

**BWE-Windgutachterbeirat**

# Mindeststandards zur Dokumentation von gutachterlichen Stellungnahmen zur Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität

---

15.11.2016

**Präambel**

Mit der vorliegenden Zusammenstellung von Kriterien gibt der BWE-Windgutachterbeirat einen Mindeststandard zur Erstellung und Dokumentation von gutachterlichen Stellungnahmen zur Ermittlung der Umgebungsturbulenz vor, die als ein Eingangsparameter für Standsicherheitsnachweise, Lebensdauerberechnungen und der Ermittlung von Mindestabständen u.a. in Windparks dienen soll. Die Umgebungs- oder meteorologische Turbulenz beinhaltet nur die Turbulenz in der freien Strömung unter Einfluss der vorhandenen Standortfaktoren. Die Umgebungsturbulenz kann aus Windmessungen am Standort abgeleitet oder aber auch rechnerisch mit Hilfe meteorologischer Modelle bestimmt werden. Zusätzliche Turbulenzkomponenten, die durch Windenergieanlagen verursacht werden, sind in der Umgebungsturbulenz nicht enthalten. Die hier vorliegende Empfehlung deckt nicht weitergehende Berechnungen wie Standsicherheitsnachweise, Lebensdauerberechnungen und Ermittlung von Mindestabständen in Windparks ab<sup>1</sup>.

Der BWE-Windgutachterbeirat beabsichtigt hiermit, zum einen die Qualität und Vergleichbarkeit von Turbulenzermittlungen zu verbessern und zum anderen dem Nutzer eine Orientierungshilfe bei deren Beurteilung zu geben. Der Beirat weist darauf hin, dass die Erfüllung der unten genannten Kriterien keine Aussage über die Richtigkeit der Ergebnisse zulässt.

Der vorliegende Mindeststandard wurde im Windgutachterbeirat am 11.2.2015 verabschiedet und 2016 überarbeitet. Der Beirat empfiehlt, den Vorgaben dieses Mindeststandards bei der Erstellung von Umgebungsturbulenzermittlungen zu folgen.

---

<sup>1</sup> Anforderungen an derartige Berechnungen sind z.B. in den relevanten IEC-Normen (IEC 61400-1), den Veröffentlichungen des Deutschen Institutes für Bautechnik

## Inhalt

Präambel .....	1
Inhalt .....	2
I. Mindeststandards für Umgebungsturbulenzermittlungen .....	3
II. Hinweise zum Umgang mit Messdaten und zur Extrapolation der Turbulenzintensität ...	5
1. Anforderungen an Messdaten .....	5
2. Empfehlungen zum Umgang mit fehlenden oder in unzureichender Anzahl vorhandenen Messdaten der Umgebungsturbulenz.....	5
3. Remote Sensing.....	6
III. Vertikale und horizontale Extrapolation der Turbulenzintensität.....	6
IV. Unsicherheiten.....	7
V. Hinweise zu gutachterlichen Stellungnahmen zu den Standortbedingungen für den Weiterbetrieb von WEA.....	7
Literaturverzeichnis.....	8



# I. Mindeststandards für Umgebungsturbulenzermittlungen

Stand: 11.02.2015

1. **Projektbezeichnung:** Eindeutige Bezeichnung des Projektes bezogen auf Standort und Erstellungsdatum mit Berichtsnummer und Kennzeichnungen von Revisionen etc.
2. **Auftraggeber:** Der Auftraggeber wird eindeutig mit Name und Anschrift angegeben.
3. **Auftragnehmer:** Die Verantwortlichen (Bearbeiter, Prüfer) werden mit Namen genannt und unterschreiben. Personelle, kapitalmäßige oder verwandtschaftliche Verflechtungen, die die Unabhängigkeit berühren, sind offenzulegen.
4. **Aufgabenstellung:** Klar definierter Abriss der gestellten Aufgaben
  - Ermittlung der natürlichen Umgebungsturbulenz
  - Klare Darstellung der Unterscheidung von weitergehenden Betrachtungen (z.B. Standsicherheitsnachweise, Lebensdauerberechnungen, Ermittlung von Mindestabständen)
5. **Verwendetes Verfahren:** Das verwendete Verfahren bzw. die Methode oder das Modell müssen benannt und unter Angabe von Referenzen im Quellenverzeichnis (z.B. Modellbeschreibung, thematischer Hintergrund) dargestellt werden.

