

## Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort .....	2
Einleitung .....	10
1 Anwendungsbereich .....	11
2 Normative Verweisungen .....	11
3 Begriffe .....	11
4 Symbole, Einheiten und Abkürzungen .....	14
5 Allgemeines .....	16
5.1 Aufbau des Dokuments .....	16
5.2 Sicherheit bei den Prüfungen .....	17
6 Prüfanforderungen .....	17
6.1 Allgemeines .....	17
6.2 Anforderungen an den Messort .....	17
6.3 Messlastfälle .....	18
6.3.1 Allgemeines .....	18
6.3.2 MLCs im stationären Betrieb .....	18
6.3.3 MLCs bei transienten Ereignissen .....	19
6.3.4 MLCs für die dynamische Beschreibung .....	19
6.3.5 Erfassungsmatrizen .....	20
6.4 Zu messende Größen .....	24
6.4.1 Allgemeines .....	24
6.4.2 Lastgrößen .....	25
6.4.3 Meteorologische Größen .....	26
6.4.4 Betriebsgrößen der WEA .....	27
6.5 Änderungen der WEA-Konfiguration .....	27
7 Messgeräteausrüstung .....	28
7.1 Lastgrößen .....	28
7.1.1 Typen von Messwertaufnehmern .....	28
7.1.2 Auswahl der Anbringungsstellen von Messwertaufnehmern .....	28
7.1.3 Messung der Biegemomente an der Blattwurzel .....	28
7.1.4 Verteilung des Biegemoments am Rotorblatt .....	29
7.1.5 Torsionsfrequenz/-dämpfung des Rotorblatts .....	29
7.1.6 Messung von Gier- und Kippmoment des Rotors .....	29
7.1.7 Messung des Rotordrehmoments .....	29
7.1.8 Messung der Biegemomente am Turmfuß .....	29
7.1.9 Biegemomente an der Turmspitze .....	29
7.1.10 Biegemomente an der Turmmitte .....	30
7.1.11 Drehmoment am Turm .....	30

	Seite
7.1.12 Beschleunigung der Turmspitze.....	30
7.1.13 Blatteinstelllasten (auf der Nabenseite der Rotorblattlager) .....	30
7.2 Meteorologische Größen .....	30
7.2.1 Anforderungen an Messung und Aufstellung .....	30
7.2.2 Möglichkeit der Vereisung .....	30
7.2.3 Stabilität der Atmosphäre .....	30
7.3 Betriebsgrößen von WEAs .....	31
7.3.1 Elektrische Leistung .....	31
7.3.2 Rotordrehzahl oder Generatorzahl .....	31
7.3.3 Gierfehler .....	31
7.3.4 Rotorazimutwinkel .....	31
7.3.5 Rotorblattstellung.....	31
7.3.6 Blatteinstellgeschwindigkeit.....	31
7.3.7 Bremsmoment .....	31
7.3.8 WEA-Zustand .....	31
7.3.9 Bremszustand.....	32
7.4 Datenerfassungssystem .....	32
7.4.1 Allgemeines .....	32
7.4.2 Auflösung.....	32
7.4.3 Anti-Aliasing.....	32
8 Bestimmung von Kalibrierfaktoren .....	32
8.1 Allgemeines .....	32
8.2 Kalibrierung von Lastkanälen .....	33
8.2.1 Allgemeines .....	33
8.2.2 Biegemomente am Rotorblatt.....	34
8.2.3 Momente an der Hauptwelle .....	34
8.2.4 Biegemomente am Turm.....	35
8.2.5 Drehmoment am Turm .....	36
8.3 Kalibrierung von unbelasteten Kanälen.....	36
8.3.1 Blatteinstellwinkel .....	36
8.3.2 Rotorazimutwinkel .....	36
8.3.3 Gierwinkel.....	37
8.3.4 Windrichtung.....	37
8.3.5 Blatteinstelllasten.....	37
8.3.6 Bremsmoment .....	37
9 Überprüfung der Daten.....	37
9.1 Allgemeines .....	37
9.2 Nachweisprüfungen.....	38
9.2.1 Allgemeines .....	38

