

	Inhalt	Seite
Europäisches Vorwort .....		2
Einleitung .....		16
1 Anwendungsbereich .....		17
2 Normative Verweisungen .....		17
3 Begriffe .....		18
4 Symbole und Einheiten .....		21
5 Überblick über das Messverfahren zur Messung des Leistungsverhaltens .....		25
6 Vorbereitungen für die Messung des Leistungsverhaltens .....		29
6.1 Allgemeines .....		29
6.2 WEA und elektrischer Anschluss .....		29
6.3 Messstandort .....		29
6.3.1 Allgemeines .....		29
6.3.2 Ort der Windmesseinrichtung .....		29
6.3.3 Messsektor .....		30
6.3.4 Korrekturfaktoren und Unsicherheit durch die Störung der Anströmung aufgrund der Topographie .....		30
7 Messausrüstung .....		31
7.1 Elektrische Leistung .....		31
7.2 Windgeschwindigkeit .....		31
7.2.1 Allgemeines .....		31
7.2.2 Allgemeine Anforderungen für an einem Messmast angebrachte Anemometer .....		32
7.2.3 An der Spitze angebrachte Anemometer .....		33
7.2.4 Seitlich angebrachte Anemometer .....		33
7.2.5 Fernerfassungseinrichtungen (RSD) .....		33
7.2.6 Messung der rotoräquivalenten Windgeschwindigkeit .....		34
7.2.7 Messung der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe .....		34
7.2.8 Messungen des Windgradienten .....		34
7.3 Windrichtung .....		36
7.4 Luftdichte .....		36
7.5 Drehzahl und Blatteinstellwinkel .....		37
7.6 Zustand der Rotorblätter .....		37
7.7 Betriebsführungssystem der WEA .....		37
7.8 Datenerfassungssystem .....		37
8 Messverfahren .....		37
8.1 Allgemeines .....		37
8.2 Betrieb der WEA .....		38
8.3 Datenerfassung .....		38
8.4 Ablehnung von Daten .....		38

	Seite
8.5 Datenbasis.....	39
9 Abgeleitete Ergebnisse.....	39
9.1 Normierung der Daten.....	39
9.1.1 Allgemeines .....	39
9.1.2 Korrektur der Störung der Anströmung seitlich angebrachter Anemometer durch den Messmast .....	40
9.1.3 Windgradientenkorrektur (wenn REWS-Messungen verfügbar sind) .....	40
9.1.4 Korrektur der Windrichtungsänderung mit der Höhe.....	43
9.1.5 Luftdichtenormierung.....	43
9.1.6 Turbulenznormierung .....	44
9.2 Ermittlung der gemessenen Leistungskurve .....	44
9.3 Jahresenergieerzeugung ( <i>AEP</i> ).....	45
9.4 Leistungsbeiwert.....	47
10 Form des Messberichtes .....	47
Anhang A (normativ) Bewertung des Einflusses von WEA und Hindernissen am Messstandort .....	55
A.1 Allgemeines .....	55
A.2 Anforderungen bezüglich benachbarter und in Betrieb befindlicher WEA .....	55
A.3 Anforderungen in Bezug auf Hindernisse.....	56
A.4 Berechnungsverfahren für auszuschließende Sektoren .....	56
A.5 Besondere Anforderungen für sehr große Hindernisse .....	59
Anhang B (normativ) Bewertung des Geländes am Messstandort .....	60
Anhang C (normativ) Verfahren der Standortkalibrierung .....	63
C.1 Allgemeines .....	63
C.2 Überblick über das Verfahren.....	63
C.3 Messaufbau .....	65
C.3.1 Betrachtungen für die Auswahl der zu testenden/prüfenden WEA und des Standortes des Messmastes .....	65
C.3.2 Messgeräteausstattung .....	66
C.4 Datenerfassung und Ablehnungskriterien .....	67
C.5 Auswertung.....	68
C.5.1 Bewertung der Bedingungen des Windgradienten.....	68
C.5.2 Verfahren 1: Windrichtungs- und Windgradienten-BINs .....	70
C.5.3 Verfahren 2: Lineare Regression, wenn der Windgradient keinen erheblichen Einfluss ausübt.....	71
C.5.4 Weitere Berechnungen.....	71
C.6 Unsicherheit der Standortkalibrierung .....	72
C.6.1 Unsicherheit der Kategorie A der Standortkalibrierung .....	72
C.6.2 Unsicherheit der Kategorie B der Standortkalibrierung.....	74
C.6.3 Kombinierte Unsicherheit .....	74
C.7 Qualitätsüberprüfungen und zusätzliche Unsicherheiten.....	74