**Die Darstellungen der Auswahl der angesetzten Randbedingungen und der verwendeten Modellparameter erfolgen in Anlehnung an die Forderungen in der TR 6 [1].** Die Eignung des verwendeten Verfahrens (z.B. Windmessung, rechnerisches Verfahren) für den vorliegenden Fall ist zu dokumentieren.

6. **Datengrundlage:**
  - Angabe zur Quelle und Qualität der ggf. verwendeten Windeingangsdaten und deren Verarbeitung; Nennung der ggf. zugrunde gelegten Windfeldanalyse. Sie sollte konform zu den Forderungen der TR 6 [1] sein. Ggf. genügt ein Verweis auf ein Windgutachten.
  - Benennung der für die Geländemodellierung gegebenenfalls verwendeten Eingabedaten in ihrem räumlichen Umfang (z.B. Orographie, Rauigkeiten, Hindernisse)
7. **Standortbesichtigung:**
  - Zeitpunkt, Person, Form der Dokumentation
  - Erstellung der Turbulenzermittlung und die Standortbesichtigung dürfen zeitlich nicht zu weit auseinander liegen (maximal 2 Jahre)
  - Dokumentation der für die Umgebungsturbulenz relevanten Standortfaktoren und Standortbeschreibung
8. **Dokumentation der Ergebnisse:**
  - Mittlere Umgebungsturbulenzintensität<sup>2</sup> und deren Standardabweichung in Abhängigkeit vom Ort, der Höhe, der Windrichtung und unter Angabe der Windgeschwindigkeit in 1 m/s -Schritten

<sup>2</sup> Die Umgebungsturbulenzintensität beschreibt die Fluktuation der Windgeschwindigkeit um ihren Mittelwert und ist wie folgt definiert:

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \quad (1)$$

Mit  $\sigma_v$  Standardabweichung der Windgeschwindigkeit im Mittelungszeitraum  
 $\bar{v}$  Mittelwert der Windgeschwindigkeit im Mittelungszeitraum



- Alternativ können die mittlere und die charakteristische (bzw. repräsentative) Umgebungsturbulenzintensität<sup>3</sup> in Abhängigkeit vom Ort, der Höhe, der Windrichtung und unter Angabe der Windgeschwindigkeit angegeben werden.
  - Ggf. ist die Ermittlung für verschiedene Standorte in einem Windpark erforderlich, wenn erhebliche Umgebungsunterschiede bestehen, um für jeden WEA-Standort ausreichend repräsentative Daten zu gewährleisten.
  - Koordinaten der Ermittlungspunkte mit Angaben zum Koordinatensystem, Höhe über Grund, Lageplan
  - Windfeldparameter entsprechend [2], 16.2a. in der Nabenhöhe mindestens einer der untersuchten Anlagen angeben. Die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit kann dabei alternativ zur Darstellung über Weibullparameter diskret erfolgen. Die mittlere Windgeschwindigkeit und die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit sind kumuliert sowie für jeden Windrichtungssektor separat anzugeben. Der mittlere Höhenexponent ist für die Rotorkreisfläche jeder untersuchten Anlage anzugeben, sowie die mittlere Luftdichte in der Nabenhöhe jeder untersuchten Anlage.
  - Bei rechnerischer Ermittlung der Turbulenzintensität sind zu den in den Fußnoten gegebenen Definitionen äquivalente Werte anzugeben.
- 9. Unsicherheiten:** Eine Stellungnahme zu den mit den Ergebnissen verbundenen Unsicherheiten ist abzugeben.
- 10. Abweichungen** von diesem Mindeststandard sind zu begründen und zu dokumentieren.

