



Gutachterliche Stellungnahme zur
Standorteignung nach DIBt 2012 für den
Windpark Freudenberg
Deutschland

Bericht Nr.: I17-SE-2017-142

Gutachterliche Stellungnahme zur Standorteignung nach DIBt 2012 für den
Windpark Freudenberg

Bericht-Nr. I17-SE-2017-142

Auftraggeber: EnBW Energie Baden-Württemberg AG
Schelmenwasenstraße 15
D-70567 Stuttgart

Auftragsnehmer: I17-Wind GmbH & Co. KG
Am Westersielzug 11
25840 Friedrichstadt
Tel.: 04881 – 936 498 - 0
Fax.: 04881 – 936 498 – 19
E-Mail: mail@i17-wind.de
Internet: www.i17-wind.de

Bearbeitet: Heiko Pauls (B. Eng.)

Geprüft: Guido Köhler (M. Sc.)

Datum: 31. Januar 2018

Haftungsausschluss und Urheberrecht

Die vorliegende Gutachterliche Stellungnahme wurde unabhängig, unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen nach derzeitigem Stand der Technik ausgeführt. Für die Daten, die nicht von der I17-Wind GmbH & Co. KG gemessen, erhoben und verarbeitet wurden, kann keine Garantie übernommen werden.

Urheber der vorliegenden Gutachterlichen Stellungnahme zur Standorteignung 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.

Die I17-Wind GmbH & Co. KG ist Mitglied im Sachverständigenbeirat des Bundesverbandes WindEnergie (BWE) e.V. und erfüllt damit die Voraussetzung zur Anerkennung der gutachterlichen Stellungnahme eines Sachverständigen gemäß Anlage 2.7/12 Fußnote 2 der Musterliste der Technischen Baubestimmungen über die örtlich auftretende Turbulenzbelastung und über die Zulässigkeit von vorgesehenen Abständen zu benachbarten Windenergieanlagen in Bezug auf die Standsicherheit der geplanten und bestehenden Anlagen.

Revisionsnummer	Revisionsdatum	Änderung	Bearbeitet
0	31.01.2018	Erstellung Bericht I17-SE-2017-142	Pauls

Bearbeitet

B. Eng Heiko Pauls,
Sachverständiger
Friedrichstadt, 31.01.2018



Gepprüft

M. Sc. Guido Köhler,
Sachverständiger
Friedrichstadt, 31.01.2018



Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung.....	7
1.1	Allgemeines	7
1.2	Geführte Nachweise.....	7
1.2.1	Prüfung der Standorteignung an nicht topografisch komplexen Standorten.....	8
1.2.2	Prüfung der Standorteignung an topografisch komplexen Standorten.....	8
1.2.3	Verfahren bei Überschreitungen.....	9
1.3	Abweichungen von den Richtlinien.....	9
2	Aufgabenstellung.....	10
2.1	Umfang der Stellungnahme	10
2.2	Standortbeschreibung.....	10
3	Vergleich der Windverhältnisse	12
3.1	Grundlagen	12
3.2	Auslegungswerte der geplanten WEA.....	12
3.2.1	Auslegungswerte der Senvion 3.4M140 EBC auf 160 m Nabenhöhe	12
3.3	Vorherrschende Windverhältnisse am Standort.....	13
3.3.1	Mittlere Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	13
3.3.2	50-Jahres-Windgeschwindigkeit.....	14
4	Vergleich der effektiven Turbulenzintensitäten I_{eff}	15
4.1	Grundlagen	15
4.2	Bedingungen am Standort.....	16
4.2.1	Windparkkonfiguration	16
4.3	Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität	17
4.3.1	Datengrundlage	17
4.3.2	Vorgehensweise	17
4.3.3	Untersuchung der topografischen Komplexität der Anlagenstandorte.....	18
4.3.4	Ermittlung des Turbulenzstrukturparameters	19
4.3.5	Repräsentative Turbulenzintensität.....	20
4.3.6	Modellunsicherheiten	20
4.4	Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität I_{eff}	21
4.4.1	Vorbemerkungen.....	21
4.4.2	Ergebnis	23
5	Erweiterter Vergleich für topografisch komplexe Standorte.....	24
5.1	Schräganströmung	24
5.1.1	Grundlagen	24
5.1.2	Ergebnis	24
5.2	Höhenexponent.....	25
5.2.1	Grundlagen	25

5.2.2	Ergebnis	25
5.3	Luftdichte	26
5.3.1	Grundlagen	26
5.3.2	Ergebnis	26
5.4	Extreme Turbulenzintensität	27
5.4.1	Grundlagen	27
5.4.2	Ergebnis	27
6	Zusammenfassung	28
7	Standortbesuch	29
7.1	Durchführung und Ergebnis	29
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	30
	Literaturverzeichnis	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration am Standort.....	11
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration	10
Tabelle 3.1: Auslegungswindbedingungen 3.4M140 EBC auf 160 m Nabenhöhe [21].....	12
Tabelle 3.2: Windverhältnisse am Standort auf einer Höhe 137 m ü. Grund [20].....	13
Tabelle 3.3: Mittlere Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe der geplanten Anlagen.....	13
Tabelle 3.4: Windzonenvergleich zwischen Standort und Typenprüfung bezogen auf DIBt 2012	14
Tabelle 4.1: Beschreibung der hinsichtlich I_{eff} auszuweisenden Anlagen	16
Tabelle 4.2: Komplexitätskriterien nach DIN EN 61400-1:2011-08 [5]	18
Tabelle 4.3: Standorte in topografisch komplexem Gelände.....	18
Tabelle 4.4: Anzusetzende Turbulenzstrukturparameter [5].....	19
Tabelle 4.5: Ermittelte Turbulenzstrukturparameter für alle in Betracht zu ziehenden Anlagen	19
Tabelle 4.6: Repräsentative Turbulenzintensität für einen Standort.....	20
Tabelle 4.7: Der Turbulenzermittlung zu Grunde gelegte Richtlinien.....	23
Tabelle 4.8: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten I_{eff}	23
Tabelle 5.1: Schräganströmung auf Nabenhöhe	24
Tabelle 5.2: Ermittelte Höhenexponenten über der Rotorkreisfläche	25
Tabelle 5.3: Kennwerte der Klimastation	26
Tabelle 5.4: Mittlere Standortluftdichte	26
Tabelle 5.5: Extreme Turbulenzintensität I_{ext}	27
Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Ergebnisse Neuanlagen	28

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“ [1.1] veröffentlicht und im März 2015 eine korrigierte Fassung herausgegeben [1], auf deren Grundlage die vorliegende Gutachterliche Stellungnahme erarbeitet wurde.

1.2 Geführte Nachweise

Die Richtlinie DIBt 2012 [1] schreibt ein alternatives, vereinfachtes Verfahren zur Prüfung der Standorteignung vor, das jedoch nur angewendet werden darf, wenn der Standort nach DIN EN 61400-1:2011-08 [5] als nicht topografisch komplex eingestuft wird. Ist dieser als topografisch komplex einzustufen, wird der vereinfachte Nachweis der Standorteignung um die Kriterien nach DIN EN 61400-1:2011-08 [5] Abschnitt 11.9 erweitert. Die folgenden Abschnitte stellen beide Verfahrensweisen dar. Die Vergleiche der Auslegungswerte nach Typen- bzw. Einzelprüfung 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]. Für bestehende Anlagen, die nach der DIBt 1993 [3] oder DIBt 2004 [2] typen- / bzw. einzelgeprüft wurden, darf im Falle einer Parkänderung / -erweiterung der Nachweis der Standorteignung auch weiterhin nach dem Verfahren der DIBt 2004 erbracht werden [1].

Die Richtlinie DIBt 2012 [1] lässt folgende Möglichkeiten, bzw. mögliche auftretende Konfigurationen, in Bezug auf die Typenprüfung und die darin zu Grunde gelegte 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] Richtlinie zu Grunde.