	Seite
C.7.1 Konvergenzprüfung .....	74
C.7.2 Korrelationsprüfung für die lineare Regression (siehe C.5.3) .....	75
C.7.3 Änderung der Korrektur zwischen benachbarten Windrichtungs-BINs .....	75
C.7.4 Entfernung des Windrichtungsaufnehmers zwischen der Standortkalibrierung und der Messung der Leistungskurve .....	76
C.7.5 Standortkalibrierung und Messungen der Leistungskurve in verschiedenen Jahreszeiten .....	76
C.8 Überprüfung der Ergebnisse .....	77
C.9 Beispiele für die Standortkalibrierung .....	78
C.9.1 Beispiel A .....	78
C.9.2 Beispiel B .....	83
C.9.3 Beispiel C .....	90
Anhang D (normativ) Bestimmung der Messunsicherheit .....	93
Anhang E (informativ) Theoretische Grundlagen für die Bestimmung der Messunsicherheit mit dem BIN-Verfahren .....	96
E.1 Allgemeines .....	96
E.2 Kombination von Unsicherheiten .....	96
E.2.1 Allgemeines .....	96
E.2.2 Erweiterte Unsicherheit .....	98
E.2.3 Basis für die Berechnung der Unsicherheit .....	99
E.3 Unsicherheiten der Kategorie A .....	103
E.3.1 Allgemeines .....	103
E.3.2 Unsicherheit der Kategorie A der elektrischen Leistung .....	103
E.3.3 Unsicherheiten der Kategorie A der Standortkalibrierung .....	103
E.4 Unsicherheiten der Kategorie B: Einführung und Datenerfassungssystem .....	103
E.4.1 Unsicherheiten der Kategorie B: Einführung .....	103
E.4.2 Unsicherheiten der Kategorie B: Datenerfassungssystem .....	104
E.5 Unsicherheiten der Kategorie B: Ausgangsleistung .....	104
E.5.1 Allgemeines .....	104
E.5.2 Unsicherheiten der Kategorie B: Ausgangsleistung – Stromwandler .....	105
E.5.3 Unsicherheiten der Kategorie B: Ausgangsleistung – Spannungswandler .....	105
E.5.4 Unsicherheiten der Kategorie B: Ausgangsleistung – Leistungsmessumformer oder andere Leistungsmessgeräte .....	106
E.5.5 Unsicherheiten der Kategorie B: Ausgangsleistung – Datenerfassung .....	106
E.6 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Einführung und Aufnehmer .....	106
E.6.1 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Einführung .....	106
E.6.2 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Hardware .....	107
E.6.3 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – An eine Messmast angebrachte Aufnehmer .....	107
E.7 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – RSD .....	110
E.7.1 Allgemeines .....	110

	Seite
E.7.2 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – RSD – Kalibrierung.....	110
E.7.3 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – RSD – Vor-Ort-Prüfung .....	110
E.7.4 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – RSD – Klassifikation.....	110
E.7.5 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – RSD – Montage.....	112
E.7.6 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – RSD – Änderung der Anströmung .....	112
E.7.7 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – RSD – Überwachungsprüfung .....	113
E.8 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – REWS.....	114
E.8.1 Allgemeines .....	114
E.8.2 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – REWS – Windgeschwindigkeitsmessung über den gesamten Rotor .....	114
E.8.3 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – REWS – Windrichtungsänderung mit der Höhe .....	115
E.9 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände.....	115
E.9.1 Allgemeines .....	115
E.9.2 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Vorkalibrierung .....	116
E.9.3 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Nachkalibrierung.....	116
E.9.4 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Klassifikation.....	117
E.9.5 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Montage.....	118
E.9.6 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Blitzfangstange .....	118
E.9.7 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Datenerfassung .....	118
E.9.8 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Änderung der Korrektur zwischen benachbarten BINs .....	119
E.9.9 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Entfernung des Windrichtungsaufnehmers.....	119
E.9.10 Unsicherheiten der Kategorie B: Windgeschwindigkeit – Gelände – Jahreszeitliche Schwankungen .....	119
E.10 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte.....	119
E.10.1 Allgemeines .....	119
E.10.2 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Temperatur – Einführung .....	120
E.10.3 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Temperatur – Kalibrierung.....	121
E.10.4 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Temperatur – Schutz gegen Einstrahlung.....	121
E.10.5 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Temperatur – Montage .....	121
E.10.6 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Temperatur – Datenerfassung .....	121
E.10.7 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Druck – Einführung.....	121
E.10.8 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Druck – Kalibrierung .....	122
E.10.9 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Druck – Montage .....	122
E.10.10 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Druck – Datenerfassung .....	123
E.10.11 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Relative Feuchte – Einführung .....	123
E.10.12 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Relative Feuchte – Kalibrierung .....	124
E.10.13 Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Relative Feuchte – Montage .....	124