	Seite
9.2.2 Momente am Rotorblatt.....	39
9.2.3 Hauptwelle .....	39
9.2.4 Turm.....	40
10 Verarbeitung der gemessenen Daten .....	40
10.1 Allgemeines.....	40
10.2 Hauptlastgrößen.....	40
10.3 Lastgrößen für große WEA.....	41
10.4 Erkennen von Windgeschwindigkeitstendenzen.....	41
10.5 Statistik.....	41
10.6 Rainflow-Zählung .....	42
10.7 Kumulatives Rainflow-Spektrum .....	42
10.8 Schadensäquivalente Last.....	42
10.9 Klassifizierung der Windgeschwindigkeit in Bins .....	43
10.10 Spektrale Leistungsdichte .....	43
11 Schätzung der Unsicherheit.....	44
12 Prüfbericht.....	44
Anhang A (informativ) Beispielkoordinatensysteme.....	48
A.1 Allgemeines.....	48
A.2 Koordinatensystem des Rotorblatts .....	48
A.3 Koordinatensystem der Nabe.....	48
A.4 Koordinatensystem der Gondel.....	49
A.5 Koordinatensystem des Turms .....	49
A.6 Gierfehler.....	50
A.7 Kegelwinkel und Kippwinkel.....	51
A.8 Rotorazimutwinkel.....	51
A.9 Blatteinstellwinkel.....	51
Anhang B (informativ) Verfahren für die Bewertung von Unsicherheiten bei Lastmessungen an WEAs .....	52
B.1 Liste der Kurzzeichen.....	52
B.2 Allgemeines Verfahren.....	53
B.2.1 Standardunsicherheit .....	53
B.2.2 Analytische Kombination von Standardunsicherheiten.....	54
B.2.3 Gesamtunsicherheit .....	55
B.2.3.1 Kalibrierunsicherheit.....	55
B.2.3.3 Gesamtunsicherheit .....	55
B.3 Unsicherheiten von Bin-gemittelten Werten.....	56
B.3.1 Allgemeines.....	56
B.3.2 Kalibrier- und Signalunsicherheit .....	56
B.3.3 Unsicherheit der Bin-Streuung .....	56

	Seite
B.3.4 Unsicherheit der Größe der $x$ -Achse .....	56
B.3.5 Unsicherheit der Bin-gemittelten Mittelwerte .....	56
B.4 Standardunsicherheit von DEL und Lastspektren .....	56
B.5 Beispiele für die Unsicherheitsermittlung .....	57
B.5.1 Beispiel für eine analytische Shunt-Kalibrierung des Drehmoments am Turm .....	57
B.5.1.1 Unsicherheitskomponenten .....	57
B.5.1.2 Kalibrierunsicherheit einer analytischen Kalibrierung .....	58
B.6 Bestimmung und Anwendung der Kalibriermatrix .....	63
B.6.1 Bestimmung der Kalibriermatrix .....	63
B.6.2 Anwendung der Kalibriermatrix .....	65
B.6.3 Zeitreihen .....	66
Anhang C (informativ) Beispieldarstellung von Messungen mechanischer Lasten und deren Auswertung .....	67
C.1 Allgemeines .....	67
Anhang D (informativ) Empfehlungen für Offshore-Messungen .....	79
Anhang E (informativ) Gültigkeitsprüfung der Lastmodelle .....	81
E.1 Allgemeines .....	81
E.2 Methoden für den Vergleich von Lasten .....	82
E.2.1 Statistische Einordnung in Bins .....	82
E.2.2 Spektralfunktionen .....	83
E.2.3 Ermüdungsspektren .....	84
E.2.4 Punktweise .....	84
Anhang F (informativ) Bestimmungsmethoden für Windgeschwindigkeitstendenzen .....	86
F.1 Liste der Symbole .....	86
F.2 Allgemeines .....	86
F.3 Methoden der Tendenzbestimmung .....	87
F.4 Fortlaufendes Verfahren .....	91
Anhang G (informativ) Hinweise zur Datenerfassung .....	92
G.1 Datenerfassungssystem .....	92
G.1.1 Allgemeines .....	92
G.1.2 Auflösung .....	92
G.1.3 Abtastmodell und Filterung .....	93
G.1.3.1 Komponenten des Abtastmodells .....	93
G.1.3.2 Gültige Datenbandbreite .....	93
G.1.3.3 Abtastfrequenz .....	94
G.1.3.4 Anti-Aliasing-Filtertyp .....	94
G.1.3.5 Filtergrenzfrequenz .....	95
G.1.4 Weitere Betrachtungen .....	95
Anhang H (informativ) Lastkalibrierung .....	96

