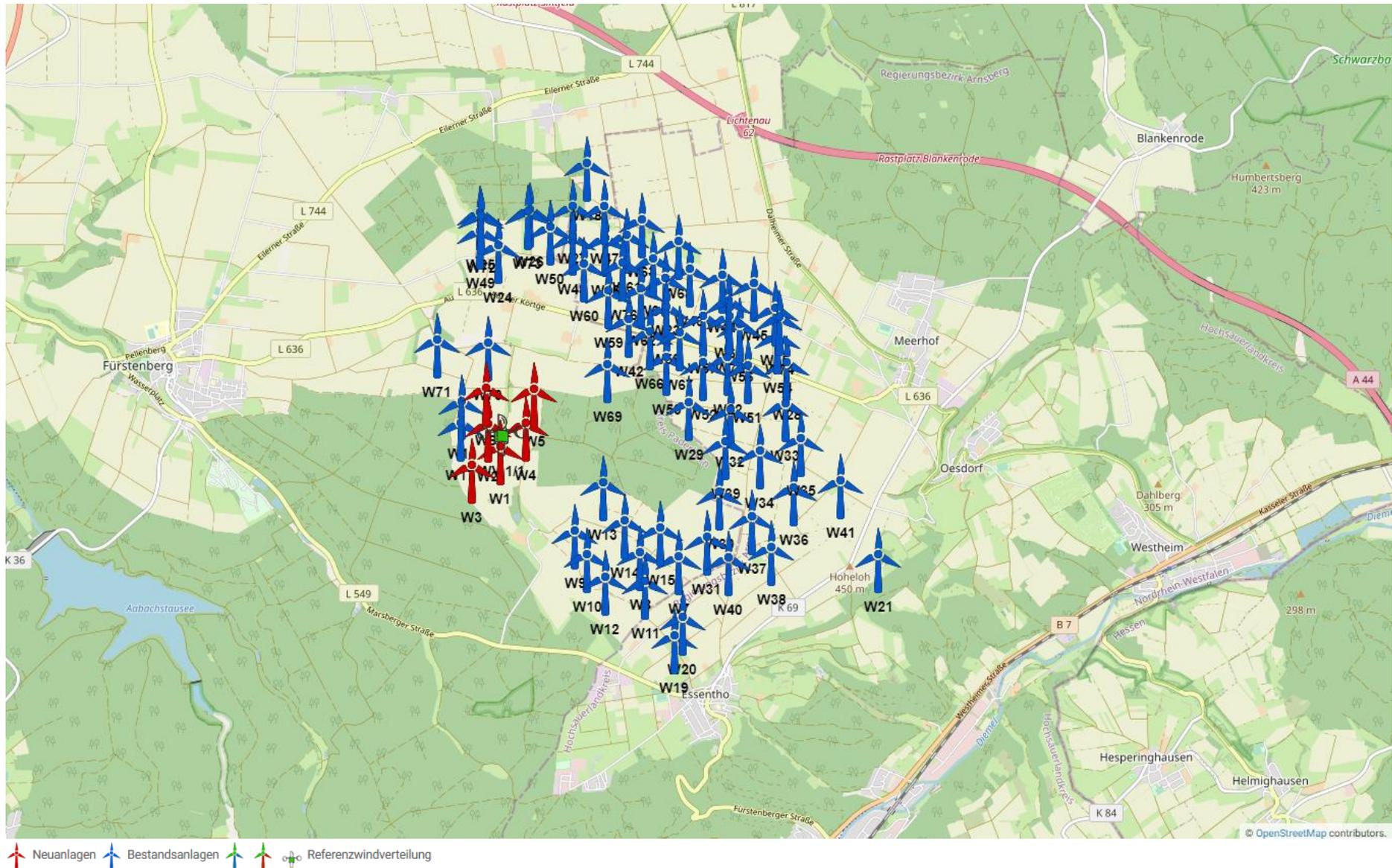


Abbildung 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration (Übersicht); Kartenmaterial: [19.1, 19.2]

Bericht-Nr.: I17-SE-2023-431

Gutachten zur Standorteignung von WEA nach DIBt 2012 im Windpark Fürstenberg

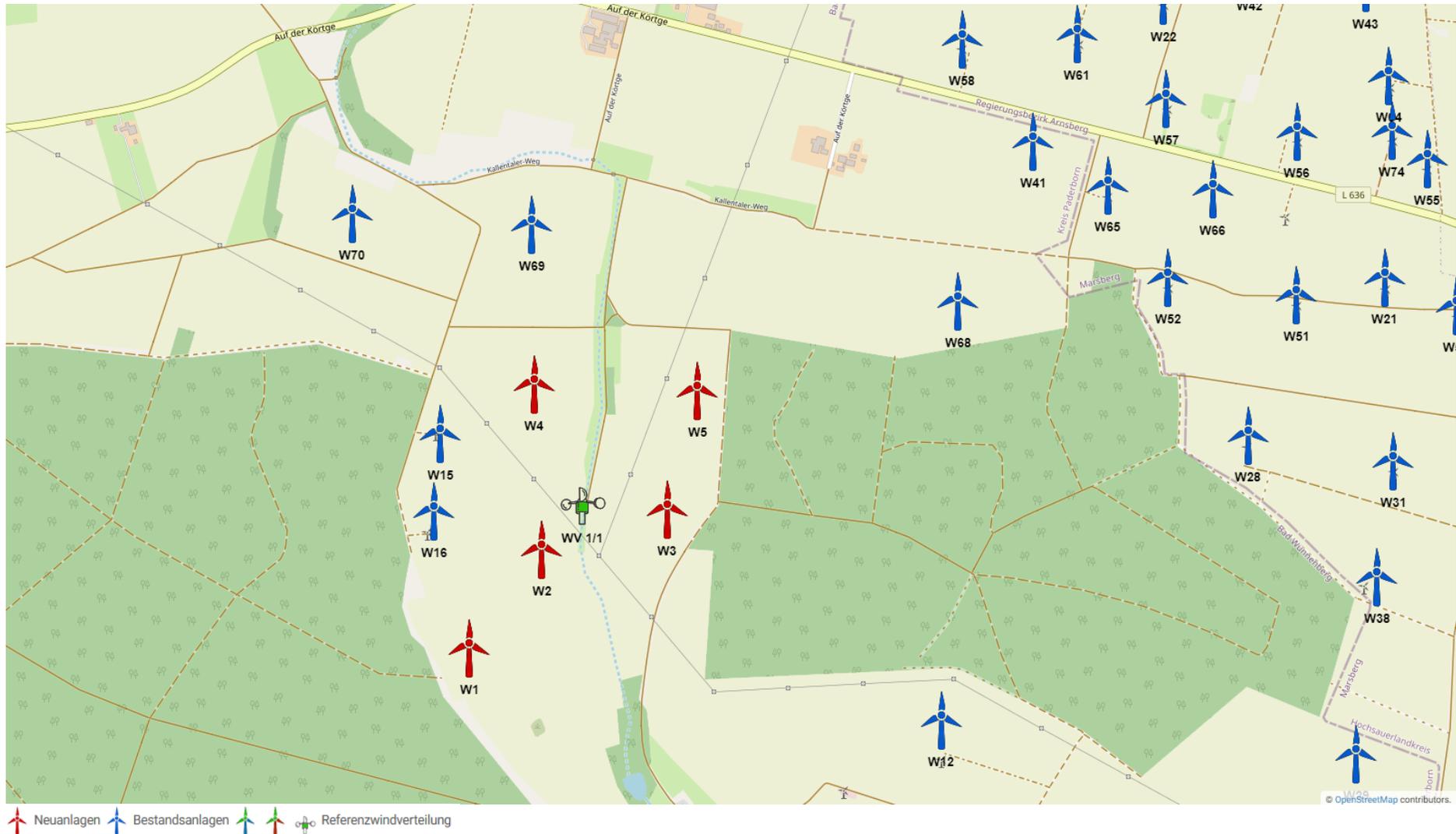


Abbildung 2.2: Zu untersuchende Windparkkonfiguration (Detail); Kartenmaterial: [19.1, 19.2]

### 3 Vergleich der Windbedingungen

#### 3.1 Grundlagen

Vom Auftraggeber wurden standortbezogene Windverhältnisse, unterteilt in mindestens 12 Sektoren, übermittelt [22.1]. Diese werden als richtig und für den Standort repräsentativ vorausgesetzt.

Um die Windverhältnisse auf Nabenhöhe an jedem Anlagenstandort zu ermitteln, werden die Daten der Windverhältnisse [22.1] auf alle notwendigen Höhen umgerechnet, sofern diese nicht vorliegen. Die Umrechnung erfolgt auf Basis eines logarithmischen Windprofils und des am Standort der Windverteilung ermittelten Höhenexponenten  $\alpha$ . Bei der vertikalen Umrechnung wird der Formparameter  $k$  als invariant mit der Höhe angenommen und lediglich der Skalenparameter  $A$  umgerechnet. Eine horizontale Umrechnung vom Standort der Winddaten zu den jeweiligen WEA Standorten erfolgt nicht. Liegen in [22.1] mehrere Windverteilungen vor, werden diese den jeweiligen WEA zugeordnet. Tabelle 3.1 führt eine der in [22.1] übermittelten Windbedingungen am Standort auf.