Im Januar 2015 wurde seitens des DKE ein Vorschlag erarbeitet, der dem DIBt übersandt wurde [1.2]. Eine Einarbeitung bzw. Kommentierung in die Richtlinie DIBt 2012 [1] dieses Vorschlages steht noch aus. Bis zur Kommentierung bzw. Einarbeitung des erarbeiteten Vorschlages in die Richtlinie werden für die zwei beschriebenen Fälle, die nicht durch die DIBt 2012 [1] abgedeckt 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], 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 [6], bzw. IEC 61400-1 ed.2 [8].
- ii. Da davon auszugehen ist, dass für bereits genehmigte, bzw. bestehende Anlagen mit einer Typenprüfung nach DIBt 2012 [1] die Standorteignung bezüglich der Windbedingungen 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_{eff} , welche durch einen Zubau erhöht werden kann.

Die dargestellte Verfahrensweise wurde in Abstimmung mit den Anlagenherstellern erarbeitet und findet solange Anwendung bis eine eindeutige Regelung durch das DIBt erfolgt ist [1].

1.2.1 Prüfung der Standorteignung an nicht topografisch komplexen Standorten

Die nach der DIBt Richtlinie Fassung 2012 [1] vereinfachte Prüfung zur Standorteignung verlangt folgende, zu erbringende Nachweise:

- 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 [5] zwischen $0.2 v_{50}(h)$ und $0.4 v_{50}(h)$ 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 [7] für nicht ebene Geländelagen sind ggf. zu beachten) oder
 - 2) die 50-Jahreswindgeschwindigkeit $v_{50}(h)$ gemäß Typen-/Einzelprüfung deckt die 50-Jahreswindgeschwindigkeit am Standort ab (z.B. Nachweis durch ein Extremwindgutachten).

1.2.2 Prüfung der Standorteignung an topografisch komplexen Standorten

Handelt es sich nach Abschnitt 11.2 der DIN EN 61400-1:2011-08 [5] um einen topografisch komplexen Standort und liegt der zu untersuchenden WEA eine Typen-/Einzelprüfung nach DIBt 2012 [1] zu Grunde, wird die vereinfachte Standorteignungsprüfung nach Abschnitt 1.2.1 um folgende Berechnungen, bzw. Nachweise, basierend auf DIN EN 61400-1:2011-08 [5], erweitert:

- i. Die sektoriellen Anströmwinkel auf Nabenhöhe müssen ermittelt und der Nachweis erbracht werden, dass der Anströmwinkel auf Nabenhöhe den vorgegebenen Wert von $\pm 8^\circ$, bzw. den in der Typen-/Einzelprüfung angegebenen Wert, nicht überschreitet.
- ii. Der Standortmittelwert des Höhenexponenten α muss ermittelt und der Nachweis erbracht werden, dass dieser für jeden Sektor unter dem Maximal-, bzw. über dem Minimalwert liegt, der in der Norm [5] ($0 \leq \alpha \leq 0.2$) oder der Typen-/Einzelprüfung angegeben ist.
- iii. Der Standortmittelwert der Luftdichte darf bei allen Windgeschwindigkeiten größer gleich der Nennwindgeschwindigkeit den in der Norm [5] ($\rho \leq 1.225 \text{ kg/m}^3$) oder der Typen-/Einzelprüfung angegebenen Wert nicht überschreiten.
- iv. Die standortspezifische extreme Turbulenz muss ermittelt und der Nachweis erbracht werden, dass die Auslegungswerte des ETM im Sektor mit der höchsten mittleren Windgeschwindigkeit nicht überschritten werden.

1.2.3 Verfahren bei Überschreitungen

Wenn eine der Bedingungen aus Abschnitt 1.2 nicht eingehalten wird, kann die Standorteignung auf Basis eines Lastvergleiches der standortspezifischen Betriebsfestigkeits- und/oder Extremlasten mit den Lastannahmen der Typen-/Einzelprüfung, entsprechend den Lastfällen im Produktionsbetrieb DLC 1.1 – 1.5, nachgewiesen werden [5]. Hierzu werden die der Typen-/Einzelprüfung zu Grunde gelegten Auslegungslasten mit den standortspezifischen Lasten, die auf Basis der Ergebnisse aus der vorliegenden Gutachterlichen Stellungnahme ermittelt werden, verglichen. Wenn sich zeigt, dass die standortspezifischen Lasten die Auslegungslasten nicht überschreiten, ist eine Standorteignung gegeben. Lässt sich nicht nachweisen, dass die standortspezifischen Lasten eingehalten werden, muss die Anlage gegebenenfalls mit einer sektoriellen Betriebseinschränkung betrieben werden, um die Lasten soweit zu reduzieren, dass sie unterhalb der Auslegungslasten liegen oder die Standorteignung kann nicht nachgewiesen werden. Der Nachweis wird durch den/die Hersteller der betroffenen Anlagen geführt und der I17-Wind GmbH & Co. KG im Rahmen einer Geheimhaltungsvereinbarung vorgelegt.

1.3 Abweichungen von den Richtlinien

Folgende, von der DIBt 2012 Richtlinie [1] abweichende, Verfahren wurden für die vorliegende gutachterliche Stellungnahme zur Standorteignung gewählt:

- I. Generell ist die Umgebungsturbulenzintensität nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [7] zu ermitteln, wobei jedoch lokale Rauigkeiten nicht direkt berücksichtigt werden, sondern nur als Geländekategorie Eingang in die Berechnung finden. Die Richtlinie des Deutschen Institutes für Bautechnik DIBt sieht die Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität für die Geländekategorie I und II nach einer vereinfachten Formel vor [1]. Um den tatsächlichen Rauigkeiten am Standort Rechnung zu tragen, wird die Umgebungsturbulenzintensität auf Basis eines invers logarithmischen Profils berechnet, das die Anordnung und den Abstand der Rauigkeitselemente berücksichtigt und die Werte nach [7] mit abdeckt.
- II. Die effektiven Turbulenzintensitäten werden bis zur Abschaltwindgeschwindigkeit der zu betrachtenden Anlage ermittelt und nachgewiesen.
- III. Bezüglich der effektiven Turbulenzintensität werden grundsätzlich alle Anlagen im Umkreis des 10-fachen Rotordurchmessers RD der geplanten Anlage(n) in die Betrachtung einbezogen und nachgewiesen.
- IV. Der Standortmittelwert der Luftdichte wird abdeckend für alle Windgeschwindigkeiten angegeben.
- V. Die standortspezifische extreme Turbulenz wird nicht nur für den Sektor mit der höchsten mittleren Windgeschwindigkeit, sondern für alle Sektoren ermittelt. Der höchste ermittelte Wert wird ausgewiesen und mit der Referenzkurve des ETM verglichen.

Im vorliegenden Nachweis ist mit der mittleren Windgeschwindigkeit v_{ave} immer das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe gemeint.

2 Aufgabenstellung

2.1 Umfang der Stellungnahme

Da es sich bei einzelnen nach DIBt 2012 typen-/einzelgeprüften Anlagenstandorten im Windpark Freudenberg nach DIN EN 61400-1:2011-08 [5] um topografisch komplexe Standorte handelt, findet das erweiterte Verfahren nach Abschnitt 1.2.2 für diese Anlagen Anwendung. Befinden sich Anlagen mit einer Typen-/Einzelprüfung nach DIBt 2004 [2] an topografisch komplexen Standorten, findet für diese weiterhin das vereinfachte Verfahren nach Abschnitt 1.2.1 Anwendung.

