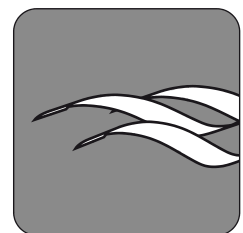
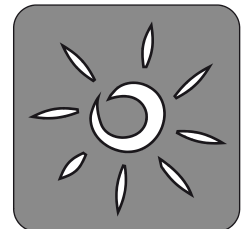
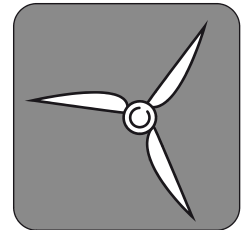


# Technische Richtlinien für Windenergieanlagen

TEIL 6 (TR 6)  
**Bestimmung von Windpotenzial und  
Energieerträgen**

Revision 11  
Stand 21.09.2020



Herausgeber:  
FGW e.V.  
Fördergesellschaft Windenergie  
und andere Dezentrale Energien



# Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen

Stand 21.09.2020

## **Herausgeber**

FGW e.V.  
Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien

Oranienburger Straße 45  
10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 30101505-0

Fax +49 (0) 30 30101505-1

E-Mail [info@wind-fgw.de](mailto:info@wind-fgw.de)

Internet [www.wind-fgw.de](http://www.wind-fgw.de)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliothek; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrecht zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Herausgebers. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsneutrale Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.

**Folgende Teile der Technischen Richtlinien der FGW sind erhältlich:**

- Teil 1:** Bestimmung der Schallemissionswerte
- Teil 2:** Bestimmung von Leistungskennlinien und standardisierten Energieerträgen
- Teil 3:** Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie für deren Komponenten am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz
- Teil 4:** Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie deren Komponenten
- Teil 5:** Bestimmung und Anwendung des Referenzertrages
- Teil 6:** Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen
- Teil 7:** Betrieb und Instandhaltung von Kraftwerken für erneuerbare Energien
  - Rubrik A:** Allgemeiner Teil
  - Rubrik A1:** Anlagenverantwortung
  - Rubrik B3:** Fachspezifische Anwendungserläuterung zur Überwachung und Überprüfung von Gründungs- und Tragstrukturen (GuT) bei Windenergieanlagen
  - Rubrik D2:** Zustands-Ereignis-Ursachen-Schlüssel für Erzeugungseinheiten (ZEUS)
  - Rubrik D3:** Globales Service Protokoll (GSP)
  - Rubrik D3 – Anhang A:** XML-Schemadokumentation
- Teil 8:** Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie deren Komponenten am Stromnetz
- Teil 9:** Bestimmung der hochfrequenten Emission von regenerativen Energieerzeugungseinheiten
- Teil 10:** Bestimmung der Standortgüte nach Inbetriebnahme

---

## Vorwort

Die vorliegende Richtlinie beschreibt Verfahren zur Bestimmung des Windpotenzials und der Energieerträge an Standorten von Windenergieanlagen (WEA). Die Richtlinie wird kontinuierlich fortgeschrieben. Der FAWP hat die nun vorliegende TR 6 Revision 11 entwickelt und am 21. September 2020 verabschiedet. Neuerungen betreffen die Abschnitte zu den Anforderungen an Windmessungen und zur Unsicherheitsanalyse.

In dieser Richtlinie wird Bezug genommen auf die Versionen Edition 1 (2005) und Edition 2 (2017) der IEC61400-12-1, auch wenn Edition 2 die Edition 1 ablöst.

Über die Ermittlung des Windpotenzials und der Energieerträge ist ein Bericht, dessen wesentliche Ergebnisse nach den in dieser Richtlinie angegebenen Verfahren ermittelt werden, anzufertigen.

Mit der aktuellen Revision werden alle vorangegangenen Revisionen der TR 6 zurückgezogen. Die Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen soll ab dem 01.01.2021 nur noch über die Revision 11 erfolgen.

Die inhaltliche Gestaltung der Technischen Richtlinien obliegt den entsprechenden Fachausschüssen und ihren Arbeitskreisen. Die Richtlinie wurde von verschiedenen Interessengruppen erarbeitet, in vielen Detailfragen abgestimmt und im Konsens verabschiedet. An der Erstellung dieser Richtlinien in den Arbeitskreisen waren beteiligt: Unabhängige Messinstitute, Herstellerfirmen von Erzeugungseinheiten und deren Komponenten, Institute und Hochschulen, Ingenieurbüros, Zertifizierungsstellen, akkreditierte Personen/Institutionen, die Gutachten erstellen sowie die FGW e.V.-Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien (FGW e.V.).