	Seite	
E.10.14	Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Relative Feuchte – Datenerfassung .....	124
E.10.15	Unsicherheiten der Kategorie B: Luftdichte – Korrektur .....	124
E.11	Unsicherheiten der Kategorie B: Verfahren .....	125
E.11.1	Allgemeines .....	125
E.11.2	Unsicherheiten der Kategorie B: Verfahren – Windbedingungen .....	125
E.11.3	Unsicherheiten der Kategorie B: Verfahren – Jahreszeitliche Effekte .....	131
E.11.4	Unsicherheiten der Kategorie B: Verfahren – Turbulenznormierung (oder das Fehlen einer Turbulenznormierung) .....	131
E.11.5	Unsicherheiten der Kategorie B: Verfahren – Kaltes Klima .....	132
E.12	Unsicherheiten der Kategorie B: Windrichtung .....	132
E.12.1	Allgemeines .....	132
E.12.2	Unsicherheiten der Kategorie B: Windrichtung – Windfahne oder Ultraschallanemometer .....	133
E.12.3	Unsicherheiten der Kategorie B: Windrichtung – RSD .....	134
E.13	Kombinierte Unsicherheiten .....	135
E.13.1	Allgemeines .....	135
E.13.2	Kombination der Unsicherheiten der Kategorie B in der elektrischen Leistung ( $u_{P,i}$ ) .....	135
E.13.3	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung ( $u_{V,i}$ ) .....	136
E.13.4	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung durch Schalenkreuz- oder Ultraschallanemometer ( $u_{VS,i}$ ) .....	136
E.13.5	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung durch RSD ( $u_{VR,i}$ ) .....	136
E.13.6	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung aus der REWS ( $u_{REWS,i}$ ) .....	137
E.13.7	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung aus der REWS für einen Messmast weit oberhalb der Nabenhöhe oder eine RSD an einem Messmast unterhalb der Nabenhöhe .....	137
E.13.8	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung aus der REWS für einen Messmast in Nabenhöhe und eine RSD für die Messung des Windgradienten mit einer absoluten Windgeschwindigkeit .....	140
E.13.9	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung aus der REWS für einen Messmast in Nabenhöhe und eine RSD für die Messung des Windgradienten mit einer relativen Windgeschwindigkeit .....	142
E.13.10	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung aus der REWS mit einer Windrichtungsänderung mit der Höhe über dem gesamten Rotor $u_{REWS,veer,i}$ .....	143
E.13.11	Kombination der Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeitsmessung durch die Störung der Anströmung bei der Standortkalibrierung $u_{VT,i}$ .....	147
E.13.12	Kombination der Unsicherheiten in der Temperaturmessung $u_{T,i}$ .....	148
E.13.13	Kombination der Unsicherheiten in der Druckmessung $u_{B,i}$ .....	148
E.13.14	Kombination der Unsicherheiten in der Feuchtemessung $u_{RH,i}$ .....	149
E.13.15	Kombination der Unsicherheiten für die verfahrensbezogenen Komponenten $u_{M,i}$ .....	149
E.13.16	Kombination der Unsicherheiten in der Windrichtungsmessung mit einer Windfahne oder einem Ultraschallanemometer $u_{WV,i}$ .....	150

	Seite
E.13.17 Kombination der Unsicherheiten in der Windrichtungsmessung mit einer RSD $u_{WR,j}$ .....	150
E.13.18 Kombinierte Unsicherheiten der Kategorie B .....	150
E.13.19 Kombinierte Standardunsicherheit – Leistungskurve.....	151
E.13.20 Kombinierte Standardunsicherheiten – Energieerzeugung .....	151
E.14 Relevanz der Unsicherheitsbedingungen unter spezifischen Bedingungen.....	151
E.15 Referenztabellen .....	152
Anhang F (normativ) Kalibrierverfahren für Anemometer im Windkanal.....	156
F.1 Allgemeine Anforderungen .....	156
F.2 Anforderungen an den Windkanal.....	156
F.3 Anforderungen an die Messgeräteausstattung und an den Kalibrieraufbau.....	158
F.4 Kalibrierverfahren .....	158
F.4.1 Allgemeines Verfahren für Schalenkreuz- und Ultraschallanemometer .....	158
F.4.2 Verfahren für die Kalibrierung von Ultraschallanemometern .....	159
F.4.3 Bestimmung der Windgeschwindigkeit an der Position des Anemometers .....	159
F.5 Auswertung der Daten.....	160
F.6 Analyse der Unsicherheit.....	160
F.7 Form des Messberichtes .....	161
F.8 Beispiel für eine Unsicherheitsberechnung .....	162
Anhang G (normativ) Befestigung von Messgeräten am Messmast .....	165
G.1 Allgemeines .....	165
G.2 Einzeln an der Spitze angebrachte Anemometer.....	165
G.3 An der Spitze nebeneinander angebrachte Anemometer .....	167
G.4 Seitlich angebrachte Messgeräte .....	170
G.4.1 Allgemeines .....	170
G.4.2 Rohrmessmasten .....	170
G.4.3 Gittermessmasten .....	172
G.5 Blitzschutz .....	177
G.6 Befestigung anderer Messgeräte .....	177
Anhang H (normativ) Messung des Leistungsverhaltens kleiner WEA .....	178
H.1 Allgemeines .....	178
H.2 Definitionen.....	178
H.3 Definition und Errichtung von WEA .....	178
H.4 Anordnung des Messmastes .....	179
H.5 Messeinrichtung .....	180
H.6 Messverfahren.....	180
H.7 Abgeleitete Ergebnisse.....	181
H.8 Messbericht .....	181
H.9 Anhang A – Bewertung des Einflusses von WEA und Hindernissen am Messstandort .....	182
H.10 Anhang B – Bewertung des Geländes am Messstandort .....	182