Tabelle 3.1: Windverhältnisse am Standort WV 1/1 [22.1]

UTM ETRS89 Zone 32			A [m/s]	k [-]	p [%]	v <sub>ave</sub> [m/s]
X [m]	Y [m]	h <sub>WV</sub> [m]				
485926	5706324	175.0				
Sektor   Windrichtung [°]						
N   0			4.78	2.460	3.8	-
NNO   30			4.80	2.460	3.0	-
ONO   60			5.33	2.410	3.6	-
O   90			6.47	2.360	5.5	-
OSO   120			6.91	2.540	7.2	-
SSO   150			6.83	2.520	6.3	-
S   180			8.40	2.530	8.5	-
SSW   210			8.59	2.570	9.4	-
WSW   240			9.32	2.710	15.7	-
W   270			9.08	2.540	16.9	-
WNW   300			7.59	2.400	13.5	-
NNW   330			5.64	2.460	6.6	-
Gesamt			<b>7.74</b>	<b>2.270</b>	<b>100.0</b>	<b>6.86</b>

## 3.2 Vergleich $v_{ave}$ und $v_{m50}$

### 3.2.1 Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeit $v_{ave}$

Liegt der Typenprüfung einer entsprechend Abschnitt 1.2.1 zu untersuchenden WEA ein Formparameter  $k$  mit  $k = 2.0$  zu Grunde, ist der Vergleich der Windverhältnisse in Bezug auf die mittlere Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$  auf Nabenhöhe jeder geplanten WEA so zu führen, dass gilt:

- i.  $v_{ave, NH} / v_{ave, TP} \leq 0.95$   
oder
- ii.  $v_{ave, NH} / v_{ave, TP} \leq 1.00$  und  $k_{NH} \geq 2.00$

Liegt der Typenprüfung einer entsprechend Abschnitt 1.2.1 zu untersuchenden WEA ein Formparameter  $k$  mit  $k \neq 2.0$  zu Grunde, ist der Vergleich der Windverhältnisse in Bezug auf die mittlere Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$  jeder geplanten WEA wie folgt zu führen:

- i. Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der standortspezifischen Windgeschwindigkeiten  $pdf_{NH}$  mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Typenprüfung  $pdf_{TP}$  in einem Bereich von  $v_{ave} - 2v_{ave}$  nach [6] bzw.  $0.2v_{ref} - 0.4v_{ref}$  nach [7]. In dem zu untersuchenden Bereich muss die Bedingung  $pdf_{NH} \leq pdf_{TP}$  erfüllt sein.

Das Ergebnis der Berechnung der mittleren Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$  und der Formparameter  $k$  der Weibullverteilung auf Nabenhöhe jeder neu geplanten WEA sind in Tabelle 3.2 dargestellt und werden mit den Auslegungswindbedingungen der jeweiligen WEA verglichen.

Tabelle 3.2: Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$  auf Nabenhöhe der geplanten WEA

Interne W-Nr.	$v_{ave, NH}$ [m/s]	$v_{ave, TP}$ [m/s]	$k_{NH}$ [-]	$k_{TP}$ [-]	Wenn $k_{TP} = 2$ : $v_{ave, NH} / v_{ave, TP}$ [-]	Wenn $k_{TP} \neq 2$ : $pdf_{NH} \leq pdf_{TP}$	Nachweis möglich (gemäß 1.2.1)	Lastvergleich erforderlich (gemäß 1.2.3)
W1 – W5	6.86	7.20	2.27	2.00	0.95	-	Ja	Nein

### 3.2.2 Vergleich der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit $v_{m50}$

Der Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{m50, NH}$  auf Nabenhöhe der geplanten WEA mit dem Auslegungswert kann auf zwei Wegen erfolgen. Wenn die WEA in einer Windzone errichtet werden soll, die niedriger oder gleich der Windzone ist, die der Typenprüfung zu Grunde liegt, reicht der Nachweis, dass die Windzone gemäß Typenprüfung die Windzone des betrachteten Standortes abdeckt [1.1]. Ist dies nicht der Fall, muss nachgewiesen werden, dass die 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{m50, TP}$  gemäß Typenprüfung die 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe der geplanten WEA am Standort abdeckt [1.1, 4, 5]. Hierzu muss die 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{m50, NH}$  mittels einer geeigneten Methode (z.B. der Gumbel-Methode [10]) am Standort ermittelt werden.

Den nachzuweisenden Standorten wird nach DIBt 2012 [1.1], bzw. nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 mit DIN EN 1991-1-4:2010-12 [9] die in Tabelle 3.3 aufgeführte Windzone entsprechend [11] und die Geländekategorie, basierend auf den durch den Standortbesuch gewonnenen Erkenntnissen und den verwendeten Satellitendaten [13], zu Grunde gelegt. Da, nach [1.1], in Übergangsbereichen der Geländekategorien stets die Gleichungen der niedrigeren Kategorie anzusetzen sind, wird der Vergleich in solchen Fällen auf Basis der Gleichungen für die niedrigere Geländekategorie durchgeführt.

In der folgenden Tabelle 3.3 werden die Auslegungswindbedingungen hinsichtlich  $v_{m50}$  mit den standortspezifischen Windbedingungen verglichen. Wenn die geplanten WEA in einer Windzone errichtet werden sollen, die durch die Auslegungswindbedingungen abgedeckt ist, ist die Standorteignung hinsichtlich  $v_{m50}$  nachgewiesen. Ist der Standort nicht durch die Auslegungswindbedingungen  $v_{m50, TP}$  der geplanten WEA abgedeckt, erfolgt der Nachweis über eine standortspezifische Extremwindabschätzung [22.2]. Die Ergebnisse der standortspezifischen Extremwindabschätzung werden als richtig und repräsentativ für den Standort vorausgesetzt. Kann

der Nachweis durch keine der beiden Verfahrensweisen erbracht werden, kann der Nachweis ggf. durch einen Lastvergleich der Extremlasten nach Abschnitt 1.2.3 erbracht werden.

Tabelle 3.3: Vergleich der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit  $v_{m50}$  auf Nabenhöhe der geplanten WEA

Interne W-Nr.	WZ <sub>TP</sub>	GK <sub>TP</sub>	$v_{m50, TP}$ [m/s]	WZ <sub>NH</sub>	GK <sub>NH</sub>	$v_{m50, NH}$ [1.1] [m/s]	$v_{m50, NH}$ [22.2] [m/s]	Nachweis möglich (gemäß 1.2.1)	Lastvergleich erforderlich (gemäß 1.2.3)
W1 – W5	S	S	38.00	1	II	35.57	-	Ja	Nein

### 3.3 Vergleich der effektiven Turbulenzintensität $I_{eff}$

#### 3.3.1 Auslegungswindbedingungen hinsichtlich der Turbulenzintensität

Für die Turbulenzintensität auf Nabenhöhe einer nach der DIBt 2012 [1.1] typengeprüften WEA gibt es windgeschwindigkeitsabhängige Auslegungswerte in fünf Kategorien, welche in der DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] aufgeführt sind und der Typenprüfung zu Grunde gelegt werden müssen. Bei den Turbulenzkategorien wird zwischen den vorgegebenen Kategorien A+, A, B, C und der durch den WEA-Hersteller definierbaren Kategorie S unterschieden.

Für WEA die nach der DIBt 2004 [2] typengeprüft sind, muss die windgeschwindigkeitsabhängige Turbulenzkategorie A, welche in der DIN EN 61400-1:2004 [8] definiert ist, als Auslegungswindbedingung hinsichtlich der Turbulenzintensität zu Grunde gelegt sein. Für WEA die nach der DIBt 1993 [3] typengeprüft sind, ist eine konstante, mittlere effektive Turbulenzintensität  $I_{eff}$  von 0.20 als Auslegungswindbedingung anzusetzen.

In Tabelle 3.4 sind die unterschiedlichen Turbulenzkategorien und deren Verläufe dargestellt.

Tabelle 3.4: Richtlinienabhängige Auslegungswindbedingungen hinsichtlich der Turbulenzintensität

V <sub>hub</sub> [m/s]	DIBt 1993 [3]	DIBt 2004 [2]	DIBt 2012 [1.1] DIN EN IEC 61400-1:2019 [6]				S [-]
	Konstanter Mittelwert	NTM A [8] [-]	NTM A+ [6] [-]	NTM A [5, 6, 7] [-]	NTM B [5, 6, 7] [-]	NTM C [5, 6, 7] [-]	
2	-	0.570	0.639	0.568	0.497	0.426	durch den WEA- Hersteller definiert
3		0.420	0.471	0.419	0.366	0.314	
4		0.345	0.387	0.344	0.301	0.258	
5		0.300	0.337	0.299	0.262	0.224	
6		0.270	0.303	0.269	0.236	0.202	
7		0.249	0.279	0.248	0.217	0.186	
8		0.233	0.261	0.232	0.203	0.174	
9		0.220	0.247	0.220	0.192	0.165	
10		0.210	0.236	0.210	0.183	0.157	
11		0.202	0.227	0.201	0.176	0.151	
12		0.195	0.219	0.195	0.170	0.146	
13		0.189	0.213	0.189	0.165	0.142	
14		0.184	0.207	0.184	0.161	0.138	
15		0.180	0.202	0.180	0.157	0.135	
16		0.176	0.198	0.176	0.154	0.132	
17		0.173	0.194	0.173	0.151	0.130	
18		0.170	0.191	0.170	0.149	0.127	
19		0.167	0.188	0.167	0.146	0.125	
20		0.165	0.185	0.165	0.144	0.124	
21		0.163	0.183	0.163	0.142	0.122	
22		0.161	0.181	0.161	0.141	0.121	
23		0.159	0.179	0.159	0.139	0.119	
24		0.158	0.177	0.157	0.138	0.118	
25		0.156	0.175	0.156	0.136	0.117	
26		0.155	0.174	0.154	0.135	0.116	
27		0.153	0.172	0.153	0.134	0.115	
28		0.152	0.171	0.152	0.133	0.114	
29		0.151	0.170	0.151	0.132	0.113	
30		0.150	0.169	0.150	0.131	0.112	
Konstanter Mittelwert		0.200	-	-	-	-	

Der Vergleich des standortspezifischen Turbulenzverlaufes mit den windgeschwindigkeitsabhängigen Auslegungswerten erfolgt bei WEA die nach der DIBt 2004 [2] typengeprüft sind, auf Basis der Werte für die Turbulenzkategorie A nach [1.1, 5, 6, 7], da diese die Werte nach [8] mit abdecken.