	Seite
H.1 Allgemeines .....	96
H.2 Kalibrierung des Biegemoments am Rotorblatt mit Schwerkraftlasten .....	96
H.3 Analytische Kalibrierung der Biegemomente am Turm .....	97
H.4 Kalibrierung des Rotordrehmoments mit äußeren Lasten .....	98
Anhang I (informativ) Temperaturdrift .....	100
I.1 Allgemeines .....	100
I.2 Bekannte Probleme .....	100
I.3 Empfehlungen .....	101
Anhang J (informativ) Messungen mechanischer Lasten bei Vertikalachs-WEAs .....	102
J.1 Allgemeines .....	102
J.2 Begriffe .....	102
J.3 Koordinatensysteme .....	103
J.4 Zu messende Größen .....	104
J.4.1 Hauptlasten .....	104
J.5 Messungen .....	105
J.5.1 Messung der Biegemomente der Rotorblattbefestigung .....	105
J.5.2 Biegemoment in der Mitte des Rotorblatts .....	105
J.5.3 Modalfrequenz und -dämpfung am Rotorblatt .....	105
J.5.4 Biegemoment an der Verbindungsstrebe .....	105
J.5.5 Axialkraft an der Verbindungsstrebe .....	105
J.5.6 Modalfrequenz und -dämpfung an der Verbindungsstrebe .....	105
J.5.7 Drehmoment an der Rotorwelle .....	105
J.5.8 Normalbiegemoment am Turm .....	106
Literaturhinweise .....	107
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen .....	108
 <b>Bilder</b>	
Bild 1 – Hauptlasten an der WEA: Lasten an Turmfuß, Rotor und Rotorblättern .....	25
Bild A.1 – Koordinatensystem des Rotorblatts .....	48
Bild A.2 – Koordinatensystem der Nabe .....	49
Bild A.3 – Koordinatensystem der Gondel .....	49
Bild A.4 – Koordinatensystem des Turms .....	50
Bild A.5 – Gierfehler .....	50
Bild A.6 – Kegelwinkel und Kippwinkel .....	51
Bild B.1 – Erklärung der verwendeten Symbole .....	62
Bild C.1 – Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe als Funktion der Zeit .....	67
Bild C.2 – Turbulenzintensität in Nabenhöhe als Funktion der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe .....	68
Bild C.3 – Tendenz der Turbulenzintensität als Funktion der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe .....	68
Bild C.4 – Globale Erfassungsmatrix mit allen Lastkanälen im Betrieb .....	69