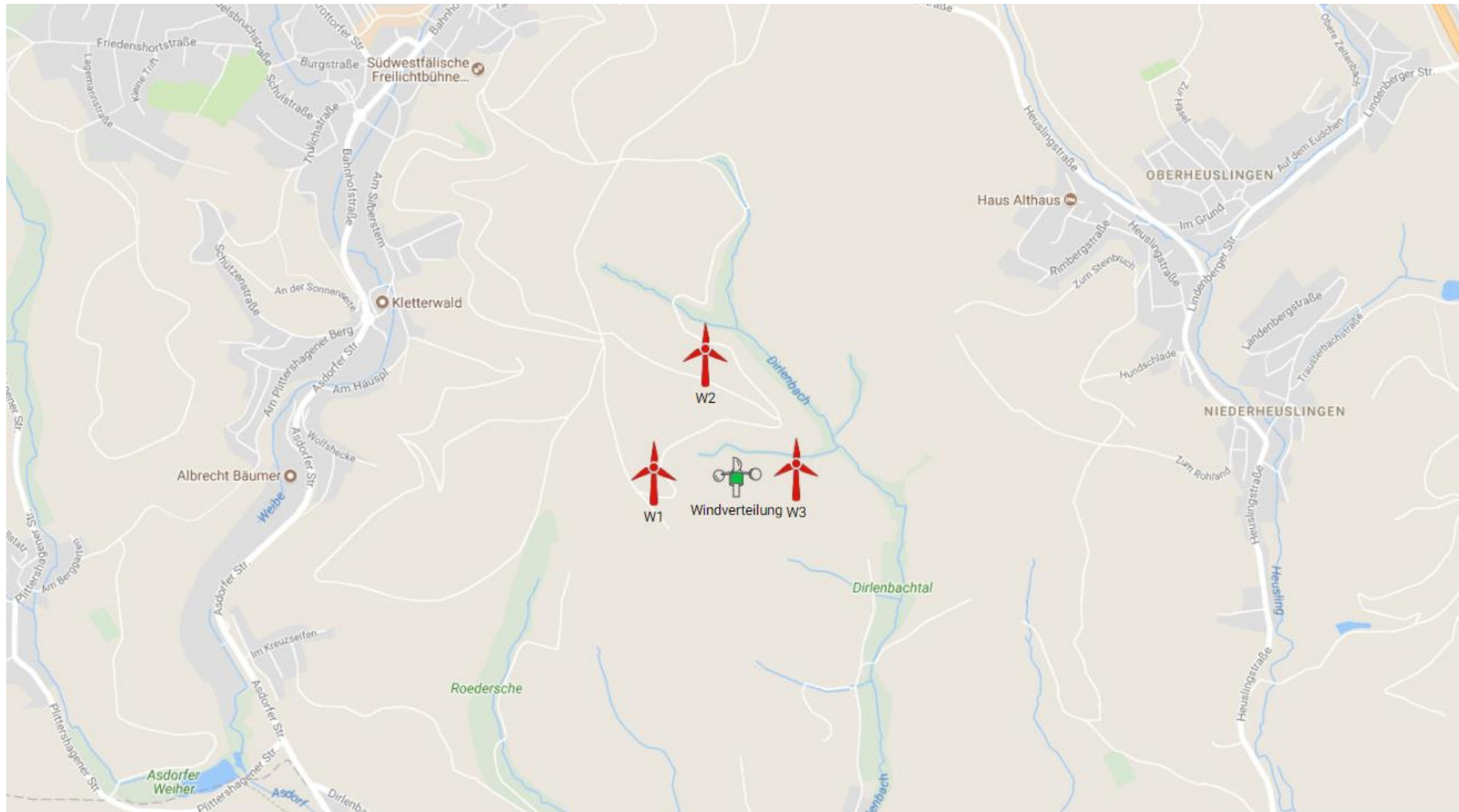
2.2 Standortbeschreibung

Der Auftraggeber plant die Errichtung von drei Windenergieanlagen (WEA) des Typs Senvion 3.4M140 EBC auf 160 m Nabenhöhe. In der näheren Umgebung von 2 km des Standortes sind keine weiteren Anlagen errichtet. Das Standortzentrum liegt ca. 1.5 km südöstlich der Stadt Freudenberg im Landkreis Siegen-Wittgenstein in Nordrhein-Westfalen. Die I17-Wind GmbH & Co. KG wurde damit beauftragt, eine gutachterliche Stellungnahme zur Standorteignung nach der „Richtlinie für Windenergieanlagen...“ DIBt 2012 [1] für alle zu betrachtenden WEA abzugeben, welche an den in Tabelle 2.1 aufgeführten und in Abbildung 2.1 dargestellten Koordinaten errichtet werden sollen. Im vorliegenden Gutachten beziehen sich alle Bezeichnungen auf die interne, laufende W-Nummer.

Interne lfd. Nr.	Neu / Bestand	Bezeichnung Kunde	Hersteller	WEA	Nennleistung [kW]	NH [m]	UTM ETRS89 Zone 32	
							X [m]	Y [m]
W1	Neu	WEA01	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	160.0	421677	5637624
W2	Neu	WEA02	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	160.0	421839	5637980
W3	Neu	WEA03	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	160.0	422109	5637629

Tabelle 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration

Im vorgegeben Windparklayout ergibt sich der geringste relative Abstand einer neu geplanten Anlage zu einer anderen Anlage von 2.79 Rotordurchmessern (RD). Dies betrifft die Anlagen W1 und W2.



✶ Neuanlagen
 ✶ Bestandsanlagen
 ✶ ✶ ✶ Windverteilung

Abbildung 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration am Standort

3 Vergleich der Windverhältnisse

3.1 Grundlagen

Vom Auftraggeber wurden standortbezogene Windverhältnisse übermittelt [20] und von der I17-Wind GmbH & Co. KG auf Plausibilität geprüft. Der Vergleich der Windverhältnisse am Standort mit den Auslegungsbedingungen ist nach DIBt 2012 [1] nur für Neuanlagen zu führen, siehe Tabelle 2.1.

3.2 Auslegungswerte der geplanten WEA

Es muss der Nachweis erbracht werden, dass die Windbedingungen auf Nabenhöhe die der Typen-/Einzelprüfung zu Grunde gelegten Werte nicht überschreiten. Dieser Nachweis bezieht sich auf die mittlere Windgeschwindigkeit v_{ave} und die 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} . Die Auslegungswindbedingungen werden entweder der Typen-/Einzelprüfung entnommen, oder nach den resultierenden Gleichungen bezüglich der Windzone und der Geländekategorie nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 mit DIN EN 1991-1-4:2010-12 [7] ermittelt, wenn die zu betrachtende Anlage nach der DIBt Fassung 2012 [1] typen-/einzelgeprüft ist, bzw. eine solche Typen-/Einzelprüfung angestrebt wird. Handelt es sich um eine zu betrachtende Anlage, deren Typen-/Einzelprüfung auf Auslegungswerten nach der DIBt Richtlinie Fassung 2004 [2] basiert und der Typen-/Einzelprüfung keine Auslegungswerte entnommen werden können, werden die Auslegungswindbedingungen entweder nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 mit DIN EN 1991-1-4:2010-12 [7] oder entsprechend der Staudruckzonen (Windzonen) und Gleichungen aus Anhang B der DIBt Fassung 2004 [2] berechnet. Entscheidend ist, welche Richtlinie der Typen-/Einzelprüfung zu Grunde liegt.

3.2.1 Auslegungswerte der Senvion 3.4M140 EBC auf 160 m Nabenhöhe

Die geplante Anlage des Typs Senvion 3.4M140 EBC auf 160 m Nabenhöhe ist basierend auf der DIBt Richtlinie von 2012 [1] typengeprüft [21]. Die Anlage ist für die **Windzone 2** und **Geländekategorie II** ausgelegt. Die Auslegungsbedingungen werden in Tabelle 3.1 dargestellt.

DIBt 2012	
Referenzgröße auf Nabenhöhe	Auslegungswerte
V_{ave} [m/s]:	7.71
V_{50} [m/s]:	38.96
Turbulenzkategorie:	A

Tabelle 3.1: Auslegungswindbedingungen 3.4M140 EBC auf 160 m Nabenhöhe [21]

3.3 Vorherrschende Windverhältnisse am Standort

3.3.1 Mittlere Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe

Um die Windverhältnisse auf Nabenhöhe an jedem Anlagenstandort zu ermitteln, werden die Daten der Windverhältnisse [20] auf alle notwendigen Höhen umgerechnet, sofern sie nicht vorliegen. Die Umrechnung erfolgt auf Basis des am jeweiligen Standort ermittelten Höhenexponenten α . Bei der vertikalen Umrechnung wird der Formparameter k als invariant mit der Höhe angenommen und lediglich der Skalenparameter A umgerechnet. Tabelle 3.2 führt die Windbedingungen am Standort auf.