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Abkürzungen</b> .....	<b>v</b>
<b>Symbole und Einheiten</b> .....	<b>vi</b>
<b>Begriffe und Definitionen</b> .....	<b>vii</b>
<b>1 Allgemeines</b> .....	<b>1</b>
1.1 Anwendungsbereich .....	1
1.2 Normativer Verweis .....	1
1.3 Vorgehen.....	2
<b>2 Standortbesichtigung</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Anforderungen an lokal erhobene Winddaten</b> .....	<b>5</b>
3.1 Anforderungen an Windmessungen .....	5
<b>3.1.1</b> Repräsentativität .....	5
<b>3.1.2</b> Messdauer .....	6
<b>3.1.3</b> Qualitätskontrolle.....	6
<b>3.1.4</b> Verwendung der Messdaten .....	8
3.2 Anforderungen an Windmessungen mit Windmessmasten.....	9
3.3 Anforderungen an Windmessungen mit Fernmessverfahren .....	11
<b>3.3.1</b> Anforderungen an das Fernmessgerät .....	12
<b>3.3.2</b> Vorgehensweise bei inhomogener Strömung im Messvolumen.....	13
3.4 Messstrategien.....	14
<b>3.4.1</b> Einzelmessung.....	15
<b>3.4.2</b> Hauptmessung und Zusatzmessung zur vertikalen Extrapolation .....	15
<b>3.4.3</b> Erträge von Vergleichs-WEA und Zusatzmessung zur vertikalen Extrapolation .....	15
<b>3.4.4</b> Hauptmessung und Zusatzmessung zur Zeitreihenverlängerung.....	16
3.5 Anforderungen an Vergleichs-WEA.....	17
<b>4 Anforderungen an Verfahren zur Langzeitkorrektur</b> .....	<b>19</b>
4.1 Kurzzeitdaten .....	20
4.2 Langzeitdaten / Bezugsdaten .....	20
4.3 Abgleichszeitraum.....	21
4.4 Bezugszeitraum .....	22
4.5 Verfahren zur Durchführung der Langzeitkorrektur .....	22
<b>5 Modellierung der Windverhältnisse</b> .....	<b>24</b>
<b>6 Modellierung Parkwirkungsgrad</b> .....	<b>26</b>
<b>7 Energieertragsberechnung</b> .....	<b>27</b>

7.1	Bruttoenergieertrag.....	27
7.2	Energieverlustfaktoren .....	27
7.2.1	Abschattungseffekt .....	29
7.2.2	Verfügbarkeit .....	29
7.2.3	Elektrische Effizienz.....	30
7.2.4	Leistungsverhalten der WEA .....	30
7.2.5	Umgebungsbedingungen .....	31
7.2.6	Leistungseinschränkungen .....	32
<b>8</b>	<b>Unsicherheitsanalyse.....</b>	<b>34</b>
8.1	Winddatenbasis .....	34
<b>8.1.1</b>	<b>Windeingangsdaten.....</b>	<b>34</b>
8.1.1.1	Windgeschwindigkeitsmessung mit Hilfe von Messmastverfahren .....	34
8.1.1.2	Windgeschwindigkeitsmessung mit Hilfe von Fernmessverfahren.....	35
8.1.1.3	Winddaten von Wetterstationen, Reanalysemodellen oder Gondelwindmessungen von WEA.....	36
<b>8.1.2</b>	<b>Vergleichs-WEA.....</b>	<b>37</b>
<b>8.1.3</b>	<b>Langzeitdaten und –korrektur .....</b>	<b>37</b>
8.2	Modellierung Windfeld .....	39
<b>8.2.1</b>	<b>Topografische Eingangsdaten.....</b>	<b>39</b>
<b>8.2.2</b>	<b>Windeingangsdaten.....</b>	<b>39</b>
<b>8.2.3</b>	<b>Horizontal- und Vertikaltransfer.....</b>	<b>39</b>
8.3	Modellierung Parkwirkungsgrad.....	40
8.4	Leistungskennlinie WEA .....	40
8.5	Energieverlustfaktoren .....	41
<b>8.5.1</b>	<b>Unsicherheit Berechnungsmodell .....</b>	<b>41</b>
<b>8.5.2</b>	<b>Unsicherheit Eingangsdaten.....</b>	<b>42</b>
<b>8.5.3</b>	<b>Kategorien.....</b>	<b>42</b>
8.6	Kombination der Unsicherheiten.....	43
8.7	Übersicht über die mindestens zu bestimmenden und zu dokumentierenden Unsicherheiten .....	44
<b>9</b>	<b>Format der Berichte .....</b>	<b>45</b>
9.1	Formale Berichtsvorgaben.....	45
9.2	Inhaltliche Berichtsvorgaben .....	45
9.3	Dokumentation Langzeitkorrektur .....	46
9.4	Dokumentation der Windmessungen .....	46
9.5	Mindestangaben im Fall von Windmessungen .....	47
9.6	Mindestangaben bei Verwendung von Betriebsdaten .....	47
9.7	Dokumentation Modellierung.....	48
9.8	Dokumentation Modellierung Parkwirkungsgrad und Energieertrag.....	48