Üblicherweise wird die Turbulenzintensität aus geeigneten Messungen mit einer hinreichend genauen Abtastrate am Standort ermittelt. Innerhalb der Messungen werden die o.g. Werte aus gemessenen 10-min-Zeitreihen extrahiert und abgespeichert. Eine Mittelung der berechneten Werte für ein definiertes Windgeschwindigkeits- und/oder Windrichtungsintervall ergibt den **Mittelwert der Turbulenzintensität**.

$$I_{\text{mittel}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (2)$$

Mit  $n$  Anzahl der Turbulenzintensitätsmesswerte im Intervall  
 $I_i$  Turbulenzintensitätsmesswert im Intervall,  $i = 1, \dots, n$

Wenn keine weitere Qualifizierung gemacht wird, sollte bei Verwendung des Begriffes Turbulenz oder Turbulenzintensität stets von dieser Definition ausgegangen werden. Die **Turbulenzintensität hängt von Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsintervall sowie dem Bezugspunkt einschließlich Höhe über Grund und dem Messzeitraum ab**. Diese Parameter sind zu dokumentieren.

<sup>3</sup> Bei genügender Anzahl von gemessenen Werten der Turbulenzintensität in einem Intervall kann die Standardabweichung der Turbulenzintensität in diesem Intervall berechnet werden.

$$I_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_{\text{mittel}})^2}{(n-1)}} \quad (3)$$

Die Addition der mittleren Turbulenzintensität und der Standardabweichung der Turbulenzintensität ergibt die **charakteristische Turbulenzintensität** (IEC61400-1 ed 2 und DIBt) im Intervall.

$$I_{\text{char}} = I_{\text{mittel}} + I_{\sigma}$$

Die **repräsentative Turbulenzintensität** ist definiert als das 90%-Quantil der Turbulenzintensität (IEC61400-1 ed 3), das heißt in 90 % der Fälle wird die repräsentative Turbulenzintensität unterschritten. Unter der Annahme, dass die Verteilung der Turbulenzintensität einer Normalverteilung folgt, ist die repräsentative Turbulenzintensität im Intervall somit definiert als

$$I_{\text{rep}} = I_{\text{mittel}} + 1,28I_{\sigma} \quad (4)$$

## II. Hinweise zum Umgang mit Messdaten und zur Extrapolation der Turbulenzintensität

Stand: 29.09.2015

**Grundsätzlich sind an Standorten erhobene Windmessdaten rein rechnerischen Ermittlungen über Modelle zur Ermittlung der Umgebungsturbulenz sowie der charakteristischen oder repräsentativen Turbulenzintensität vorzuziehen.**

### 1. Anforderungen an Messdaten

Der Messzeitraum sollte mindestens 6 Monate betragen. Empfohlen wird ein Zeitraum von einem Jahr. Bei kürzeren Messzeiträumen als 1 Jahr ist auf eine saisonale Ausgewogenheit der verwendeten Messdaten zu achten.

Die Messhöhe sollte bei Mastmessungen in der Regel auf Nabenhöhe liegen, jedoch nicht 2/3 der Nabenhöhe unterschreiten. Niedrigere Messhöhen sind zulässig, erhöhen aber die Unsicherheit der Extrapolation der Turbulenzermittlung auf Nabenhöhe.

Es ist eine Analyse mit mindestens 12 Sektoren erforderlich. Die Anzahl der Sektoren kann aber bei Bedarf entsprechend den spezifischen Wind- und Standortbedingungen erhöht werden.

Die Messung sollte repräsentativ für die zu untersuchende WEA sein. Ansonsten sind ggf. mehrere Messungen oder Anpassungen der Ergebnisse über geeignete Methoden erforderlich.

Weitere allgemeine Hinweise zu Windmessungen und deren Auswertungen sind der Technischen Richtlinie 6 der Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien e.V. (FGW e.V.) in der jeweils aktuellen Fassung zu finden.

### 2. Empfehlungen zum Umgang mit fehlenden oder in unzureichender Anzahl vorhandenen Messdaten der Umgebungsturbulenz

Bei Messungen ist es oft nicht gegeben, dass - wie meist für Lastrechnungen bzw. den zur Berechnung der effektiven Turbulenzintensität ( $I_{eff}$ ) anzuwendenden Modellen gefordert - für alle Windgeschwindigkeitsklassen in allen Richtungen Messwerte in ausreichender Anzahl vorliegen.

Bei Unterschreitung einer Anzahl von 20 Messwerten pro Windgeschwindigkeitsklasse und -sektor muss die statistische Unabhängigkeit und Plausibilität der Werte gesondert betrachtet und dokumentiert werden.