Höhe: 137 m		A Parameter [m/s]	k Parameter [-]	Häufigkeit [%]	Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]
UTM ETRS89 Zone 32					
421928	5637640				
Sektor					
N		4.23	2.72	4.5	3.76
NNO		5.11	2.60	3.1	4.54
ONO		7.59	2.68	5.4	6.75
O		7.93	2.46	8.3	7.03
OSO		6.92	2.37	10.5	6.13
SSO		5.81	2.40	9.1	5.15
S		5.91	2.46	8.1	5.24
SSW		6.58	2.71	11.2	5.86
WSW		6.60	2.50	10.3	5.85
W		6.75	2.42	11.6	5.99
WNW		5.12	2.56	10.8	4.55
NNW		4.94	2.84	7.3	4.40
Gesamt (alle Sektoren)		6.26	2.29	100.0	5.55

Tabelle 3.2: Windverhältnisse am Standort auf einer Höhe 137 m ü. Grund [20]

Das Ergebnis der Berechnung der mittleren Windgeschwindigkeit v_{ave} auf Nabenhöhe jeder zu betrachtenden Anlage ist in Tabelle 3.3 dargestellt. Des Weiteren werden dort die Ergebnisse mit den Auslegungswerten der Anlagen verglichen. Überschreitungen des Auslegungswertes werden **fett kursiv** dargestellt und in der relativen Betrachtung mit einem positiven Vorzeichen versehen. Unterschreitungen werden normal dargestellt und in der relativen Betrachtung mit einem negativen Vorzeichen versehen.

Interne Ifd. Nr.	Hersteller	WEA	NH [m]	v_{ave} (Standort) [m/s]	v_{ave} (Auslegung) [m/s]	$v_{ave}(\text{Standort})$ / $v_{ave}(\text{TP})$ [%]	Einhaltung des Auslegungs- wertes
W1	Senvion	3.4M140 EBC	160.0	5.81	7.71	-24.6	Ja
W2	Senvion	3.4M140 EBC	160.0	5.64	7.71	-26.8	Ja
W3	Senvion	3.4M140 EBC	160.0	5.50	7.71	-28.7	Ja

Tabelle 3.3: Mittlere Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe der geplanten Anlagen

Die mittlere Windgeschwindigkeit v_{ave} am Standort unterschreitet die Auslegungswerte für alle WEA um mindestens 5%, somit ist die Standorteignung in Bezug auf die mittlere Windgeschwindigkeit v_{ave} am Standort nachgewiesen.

3.3.2 50-Jahres-Windgeschwindigkeit

Der Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} am Standort mit dem Auslegungswert kann auf zwei Wegen erfolgen. Wenn die Anlage in einer Windzone errichtet wird, die niedriger oder gleich der Windzone liegt, die der Typen-/Einzelprüfung zu Grunde gelegt wurde, reicht der Nachweis, dass die Windzone gemäß Typen-/Einzelprüfung die Windzone des betrachteten Standortes abdeckt [1]. Ist dies nicht der Fall, muss nachgewiesen werden, dass die 50-Jahreswindgeschwindigkeit v_{50} gemäß Typen-/Einzelprüfung die 50-Jahreswindgeschwindigkeit am Standort abdeckt [1]. Hierzu muss die 50-Jahreswindgeschwindigkeit mittels einer geeigneten Methode (z.B. der *Gumbel*-Methode [10]) am Standort ermittelt werden.

Im Abschnitt 3.2 werden die Auslegungsbedingungen bezüglich v_{50} der zu betrachtenden Anlagen dargestellt und in der folgenden Tabelle 3.4 mit den Bedingungen am Standort verglichen.

Alle zu betrachtenden Standorte liegen in Windzone 2 [11] und Geländekategorie III nach DIBt 2012 [1], bzw. nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 mit DIN EN 1991-1-4:2010-12 [7]. Die folgende Tabelle 3.4 stellt den Vergleich zwischen der Auslegungswindbedingung und der dem Standort zugeordneten Windzone dar.

WEA-Typ	NH [m]	Typenprüfung	v_{50} Auslegung	v_{50} Standort	Standortklasse	Einhaltung des Auslegungs- wertes
3.4M140 EBC	160.0	WZ 2 GK II nach DIBt 2012	38.96	35.43	WZ 2 GK III	Ja

Tabelle 3.4: Windzonenvergleich zwischen Standort und Typenprüfung bezogen auf DIBt 2012

Die geplanten Anlagen sollen in einer Windzone errichtet werden, die durch die Auslegungswerte hinsichtlich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe abgedeckt ist. Die Standorteignung hinsichtlich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit ist somit für die geplanten Anlagen nachgewiesen.

4 Vergleich der effektiven Turbulenzintensitäten I_{eff}

4.1 Grundlagen

WEA sind für eine bestimmte mittlere Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe ausgelegt, welche sich durch die der Typen-/Einzelprüfung zu Grunde gelegten Windzone ergibt. Wird durch eine Messung oder ein Gutachten gezeigt, dass die vorherrschenden Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe innerhalb der Auslegungswerte der Typenprüfung liegen, kann eine Anlage des betrachteten Typs in Erwägung gezogen werden, siehe hierzu Abschnitt 3. Für die Turbulenzintensität auf Nabenhöhe existieren ebenfalls Auslegungswerte, welche in der aktuellen Norm DIN EN 61400-1:2011-8 [5] unter anderem in die drei Klassen A, B und C unterteilt sind. Im Gegensatz zur Windgeschwindigkeit, einer atmosphärisch auferlegten Größe, kann sich die Turbulenzintensität in Windfarmen derart erhöhen, dass die Auslegungswerte bezüglich dieser Größe überschritten werden. Ist dies der Fall, arbeitet eine WEA außerhalb der definierten Grenzwerte, was eine Verkürzung der in der Typen-/Einzelprüfung festgelegten Betriebsdauer zur Folge haben kann.

Wenn nachgewiesen werden kann, dass die an den zu betrachtenden Anlagen ermittelten, effektiven Turbulenzintensitäten unterhalb der Auslegungswerte der Typen-/Einzelprüfung der Anlage liegen, bzw. diese nicht überschreiten, kann die betrachtete Windenergieanlage am Standort betrieben werden und die Standorteignung bezüglich der effektiven Turbulenzintensität ist nachgewiesen. Die Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität I_{eff} erfolgt hierbei nach dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen Verfahren. Wenn effektive Turbulenzintensitäten ermittelt werden, die oberhalb der Auslegungswerte der betrachteten Turbulenzklasse liegen, kann die Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität über einen Vergleich mit den Auslegungswerten nicht nachgewiesen werden.

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 die vorliegende gutachterliche Stellungnahme zur Turbulenzbelastung zusätzlich eine Turbulenzimmissionsprognose im Sinne des BImSchG dar, und kann als Bestandteil der Antragsstellung nach dem BImSchG verwendet werden.

4.2 Bedingungen am Standort

4.2.1 Windparkkonfiguration

Der Auftraggeber hat die in Tabelle 2.1 und Abbildung 2.1 dargestellte Windparkkonfiguration übermittelt [19]. Aufgeführt sind alle übermittelten Anlagen, siehe hierzu auch Abschnitt 2.2. Die effektive Turbulenzintensität I_{eff} ist nur für Anlagen innerhalb eines Radius von $10 RD$ [5] um die geplanten Anlagen auszuweisen, bei der Ermittlung von I_{eff} wird aber das gesamte Windparklayout aus Tabelle 2.1 berücksichtigt. Tabelle 4.1 führt die für die Betrachtung der effektiven Turbulenzintensität relevanten Anlagen auf.

Interne lfd. Nr.	Hersteller	WEA	Nennleistung [kW]	RD [m]	NH [m]	UTM ETRS89 Zone 32	
						X [m]	Y [m]
W1	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	140.0	160.0	421677	5637624
W2	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	140.0	160.0	421839	5637980
W3	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	140.0	160.0	422109	5637629

Tabelle 4.1: Beschreibung der hinsichtlich I_{eff} auszuweisenden Anlagen

4.3 Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität

4.3.1 Datengrundlage

Im Wesentlichen hängt die Umgebungsturbulenz I_{amb} von den Windverhältnissen, der Orographie und der Geländerauigkeit ab. Die Windverhältnisse aus [20] enthalten keinerlei Informationen zur Umgebungsturbulenzintensität vor Ort, somit wurde diese auf Basis der vorliegenden Informationen zur Bodenbedeckung [13] am Standort auf Nabenhöhe ermittelt.