<b>Inhaltsverzeichnis Anhänge .....</b>	<b>49</b>
Anhang A FGW Vereisungskarte für Deutschland.....	50
Anhang B Dokumentation von Windmessungen.....	51
Anhang C Bestimmung der Standortgüte zur Inbetriebnahme gemäß EEG 2017.....	54
Anhang D Verfahren zur Plausibilisierung von Remote Sensing Devices .....	58
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>60</b>



---

## Verwendete Abkürzungen

BWE	Bundesverband Windenergie e.V.
CFD	Computational Fluid Dynamics
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FGW	FGW e.V.-Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
MEASNET	Measuring Network of Wind Energy Institutes
NN	Normal-Null
NTF	Nacelle Transfer Function (Gondeltransferfunktion)
Rev.	Revision
RSD	Remote Sensing Device
TR	Technische Richtlinie
ü. Gr.	über Grund
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WEA	Windenergieanlage(n)

## Symbole und Einheiten

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$A$	Rotorkreisfläche einer WEA	m <sup>2</sup>
$c_p$	Leistungsbeiwert	
$D$	Rotordurchmesser	m
$E$	Energieertrag	kWh
$E_{frei}$	Energieertrag, der für die WEA am Standort bestimmt wurde (freie Anströmung)	kWh
$E_{St0}$	Standortertrag, der für die WEA am Standort nach C.2.1 Nr.3 bestimmt wurde	kWh
$h_N$	Nabenhöhe der WEA	m
$P$	Leistung einer WEA	kW
$R$	Referenzertrag	kWh
$\rho$	Standardluftdichte	kg/m <sup>3</sup>
$SG$	SG Standortgüte (Verhältnis zwischen Standortertrag und Referenzertrag), anzugeben als Prozentwert mit einer Nachkommastelle	%
$U_{Efrei}$	Relative Unsicherheit des ermittelten Energieertrages $E_{frei}$ (Verhältnis von absoluter Standardunsicherheit zu Energieertrag)	%
$v$	Windgeschwindigkeit	m/s

---

## Begriffe und Definitionen

Für die Anwendung dieser Richtlinie gelten die folgenden Begriffe in Anlehnung an DIN IEC 60050 Teil 415, „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Deutsche Ausgabe“:

**Nachlaufströmung:** Strömungsverhältnisse im Lee von WEA

**Ertrag:** Im Sinne dieser Richtlinie gleich Energieertrag.

**Energieertrag:** Energieerzeugung einer Windenergieanlage (WEA) oder mehrerer WEA.

**Bruttoenergieertrag (auch freier Energieertrag):** Mittlere, innerhalb eines Jahres zu erwartende Energieerzeugung einer oder mehrerer WEA, die sich auf Grundlage des in Nabenhöhe ermittelten Windpotenzials mit einer spezifischen Leistungskennlinie ohne jegliche Abschläge ergibt.

**Freie Anströmung:** Anströmung einer WEA an einem Standort, ohne Berücksichtigung der Abschattung durch benachbarte WEA.

**Leistungskennlinie:** Der für jeden WEA-Typ ermittelte Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Leistungsabgabe unabhängig von der Nabenhöhe [1].

**Nabenhöhe<sup>1</sup>:** Höhe der Rotormitte über Geländeoberfläche.

**Nennleistung<sup>2</sup>:** Eine im Allgemeinen von einer Herstellerfirma für eine Komponente, eine Einrichtung oder ein Betriebsmittel für eine festgelegte Betriebsbedingung zugeordnete Leistungsgröße (DIN EN 61400-12-1:2017-03 Edition 2).

**Nettoenergieertrag:** Mittlere, innerhalb eines Jahres zu erwartende Energieerzeugung einer oder mehrerer WEA an einem Einzelstandort oder an einem Standort im Windpark, die sich auf Grundlage des in Nabenhöhe ermittelten Windpotenzials mit einer spezifischen Leistungskennlinie und inklusive Abschläge durch Abschattungseffekte im Windpark und weiterer Verluste ergibt.