### 3.3.2 Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität

#### 3.3.2.1 Datengrundlage

Im Wesentlichen hängt die Umgebungsturbulenz  $I_{amb}$  von den Windverhältnissen, der Orographie und der Geländerauigkeit ab. Die Windverhältnisse aus [22.1] enthalten keinerlei Informationen zur Umgebungsturbulenzintensität vor Ort, somit wurde diese auf Basis der vorliegenden Informationen zur Bodenbedeckung [13] und der Topografie [14] am Standort auf Nabenhöhe ermittelt.

#### 3.3.2.2 Vorgehensweise

Die Umgebungsturbulenzintensität  $I_{amb}$  beschreibt im Allgemeinen die Schwankung der Windgeschwindigkeit in einem Zeitintervall von 600 s um ihren Mittelwert. Sie ist als der Quotient aus der Standardabweichung  $\sigma$  der Windgeschwindigkeit und der zugehörigen mittleren Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$  in einem 600 s Intervall zu bilden [6, 7, 8]. Liegen Daten einer Windmessung am Standort vor, kann  $I_{amb}$  direkt, bzw.  $I_{char}$  durch Addition der 1fachen Standardabweichung der Umgebungsturbulenzintensität  $\sigma_\sigma$  [4, 8] und  $I_{rep}$  durch Addition der 1.28fachen Standardabweichung der Umgebungsturbulenzintensität  $\sigma_\sigma$  [6, 7] zu  $I_{amb}$  ermittelt werden. Durch Ermittlung der Windscherung, kann die auf Messhöhe ermittelte charakteristische, bzw. repräsentative Turbulenzintensität auf Nabenhöhe extrapoliert werden. Liegt keine Messung vor, muss die Umgebungsturbulenzintensität rechnerisch ermittelt werden.

Zur Berechnung von  $I_{amb}$  werden an jedem zu untersuchenden WEA Standort die flächenmäßigen Informationen zur Bodenbedeckung aus dem CORINE Datensatz [13] mit 20 km Radius um den Standort zu Grunde gelegt. Die in [13] enthaltenen Flächen verschiedener Bodenbedeckung werden nach den Empfehlungen des Europäischen Wind Atlas [12] in Flächen mit einer Rauigkeitslänge  $z_0$  konvertiert. Alle innerhalb eines Sektors liegenden Rauigkeitselemente werden abschließend nach Abstand und Größe gewichtet und in einen, für diesen Sektor, repräsentativen Rauigkeitswert umgerechnet. Aus den sektoriell vorliegenden Rauigkeitslängen wird mittels eines von der Rauigkeitslänge  $z_0$  abhängigen Profils die Umgebungsturbulenzintensität auf Nabenhöhe der jeweiligen WEA berechnet.

Da in der Richtlinie des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt 2012 [1.1] für die Ermittlung der Standorteignung bezüglich der effektiven Turbulenzintensitäten Turbulenzwerte für verschiedene Windgeschwindigkeiten gefordert sind, wird den ermittelten Werten für die Umgebungsturbulenzintensität das NTM nach [6, 7] zu Grunde gelegt. Der ermittelten Turbulenzkurve wird in Anlehnung an das vom Risø DTU National Laboratory entwickelte Verfahren im Windfarm Assessment Tool eine windgeschwindigkeitsabhängige Standardabweichung  $\sigma_\sigma$  unterstellt, die ebenfalls dem NTM Verlauf folgt [15]. Die Werte für die Standardabweichung der Umgebungsturbulenzintensität  $\sigma_\sigma$  sind so gewählt, dass die Summe aus der Referenzsturbulenzintensität nach NTM und dem 1fachen  $\sigma_\sigma$  die Referenzkurve nach [6, 7] ergibt.

Die repräsentative Turbulenzintensität  $I_{rep}$  wird nach dem beschriebenen Verfahren für jede zu betrachtende, nach DIBt 2012 [1.1] typen-/einzelgeprüfte, WEA auf Nabenhöhe ermittelt und den weiteren Berechnungen zu Grunde gelegt. Für Anlagen, deren Typen-/Einzelprüfung auf der Richtlinie DIBt 2004 [2] oder DIBt 1993 [3] basiert, findet die charakteristische Turbulenzintensität  $I_{char}$  Anwendung.

### 3.3.2.3 Untersuchung der topografischen Komplexität der Anlagenstandorte

Das verwendete Höhenmodell aus dem SRTM Datensatz [14] liegt in einer Auflösung von ca. 30 m vor und wird für die Ermittlung der topografischen Komplexität der Standorte herangezogen.

Die Standorte aller zu betrachtenden Anlagen werden basierend auf den Vorgaben der geltenden Norm DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] auf topografische Komplexität untersucht und bewertet, da die topografische Komplexität eine Verzerrung und damit eine Abweichung der Turbulenzstruktur von den Auslegungswindbedingungen verursachen kann.

Die Komplexität eines Standortes wird durch die Neigung des Geländes und die Abweichungen der Topografie des Geländes von einer angenäherten Ebene dargestellt. Dazu werden mindestens 37 Ausgleichsebenen entsprechend der Kriterien aus [6] mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gebildet. Die DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] lässt die Möglichkeit offen, die angenäherte Ebene für die Kreissektoren mit dem Radius  $5 z_{hub}$  leewärts zur Position der zu untersuchenden WEA um  $2 z_{hub}$  zu erweitern. Diese Erweiterung wird bei der Komplexitätsbewertung im vorliegenden Gutachten angewendet. In Abhängigkeit der Neigung der angenäherten Ebenen, der Abweichung des digitalen Geländemodells [14] von dieser und des Anteils der Windenergie aus dem betrachteten Sektor, lassen sich die Indizes  $TSI$  für die Geländeneigung und  $TVI$  für die Geländeabweichung berechnen. Überschreitet einer der berechneten Indizes die in Tabelle 3.5 aufgeführten Schwellenwerte, ist der untersuchte Standort als topografisch komplex zu bewerten, wobei der jeweils überschrittene Schwellenwert die Geländekomplexitätskategorie L, M oder H bestimmt.

Nach [6] hat an topografisch komplexen Standorten eine Erhöhung der longitudinalen Komponente der Umgebungsturbulenzintensität durch Multiplikation mit einem Turbulenzstrukturparameter  $C_{CT}$  gemäß Tabelle 3.5 zu erfolgen.

Tabelle 3.5: Komplexitätskriterien und  $C_{CT}$  nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6]

Radius der Kreisfläche um die WEA [m]	Sektoramplitude der angenäherten Ausgleichsebene [°]	Schwellenwerte (untere Grenze)					
		Index der Geländeneigung $TSI$ [°]			Index der Geländeabweichung $TVI$ [%]		
		L	M	H	L	M	H
$5 z_{hub}$	360	10	15	20	2	4	6
$5 z_{hub}$	30						
$10 z_{hub}$							
$20 z_{hub}$							
		<b>Kategorie</b>					
	<b>L</b>	<b>M</b>			<b>H</b>		
$C_{CT}$	1.05	1.10			1.15		

Die Ergebnisse der Bewertung der topografischen Komplexität der zu untersuchenden WEA können Tabelle 2.1 entnommen werden.

### 3.3.2.4 Repräsentative Turbulenzintensität

In Tabelle 3.6 werden die sektoriell nach dem in Abschnitt 3.3.2.2 beschriebenen Verfahren ermittelten, repräsentativen Turbulenzintensitäten, bezogen auf eine Windgeschwindigkeit von 15 m/s, für eine Anlagenposition aufgeführt.

Tabelle 3.6: Repräsentative Turbulenzintensität für einen Standort

Standort: W2	NH: 175.0 m	$I_{rep}$ [-]
Sektor	Windrichtung [°]	
N	0	0.125
NNO	30	0.126
ONO	60	0.138
O	90	0.132
OSO	120	0.130
SSO	150	0.129
S	180	0.138
SSW	210	0.137
WSW	240	0.137
W	270	0.135
WNW	300	0.127
NNW	330	0.127

### 3.3.3 Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität $I_{eff}$

#### 3.3.3.1 Grundlagen

Die effektive Turbulenzintensität  $I_{eff}$  ist definiert als die mittlere Turbulenzintensität, die über die Lebensdauer einer WEA dieselbe Materialermüdung verursacht, wie die am Standort herrschenden, verschiedenen Turbulenzen. Die Materialkennzahl, die maßgeblich in die Berechnung der effektiven Turbulenzintensität einfließt, ist der Wöhlerlinienkoeffizient  $m$ . Im vorliegenden Gutachten liegt jeder zu betrachtenden WEA der anlagenspezifische Wöhlerlinienkoeffizient zu Grunde, der die strukturschwächste Komponente repräsentiert. Hierbei handelt es sich im Regelfall um die Rotorblätter einer WEA, welche durch Wöhlerlinienkoeffizienten zwischen  $m = 10$  für glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe und  $m = 15$  für kohlefaserverstärkte Verbundwerkstoffe abgedeckt werden. Dadurch werden alle Komponenten einer WEA in die Betrachtung mit einbezogen.