	Seite
H.11 Anhang C – Verfahren der Standortkalibrierung.....	182
Anhang I (normativ) Klassifikation von Schalenkreuz- und Ultraschallanemometern .....	183
I.1 Allgemeines.....	183
I.2 Klassifikation .....	183
I.3 Bereiche von Einflussparametern .....	184
I.4 Klassifikation von Schalenkreuz- und Ultraschallanemometern .....	184
I.5 Form des Klassifikationsberichtes.....	186
Anhang J (normativ) Bewertung der Windmessung mit einem Schalenkreuz- und einem Ultraschallanemometer .....	187
J.1 Allgemeines.....	187
J.2 Messung der Kennwerte von Anemometern.....	187
J.2.1 Messungen der Kennwerte der Schräganströmungsabhängigkeit eines Schalenkreuzanemometers im Windkanal.....	187
J.2.2 Messungen der Kennwerte der Richtungsabhängigkeit von Schalenkreuzanemometern im Windkanal.....	189
J.2.3 Messungen der Kennwerte des Rotordrehmomentes von Schalenkreuzanemometern im Windkanal.....	189
J.2.4 Messungen der Sprungantworten von Schalenkreuzanemometern im Windkanal.....	190
J.2.5 Messung von temperaturinduzierten Effekten auf das Anemometerverhalten.....	191
J.2.6 Messungen der Richtungsabhängigkeit von Ultraschallanemometern im Windkanal .....	192
J.3 Klassifikationsverfahren für Schalenkreuzanemometer auf der Grundlage von Windkanal- und Labormessungen und der Modellierung des Schalenkreuzanemometers .....	192
J.3.1 Verfahren.....	192
J.3.2 Beispiel für ein Modell des Schalenkreuzanemometers .....	192
J.4 Klassifikationsverfahren für Ultraschallanemometer auf der Grundlage von Windkanalmessungen und der Modellierung des Ultraschallanemometers .....	199
J.5 Freifeld-Vergleichsmessungen.....	200
Anhang K (normativ) Vor-Ort-Vergleich von Anemometern.....	201
K.1 Allgemeines.....	201
K.2 Vorbedingungen.....	201
K.3 Analyseverfahren .....	201
K.4 Bewertungskriterien .....	202
Anhang L (normativ) Anwendung der Fernerfassungstechnik.....	205
L.1 Allgemeines.....	205
L.2 Klassifikation von Fernerfassungseinrichtungen.....	206
L.2.1 Allgemeines.....	206
L.2.2 Datenerfassung .....	206
L.2.3 Datenaufbereitung .....	207
L.2.4 Grundsätze und Anforderungen für Prüfungen der Ansprechempfindlichkeit .....	208
L.2.5 Ermittlung des erheblichen Einflusses von Variablen .....	214
L.2.6 Bewertung der Wechselbeziehung zwischen Umgebungsvariablen .....	216