4.3.2 Vorgehensweise

Die Umgebungsturbulenzintensität I_{amb} beschreibt im Allgemeinen die Schwankung der Windgeschwindigkeit in einem definierten Zeitintervall um ihren Mittelwert. Sie ist nach den geltenden Richtlinien als der Quotient aus der Standardabweichung σ der Windgeschwindigkeit und der zugehörigen mittleren Windgeschwindigkeit v_{ave} in einem 10 Minuten Intervall zu bilden [5]. Liegen Daten einer Windmessung am Standort vor, kann I_{amb} direkt, bzw. I_{char} durch Addition der 1-fachen Standardabweichung σ_σ und I_{rep} durch Addition der 1.28-fachen Standardabweichung σ_σ der Umgebungsturbulenzintensität zu I_{amb} , ermittelt werden [5]. 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, bzw. numerisch 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 Vorgaben des Europäischen Wind Atlas [12] in Flächen mit einer Rauigkeitslänge z 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 abhängigen invers logarithmischen Profils die Umgebungsturbulenzintensität auf Nabenhöhe der jeweiligen WEA berechnet.

Da in der Richtlinie des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt 2012 [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 der geltenden Richtlinie [5] 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 σ_σ unterstellt, die ebenfalls dem NTM Verlauf folgt [15]. Die Werte für die Standardabweichung der Umgebungsturbulenzintensität σ_σ sind so gewählt, dass die Summe aus der Referenzsturbulenzintensität nach NTM und dem 1-fachen σ_σ die Referenzkurve nach der geltenden Richtlinie [5] ergibt.

Die repräsentative Turbulenzintensität I_{rep} wird nach dem beschriebenen Verfahren für jede zu betrachtende, nach DIBt 2012 [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.

4.3.3 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 61400-1:2011-08 [5] auf topografische Komplexität untersucht. Die topografische Komplexität des Standortes wird dargestellt durch die Neigung des Geländes und die Abweichungen der Topografie des Geländes von einer dem Gelände angenäherten Ebene. Die Beurteilungskriterien sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Abstand von der betrachteten WEA [m]	Sektoramplitude [°]	Größte Neigung der angenäherten Ebene	Größte Geländeabweichung [m]
< 5*NH	360	< 10	< 0.3*NH
< 10*NH	30		< 0.6*NH
< 20*NH	30		< 1.2*NH

Tabelle 4.2: Komplexitätskriterien nach DIN EN 61400-1:2011-08 [5]

Ein Standort wird als topografisch komplex eingestuft, wenn 15% der Windenergie aus Sektoren kommt, die die Kriterien in Tabelle 4.2 nicht erfüllen [5]. Demnach sind im Windpark Freudenberg folgende, in Tabelle 4.3 aufgeführten, Anlagenstandorte für WEA die nach DIBt 2012 [1] typen-/einzelgeprüft sind, als topografisch komplex einzustufen. Für diese Anlagen sind die erweiterten Vergleiche nach Abschnitt 1.2.2 zu führen.

Interne lfd. Nr.	Hersteller	WEA	Nennleistung [kW]	RD [m]	NH [m]	UTM ETRS89 Zone 32	
						X [m]	Y [m]
W1	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	140.0	160.0	421677	5637624

Tabelle 4.3: Standorte in topografisch komplexem Gelände

4.3.4 Ermittlung des Turbulenzstrukturparameters

Um der Deformation der turbulenten Anströmung durch die Topografie Rechnung zu tragen, erfolgt die Einführung des von der Energieverteilung abhängigen Turbulenzstrukturparameters C_{CT} . Hierfür wird nach DIN EN 61400-1:2011-08 [5] der Komplexitätsindex i_c ermittelt und angesetzt, siehe Tabelle 4.4. Bei der Ermittlung von i_c werden alle Energieanteile aus den Sektoren aufsummiert, welche die Kriterien aus Tabelle 4.2 nicht erfüllen. Der errechnete Turbulenzstrukturparameter C_{CT} kommt dann in jedem dieser Sektoren zum Tragen. Dieser wird auf Basis des verwendeten Höhenmodells [14] und der übermittelten Windverhältnisse [20] berechnet.

Anteil an der Energieverteilung [%]	Komplexitätsindex i_c [-]	Turbulenzstrukturparameter C_{CT} [-]
0 - 5	0	1.000
6	0.1	1.015
7	0.2	1.030
8	0.3	1.045
9	0.4	1.060
10	0.5	1.075
11	0.6	1.090
12	0.7	1.105
13	0.8	1.120
14	0.9	1.135
15	1	1.150
16 - 100	1	1.150

Tabelle 4.4: Anzusetzende Turbulenzstrukturparameter [5]

Die folgende Tabelle 4.5 führt auf, in welchen Sektoren der für den Standort ermittelte Turbulenzstrukturparameter C_{CT} zum Tragen kommt und welcher Wert errechnet wurde.

Interne lfd. Nr.	C_{CT} (0)	C_{CT} (30)	C_{CT} (60)	C_{CT} (90)	C_{CT} (120)	C_{CT} (150)	C_{CT} (180)	C_{CT} (210)	C_{CT} (240)	C_{CT} (270)	C_{CT} (300)	C_{CT} (330)
W1	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
W2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
W3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabelle 4.5: Ermittelte Turbulenzstrukturparameter für alle in Betracht zu ziehenden Anlagen

4.3.5 Repräsentative Turbulenzintensität

In Tabelle 4.6 werden die sektoriell nach dem in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Verfahren ermittelten, repräsentativen Turbulenzintensitäten, bezogen auf eine Windgeschwindigkeit von 15 m/s, für eine Anlagenposition aufgeführt.

W2	NH: 160 m	I_{rep} [%]
UTM ETRS89 Zone 32		
421839	5637980	
Sektor		
N		13.25
NNO		13.74
ONO		13.79
O		13.87
OSO		13.80
SSO		14.13
S		13.98
SSW		13.85
WSW		13.69
W		13.09
WNW		13.53
NNW		13.13

Tabelle 4.6: Repräsentative Turbulenzintensität für einen Standort

4.3.6 Modellunsicherheiten

Berechnungsmodelle bilden nur annähernd die Realität ab und bei den Berechnungen werden teilweise vereinfachte Annahmen getroffen, die jedoch allesamt als konservativ zu bewerten sind.

4.4 Ermittlung der effektiven Turbulenzintensität I_{eff}

4.4.1 Vorbemerkungen

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 Wöhlerkoeffizient m , welcher in der vorliegenden Stellungnahme mit $m=10$ zu Grunde gelegt wird. Dadurch sind alle Komponenten einer WEA in die Betrachtung mit einbezogen.

Die effektive Turbulenzintensität wird auf Nabenhöhe jeder zu betrachtenden Anlage ausgewiesen. In der Ausarbeitung von Sten Frandsen [16], welche Inhalt sowohl der nationalen [1, 2], als auch internationalen Richtlinie [8, 9] ist, wird kein relativer Mindestabstand zwischen WEA ausgewiesen, bis zu welchem das Turbulenzmodell seine Gültigkeit behält. In der Zusammenfassung des Vergleichs des Modells mit realen Messungen an Anlagen wird beschrieben, dass das angewandte Modell in den unteren Windgeschwindigkeitsbereichen, in welchen die Schubbeiwerte c_t am höchsten sind, gute Übereinstimmung mit den Messungen liefert. In höheren Windgeschwindigkeitsbereichen werden die mit Hilfe des Modells ermittelten Lasten durch den Nachlauf anderer Anlagen in allen Fällen überschätzt. Diese Vergleiche des Modells mit realen Messungen wurden bis zu relativen Anlagenabständen von 2.0 RD durchgeführt. Die Versuche fanden im Vergleich zu heutigen Anlagengrößen an sehr kleinen Anlagen statt, sodass eine Übertragbarkeit auf heutige Anlagengrößen nicht uneingeschränkt gegeben ist. Aus diesem Grund wird von einer pauschalen Anwendbarkeit bis 2.0 RD abgesehen und eine Einzelfallprüfung durchgeführt.