Grundsätzlich setzt sich die effektive Turbulenzintensität  $I_{eff}$  an einer WEA aus der Umgebungsturbulenzintensität und der durch den Nachlauf anderer WEA induzierten Turbulenzintensität, dem sogenannten „Wake-Effekt“, zusammen. Hierbei sind je nach zu Grunde gelegter Richtlinie unterschiedliche Berücksichtigungen der Standardabweichung der Umgebungsturbulenzintensität  $\sigma_\sigma$  zu berücksichtigen.

Die Berechnung der induzierten Turbulenzintensität erfolgt nach den Ausarbeitungen in [10], Kapitel 2.4.4, wenn alle hierfür erforderlichen Anlagenparameter vorliegen oder konservativ abdeckend ermittelt werden konnten. Andernfalls erfolgt die Berechnung der induzierten Turbulenzintensität nach den Ausarbeitungen in [16], sowie den informativen Anhängen in [6] und [7]. Die generelle Vorgehensweise zur Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität  $I_{eff}$  erfolgt in beiden Fällen entsprechend den Anforderungen aus [6] und [7].

Die induzierte Turbulenzintensität wird in [10] als eine Funktion beschrieben, die von den Abständen der WEA untereinander, der Umgebungsturbulenzintensität und von anlagenspezifischen Kenngrößen abhängig ist. Diese Kenngrößen sind einerseits der windgeschwindigkeitsabhängige Schubbeiwert  $c_t$ , als auch die windgeschwindigkeitsabhängige Schnelllaufzahl  $\lambda$  der turbulenzinduzierenden WEA. Das Modell bildet sowohl den voll ausgebildeten Nachlauf als auch den nicht voll ausgebildeten Nachlauf

hinter einer WEA ab. Die anlagenspezifischen Werte  $c_t$  und  $\lambda$  sind vom Anlagenhersteller übermittelt. Wenn für eine zu betrachtende WEA diese Werte nicht vorliegen, werden Sie, wenn möglich, auf Basis der Anlagenparameter wie Drehzahl und Rotordurchmesser ermittelt, oder durch eine konservativ abdeckende Standardkurve ersetzt. Der Ermittlung von  $I_{eff}$  werden die am Standort herrschenden geometrischen Verhältnisse, sowie die am Standort herrschenden Windbedingungen zu Grunde gelegt. Da in [10] keine Aussage zum berücksichtigenden Einflussbereich der WEA untereinander getroffen wird, werden sowohl die Bereiche im Volleinfluss (Rotor der WEA steht voll im Nachlauf einer anderen WEA), als auch die Bereiche im Teileinfluss (Rotor der WEA steht nur teilweise im Nachlauf einer anderen WEA) bei der Berechnung von  $I_{eff}$  berücksichtigt, was somit den konservativsten Ansatz darstellt.

Die induzierte Turbulenzintensität wird in [16] als eine Funktion beschrieben, die von den Abständen  $s$  der WEA untereinander und vom windgeschwindigkeitsabhängigen Schubbeiwert  $c_t$  abhängig ist. Die anlagenspezifischen  $c_t$  Werte sind vom Anlagenhersteller übermittelt. Wenn für eine zu betrachtende WEA diese Werte nicht vorliegen, werden Sie durch eine konservativ abdeckende Standardkurve ersetzt. Der Ermittlung von  $I_{eff}$  werden die am Standort herrschenden geometrischen Verhältnisse, sowie die am Standort herrschenden Windbedingungen zu Grunde gelegt. Da in [16] eine eindeutige Aussage zum berücksichtigenden Einflussbereich der WEA untereinander getroffen wird, wird genau dieser Bereich bei der Berechnung von  $I_{eff}$  berücksichtigt.

Die Ermittlung der induzierten Turbulenzintensität muss durchgeführt werden, solange sich eine WEA in einem Abstand  $s$  kleiner  $10 D$  von der zu betrachtenden Anlage befindet [6, 7, 8]. Ist der Abstand  $s$  aller WEA im Umfeld grösser  $10 D$ , bezogen auf die jeweils turbulenzinduzierende WEA, muss deren Einfluss nicht mehr berücksichtigt werden.

In keiner der zu Grunde gelegten Richtlinien und Normen [1.1 - 8] werden hinsichtlich des Abstandes  $s$  von WEA Grenzen definiert, bis zu welchen die Ergebnisse der effektiven Turbulenzintensitäten  $I_{eff}$  anwendbar oder belastbar sind. Dasselbe gilt für die in [10] und [16] beschriebenen Turbulenzmodelle. Verschiedene Untersuchungen und Ausarbeitungen haben gezeigt, dass die Turbulenzmodelle auch bei geringen relativen Abständen  $s$  im Bereich  $3 D \geq s \geq 2 D$  konservative Ergebnisse liefern und belastbar sind. Diese Ergebnisse können sowohl für einen Vergleich der Windbedingungen entsprechend Abschnitt 1.2.1 als auch für einen Nachweis gemäß 1.2.3 herangezogen werden. Die Ergebnisse der ermittelten, effektiven Turbulenzintensitäten bei Anlagenabständen  $s$  von unter  $2.0 D$  sollten nicht mehr für eine standortspezifische Lastrechnung (siehe Abschnitt 1.2.3) herangezogen werden. In diesen Nachlaufsituationen ist eine Abschaltung erforderlich. Eine Ausnahme bilden Abstände  $s$  von unter  $2.0 D$  in Verbindung mit einem großen Nabhöhenunterschied der betrachteten WEA. In solch einer Situation kann es durch die geometrischen Verhältnisse dazu kommen, dass der Nachlauf der turbulenzinduzierenden WEA über bzw. unter der Rotorkreisfläche der beeinflussten WEA strömt. In diesem Fall sind keine Betriebsbeschränkungen bzw. Abschaltungen erforderlich.

Die ermittelten Werte für  $I_{eff}$  werden den Auslegungswerten, die der Typen-/Einzelprüfung der betrachteten Anlage zu Grunde liegen, gegenübergestellt. Liegen die ermittelten Werte nicht oberhalb der Auslegungswerte, gilt eine Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität als nachgewiesen. Liegen die Werte über den Auslegungswerten, kann eine Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität nicht durch den Vergleich mit den Auslegungswerten nachgewiesen werden. Der Nachweis der Standorteignung kann in diesem Fall jedoch durch eine standortspezifische Lastrechnung seitens des Anlagenherstellers oder eines unabhängigen Dritten erfolgen.

### 3.3.3.2 Berücksichtigte sektorische Betriebsbeschränkungen (WSM)

Bei der Berechnung der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  können sektorische Betriebsbeschränkungen (WSM) an WEA berücksichtigt werden. Die Betriebsbeschränkungen können sich aus beispielsweise zu geringen Abständen  $s$  ergeben, oder Bestandteil der Genehmigung bereits bestehender WEA sein. Des Weiteren kann ein WSM dafür genutzt werden, den Einfluss einer neu geplanten WEA auf den zu berücksichtigenden Bestand derart zu reduzieren, dass die geplante WEA keinen signifikanten Einfluss mehr auf die effektive Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  einer Bestandsanlage hat oder um Überschreitungen der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  an dieser zu verhindern. Die im Folgenden aufgeführten Betriebsbeschränkungen stellen immer eine Mindestanforderung dar, deren technische Umsetzbarkeit nicht geprüft wurde. Wenn möglich, wird für jedes WSM an einer beeinflussenden WEA ein alternatives WSM an der beeinflussten WEA ausgewiesen. Hierbei handelt es sich in der Regel um eine Abschaltung an der beeinflussten WEA, da die Lasten an einer abgeschalteten WEA geringer sind als die Lasten im frei angeströmten Betrieb. Die ausgewiesenen Alternativen stellen einen Vorschlag dar, werden aber nicht in der Berechnung der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  berücksichtigt. Soll eine ausgewiesene Alternative berücksichtigt werden, erfordert dies eine neue Bewertung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$ .

Bei der Berechnung der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  wurden keine sektorischen Betriebsbeschränkungen berücksichtigt.

### 3.3.3.3 Ergebnis

Die folgende Tabelle 3.7 stellt die ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten vor Zubau der geplanten WEA in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit dar. Aufgeführt werden nur Bestands-WEA, für die ein Vergleich der Situation vor mit der Situation nach dem geplanten Zubau durchgeführt wird. Tabelle 3.8 und Tabelle 3.9 stellen die ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten nach Zubau der geplanten WEA in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit dar. Die nach der jeweils zu Grunde gelegten Richtlinie ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten werden der Referenzkurve nach DIBt 2012 [1.1] oder der Referenzkurve der jeweiligen Typenprüfung gegenübergestellt. Überschreitungen sind **fett kursiv** dargestellt. Für WEA die nach der Richtlinie DIBt 1993 [3] typengeprüft sind, ist nur die mittlere konstante effektive Turbulenzintensität am unteren Ende der Tabelle relevant.