	Seite
Bild C.5 – IEC-Beispiel-WEA bei 9,1 m/s – Betriebsgrößen und meteorologische Größen der WEA .....	70
Bild C.6 – IEC-Beispiel-WEA bei 9,1 m/s – Hauptlastkomponenten .....	71
Bild C.7 – 10-min-Statistik für das Biegemoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1 in Sehnenrichtung.....	72
Bild C.8 – Spektrale Leistungsdichte des Biegemoments an der Blattwurzel von Rotorblatt 1 in Sehnenrichtung.....	73
Bild C.9 – Kumulatives Rainflow-Spektrum für Rotorblatt 1 bei einem Biegemoment an der Blattwurzel in Sehnenrichtung während einer Messperiode .....	75
Bild C.10 – Normale Abschaltung einer IEC-Beispiel-WEA bei 9,5 m/s – Betriebsgrößen und meteorologische Größen der WEA .....	77
Bild C.11 – Normale Abschaltung einer IEC-Beispiel-WEA bei 9,5 m/s – Hauptlastkomponenten .....	78
Bild D.1 – Beispiel eines Wellenspektrums und Monopil-Verhalten.....	79
Bild D.2 – Beispiel eines Wellenspektrums .....	80
Bild E.1 – Gemessene Daten .....	82
Bild E.2 – Simulierte Daten.....	82
Bild E.3 – Vergleich der 10-min-Statistiken der Bin-gemittelten Windgeschwindigkeit .....	82
Bild E.4 – Vergleich der 1 – Hz-Ersatzlasten.....	83
Bild E.5 – Vergleich der 1 – Hz-Ersatzlasten (Bin-gemittelte Windgeschwindigkeit) .....	83
Bild E.6 – Vergleich der PSD-Funktionen.....	83
Bild E.7 – Vergleich des Ermüdungsspektrums .....	84
Bild E.8 – Punktweiser Vergleich des Verlaufs von Windgeschwindigkeit.....	85
Bild E.9 – Punktweiser Vergleich des Verlaufs von Lastzeiten .....	85
Bild F.1 – Vergleich von gemessener Windgeschwindigkeit ( $v_{meas}$ ), geglätteter und gefilterter Windgeschwindigkeit ( $v_{filt}$ ) und resultierender tendenzbereinigter Windgeschwindigkeit ( $v_{HP}$ ).....	87
Bild F.2 – Unterschiede der Turbulenzintensitäten, berechnet mit der nicht gefilterten und der gefilterten Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der mittleren gemessenen Windgeschwindigkeit.....	89
Bild F.3 – Verhältnis der Turbulenzintensitäten, berechnet mit der nicht gefilterten und der gefilterten Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der mittleren gemessenen Windgeschwindigkeit.....	90
Bild G.1 – Anti-Aliasing-Prüfung .....	93
Bild I.1 – Beobachtete Streuung in den jeweiligen 10-min-Mittelwerten des Biegemoments am Rotorblatt in Sehnenrichtung zusammen mit demselben Signal in dunkelblauer Farbe nach der Temperaturkompensation .....	100
Bild I.2 – Lineare Regression durch die Offsets, abgeleitet aus den verschiedenen Kalibrierdurchläufen.....	101
Bild J.1 – VAWT mit Darrieus-Rotor .....	103
Bild J.2 – VAWT mit spiralförmigem Darrieus-Rotor .....	103
<b>Tabellen</b>	
Tabelle 1 – MLCs im stationären Betrieb bezogen auf die in IEC 61400-1 definierten DLCs.....	19
Tabelle 2 – Messung transienter Lastfälle bezogen auf die in IEC 61400-1 definierten DLCs .....	19
Tabelle 3 – MLCs für die dynamische Beschreibung .....	20
Tabelle 4 – Erfassungsmatrix für den normalen Produktionsbetrieb für WEAs mit Stall-Regelung.....	22

	Seite
Tabelle 5 – Erfassungsmatrix für den normalen Produktionsbetrieb für WEAs, die nicht über den Strömungsabriss geregelt werden .....	23
Tabelle 6 – Erfassungsmatrix für den geparkten Zustand .....	23
Tabelle 7 – Erfassungsmatrix für normale transiente Ereignisse .....	24
Tabelle 8 – Erfassungsmatrix für außergewöhnliche transiente Ereignisse .....	24
Tabelle 9 – Hauptlastgrößen an einer WEA.....	25
Tabelle 10 – Zusätzliche Lastgrößen für WEAs mit einer Bemessungsleistung über 1 500 kW und einem Rotordurchmesser von mehr als 75 m .....	26
Tabelle 11 – Meteorologische Größen .....	26
Tabelle 12 – Betriebsgrößen einer WEA.....	27
Tabelle 13 – Zusammenstellung der geeigneten Kalibrierverfahren .....	34
Tabelle B.1 – Unsicherheitskomponenten.....	57
Tabelle B.2 – Werte und Unsicherheiten für die Berechnung .....	61
Tabelle C.1 – Bin-Daten für das Biegemoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1 in Sehnenrichtung .....	74
Tabelle C.2 – Erfassungsmatrix für Transienten beim normalen Anlauf und bei der normalen Abschaltung.....	75
Tabelle C.3 – Kurze statistische Beschreibung der normalen Abschaltung für eine IEC-Beispiel-WEA bei 9,5 m/s .....	76
Tabelle G.1 – Charakteristische Frequenzen der WEA .....	94
Tabelle G.2 – Abtastverhältnis .....	94
Tabelle J.1 – Mindestempfehlungen für die Hauptlastgrößen von VAWTs .....	104