Im Folgenden werden Hinweise zur Behandlung und Extrapolation von Daten für diese Fälle gegeben:

- Für die Extrapolation sollten nur Turbulenzwerte aus Windgeschwindigkeitsklassen verwendet werden, die einen ähnlichen funktionellen Zusammenhang zwischen Turbulenzintensität und Windgeschwindigkeit aufweisen. Dies sollte über den Vergleich mit anderen Sektoren geprüft werden.
- Unter der Voraussetzung von ähnlichen Geländeverhältnissen (bzgl. Rauigkeit, Orographie und atmosphärischer Schichtung) in den zum Vergleich herangezogenen Sektoren, kann angenommen werden, dass ein ähnlicher funktioneller Zusammenhang zwischen Turbulenzintensität und Windgeschwindigkeit bei zu extrapolierenden Sektoren besteht.
- Sinnvoll kann die Verwendung von variablen Sektorgrenzen und/oder die Extrapolation bzw. Interpolation mit Werten benachbarter Sektoren sein.
- Für die Extrapolation der Standardabweichung der Turbulenzintensität kann unter Berücksichtigung des funktionellen Zusammenhangs zwischen Turbulenzintensität und deren Standardabweichung ähnlich vorgegangen werden. Alternativ kann für alle Sektoren mit dem gewichteten Mittel der Standardabweichung von Turbulenzintensität pro Bin gerechnet werden.
- Alle Extrapolationen sind auf Plausibilität zu prüfen.

- Bei Sektoren, in denen viele Windgeschwindigkeitsklassen nicht vorkommen und funktionale Zusammenhänge nicht gebildet werden können, sind konservativ abgeschätzte Werte für die Turbulenzintensitäten durch Vergleich mit anderen Sektoren anzusetzen. Dabei ist zu beachten, dass diese Sektoren/Windgeschwindigkeitsklassen zur tatsächlichen Belastung der WEA an dem Standort nur einen geringen bis keinen Beitrag leisten. Dies sollte durch einen Vergleich mit langjährigen repräsentativen Daten geprüft werden. Die Grundlage der Unsicherheitsbetrachtung bildet die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit. Bei Extrapolation von Werten in Sektoren und Windgeschwindigkeitsklassen, die auch langzeitreferenziert eine sehr geringe Häufigkeit aufweisen, ist ein Ansatz zusätzlicher Unsicherheiten nicht erforderlich, da diese für die auftretenden Lasten an Windkraftanlagen nicht relevant sind bzw. nur einen sehr geringen Beitrag leisten.

### 3. Remote Sensing

Es ist grundsätzlich zu beobachten, dass sich die gemessenen Turbulenzwerte bei den verschiedenen Messsystemen unterscheiden. Als Referenz gilt bei den heutigen Normungen die Mastmessung mit Schalenkreuzanemometern. Die Turbulenzmessung mittels Fernmessgeräten, wie z.B. SODAR und LIDAR, ist anwendbar unter Berücksichtigung folgender Hinweise:

- Zur ausreichend repräsentativen Abdeckung der meteorologischen Verhältnisse im Rahmen einer Messung (siehe Hinweise unter Pkt. 1).
- Eine Betrachtung der Datenverfügbarkeit für den Windgeschwindigkeitsbereich 4-16 m/s muss durchgeführt werden.
- Die Notwendigkeit der Anwendung einer Korrekturfunktion zwischen gemessener Turbulenz am Mast mit auf Klasse 1 klassifizierten Anemometern und dem verwendeten Fernmessgerät ist für den jeweiligen Standort zu prüfen. Grundlage dafür ist ein Verifikationstest idealerweise am Standort selbst.
- Zur Anwendung einer Korrekturfunktion soll die Auswertung der Messung im Verifikationstest hinsichtlich der Turbulenz und deren Standardabweichung über den Windgeschwindigkeitsbereich 4 – 16 m/s erfolgen.

## III. Vertikale und horizontale Extrapolation der Turbulenzintensität

Den Ausgangspunkt der horizontalen und/oder vertikalen Extrapolation der Turbulenz bilden empirische/theoretische Berechnungsverfahren und Modelle. In der Regel werden vereinfachte Berechnungsverfahren oder CFD-Modelle eingesetzt.