Tabelle 3.7: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten  $I_{\text{eff}}$  (vor Zubau)

$v_{\text{hub}}$	W8[A]	W9[A]	W13[A]	W15[A]	W23[A]	W41[A]	W52[A]	W58[A]	W59[A]	W61[A]	W65[A]	Referenz Klasse A
3	<b>0.467</b>	<b>0.481</b>	<b>0.424</b>	0.385	0.398	<b>0.422</b>	<b>0.459</b>	<b>0.447</b>	<b>0.426</b>	<b>0.462</b>	0.499	0.419
4	<b>0.457</b>	<b>0.452</b>	<b>0.397</b>	0.333	0.338	<b>0.391</b>	<b>0.435</b>	<b>0.412</b>	<b>0.389</b>	<b>0.431</b>	0.456	0.344
5	<b>0.396</b>	<b>0.373</b>	<b>0.344</b>	<b>0.306</b>	0.296	<b>0.328</b>	<b>0.365</b>	<b>0.348</b>	<b>0.327</b>	<b>0.367</b>	0.392	0.299
6	<b>0.344</b>	<b>0.330</b>	<b>0.301</b>	<b>0.287</b>	<b>0.270</b>	<b>0.282</b>	<b>0.307</b>	<b>0.303</b>	<b>0.283</b>	<b>0.323</b>	0.352	0.269
7	<b>0.308</b>	<b>0.296</b>	<b>0.271</b>	<b>0.272</b>	<b>0.250</b>	<b>0.250</b>	<b>0.265</b>	<b>0.270</b>	<b>0.252</b>	<b>0.292</b>	0.320	0.248
8	<b>0.263</b>	<b>0.260</b>	<b>0.238</b>	<b>0.259</b>	0.232	0.222	0.226	<b>0.237</b>	0.224	<b>0.262</b>	0.285	0.232
9	<b>0.232</b>	<b>0.233</b>	0.216	<b>0.251</b>	<b>0.222</b>	0.204	0.203	0.214	0.203	<b>0.242</b>	0.264	0.220
10	0.210	<b>0.211</b>	0.201	<b>0.243</b>	<b>0.212</b>	0.190	0.188	0.197	0.186	<b>0.227</b>	0.251	0.210
11	0.192	0.190	0.187	<b>0.236</b>	<b>0.204</b>	0.178	0.176	0.177	0.171	<b>0.204</b>	0.213	0.201
12	0.177	0.172	0.175	<b>0.199</b>	0.173	0.165	0.164	0.162	0.157	0.184	0.186	0.195
13	0.164	0.159	0.166	0.171	0.153	0.149	0.154	0.152	0.149	0.171	0.171	0.189
14	0.153	0.151	0.158	0.157	0.143	0.141	0.148	0.145	0.143	0.160	0.159	0.184
15	0.147	0.146	0.152	0.148	0.136	0.135	0.143	0.140	0.139	0.152	0.152	0.180
16	0.142	0.142	0.147	0.142	0.132	0.131	0.140	0.136	0.135	0.145	0.145	0.176
17	0.139	0.139	0.143	0.136	0.128	0.127	0.136	0.132	0.132	0.140	0.140	0.173
18	0.136	0.136	0.140	0.132	0.124	0.125	0.134	0.129	0.129	0.135	0.136	0.170
19	0.134	0.134	0.137	0.129	0.122	0.122	0.131	0.127	0.127	0.132	0.133	0.167
20	0.131	0.132	0.134	0.126	0.119	0.119	0.128	0.125	0.124	0.128	0.130	0.165
21	0.130	0.131	0.132	0.124	0.117	0.117	0.126	0.122	0.122	0.125	0.127	0.163
22	0.128	0.129	0.130	0.122	0.115	0.115	0.124	0.120	0.120	0.123	0.125	0.161
23	0.127	0.128	0.129	0.120	0.113	0.113	0.122	0.118	0.118	0.120	0.122	0.159
24	0.126	0.127	0.127	0.118	0.111	0.112	0.121	0.116	0.116	0.118	0.120	0.157
25	0.125	0.126	0.126	0.117	0.109	0.110	0.119	0.114	0.114	0.115	0.118	0.156
DIBt 1993	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.269</b>	0.200

Tabelle 3.8: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten  $I_{eff}$  (nach Zubau – Teil 1)

$v_{hub}$	W1[S1]	W2[S1]	W3[S1]	W4[S1]	W5[S1]	W8[A]	W9[A]	W12[A]	W13[A]	W15[A]	W16[A]	Referenz Klasse A	Referenz Klasse S1
3	0.353	<b>0.383</b>	<b>0.372</b>	0.362	0.363	<b>0.467</b>	<b>0.481</b>	0.357	<b>0.424</b>	0.405	0.389	0.419	0.370
4	0.294	0.325	0.315	0.309	0.310	<b>0.457</b>	<b>0.452</b>	0.322	<b>0.397</b>	<b>0.348</b>	0.329	0.344	0.340
5	0.280	<b>0.318</b>	<b>0.308</b>	0.289	0.306	<b>0.396</b>	<b>0.373</b>	0.279	<b>0.344</b>	<b>0.331</b>	<b>0.315</b>	0.299	0.306
6	0.260	<b>0.305</b>	<b>0.294</b>	0.271	<b>0.295</b>	<b>0.344</b>	<b>0.330</b>	0.247	<b>0.301</b>	<b>0.312</b>	<b>0.299</b>	0.269	0.281
7	0.232	<b>0.285</b>	<b>0.274</b>	0.254	<b>0.277</b>	<b>0.308</b>	<b>0.296</b>	0.225	<b>0.271</b>	<b>0.289</b>	<b>0.275</b>	0.248	0.260
8	0.207	<b>0.266</b>	<b>0.256</b>	0.239	<b>0.259</b>	<b>0.263</b>	<b>0.260</b>	0.203	<b>0.238</b>	<b>0.269</b>	<b>0.253</b>	0.232	0.243
9	0.185	<b>0.250</b>	<b>0.240</b>	0.228	<b>0.243</b>	<b>0.232</b>	<b>0.233</b>	0.188	0.216	<b>0.256</b>	<b>0.232</b>	0.220	0.230
10	0.166	<b>0.230</b>	<b>0.220</b>	<b>0.218</b>	<b>0.222</b>	0.210	<b>0.211</b>	0.177	0.201	<b>0.245</b>	0.207	0.210	0.216
11	0.155	<b>0.214</b>	<b>0.205</b>	<b>0.211</b>	<b>0.205</b>	0.192	0.190	0.166	0.187	<b>0.237</b>	0.187	0.201	0.192
12	0.148	<b>0.193</b>	<b>0.188</b>	<b>0.186</b>	<b>0.187</b>	0.177	0.172	0.157	0.175	<b>0.199</b>	0.168	0.195	0.168
13	0.144	<b>0.176</b>	<b>0.174</b>	<b>0.168</b>	<b>0.172</b>	0.164	0.159	0.150	0.166	0.171	0.155	0.189	0.158
14	0.140	<b>0.165</b>	<b>0.164</b>	<b>0.158</b>	<b>0.162</b>	0.154	0.151	0.145	0.158	0.157	0.146	0.184	0.147
15	0.137	<b>0.156</b>	<b>0.156</b>	<b>0.151</b>	<b>0.153</b>	0.147	0.146	0.141	0.152	0.149	0.140	0.180	0.142
16	0.134	<b>0.149</b>	<b>0.149</b>	<b>0.145</b>	<b>0.147</b>	0.142	0.142	0.137	0.147	0.142	0.136	0.176	0.136
17	0.132	<b>0.144</b>	<b>0.144</b>	<b>0.140</b>	<b>0.142</b>	0.139	0.139	0.134	0.143	0.136	0.133	0.173	0.133
18	0.129	<b>0.139</b>	<b>0.140</b>	<b>0.135</b>	<b>0.137</b>	0.136	0.136	0.131	0.140	0.132	0.130	0.170	0.129
19	0.127	<b>0.135</b>	<b>0.136</b>	<b>0.132</b>	<b>0.133</b>	0.134	0.134	0.129	0.137	0.129	0.127	0.167	0.127
20	<b>0.126</b>	<b>0.131</b>	<b>0.132</b>	<b>0.129</b>	<b>0.130</b>	0.131	0.132	0.127	0.134	0.126	0.125	0.165	0.124
21	<b>0.124</b>	<b>0.128</b>	<b>0.129</b>	<b>0.126</b>	<b>0.126</b>	0.130	0.131	0.125	0.132	0.124	0.123	0.163	0.123
22	<b>0.123</b>	<b>0.125</b>	<b>0.126</b>	<b>0.124</b>	<b>0.123</b>	0.128	0.129	0.124	0.130	0.122	0.121	0.161	0.122
23	<b>0.121</b>	<b>0.123</b>	<b>0.123</b>	<b>0.121</b>	<b>0.121</b>	0.127	0.128	0.122	0.129	0.120	0.120	0.159	0.120
24	<b>0.120</b>	<b>0.121</b>	<b>0.120</b>	<b>0.119</b>	<b>0.119</b>	0.126	0.127	0.121	0.127	0.118	0.118	0.157	0.118
25	<b>0.119</b>	<b>0.119</b>	<b>0.118</b>	<b>0.118</b>	<b>0.117</b>	0.125	0.126	0.120	0.126	0.117	0.117	0.156	0.116

Tabelle 3.9: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten  $I_{eff}$  (nach Zubau – Teil 2)