	Seite
L.2.7 Berechnung der Genauigkeitsklasse.....	218
L.2.8 Abnahmekriterien .....	220
L.2.9 Klassifikation von RSD .....	221
L.3 Nachweisprüfung des Verhaltens von Fernerfassungseinrichtungen.....	221
L.4 Ermittlung der Messunsicherheit von Fernerfassungseinrichtungen .....	224
L.4.1 Allgemeines .....	224
L.4.2 Referenzunsicherheit.....	224
L.4.3 Unsicherheit, die sich aus der RSD-Kalibrierprüfung ergibt.....	224
L.4.4 Unsicherheit durch die Klassifikation der Fernerfassungseinrichtung .....	226
L.4.5 Unsicherheit durch eine inhomogene Strömung innerhalb des Messvolumens .....	227
L.4.6 Unsicherheit durch Montageeffekte.....	228
L.4.7 Unsicherheit durch die Änderung der Anströmung am Standort .....	228
L.5 Weitere Prüfungen.....	228
L.5.1 Überwachung des Verhaltens der Fernerfassungseinrichtung am Einsatzort.....	228
L.5.2 Erkennen von Fehlfunktionen der Fernerfassungseinrichtung.....	228
L.5.3 Beständigkeitssprüfung der Bewertung der systematischen Unsicherheiten der Fernerfassungseinrichtung .....	228
L.5.4 Vor-Ort-Prüfung der Fernerfassungseinrichtung .....	229
L.6 Weitere spezifische Anforderungen für die Messung der Leistungskurve .....	229
L.7 Messbericht .....	231
L.7.1 Allgemeiner Bericht über die Klassifikationsprüfung, die Kalibrierprüfung und die Überwachung der Fernerfassungseinrichtung während des Einsatzes .....	231
L.7.2 Weitere Berichte über die Klassifikationsprüfung.....	232
L.7.3 Weitere Berichte über die Kalibrierprüfung .....	232
L.7.4 Weitere Berichte über den Einsatz.....	232
Anhang M (informativ) Normierung der Messdaten der Leistungskurve auf die Turbulenzintensität .....	233
M.1 Allgemeines .....	233
M.2 Verfahren der Turbulenznormierung .....	233
M.3 Bestimmung der Nullturbulenz-Leistungskurve.....	235
M.4 Grad der Windgradientenkorrektur (Normierung) und Turbulenznormierung .....	240
M.5 Unsicherheit der Turbulenznormierung oder der Leistungskurve durch Turbulenzwirkungen .....	240
Anhang N (informativ) Windkanal-Kalibrierverfahren für Windrichtungsaufnehmer.....	242
N.1 Allgemeines .....	242
N.2 Allgemeine Anforderungen.....	242
N.3 Anforderungen an den Windkanal.....	242
N.4 Anforderungen an die Messgeräte und den Kalibrieraufbau.....	243
N.5 Kalibrierverfahren .....	244
N.6 Datenanalyse.....	245
N.7 Analyse der Unsicherheit.....	245

	Seite
N.8 Form des Messberichtes .....	245
N.9 Beispiel für die Berechnung der Unsicherheit .....	247
N.9.1 Allgemeines .....	247
N.9.2 Messunsicherheiten, die durch die Bestimmung der Strömungsrichtung im Windkanal erzeugt werden .....	247
N.9.3 Beitrag zur Messunsicherheit durch den Windrichtungsaufnehmer .....	248
N.9.4 Ergebnis der Unsicherheitsberechnung .....	249
Anhang O (informativ) Messung des Leistungsverhaltens in kaltem Klima .....	252
O.1 Einleitung .....	252
O.2 Empfehlungen .....	252
O.2.1 Allgemeines .....	252
O.2.2 Ultraschallanemometer .....	252
O.2.3 Schalenkreuzanemometer .....	252
O.3 Unsicherheiten .....	253
O.4 Prüfbericht .....	253
Anhang P (informativ) Verfahren der Windgradientennormierung .....	254
P.1 Allgemeines .....	254
Anhang Q (informativ) Definition der rotoräquivalenten Windgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Windrichtungsänderung mit der Höhe .....	256
Q.1 Allgemeines .....	256
Q.2 Definition der rotoräquivalenten Windgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Windrichtungsänderung mit der Höhe .....	257
Q.3 Messung der Windrichtungsänderung mit der Höhe .....	257
Q.4 Windrichtungsänderung mit der Höhe .....	257
Anhang R (informativ) Unsicherheitsbetrachtungen für Prüfungen an mehreren WEA .....	258
R.1 Allgemeines .....	258
Anhang S (informativ) Korrektur der Störung der Anströmung durch Gittermasten .....	263
Literaturhinweise .....	266
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen .....	267
<b>Bilder</b>	
Bild 1 – Anforderungen an den Abstand zur Windmesseinrichtung und an maximal zulässige Messsektoren .....	30
Bild 2 – Höhen zur Messung des Windgradienten, die für die Messung der rotoräquivalenten Windgeschwindigkeit geeignet sind .....	35
Bild 3 – Höhen zur Messung des Windgradienten, wenn keine Windgeschwindigkeitsmessungen oberhalb der Nabenhöhe verfügbar sind (nur für die Bestimmung des Höhenexponenten) .....	36
Bild 4 – Anwendungsprozess der verschiedenen Normierungen .....	40
Bild 5 – Beispieldarstellung einer Datenbasis: Streudiagramm der Messung des Leistungsverhaltens, aufgenommen mit 1 Hz (Mittelwerte, über 10 min gemittelt) .....	51
Bild 6 – Beispieldarstellung einer gemessenen Leistungskurve .....	51