Die Ergebnisse der ermittelten, effektiven Turbulenzintensitäten bei Anlagenabständen von mindestens 2.5 RD können uneingeschränkt für eine standortspezifische Lastenrechnung (siehe Abschnitt 1.2.3) herangezogen werden. Bei relativen Anlagenabständen zwischen 2.0 RD und 2.5 RD wird nach einschlägigen Kriterien im Einzelfall entschieden, ob die Ergebnisse für eine Lastenrechnung verwendet werden können, oder nicht. In der Einzelfallprüfung werden folgende Größen im Bereich der zu untersuchenden Nachlafsituation bewertet:

- Der Formfaktor der Weibullverteilung k
- Der Energieanteil
- Die Kriterien nach Tabelle 4.2

Ergibt die Einzelfallprüfung, dass die Ergebnisse nicht für eine Lastenrechnung herangezogen werden können, werden sektorielle Abschaltungen oder Betriebsweisen eingearbeitet, um die Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität nachzuweisen.

In den zu Grunde gelegten Richtlinien DIBt 2012 [1] und DIBt 2004 [2] dient eine windgeschwindigkeitsabhängige effektive Turbulenzintensität I_{eff} als Grundlage zur Bewertung der Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität, in der DIBt 1993 Richtlinie [3] eine konstante, mittlere effektive Turbulenzintensität $I_{\text{eff}} = 20\%$. Des Weiteren wird von einer uniformen Windgeschwindigkeitsverteilung ausgegangen. Diese kann jedoch optional durch die am Standort vorherrschende Häufigkeitsverteilung angepasst werden. Im vorliegenden Nachweis werden die auf der vorliegenden Häufigkeitsverteilung basierenden [20], und in Tabelle 3.2 für einen Standort beispielhaft aufgeführten, sektoriellen Windrichtungsverteilungen als Grundlage herangezogen.

Die zusätzliche Turbulenzbelastung wird durch den sogenannten „Wake-Effekt“ erzeugt. Die zu verwendende anlagenspezifische Größe, die diese Nachlaufteffekte beschreibt, ist die c_t -Kurve. Grundsätzlich wird die repräsentative, bzw. charakteristische Umgebungsturbulenzintensität (I_{rep} bzw. I_{char}) als Grundlage herangezogen und die durch benachbarte WEA erzeugte Turbulenz quadratisch hinzuaddiert, wenn eine Nachlafsituation auftritt. Diese Betrachtung muss

durchgeführt werden, solange sich WEA in einem Abstand kleiner 10 RD von der zu betrachtenden Anlage befinden [5]. Ist der Abstand aller WEA im Umfeld grösser 10 RD gilt $I_{\text{eff}} = I_{\text{rep}}$, bzw. $I_{\text{eff}} = I_{\text{char}}$.

Die ermittelten Werte für I_{eff} werden den Auslegungswerten, die der Typen-/Einzelprüfung der betrachteten Anlage zu Grunde liegen, gegenübergestellt. Liegen die ermittelten Werte unterhalb der Auslegungswerte gilt eine Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität nach der jeweiligen Richtlinie als nachgewiesen. Liegen die Werte über den Auslegungswerten, kann eine Standorteignung hinsichtlich der effektiven Turbulenzintensität nach der zu Grunde gelegten Richtlinie nicht nachgewiesen werden, was jedoch durch eine standortspezifische Lastenberechnung seitens des Anlagenherstellers oder eines Zertifizierers ermöglicht werden kann.

Die vorliegenden Ergebnisse für die effektive Turbulenzintensität werden nach den Vorgaben der „Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“ Fassung 2012 des Deutschen Institutes für Bautechnik [1] ermittelt. Alle Forderungen und Vorgaben decken ebenfalls die Forderungen der „Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“ Fassung 2004 [2], sowie die der Fassung von 1993, 2. Überarbeitete Auflage 1995 des Deutschen Institutes für Bautechnik [3], ab.

4.4.2 Ergebnis

Die folgende Tabelle 4.7 führt die den zu betrachtenden Anlagen zu Grunde gelegten, bzw. unterstellten Richtlinien in Bezug auf deren Typenprüfung auf.

Anlage	Nabenhöhe [m]	Zu Grunde gelegte Richtlinie	Turbulenzkategorie
3.4M140 EBC	160.0	DIBt 2012	A

Tabelle 4.7: Der Turbulenzermittlung zu Grunde gelegte Richtlinien

Die folgende Tabelle 4.8 stellt die ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten der geplanten Anlagen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit dar. Die nach der jeweils zu Grunde gelegten Richtlinie ermittelten effektiven Turbulenzintensitäten werden der Referenzkurve nach DIBt 2012 [1] gegenübergestellt. Überschreitungen sind **fett kursiv** dargestellt.

v_{hub}	W1	W2	W3	Referenz Klasse A
3	0.367	0.356	0.342	0.419
4	0.310	0.310	0.297	0.344
5	0.280	0.286	0.272	0.299
6	0.262	0.274	0.258	0.269
7	0.251	0.265	0.247	0.248
8	0.242	0.255	0.237	0.232
9	0.233	0.243	0.225	0.220
10	0.220	0.223	0.208	0.210
11	0.207	0.202	0.192	0.201
12	0.195	0.183	0.177	0.195
13	0.187	0.168	0.165	0.189
14	0.181	0.155	0.156	0.184
15	0.175	0.144	0.147	0.180
16	0.169	0.135	0.138	0.176
17	0.166	0.130	0.133	0.173
18	0.160	0.125	0.127	0.170
19	0.157	0.122	0.123	0.167
20	0.153	0.119	0.119	0.165
21	0.149	0.116	0.116	0.163
22	0.148	0.115	0.115	0.161
23	0.126	0.112	0.112	0.159
24	0.125	0.111	0.111	0.157
25	0.123	0.110	0.110	0.156

Tabelle 4.8: Ermittelte effektive Turbulenzintensitäten I_{eff}

5 Erweiterter Vergleich für topografisch komplexe Standorte

Wie in Abschnitt 1.2.2 beschrieben, ist für Anlagen die nach DIBt 2012 [1] typen-/einzelgeprüft sind, an topografisch komplexen Standorten der erweiterte Vergleich der Standortbedingungen nach DIN EN 61400-1:2011-08 [5] mit den Auslegebedingungen zu führen. Am Standort Freudenberg betrifft dies die Anlagen aus Tabelle 4.3.

5.1 Schräganströmung

5.1.1 Grundlagen

Gemäß DIN EN 61400-1:2011-08 [5] Abschnitt 11.9 ist der Nachweis zu führen, dass die Schräganströmung an den zu betrachtenden Anlagen einen Wert von $-8^\circ \leq \beta \leq +8^\circ$, bzw. den in der Typen-/Einzelprüfung ausgewiesenen Bereich, gegenüber der horizontalen Ebene auf Nabenhöhe nicht über-, bzw. unterschreitet, um einen Betrieb innerhalb der Auslegungswerte der WEA zu gewährleisten. Die Ermittlung der Schräganströmung erfolgt gemäß [5] und wird durch den Wert der Neigung der angenäherten Ebene mit einem Radius der fünffachen Nabenhöhe (siehe Tabelle 4.2) gegenüber der horizontalen Mittelgeraden des betrachteten Sektors repräsentiert. Die Schräganströmung ist für alle zu betrachtenden Anlagen sektoriell auf Nabenhöhe zu ermitteln und mit dem Auslegungswert zu vergleichen. Eine Schräganströmung mit positivem Vorzeichen beschreibt eine gegenüber der horizontalen Ebene auf Nabenhöhe aufwärts gerichtete, eine mit negativem Vorzeichen beschreibt eine abwärts gerichtete Schräganströmung.

5.1.2 Ergebnis

Die folgende Tabelle 5.1 stellt die Ergebnisse der ermittelten Schräganströmung dar. Über-, bzw. Unterschreitungen des Auslegungswertes werden **fett kursiv** dargestellt.