$v_{hub}$	W23[A]	W41[A]	W52[A]	W58[A]	W59[A]	W61[A]	W65[A]	W68[A]	W69[S2]	W70[S2]	W23[A]	Referenz Klasse A	Referenz Klasse S2
3	0.398	<b>0.422</b>	<b>0.459</b>	<b>0.447</b>	<b>0.426</b>	<b>0.462</b>	0.499	0.348	<b>0.340</b>	0.318	0.398	0.419	0.332
4	0.338	<b>0.391</b>	<b>0.435</b>	<b>0.412</b>	<b>0.389</b>	<b>0.431</b>	0.456	0.293	<b>0.288</b>	0.267	0.338	0.344	0.282
5	0.296	<b>0.328</b>	<b>0.365</b>	<b>0.348</b>	<b>0.327</b>	<b>0.367</b>	0.392	0.254	<b>0.276</b>	0.243	0.296	0.299	0.253
6	<b>0.270</b>	<b>0.282</b>	<b>0.307</b>	<b>0.303</b>	<b>0.283</b>	<b>0.323</b>	0.352	0.230	<b>0.262</b>	0.225	<b>0.270</b>	0.269	0.233
7	<b>0.250</b>	<b>0.250</b>	<b>0.265</b>	<b>0.271</b>	<b>0.252</b>	<b>0.292</b>	0.320	0.212	<b>0.244</b>	0.208	<b>0.250</b>	0.248	0.219
8	0.232	0.222	0.226	<b>0.238</b>	0.224	<b>0.262</b>	0.285	0.197	<b>0.228</b>	0.194	0.232	0.232	0.208
9	<b>0.222</b>	0.204	0.203	0.215	0.203	<b>0.242</b>	0.264	0.185	<b>0.213</b>	0.179	<b>0.222</b>	0.220	0.200
10	<b>0.212</b>	0.190	0.188	0.198	0.187	<b>0.227</b>	0.251	0.175	<b>0.197</b>	0.168	<b>0.212</b>	0.210	0.193
11	<b>0.204</b>	0.179	0.176	0.177	0.171	<b>0.204</b>	0.213	0.167	0.184	0.158	<b>0.204</b>	0.201	0.188
12	0.173	0.166	0.164	0.162	0.158	0.184	0.186	0.159	0.171	0.150	0.173	0.195	0.183
13	0.153	0.150	0.155	0.152	0.149	0.171	0.171	0.153	0.161	0.144	0.153	0.189	0.179
14	0.143	0.142	0.148	0.145	0.143	0.160	0.159	0.147	0.153	0.140	0.143	0.184	0.176
15	0.136	0.136	0.143	0.140	0.139	0.152	0.152	0.143	0.146	0.136	0.136	0.180	0.173
16	0.132	0.132	0.140	0.136	0.135	0.145	0.146	0.139	0.141	0.133	0.132	0.176	0.171
17	0.128	0.128	0.136	0.133	0.132	0.140	0.141	0.136	0.137	0.130	0.128	0.173	0.169
18	0.124	0.125	0.134	0.130	0.129	0.135	0.137	0.133	0.133	0.128	0.124	0.170	0.167
19	0.122	0.122	0.131	0.127	0.127	0.132	0.133	0.131	0.130	0.126	0.122	0.167	0.165
20	0.119	0.120	0.128	0.125	0.124	0.128	0.130	0.128	0.127	0.124	0.119	0.165	0.163
21	0.117	0.118	0.126	0.122	0.122	0.125	0.127	0.126	0.125	0.122	0.117	0.163	0.162
22	0.115	0.115	0.124	0.120	0.120	0.123	0.125	0.124	0.122	0.120	0.115	0.161	0.161
23	0.113	0.114	0.122	0.118	0.118	0.120	0.122	0.122	0.120	0.118	0.113	0.159	0.159
24	0.111	0.112	0.121	0.116	0.116	0.118	0.120	0.120	0.118	0.116	0.111	0.157	0.158
25	0.109	0.110	0.119	0.115	0.114	0.115	0.118	0.118	0.116	0.114	0.109	0.156	0.157
DIBt 1993	-	-	-	-	-	-	<b>0.269</b>	-	-	-	-	0.200	-

### 3.3.3.4 Geforderte sektorielle Betriebsbeschränkungen (WSM)

Um die Überschreitungen hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität an betroffenen Bestands-WEA zu verhindern bzw. nicht weiter zu erhöhen, sind die folgenden sektoriellen Betriebsbeschränkungen notwendig.

Tabelle 3.10: Geforderte Betriebsbeschränkungen zum Schutz von W15

WEA	Start WSM [°]	Ende WSM [°]	Startwindgeschwindigkeit [m/s]	Endwindgeschwindigkeit [m/s]	Betriebsmodus
W2	38	88	$v_{in}$	10.5	Abschaltung
Alternativ: W15	38	88	$v_{in}$	10.5	Abschaltung
W4	119	159	$v_{in}$	8.5	Abschaltung
Alternativ: W15	119	159	$v_{in}$	8.5	Abschaltung

Tabelle 3.11: Geforderte Betriebsbeschränkungen zum Schutz von W16

WEA	Start WSM [°]	Ende WSM [°]	Startwindgeschwindigkeit [m/s]	Endwindgeschwindigkeit [m/s]	Betriebsmodus
W1	145	187	5.5	7.5	Abschaltung
Alternativ: W16	145	187	5.5	7.5	Abschaltung
W2	86	134	4.5	9.5	Abschaltung
Alternativ: W16	86	134	4.5	9.5	Abschaltung

Tabelle 3.12: Geforderte Betriebsbeschränkungen zum Schutz von W69

WEA	Start WSM [°]	Ende WSM [°]	Startwindgeschwindigkeit [m/s]	Endwindgeschwindigkeit [m/s]	Betriebsmodus
W2	164	193	5.5	7.5	Abschaltung
Alternativ: W69	164	193	5.5	7.5	Abschaltung
W3	139	169	5.5	6.5	Abschaltung
Alternativ: W69	139	169	5.5	6.5	Abschaltung
W4	156	202	$v_{in}$	10.5	Abschaltung
Alternativ: W69	156	202	$v_{in}$	10.5	Abschaltung
W5	117	153	5.5	7.5	Abschaltung
Alternativ: W69	117	153	5.5	7.5	Abschaltung

### 3.4 Schräganströmung $\delta$

Da es sich bei keinem Anlagenstandort einer nach DIBt 2012 typengeprüften neu geplanten Anlage um einen nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] topografisch komplexen Standort handelt, sind die Nachweise nach Abschnitt 1.2.2 nicht zu führen. Die Ausweisung der Werte erfolgt rein informativ und ein Vergleich mit den Auslegungswindbedingungen erfolgt im vorliegenden Gutachten nicht. Die Werte können jedoch einer eventuell erforderlichen Lastrechnung durch den Anlagenhersteller zu Grunde gelegt werden.

Die Ermittlung der Schräganströmung  $\delta_{NH}$  erfolgt gemäß [6] und entspricht der Neigung der angenäherten Ebene mit einem Radius  $5 z_{hub}$  vor der WEA und  $2 z_{hub}$  hinter der WEA gegenüber der horizontalen Mittelgeraden des betrachteten Sektors.

Die folgende Tabelle 3.13 stellt die Ergebnisse der ermittelten Schräganströmung  $\delta_{NH}$  dar.

Tabelle 3.13 Standortmittelwert der Schräganströmung  $\delta_{NH}$  der neu geplanten WEA

Interne W-Nr.	$\delta_{NH}$ [°]
W1	-1.3
W2	-1.7
W3	0.0
W4	-0.9
W5	0.3

### 3.5 Höhenexponent $\alpha$

Da es sich bei keinem Anlagenstandort einer nach DIBt 2012 typengeprüften neu geplanten Anlage um einen nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] topografisch komplexen Standort handelt, sind die Nachweise nach Abschnitt 1.2.2 nicht zu führen. Die Ausweisung der Werte erfolgt rein informativ und ein Vergleich mit den Auslegungswindbedingungen erfolgt im vorliegenden Gutachten nicht. Die Werte können jedoch einer eventuell erforderlichen Lastrechnung durch den Anlagenhersteller zu Grunde gelegt werden.

Die Ermittlung des Höhenexponenten erfolgt entsprechend der DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] auf Basis der ermittelten Rauigkeiten am Standort. Einflüsse der Stabilität der Atmosphäre werden dabei nicht berücksichtigt. Die Ermittlung berücksichtigt keinen Einfluss der Topografie, der bei den hier untersuchten Nabenhöhen vernachlässigt werden kann, solange sich keine schroffen Geländekanten oder Steilhänge in unmittelbarer Umgebung der betrachteten WEA befinden. Der über alle Windrichtungen energiegewichtete Standortmittelwert des Höhenexponenten  $\alpha_{NH}$  ist für alle zu betrachtenden Anlagen in einem Bereich von der unteren Blattspitze bis zur oberen Blattspitze zu ermitteln.

Die folgende Tabelle 3.14 stellt die Ergebnisse der Standortmittelwerte des Höhenexponenten  $\alpha_{NH}$  dar.

Tabelle 3.14 Standortmittelwert des Höhenexponenten  $\alpha_{NH}$  der neu geplanten WEA

Interne W-Nr.	$\alpha_{NH}$ [-]
W1	0.17
W2	0.17
W3	0.17
W4	0.17
W5	0.17

### 3.6 Luftdichte $\rho$

Da es sich bei keinem Anlagenstandort einer nach DIBt 2012 typengeprüften neu geplanten Anlage um einen nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] topografisch komplexen Standort handelt, sind die Nachweise nach Abschnitt 1.2.2 nicht zu führen. Die Ausweisung der Werte erfolgt rein informativ und ein Vergleich mit den Auslegungswindbedingungen erfolgt im vorliegenden Gutachten nicht. Die Werte können jedoch einer eventuell erforderlichen Lastrechnung durch den Anlagenhersteller zu Grunde gelegt werden.