Die Parametrisierung des verwendeten Modells muss an die Standortbedingungen und die gemessene Turbulenz angepasst werden. Gegebenenfalls ist eine andere Parametrisierung des Modells als bei der Übertragung der Windgeschwindigkeit notwendig.

Das Berechnungsverfahren ist durch einen Vergleich der berechneten mit der gemessenen Turbulenzintensität mit einer zweiten Messhöhe bzw. einem zweiten Messmast oder Fernerkundungsmessung im Untersuchungsgebiet zu plausibilisieren.

Bei nur einem Messpunkt oder dem Fehlen von Messdaten ist die Wahl der Einstellungen zu begründen.

Die Unsicherheit der Berechnung erhöht sich, je stärker sich Geländegestalt und Rauigkeiten im Bereich der horizontalen Extrapolation ändern.

Je nach Standort und Eingangsdaten kann es sinnvoll sein, die Anzahl der meist üblichen 12 Sektoren anzupassen. Für sehr komplexe Standorte werden mehr als 12 Sektoren empfohlen.

## IV. Unsicherheiten

Die Ermittlung der Turbulenzintensität ist mit Unsicherheiten behaftet, die z.B. durch Eingangsdaten von Messungen, Modellannahmen bzw. Berechnungsmethoden entstehen.

Grundsätzlich sind diese Unsicherheiten durch ausreichende Sicherheitsmargen bei der Lastauslegung der Windenergieanlage berücksichtigt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Unsicherheiten jeglicher Größenordnung bei der Ermittlung der Turbulenzintensität akzeptabel sind. Erhöhte Unsicherheiten sollten durch entsprechende Zuschläge berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Angabe von Unsicherheiten bei der weiteren Lastberechnung aufgrund der dort enthaltenen Sicherheiten meist keine Berücksichtigung findet.

Folgende Unsicherheitskategorien treten bei der Ermittlung von Turbulenzintensitäten auf:

- a. Saisonale Repräsentativität der Messdaten
- b. Eingangsdaten des Modells
- c. Extrapolation der gemessenen Turbulenz über alle relevanten Windgeschwindigkeitsklassen
- d. Extrapolation der gemessenen Turbulenz auf Nabenhöhe
- e. Orographische Effekte, die im Modell unterrepräsentiert oder nicht repräsentiert sind
- f. Rauigkeitseffekte, die im Modell unterrepräsentiert sind
- g. Sonstige Einflüsse, die im Modell nicht repräsentiert sind (Stabilitätseffekte, interne Grenzschichten, regionstypische Effekte etc.)
- h. Einfluss von Hindernissen auf die Umgebungsturbulenz am Anlagenstandort
- i. Repräsentanz des Standortes einer Messung
- j. Unsicherheiten der verwendeten Modellparameter

## V. Hinweise zu gutachterlichen Stellungnahmen zu den Standortbedingungen für den Weiterbetrieb von WEA

Stand: 30.09.2016

Die Ermittlung der Umgebungsturbulenzintensität am Standort sollte den oben dargelegten Anforderungen entsprechen. Dabei müssen bei der Ermittlung der Windcharakteristika die tatsächlichen Windbedingungen am jeweiligen Standort berücksichtigt werden. Diese können nach [1] auch aus den Betriebsergebnissen der untersuchten WEA ermittelt werden, sollte keine Windmessung am Standort vorliegen. Die Annahmen des ursprünglichen Windgutachtens entsprechen in der Regel nicht mehr heutigen Anforderungen und müssen aktualisiert werden.

Die Berechnung der effektiven Turbulenzintensität und aller weiteren Standortbedingungen wird über diesen Mindeststandard nicht abgedeckt. Sie muss den Anforderungen nach [2] und [3] entsprechen.



## Literaturverzeichnis

- [1] Fördergesellschaft Windenergie und andere erneuerbare Energien e.V.: Technische Richtlinie für Windenergieanlagen: Teil 6: Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen. Revision 9. Berlin, 22. September 2014
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik: Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Fassung Oktober 2012.
- [3] Bundesverband Windenergie: Grundsätze für die Durchführung einer Bewertung und Prüfung über den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen (BPW)/ Fassung: 2016