Sektor	Schräganströmung β [°]
	W1
N	-1.1
NNO	-0.8
ONO	-0.2
O	0.2
OSO	0.7
SSO	1.0
S	1.2
SSW	0.7
WSW	0.1
W	-0.3
WNW	-0.8
NNW	-1.0

Tabelle 5.1: Schräganströmung auf Nabenhöhe

Die Schräganströmung der zu betrachtenden Anlage W1 liegt in allen zu betrachtenden Sektoren innerhalb der Auslegungswerte.

5.2 Höhenexponent

5.2.1 Grundlagen

Gemäß DIN EN 61400-1:2011-08 [5] Abschnitt 11.9 ist der Nachweis zu führen, dass der Höhenexponent über der Rotorkreisfläche der zu betrachtenden Anlagen innerhalb eines Bereichs von $0 \leq \alpha \leq 0.2$ liegt, bzw. den in der Typen-/Einzelprüfung ausgewiesenen Bereich nicht über-, bzw. unterschreitet um einen Betrieb innerhalb der Auslegungswerte der WEA zu gewährleisten. Durch den Höhenexponenten wird die Form, bzw. Ausprägung des Windgeschwindigkeitsprofils beschrieben. Somit ist es mittels des Höhenexponenten möglich, die Windgeschwindigkeitsänderung zwischen zwei Höhen zu ermitteln. Wenn keine Messdaten vom Standort vorliegen, erfolgt eine Abschätzung des Höhenexponenten auf Basis der sektoriellen Rauigkeiten und der folgenden Gleichung. Die Abschätzung berücksichtigt keinen Einfluss der Orografie, der bei den hier untersuchten Nabenhöhen vernachlässigt werden kann, solange sich keine schroffen Geländekanten oder Steilhänge in unmittelbarer Umgebung der betrachteten WEA befinden.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\ln\left(\frac{H_{top}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_{bot}}{z_0}\right)}\right)}{\ln\left(\frac{H_{top}}{H_{bot}}\right)}$$

Der Standortmittelwert des Höhenexponenten ist für alle zu betrachtenden Anlagen auf Nabenhöhe in einem Bereich von der unteren Blattspitze bis zur oberen Blattspitze zu ermitteln und mit dem Auslegungswert zu vergleichen.

5.2.2 Ergebnis

Die folgende Tabelle 5.2 stellt die Ergebnisse der abgeschätzten Höhenexponenten dar. Über-, bzw. Unterschreitungen des Auslegungswertes werden **fett kursiv** dargestellt.

Sektor	Höhenexponent α [-]
	W1
N	0.29
NNO	0.24
ONO	0.19
O	0.22
OSO	0.24
SSO	0.27
S	0.26
SSW	0.25
WSW	0.24
W	0.28
WNW	0.30
NNW	0.32
Mittelwert	0.26

Tabelle 5.2: Ermittelte Höhenexponenten über der Rotorkreisfläche

Der Mittelwert des Höhenexponenten der zu betrachtenden Anlage W1 liegt über dem Auslegungswert.

5.3 Luftdichte

5.3.1 Grundlagen

Gemäß DIN EN 61400-1:2011-08 [5] Abschnitt 11.9 ist der Nachweis zu führen, dass der Standortmittelwert der Luftdichte bei allen Windgeschwindigkeiten die in einem Bereich größer oder gleich der Nennwindgeschwindigkeit v_r liegen, den Auslegungswert von $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$, bzw. den in der Typen-/Einzelprüfung aufgeführten Wert, nicht überschreitet. Dadurch wird ein Betrieb innerhalb der Auslegungswerte der WEA gewährleistet. Die angegebene mittlere Luftdichte am Standort bezieht sich auf die Nabenhöhe der zu betrachtenden Anlage. Wenn den Windverhältnissen, bzw. dem Windgutachten [20] keine Werte für die Luftdichte zu entnehmen sind, erfolgt die Berechnung der mittleren Luftdichte auf Basis des US Standard Atmosphärenmodells von 1976, welches um den Einfluss der Luftfeuchtigkeit erweitert wurde [17]. Hierzu werden die Klimadaten aus umliegenden Stationen herangezogen und mit Hilfe des Atmosphärenmodells auf die Höhe des Standortes umgerechnet, woraus dann eine mittlere Luftdichte errechnet werden kann. Berücksichtigt werden hierbei die Größen Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit (soweit vorhanden) sowie Standorthöhe über dem Meeresspiegel. Die folgende Tabelle 5.3 stellt die zu Grunde gelegte Luftdichte aus [20], bzw. die ermittelte Luftdichte auf Basis einer Klimastation dar.

Name	Geografische Breite [°]	Geografische Länge [°]	Höhe über NN. [m]	Vorhandene Daten
Bad Marienberg	50.67	7.97	547.0	1981 – 1991 (Temperatur)

Tabelle 5.3: Kennwerte der Klimastation

5.3.2 Ergebnis

Die folgende Tabelle 5.4 stellt das Ergebnis der Luftdichte am Standort dar. Überschreitungen des Auslegungswertes werden **fett kursiv** dargestellt.

Name	Mittlere Nabenhöhe über NN. [m]	Nach [20] ermittelte Luftdichte ρ [kg/m ³]
Freudenberg	550.0	1.177

Tabelle 5.4: Mittlere Standortluftdichte

Der Standortmittelwert der Luftdichte auf Nabenhöhe der zu betrachtenden Anlage beträgt 96.1 % des Auslegungswertes und wird somit nicht überschritten.

5.4 Extreme Turbulenzintensität

5.4.1 Grundlagen

Gemäß DIN EN 61400-1:2011-08 [5] Abschnitt 11.9 ist der Nachweis zu führen, dass die standortspezifische, extreme Turbulenz die Auslegungswerte des Extrem Turbulenz Modells (ETM) nicht überschreitet. Dadurch wird ein Betrieb innerhalb der Auslegungswerte der WEA gewährleistet. Die Ermittlung der Extremturbulenzintensität erfolgt durch die Betrachtung aller möglichen Nachlaufsituationen, wobei nach [5] der Turbulenzstrukturparameter C_{CT} nicht zu berücksichtigen ist und stellt das Ergebnis mit dem höchsten Wert, bezogen auf die jeweilige Windgeschwindigkeit, dar.

5.4.2 Ergebnis

Die folgende Tabelle 5.5 stellt die ermittelten extremen Turbulenzintensitäten, in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit, dar. Die Werte werden den Auslegungswerten des ETM nach [5] gegenübergestellt. Überschreitungen sind **fett kursiv** dargestellt.

V_{hub}	W1	Referenz ETM
3	0.342	0.935
4	0.377	0.721
5	0.351	0.593
6	0.337	0.507
7	0.326	0.446
8	0.316	0.400
9	0.303	0.364
10	0.284	0.336
11	0.262	0.312
12	0.242	0.293
13	0.225	0.277
14	0.212	0.262
15	0.201	0.250
16	0.191	0.239
17	0.183	0.230
18	0.176	0.222
19	0.169	0.214
20	0.163	0.207
21	0.158	0.201
22	0.154	0.196
23	0.146	0.191
24	0.133	0.186
25	0.132	0.182

Tabelle 5.5: Extreme Turbulenzintensität I_{ext}

Bei der Ermittlung der extremen Turbulenzintensität hat sich gezeigt, dass die Auslegungswerte für die zu betrachtende Anlage nach [5] eingehalten werden.

6 Zusammenfassung

Am Standort Freudenberg wurden die Standortbedingungen nach Abschnitt 1.2.1 für alle Anlagen ermittelt und mit den Auslegungswerten verglichen. Dieser Vergleich hat gezeigt, dass

- i. W1 – W3 keine Überschreitung der mittleren Windgeschwindigkeit im Vergleich zur Auslegungswindgeschwindigkeit aufweisen (siehe Abschnitt 3.3.1),
- ii. W1 – W3 in einer Windzone errichtet werden sollen, die den Auslegungswert der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit nicht überschreitet (siehe Abschnitt 3.3.2) und
- iii. W1 – W3 Überschreitungen der effektiven Turbulenzintensität gegenüber den Auslegungswerten aufweisen (siehe Abschnitt 4.4.2).