Bild 7 – Beispieldarstellung einer $C_p$ -Kurve.....	52
Bild A.1 – Auszuschließende Sektoren aufgrund von Nachlaufströmungen benachbarter und in Betrieb befindlicher WEA und maßgeblicher/signifikanter Hindernisse .....	57
Bild A.2 – Beispiele für auszuschließende Sektoren aufgrund von Nachlaufströmungen der zu prüfenden WEA, einer benachbarten und in Betrieb befindlichen WEA und eines erheblichen Hindernisses .....	58
Bild B.1 – Darstellung des zu bewertenden Bereiches, Draufsicht .....	60
Bild B.2 – Beispiel für die Bestimmung von Geländeneigung und Unregelmäßigkeiten des Geländes gegenüber der Ausgleichsebene: „ $2L$ bis $4L$ “ und der Fall „Messsektor“ (Tabelle B.1, Zeile 2).....	61
Bild B.3 – Bestimmung der Geländeneigung für die Abstände „ $2L$ bis $4L$ “ und „ $8L$ bis $16L$ “ und den Fall „außerhalb des Messsektors“ (Tabelle B.1, Zeile 3 und Zeile 5) .....	62
Bild C.1 – Ablaufdiagramm für die Standortkalibrierung.....	64
Bild C.2 – Geländetypen.....	66
Bild C.3 – Beispiel für das Ergebnis einer Nachweisprüfung .....	78
Bild C.4 – Höhenexponent in Abhängigkeit von der Tageszeit, Beispiel A .....	79
Bild C.5 – Höhenexponenten am WEA-Standort in Abhängigkeit vom Referenzmessmast, Beispiel A, mit der farbigen Achse = Windgeschwindigkeit (m/s) .....	80
Bild C.6 – Windgeschwindigkeitsverhältnisse und Anzahl der Datenpunkte in Abhängigkeit vom Höhenexponenten und Windrichtungs-BIN – Windgeschwindigkeitsverhältnisse (Volllinien), Anzahl der Datenpunkte (Punktlinien).....	81
Bild C.7 – Datenkovergenzprüfung für das $190^\circ$ -BIN .....	83
Bild C.8 – Höhenexponent in Abhängigkeit von der Tageszeit, Beispiel B .....	84
Bild C.9 – Höhenexponenten am WEA-Standort in Abhängigkeit vom Referenzmessmast, Beispiel B.....	84
Bild C.10 – Lineare Regression der Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe am WEA-Standort in Abhängigkeit vom Referenzmessmast für das $330^\circ$ -BIN .....	85
Bild C.11 – Windgeschwindigkeitsverhältnisse in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für das $330^\circ$ -BIN .....	85
Bild C.12 – Windgeschwindigkeitsverhältnisse in Abhängigkeit vom Windgradienten für das $330^\circ$ -BIN .....	86
Bild C.13 – Höhenexponenten am WEA-Standort in Abhängigkeit vom Referenzmessmast nach der Filterung.....	87
Bild C.14 – Lineare Regression der Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe am WEA-Standort in Abhängigkeit vom Referenzmessmast für das $330^\circ$ -BIN nach der Filterung.....	87
Bild C.15 – Windgeschwindigkeitsverhältnisse in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für das $330^\circ$ -BIN nach der Filterung .....	88
Bild C.16 – Datenkovergenzprüfung für das $330^\circ$ -BIN .....	89
Bild C.17 – Windgradient der Standortkalibrierung in Abhängigkeit vom Windgradienten der Messung der Leistungskurve .....	90
Bild C.18 – Datenkovergenzprüfung für das $270^\circ$ -BIN .....	92
Bild F.1 – Definition des Volumens für die Prüfung der Gleichförmigkeit der Anströmung – Das Volumen erstreckt sich außerdem $1,5 \times b$ in die Tiefe (entlang der Anströmung) .....	157
Bild G.1 – Beispiel für die Befestigung eines Anemometers an der Spitze und Anforderungen an die Montage.....	167