Die Berechnung der mittleren Luftdichte  $\rho_{NH}$  auf Nabenhöhe der jeweiligen WEA erfolgt entsprechend der Norm DIN ISO 2553 [17]. Als Datengrundlage dient die mittlere Temperatur in 2 m über Grund, die in einem 1 km Raster über den Zeitraum von 1981 – 2010 vorliegt [18] und entsprechend [17] auf die zu untersuchende Nabenhöhe umgerechnet wird.

Die folgende Tabelle 3.15 stellt die Ergebnisse des Standortmittelwertes der Luftdichte  $\rho_{NH}$  für jede zu untersuchende WEA dar.

*Tabelle 3.15: Standortmittelwert der Luftdichte  $\rho_{NH}$  der neu geplanten WEA*

Interne W-Nr.	$\rho_{NH}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
W1	1.176
W2	1.179
W3	1.177
W4	1.179
W5	1.177

### 3.7 Extreme Turbulenzintensität $I_{ext}$

Da es sich bei keinem Anlagenstandort einer nach DIBt 2012 typengeprüften neu geplanten Anlage um einen nach DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] topografisch komplexen Standort handelt, sind die Nachweise nach Abschnitt 1.2.2 nicht zu führen. Die Ausweisung der Werte erfolgt rein informativ und ein Vergleich mit den Auslegungswindbedingungen erfolgt im vorliegenden Gutachten nicht. Die Werte können jedoch einer eventuell erforderlichen Lastrechnung durch den Anlagenhersteller zu Grunde gelegt werden.

Die Ermittlung der Extremturbulenzintensität erfolgt durch die Betrachtung aller auftretenden Nachlaufsituationen und stellt das Ergebnis mit dem höchsten Wert, im Zentrum aller betrachteten Nachlaufsituationen dar. Wenn keine Nachlaufsituationen zu berücksichtigen sind, wird der Wert der höchsten repräsentativen Turbulenzintensität ausgewiesen. Entsprechend [6] berücksichtigen alle ausgewiesenen Werte den jeweiligen anzusetzenden Turbulenzstrukturparameter  $C_{CT}$ .

Die folgende Tabelle 3.16 stellt die ermittelten extremen Turbulenzintensitäten  $I_{ext, NH}$  in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit dar.

Tabelle 3.16: Ermittelte extreme Turbulenzintensitäten  $I_{ext, NH}$

$v_{hub}$	W1	W2	W3	W4	W5
3	0.431	0.431	0.415	0.412	0.429
4	0.366	0.366	0.352	0.350	0.364
5	0.364	0.364	0.346	0.315	0.362
6	0.349	0.349	0.331	0.290	0.347
7	0.323	0.323	0.306	0.272	0.322
8	0.300	0.300	0.285	0.256	0.299
9	0.279	0.279	0.265	0.246	0.277
10	0.252	0.252	0.240	0.237	0.251
11	0.232	0.232	0.221	0.229	0.230
12	0.209	0.209	0.201	0.199	0.208
13	0.191	0.191	0.184	0.177	0.190
14	0.178	0.178	0.172	0.165	0.177
15	0.167	0.167	0.163	0.157	0.166
16	0.160	0.160	0.155	0.150	0.158
17	0.153	0.153	0.149	0.145	0.152
18	0.147	0.147	0.144	0.140	0.146
19	0.142	0.142	0.140	0.137	0.141
20	0.138	0.138	0.136	0.133	0.137
21	0.134	0.134	0.132	0.131	0.133
22	0.130	0.130	0.128	0.128	0.129
23	0.127	0.127	0.125	0.126	0.126
24	0.124	0.124	0.123	0.124	0.123
25	0.122	0.122	0.121	0.122	0.121

## 4 Zusammenfassung

### 4.1 Neu geplante WEA

Es wurden die Standortbedingungen nach Abschnitt 1.2.1 für die neu geplanten WEA ermittelt und mit den Auslegungswerten verglichen. Dieser Vergleich hat gezeigt, dass

- i. W1 – W5 keine Überschreitung der mittleren Windgeschwindigkeit  $v_{\text{hub, NH}}$  im Vergleich zur Auslegungswindgeschwindigkeit  $v_{\text{hub, TP}}$  aufweisen (siehe Abschnitt 3.2.1),
- ii. W1 – W5 an einem Standort errichtet werden sollen, der den Auslegungswert der 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{\text{m50, TP}}$  nicht überschreitet (siehe Abschnitt 3.2.2) und
- iii. W1 – W5 Überschreitungen der effektiven Turbulenzintensität  $I_{\text{eff}}$  gegenüber den Auslegungswerten aufweisen (siehe Abschnitt 3.3.3.3).

Für die WEA W1 – W5 hat eine seitens des Herstellers Vestas durchgeführte Überprüfung der standortspezifischen Lasten der WEA, in der geplanten Konfiguration nach Tabelle 2.1, anhand der dem Hersteller zur Verfügung gestellten Ergebnisse aus Kapitel 3 ergeben, dass die Auslegungslasten der WEA nicht überschritten werden [25]. Die Ergebnisse in [25] wurden von der I17-Wind GmbH & Co. KG hinsichtlich der berücksichtigten Eingangsdaten geprüft und werden als richtig vorausgesetzt.

Die Standorteignung gemäß DIBt 2012 [1.1] ist für die WEA W1 – W5 unter Berücksichtigung der standortspezifischen Lastrechnung [25] durch das vorliegende Gutachten nachgewiesen.

Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse zum Nachweis der Standorteignung der geplanten WEA zusammenfassend dar.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse geplante WEA

Interne W-Nr.	Hersteller	WEA Typ	NH [m]	FEH [m]	Standorteignung gemäß DIBt 2012 nachgewiesen
W1	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	0.0	Ja
W2	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	0.0	Ja
W3	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	0.0	Ja
W4	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	0.0	Ja
W5	Vestas	V172-7.2 MW	175.0	0.0	Ja

## 4.2 Bestehende WEA

### 4.2.1 Nachweis der Standorteignung durch den Vergleich mit den Auslegungswerten

Für die Bestands-WEA W12, W68 und W70 konnte die nach DIBt 2012 [1.1] nachzuweisende Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität durch den Vergleich mit den Auslegungswerten nachgewiesen werden.

Die Bestands-WEA W8, W9, W13, W23, W41, W52, W58, W59, W61 und W65 weisen Überschreitungen der effektiven Turbulenzintensität nach der Richtlinie DIBt 2012 [1.1] auf. Durch einen Vergleich der Situation vor, mit der Situation nach dem geplanten Zubau konnte gezeigt werden, dass der geplante Zubau keinen signifikanten Einfluss auf die Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensitäten der WEA W8, W9, W13, W23, W41, W52, W58, W59, W61 und W65 hat. Bei diesem Vergleich wurde die Erhöhung der effektiven Turbulenzintensität durch den Zubau und ggf. deren Einfluss auf die PEL nach [20] untersucht. Somit ist die Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität für diese WEA unter Maßgabe einer in deren Genehmigungsverfahren nachgewiesenen Standorteignung weiterhin nachgewiesen.

Die Bestands-WEA W16 und W69 weisen Überschreitungen hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität auf, die durch den Zubau verursacht werden. Um die Standorteignung der WEA W16 und W69 auch nach Zubau nachweisen zu können, sind die in Abschnitt 3.3.3.4 aufgeführten sektoriellen Betriebsbeschränkungen notwendig.

Die Bestands-WEA W15 weist sowohl vor Zubau als auch nach Zubau Überschreitungen hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität auf, die durch den Zubau erhöht werden. Um die Standorteignung der WEA W15 auch nach Zubau nachweisen zu können bzw. die Überschreitungen der effektiven Turbulenzintensität nicht signifikant zu erhöhen, sind die in Abschnitt 3.3.3.4 aufgeführten sektoriellen Betriebsbeschränkungen notwendig. Bei der Festlegung der Betriebseinschränkungen wurde die Erhöhung der effektiven Turbulenzintensität durch den Zubau und ggf. deren Einfluss auf die PEL nach [20] untersucht. Somit ist die Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität für diese WEA unter Maßgabe einer in deren Genehmigungsverfahren nachgewiesenen Standorteignung weiterhin nachgewiesen.

## 4.2.2 Zusammenfassung

Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse zum Nachweis der Standorteignung der Bestands-WEA zusammenfassend dar.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Ergebnisse Bestands-WEA

Interne W-Nr.	Hersteller	WEA Typ	NH [m]	FEH [m]	Standorteignung gemäß DIBt 2012 nachgewiesen
W8	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	0.0	Ja
W9	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	130.1	0.0	Ja
W12	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	0.0	Ja
W13	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	130.1	0.0	Ja
W15	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	0.0	Ja, siehe Abschnitt 3.3.3.4
W16	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	0.0	Ja, siehe Abschnitt 3.3.3.4
W23	Enercon	E-82 E2 / 2.300 kW	138.4	0.0	Ja
W41	Enercon	E-115 / 3.000 kW	149.0	0.0	Ja
W52	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	0.0	Ja
W58	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	0.0	Ja
W59	Enercon	E-126 EP3 / 4.000 kW	135.0	0.0	Ja
W61	Enercon	E-138 EP3 E2 / 4.200 kW	160.0	0.0	Ja
W65	Enercon	E-66 / 18.70	98.0	0.0	Ja
W68	Enercon	E-126 EP4 / 4.200 kW	135.0	0.0	Ja
W69	Nordex	N149/5700	164.0	0.0	Ja, siehe Abschnitt 3.3.3.4
W70	Nordex	N163/6.X	164.0	0.0	Ja

---

## 5 Standortbesichtigung

Entsprechend der Forderung in der Richtlinie DIBt Fassung Oktober 2012 [1.1] nach einer Standortbesichtigung wurde diese am 27.08.2023 durch den Auftraggeber durchgeführt [23].