Die erweiterte Prüfung nach Abschnitt 1.2.2 wurde für die Anlage W1 durchgeführt und kam zu dem Ergebnis, dass

- iv. W1 keine Überschreitungen des Auslegungswertes hinsichtlich des Anströmwinkels aufweist (siehe Abschnitt 5.1.2),
- v. W1 Überschreitungen des Auslegungswertes hinsichtlich des Standortmittelwertes des Höhenexponenten aufweist (siehe Abschnitt 5.2.2),
- vi. der Standortmittelwert der Luftdichte an W1 den maximal zulässigen Wert nicht überschreitet (siehe Abschnitt 5.3.2) und dass
- vii. der Auslegungswert der extremen Turbulenz nach dem ETM an W1 nicht überschritten wird (siehe Abschnitt 5.4.2).

Für die geplanten Anlagen W1 – W3 hat eine seitens des Herstellers Senvion durchgeführte Überprüfung der standortspezifischen Lasten der WEA, in der geplanten Konfiguration nach Tabelle 2.1, anhand der dem Hersteller zur Verfügung gestellten Ergebnisse aus den Abschnitten 3 bis 5 ergeben, dass die Auslegungslasten der Windenergieanlagen nach Tabelle 2.1 nicht überschritten werden [22, 23]. Die Ergebnisse in [22, 23] wurden von der I17-Wind GmbH & Co. KG auf Plausibilität geprüft. Somit ist die Standorteignung gemäß der Richtlinie DIBt 2012 [1] für die geplanten Anlagen W1 – W3 nachgewiesen.

Die folgende Tabelle 6.1 stellt die Ergebnisse zusammenfassend dar.

Interne lfd. Nr.	Hersteller	Anlagentyp	Nennleistung [kW]	NH [m]	UTM ETRS89 Zone 32		Standorteignung gemäß DIBt 2012 nachgewiesen
					X [m]	Y [m]	
W1	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	160.0	421677	5637624	Ja
W2	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	160.0	421839	5637980	Ja
W3	Senvion	3.4M140 EBC	3.400	160.0	422109	5637629	Ja

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Ergebnisse Neuanlagen

7 Standortbesuch

7.1 Durchführung und Ergebnis

Entsprechend der Forderung in der Richtlinie DIBt Fassung Oktober 2012 [1] nach einer Standortbesichtigung wurde diese durchgeführt [20].

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

A	Skalen-Parameter der Weibullverteilung
α	Höhenexponent / Windscherung
β	Anströmwinkel bezogen auf die horizontale Ebene auf Nabenhöhe
BImSchG	Bundes Immissions-Schutz Gesetz
C_{CT}	Turbulenzstrukturparameter
C_t	Schubbeiwert
D	Dimensionsloser Abstand bezogen auf den größeren Rotordurchmesser
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
ETM	Extremturbulenzmodell
ETRS 89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem von 1989
GK	Gauss-Krüger oder Geländekategorie
H_{bot}	Höhe der Blattspitze über Grund, wenn Blatt in tiefster Stellung
H_{min}	Geringste Höhe, bei der die zu Grunde gelegten Gleichungen gültig sind.
H_{top}	Höhe der Blattspitze über Grund, wenn Blatt in höchster Stellung
I_{amb}	Umgebungsturbulenzintensität
I_{char}	Charakteristische Turbulenzintensität nach [2]
I_{rep}	Repräsentative Turbulenzintensität nach [3]
I_{eff}	Effektive Turbulenzintensität
I_{ext}	Extreme Turbulenzintensität
k	Formfaktor der Weibullverteilung
NA	Nationaler Anhang
NH	Nabenhöhe
NTM	Normalturbulenzmodell
RD	Rotordurchmesser
ρ	Luftdichte
TP	Typenprüfung
UTM	Universal Transverse Mercator coordinate system
v_{ave}	Jahresmittel der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe
$v_{horizontal}$	Horizontale Komponente der Windgeschwindigkeit
v_{in}	Einschaltwindgeschwindigkeit
v_{out}	Abschaltwindgeschwindigkeit
v_r	Nennwindgeschwindigkeit
v_{ref}	Referenzwindgeschwindigkeit
v_{en}	n-Jahres-Bö
$v_{vertikal}$	Vertikale Komponente der Windgeschwindigkeit
v_{50}	50-Jahres-Windgeschwindigkeit (10-Minuten-Mittelwert)

v_{50} (h)	50-Jahreswindgeschwindigkeit (10-Minuten-Mittelwert) auf Nabenhöhe der WEA
WEA	Windenergieanlage
WGS 84	World Geodetic System (letzte Revision in 2004)
WP	Windpark
WSM	Windsektormanagement (sektorielle Abschaltung)
WZ	Windzone / Staudruckzone
ρ	Luftdichte
σ	Standardabweichung der Windgeschwindigkeit
σ_σ	Standardabweichung der Turbulenzintensität
z_0	Rauigkeitslänge

Literaturverzeichnis

- [1] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Referat I 8 Bautechnisches Prüfamt Grundlagen der Standsicherheit; Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Stand: Oktober 2012 – Korrigierte Fassung März 2015;*
- [1.1] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Oktober 2012; Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik Reihe B, Heft 8;*
- [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] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Musterliste für Baubestimmungen; Fassung September 2012; http://www.dibt.de/de/Geschaeftsfelder/data/Muster-LTB_09_2012.pdf;*
- [5] *Deutsches Institut für Normung; DIN EN 61400-1:2011-08 Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005 + A1:2012); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005 + A1:2010;*
- [6] *Deutsches Institut für Normung; DIN EN 61400-1:2004 Windenergieanlagen – Teil 1: Sicherheitsanforderungen (IEC 61400-1:1999); Deutsche Fassung EN 61400-1:2004;*
- [7] *Deutsches Institut für Normung; 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;*
- [8] *International Electrotechnical Commission; IEC 61400-1 Edition 2.0 International Standard Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements;*
- [9] *International Electrotechnical Commission; IEC 61400-1 Edition 3.0 International Standard Wind turbines – Part 1: Design requirement; Mit Implementierung von 61400-1/A1, Amendment 1, 2009;*
- [10] *ENC 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; P5_Windzonen_April_2015.xls;*
- [12] *European Wind Atlas, Risø National Laboratory, Roskilde (DK), 1989 Troen, Ib; Petersen, Erik L.;*
- [13] *European Environment Agency; Corine Land Cover (CLC) 2012, Version 18.5.1; Veröffentlicht am 19.09.2016;*
- [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] *EMD International A/S; WindPRO / ENERGY; Modelling of the variation of air density with altitude through pressure, humidity and temperature; 12.05.2014;*
- [18] *EMD online Katalog oder Anlagendokumentation der Hersteller;*
- [19] *EnBW Energie Baden-Württemberg AG; 20171024_FRE01_Turbulenz_infos.xlsx; Ulrike Ahrens; per E-Mail mit dem Betreff: „Aktualisierung von Gutachten Freudenberg-Kuhlenberg“ am 24.10.2017;*
- [20] *Deutsche WindGuard Consulting GmbH; Energieertragsermittlung für Windenergieanlagen Standort: Freudenberg (Nordrhein-Westfalen); Bericht-Nr.: EE15044.A1; Bärbel Eichler; Varel, 11.06.2015;*
- [21] *TÜV SÜD Industrie Service GmbH; Gutachterliche Stellungnahme, Windenergieanlagen Senvion 3.4M140/ 3.6M140 EBC 3400 - 3600 kW 50 Hz Rotorblatt Typ RE68.5 160 m Nabenhöhe über Geländeoberkante Lastannahmen und Lastvergleiche für Maschine, Turm und Rotorblätter; Prüfnummer: 2732216-1-d; 14.07.2017;*
- [22] *Senvion GmbH; Senvion 3.4M140 EBC Summary of Wind Conditions for the Site Suitability Load Assessment Freudenberg Germany; Doc-No.: U-3.20-Lal.LS.28-A-EN-A; 14.12.2017;*
- [23] *Senvion GmbH; Senvion 3.4M140 EBC Site Suitability Load Assessment Freudenberg, Germany; Doc-No.: U-3.20-LA.LS.28-B-EN-A; 14.12.2017;*