Bild G.2 – Alternatives Beispiel für an der Spitze nebeneinander angebrachte Auswerteanemometer und Kontrollanemometer mit einer Windfahne und weiteren Messgeräten am Ausleger.....	169
Bild G.3 – Diagramm der Linien gleicher Windgeschwindigkeit bei Umströmung eines zylindrischen Messmastes .....	171
Bild G.4 – Relative Windgeschwindigkeit auf der Mittellinie als Funktion des Abstandes $R_d$ von der Achse eines Rohrmessmastes zum Durchmesser $d$ des Messmastes .....	172
Bild G.5 – Darstellung eines dreischenkligen Gittermessmastes.....	172
Bild G.6 – Diagramm der Linien gleicher Windgeschwindigkeit bei Umströmung eines dreieckigen Gittermastes mit einem $C_T$ -Wert von 0,5 .....	173
Bild G.7 – Relative Windgeschwindigkeit auf der Mittellinie als Funktion des Abstandes $R_d$ von der Achse eines dreieckigen Gittermessmastes mit der Gitterbreite $L_m$ für verschiedene $C_T$ -Werte .....	174
Bild G.8 – Mit der dreidimensionalen numerischen Strömungsmechanik abgeleitete Störung der Anströmung für zwei verschiedene Windrichtungen um einen dreieckigen Gittermessmast ( $C_T = 0,27$ ) – Anströmungsrichtung siehe roter Pfeil links unten in jedem Bild .....	176
Bild H.1 – Definition der Nabenhöhe und der Anordnung des Messmastes für Vertikalachs-WEA .....	179
Bild J.1 – Schräganströmungsabhängigkeit $V_d/V_{\alpha=0}$ eines Schalenkreuzanemometers als Funktion des Anströmungswinkels $\alpha$ im Vergleich mit einem Kosinusverhalten.....	188
Bild J.2 – Drehmomentmessungen im Windkanal $Q_A - Q_F$ als Funktion der Winkelgeschwindigkeit $\omega$ eines Rotors eines Schalenkreuzanemometers bei 8 m/s.....	189
Bild J.3 – Beispiel für das Lagerreibungsmoment $Q_F$ als Funktion der Temperatur für einen Bereich von Winkelgeschwindigkeiten $\omega$ .....	191
Bild J.4 – Beispiel für den Beiwert des Rotordrehmomentes $C_{QA}$ als Funktion des Windgeschwindigkeitsverhältnisses $\lambda$ , abgeleitet aus Sprungantworten mit $K_{low} = -5,5$ und $K_{high} = -6,5$ .....	194
Bild J.5 – Klassifikationsabweichungen für ein Beispiel-Schalenkreuzanemometer mit der Darstellung der Klasse 1,69A (oben) und der Klasse 6,56B (unten).....	198
Bild J.6 – Klassifikationsabweichungen für ein Beispiel-Schalenkreuzanemometer mit der Darstellung der Klasse 8,01C (oben) und der Klasse 9,94D (unten).....	199
Bild K.1 – Beispiel mit einem dreieckigen Gittermessmast.....	203
Bild K.2 – Beispiel mit einem Rohrmessmast.....	204
Bild L.1 – Abweichung in Abhängigkeit vom Winkel der Schräganströmung, bestimmt für eine Fernerfassungseinrichtung gegenüber einem Schalenkreuzanemometer in Bild J.1 .....	210
Bild L.2 – Beispiel für die Analyse der Ansprechempfindlichkeit auf den Windgradienten .....	212
Bild L.3 – Beispiel für den Windgradienten in Abhängigkeit von der Turbulenzintensität.....	216
Bild L.4 – Beispiel für die prozentuale Messabweichung der Fernerfassungseinrichtung und des Referenzaunehmers in Abhängigkeit von der Turbulenzintensität .....	217
Bild L.5 – Vergleich der 10-min-Mittelwerte der horizontalen Windgeschwindigkeitskomponente nach Messung mit einer Fernerfassungseinrichtung und einem Schalenkreuzanemometer .....	223
Bild L.6 – BIN-weiser Vergleich der Messwerte der horizontalen Windgeschwindigkeitskomponente einer Fernerfassungseinrichtung und eines Schalenkreuzanemometers.....	223
Bild L.7 – Beispiel für den zulässigen Bereich für Orte des Messvolumens .....	230

Bild M.1 – Prozess der Ermittlung einer Leistungskurve für eine bestimmte Turbulenzintensität ( $I_{\text{reference}}$ ) .....	234
Bild M.2 – Prozess der Ermittlung der Parameter der Anfangs-Nullturbulenz-Leistungskurve aus den Messdaten .....	236
Bild M.3 – Erster Ansatz der Anfangs-Nullturbulenz-Leistungskurve .....	236
Bild M.4 – Prozess der Ermittlung der Parameter der theoretischen Nullturbulenz-Leistungskurve aus den Messwerten .....	238
Bild M.5 – Angepasste Anfangs-Nullturbulenz-Leistungskurve (grün) im Vergleich zum ersten Ansatz (rot) .....	239
Bild M.6 – Prozess der Ermittlung der End-Nullturbulenz-Leistungskurve aus den Messdaten .....	239
Bild M.7 – Angepasste Anfangs-Nullturbulenz-Leistungskurve (grün) im Vergleich zur End-Nullturbulenz-Leistungskurve (schwarz) .....	240
Bild N.1 – Beispiel für einen Kalibrieraufbau für einen Windrichtungsaufnehmer im Windkanal .....	244
Bild Q.1 – Mit LIDAR über ebenem Gelände gemessene Windprofile .....	256
Bild S.1 – Beispiel für die Störung der Anströmung durch den Mast .....	263
Bild S.2 – Restwerte der Störung der Anströmung in Abhängigkeit von der Windrichtung .....	265