Die Standortbesichtigung dient zur Ermittlung, bzw. zum Abgleich von Geländebeschaffenheit mit vorhandenen Satellitendaten zur Rauigkeit [13] und ggf. zu den Höhenlinien [14]. Mögliche turbulenzrelevante Einzelstrukturen wurden untersucht und dokumentiert. Die Standortdokumentation bestätigt die zu Grunde gelegten Rauigkeiten und die Ergebnisse zur Komplexität.

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ETM	Extremes Turbulenzmodell
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem von 1989
GK	Gauß-Krüger, Geländekategorie
H	Komplexitätskategorie Stark
IEC	International Electrotechnical Commission
L	Komplexitätskategorie Gering
M	Komplexitätskategorie Mittel
NA	Nationaler Anhang
NTM	Normales Turbulenzmodell
PEL	Pseudo-Äquivalente-Last
pdf	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
TK	Turbulenzkategorie, Auslegungsturbulenz
TP	Typenprüfung
UTM	Universal Transverse Mercator Projection
WEA	Windenergieanlage(n)
WGS84	World Geodetic System (letzte Revision in 2004)
WSM	Wind Sector Management, Sektorielle Betriebsbeschränkung
WV	Windverteilung
WZ	Windzone

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A$	Skalenparameter der Weibullverteilung	[m/s]
$C_{CT}$	Turbulenzstrukturparameter	[-]
$c_t$	Schubbeiwert	[-]
$D$	Rotordurchmesser	[m]
$FEH$	Fundamenterhöhung	[m]
$h_{WV}$	Höhe der Windbedingungen / Windverteilung über Grund	[m]
$I_{amb}$	Umgebungsturbulenzintensität	[-]
$i_c$	Komplexitätsindex	[-]
$I_{char}$	Charakteristische Turbulenzintensität	[-]
$I_{ext}$	Extreme Turbulenzintensität	[-]
$I_{eff}$	Effektive Turbulenzintensität auf Nabenhöhe	[-]
$I_{rep}$	Repräsentative Turbulenzintensität	[-]
$k$	Formparameter der Weibullverteilung	[-]
$\lambda$	Schnelllaufzahl	[-]
$m$	Wöhlerlinienkoeffizient	[-]
$NH$	Nabenhöhe	[m]
$p$	Sektorielle Häufigkeit	[%]
$P_N$	Nennleistung	[kW]
$s$	Dimensionsloser Abstand zwischen WEA, bezogen auf den jeweils größeren Rotordurchmesser	[-]

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\tau$	Lebensdauer	[a]
$TSI$	Index der Geländeneigung	[°]
$TVI$	Index der Geländeabweichung	[%]
$v_{ave}$	Jahresmittel der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	[m/s]
$v_{hub}$	Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	[m/s]
$v_{in}$	Einschaltwindgeschwindigkeit der WEA	[m/s]
$v_{m50}$	10-Minuten Mittelwert der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	[m/s]
$v_{out}$	Abschaltwindgeschwindigkeit der WEA	[m/s]
$v_r$	Nennwindgeschwindigkeit der WEA	[m/s]
$v_{ref}$	Auslegungswert des 10-Minuten Mittelwerts der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit	[m/s]
$X$	Rechtswert	[m]
$Y$	Hochwert	[m]
$z_0$	Rauigkeitslänge	[m]
$z_{hub}$	Nabenhöhe der betrachteten WEA	[m]
$\alpha$	Höhenexponent	[-]
$\delta$	Schräganströmung	[°]
$\rho$	Luftdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Standardabweichung der Windgeschwindigkeit	[m/s]
$\sigma_\sigma$	Standardabweichung der Turbulenzintensität	[-]

## Literaturverzeichnis

- [1.1] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Referat I 8 Bautechnisches Prüfamts Grundlagen der Standsicherheit; Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Oktober 2012 und korrigierte Fassung März 2015;*
- [1.2] *DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik; DKE/AK 383.0.01/Untergruppe DIBt2012 an die PG „Windenergieanlagen“ des DIBt; Anwendung der DIBt 2012 zur Prüfung der Standorteignung, 30.01.2015;*
- [2] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung März 2004; Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik Reihe B, Heft 8;*
- [3] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Richtlinie für Windkraftanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Juni 1993; 2. Überarbeitete Auflage 1995; Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik Reihe B, Heft 8;*
- [4] *International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1 Edition 2.0 International Standard Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements;*
- [5] *International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1 Edition 3.0 International Standard Wind turbines – Part 1: Design requirement; Mit Implementierung von 61400-1/A1, Amendment 1, 2009;*
- [6] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN IEC 61400-1:2019; Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC61400-1:2019; Deutsche Fassung EN IEC 61400-1:2019; Dezember 2019;*
- [7] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1:2011-08 Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005 + A1:2012); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005 + A1:2010;*
- [8] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1:2004 Windenergieanlagen – Teil 1: Sicherheitsanforderungen (IEC 61400-1:1999); Deutsche Fassung EN 61400-1:2004;*
- [9] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 mit DIN EN 1991-1-4:2010-12; Nationaler Anhang – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen: Windlasten;*
- [10] *ECN Solar & Wind Energy, J.W.M. Dekker und J.T.G. Pierik [Hrsg.]: European Wind Turbine Standards II, Petten, (NLD), 1998;*
- [11] *Deutsches Institut für Bautechnik; Windzonen nach Verwaltungsgrenzen; Windzonen\_nach\_Verwaltungsgrenzen.xlsx; Stand 02.06.2022;*
- [12] *European Wind Atlas, Risø National Laboratory, Roskilde (DK), 1989 Troen, Ib; Petersen, Erik L.;*
- [13] *European Environment Agency; Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 20 (final version); Veröffentlicht im Juni 2019;*
- [14] *U.S. Geological Survey Earth Resources Observation & Science Center (EROS); SRTM 1 Arc-Sec Global; Download am 02.12.2016;*
- [15] *Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, Windfarm Assessment Tool Version 3.3.0.128;*

- [16] *Frandsen, Sten T. (2007): Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters. Roskilde (DK);*
- [17] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN ISO 2533; Normatmosphäre; Dezember 1979;*
- [18] *Deutscher Wetterdienst; DWD Climate Data Center (CDC), Vieljährige mittlere Raster der Lufttemperatur (2m) für Deutschland 1981-2010, Version v1.0.;*
- [19.1] *OpenStreetMap und Mitwirkende; SRTM | Kartendarstellung: OpenTopoMap (CC-BY-SA); Siehe auch: <https://creativecommons.org>;*
- [19.2] *Microsoft Corporation; © 2019 Digital Globe © CNES (2019) Distribution Airbus DS; Siehe auch: <https://www.microsoft.com/en-us/maps/product>;*
- [20] *Rodenhausen M., Moser W., Hülsmann C., Bergemann C., Könker M., McKenna R.; Prüfung der Standorteignung für Windenergieanlagen: Ein pragmatischer Ansatz; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. Bautechnik 93 (2016) Heft 10;*
- [21] *Lackmann Phymetric GmbH; E-Mail mit dem Betreff: "WG: Turbulenzgutachten Fürstenberg" vom 29.08.2023; Daten zur Verfügung gestellt in WakeGuard® Layout-ID:2440247;*
- [22.1] *anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH; Abschätzung des langjährigen mittleren Windpotentials auf Basis des anemos Windatlas für Deutschland am Standort Fürstenberg, Nordrhein-Westfalen; Berichts-Nr.:23-323-7230737-Rev.00-WV-PP S; 28.06.2023;*
- [22.2] *entfällt;*
- [23] *Lackmann Flocke GbR und rentec Fürstenberg GmbH & Co. KG; Standortdokumentation für ein Gutachten zur Standorteignung nach DIBt 2012 für den Windpark Fürstenberg Deutschland; Bericht-Nr.: I17-SV-2023-277; 28.08.2023;*
- [24.1] *DNV Energy Systems Renewable Certification DNV Renewables Certification GmbH; VESTAS ENVENTUS V172 MIT 175 M NABENHÖHE, WINDZONE S, 25 JAHRE ENTWURFSLEBENSDAUER Gutachtliche Stellungnahme für Lastannahmen zur Turmberechnung der Vestas Turbinen; Berichtsnr.: L-08867b-A052-1; 24.04.2023;*
- [24.2] *Vestas Wind Systems A/S; Gutachterinformation Auslegungswerte Turbulenz EnVentus™ V172-7.2 MW 50/60 Hz 25 Jahre; Documentnr.: 0125-0417 V01; 19.05.2022;*
- [25] *Vestas Wind Systems A/S; Vestas Site Specific Load Calculation Fürstenberg – Germany; WS-Loads-C4C: 271064; Revision: 0; T13 0153-8026 Ver 00; 05.10.2023;*