**Parkenergieertrag:** Bruttoenergieertrag abzüglich der Abschattungsverluste im Windpark.

**Reanalyseedaten:** Zeitliche Abfolge des atmosphärischen Zustandes (u.a. Windgeschwindigkeit, Temperatur, Luftdruck, Feuchte) als Ergebnis der Analyse von Beobachtungsdaten mit einem einheitlichen atmosphärischen Strömungsmodell. Durch die Fixierung des Strömungsmodells ergibt sich eine große zeitliche Konsistenz, die für die Zwecke des Langzeitabgleichs von großem Vorteil ist.

**Referenzertrag:** Die für jeden WEA-Typ einschließlich der jeweiligen Nabenhöhe bestimmte Strommenge, die dieser Typ bei Errichtung am Referenzstandort i.S. des EEG rechnerisch auf Basis einer vermessenen Leistungskennlinie in fünf Betriebsjahren erbringen würde [1].

**Referenzstandort:** Standort mit einem theoretischen, fest definierten Windpotenzial. Die Definition des Standorts ist im EEG [1] Anlage 2 zu finden.

**Typ einer Windenergieanlage (WEA-Typ):** Bestimmt durch die Typenbezeichnung, den Rotordurchmesser, die Nennleistung und die Nabenhöhe gemäß den Angaben der Herstellerfirma [1].

---

<sup>1</sup> Bei einer WEA mit vertikaler Achse ist die Nabenhöhe die Höhe der Äquatorebene.

<sup>2</sup> Höchste elektrische Dauer-Leistungsabgabe, für die eine WEA unter bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen ausgelegt ist.

**Vergleichs-WEA:** Vorhandene WEA, deren Betriebsergebnisse als Vergleichsdaten für die Energieertragsbestimmung genutzt werden zur Verifizierung der Berechnungsmethode.

**Verfügbarkeit (zeitliche Verfügbarkeit):** Verhältniszahl aus Gesamtstundenzahl einer Zeitspanne abzüglich der Stundenzahl, in der die WEA wegen Wartung oder Störung nicht betrieben wurde, und Gesamtstunden der Zeitspanne, ausgedrückt in Prozent.

**Verfügbarkeit (energetische Verfügbarkeit):** Verhältniszahl aus dem tatsächlich in einem Bezugszeitraum erzeugten Energieertrag zu dem Energieertrag, der in diesem Zeitraum hätte von der WEA erzeugt werden können, wenn die WEA nicht aus technischen oder sonstigen Gründen zu einzelnen Zeiten im Bezugszeitraum stillgestanden hätte. Die energetische Verfügbarkeit bezieht sich im Gegensatz zur zeitlichen Verfügbarkeit auf den Energieverlust. Ist die energetische Verfügbarkeit geringer als die zeitliche Verfügbarkeit, fanden Stillstände der Anlage bei windstärkeren Zeiten statt.

**Verluste:** Im Sinne dieser Richtlinie Ertragsverluste einer WEA, die z. B. durch Abschattungseffekte in Windparks oder technisch bedingt sind und/oder sich durch nicht optimale Betriebsbedingungen ergeben.

**Windparkfläche:** Bereich der geplanten WEA

**Windpotenzial:** Windverhältnisse an einem Standort, die bezogen auf eine Höhe ü. Gr. durch Windfeldparameter (Windgeschwindigkeit, Windleistungsdichte, Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung) angegeben werden.

**Soll-/Kann-/Muss-Regelung:** Bei der Erstellung der TR 6 Revision 10 wurden insbesondere die Kapitel 7.2 Energieverlustfaktoren und 4 Anforderungen an Verfahren zur Langzeitkorrektur überarbeitet. In der TR 6 Revision 11 wurden die Kapitel 3.1 bis 3.4 als auch das Kapitel 8 Unsicherheitsanalyse überarbeitet. Für diese Kapitel sind die folgenden Regelungen zunächst anzuwenden:

- **Muss-Regelungen:** Derartige Regelungen überlassen dem Gutachter keinerlei Ermessensspielraum und sind einzuhalten. Eine Nicht-Einhaltung stellt eine Abweichung zur TR 6 dar. Dies gilt auch für im Imperativ formulierte Regelungen der Form "... ist/sind zu ...".
- **Soll-Regelungen:** Derartige Regelungen sind im Regelfall vom Gutachter einzuhalten. In untypischen bzw. Sonderfällen wird dem Gutachter jedoch ein gewisser Ermessensspielraum eingeräumt. Eine Nicht-Einhaltung ist stets nachvollziehbar zu begründen und stellt auch nur dann keine Abweichung zur TR 6 dar.
- **Kann-Regelungen:** Derartige Regelungen haben lediglich einen empfehlenden Charakter und räumen dem Gutachter somit freies Ermessen ein. Eine Nicht-Einhaltung kann keine Abweichung zur TR 6 darstellen.