## Tabellen

Tabelle 1 – Überblick über Messanordnungen für die Windmessung bei Messungen der Leistungskurve nach den Anforderungen dieser Norm .....	28
Tabelle 2 – Messanordnungen für die Messung der Windgeschwindigkeit (X bezeichnet eine zulässige Anordnung) .....	32
Tabelle 3 – Beispiel für eine REWS-Berechnung .....	42
Tabelle 4 – Beispieldarstellung einer gemessenen Leistungskurve .....	52
Tabelle 5 – Beispieldarstellung der geschätzten Jahresenergieerzeugung .....	54
Tabelle A.1 – Anforderungen an Hindernisse: Erheblichkeit von Hindernissen .....	56
Tabelle B.1 – Anforderungen an den Messstandort: Topographische Unregelmäßigkeiten .....	61
Tabelle C.1 – Anströmungskorrekturen der Standortkalibrierung (Windgeschwindigkeitsverhältnis) .....	82
Tabelle C.2 – Datenpunkte der Standortkalibrierung .....	82
Tabelle C.3 – $r^2$ -Werte für jedes Windrichtungs-BIN .....	89
Tabelle C.4 – Zusätzliche Unsicherheit durch Änderung zwischen BINs .....	89
Tabelle C.5 – Zusätzliche Unsicherheit durch Änderung zwischen BINs .....	92
Tabelle D.1 – Liste der Unsicherheitskomponenten .....	93
Tabelle E.1 – Erweiterte Unsicherheiten .....	98
Tabelle E.2 – Liste der Unsicherheiten der Kategorien B und A .....	100
Tabelle E.3 – Beispiel für die Unsicherheiten durch nicht durchgeführte Windgradientenmessungen .....	127
Tabelle E.4 – Beispiel für die Standardunsicherheiten durch nicht durchgeführte Messungen der Windrichtungsänderung mit der Höhe .....	129
Tabelle E.5 – Unsicherheitsbeiträge durch fehlende Kenntnisse über die Schräganströmung .....	130
Tabelle E.6 – Unsicherheitsbeiträge durch fehlende Kenntnisse über die Turbulenz .....	130
Tabelle E.7 – Empfohlene Annahmen für die Korrelationen von Messunsicherheiten zwischen verschiedenen Messhöhen .....	139

	Seite
Tabelle E.8 – Empfohlene Annahmen für die Korrelation von Messunsicherheiten der relativen Windrichtungsmessung in verschiedenen Messhöhen.....	145
Tabelle E.9 – Unsicherheiten durch die Luftdichtenormierung .....	152
Tabelle E.10 – Empfindlichkeitsfaktoren .....	153
Tabelle E.11 – Unsicherheiten der Kategorie B .....	154
Tabelle F.1 – Beispiel für die Bewertung der Unsicherheiten der Anemometerkalibrierung .....	162
Tabelle G.1 – Abschätzungsverfahren für $C_T$ für verschiedene Gittermasttypen .....	174
Tabelle H.1 – Spannungseinstellungen für die Batteriebank .....	181
Tabelle I.1 – Bereiche von Einflussparametern (10-min-Mittelwerte) der Klassen A, B, C, D und S.....	185
Tabelle J.1 – Schräganströmungsabhängigkeit für ein Beispiel-Schalenkreuzanemometer.....	195
Tabelle J.2 – Reibungsbeiwerte für ein Beispiel-Schalenkreuzanemometer.....	196
Tabelle J.3 – Sonstige Werte für die Klassifikation für ein Beispiel-Schalenkreuzanemometer.....	197
Tabelle L.1 – Beispiele für die BIN-Breite für eine Liste von Umgebungsvariablen.....	211
Tabelle L.2 – Parameter, die aus einer Analyse der Ansprechempfindlichkeit einer Fernerfassungseinrichtung abgeleitet wurden .....	212
Tabelle L.3 – Bereiche von Umgebungsparametern für die Analyse der Ansprechempfindlichkeit .....	214
Tabelle L.4 – Beispieldauswahl von Umgebungsvariablen, für die sich ein erheblicher Einfluss ergeben hat .....	215
Tabelle L.5 – Parameter der Analyse der Ansprechempfindlichkeit, die nach der Analyse der Wechselbeziehung der Variablen verbleiben.....	218
Tabelle L.6 – Schema für die Berechnung des größten Einflusses von Umgebungsvariablen .....	219
Tabelle L.7 – Vorläufige Genauigkeitsklassen einer Fernerfassungseinrichtung unter Berücksichtigung sowohl aller als auch der erheblichen Einflussvariablen .....	220
Tabelle L.8 – Beispiel für die endgültigen Genauigkeitsklassen einer Fernerfassungseinrichtung .....	220
Tabelle L.9 – Beispiel für Unsicherheitsberechnungen, die bei der Kalibrierung einer Fernerfassungseinrichtung als systematische Unsicherheiten entstehen .....	225
Tabelle N.1 – Unsicherheitsbeiträge bei der Kalibrierung von Windrichtungsaufnehmern.....	250
Tabelle N.2 – Unsicherheitsbeiträge und Gesamtstandardunsicherheit bei der Kalibrierung von Windrichtungsaufnehmern .....	251
Tabelle R.1 – Liste der korrelierten Unsicherheitskomponenten .....	259