

	DIN IEC 61400-11 (VDE 0127-11)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE

ICS 17.140.20; 27.180

Einsprüche bis 2009-03-31

EntwurfVorgesehen als Ersatz für
DIN EN 61400-11
(VDE 0127-11):2007-03

**Windenergieanlagen –
Teil 11: Schallmessverfahren
(IEC 88/324/CD:2008)**

Wind turbines –
Part 11: Acoustic noise measurement techniques
(IEC 88/324/CD:2008)

Aérogénérateurs –
Partie 11 : Techniques des mesure du bruit acoustique
(CEI 88/324/CD:2008)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2009-01-12 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an **dke@vde.com** in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter **www.dke.de/stellungnahme** abgerufen werden
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 114 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen.....	8
3 Begriffe.....	9
4 Symbole und Einheiten	11
5 Verfahrensbeschreibung.....	12
6 Messgeräte	13
7 Messungen und Durchführung der Messungen	15
8 Nicht-akustische Messungen.....	17
9 Datenauswertung.....	19
10 Angaben im Bericht.....	28
Anhang A (informativ) Weitere Charakteristiken der Geräuschabstrahlung von WEA und ihre Quantifizierung.....	40
A.1 Allgemeines	40
A.2 Infraschall.....	40
A.3 Tieffrequente Geräusche	40
A.4 Impulshaltigkeit	41
A.5 Amplitudenmodulation des breitbandigen Geräusches	41
A.6 Andere Geräuschcharakteristiken	41
Anhang B (informativ) Einschätzung der Turbulenz	42
Anhang C (informativ) Beurteilung der Messunsicherheit	43
C.1 Allgemeines	43
C.2 Messunsicherheitskomponenten der Typen A und B	43
C.3 Standorteinflüsse	43
C.4 Messunsicherheit der akustischen Parameter.....	43
Anhang D (informativ) Effektive Rauigkeitslänge.....	45
D.1 Allgemeines	45
D.2 Methode zur Bestimmung der Rauigkeitslänge.....	45
D.3 Umrechnung von Windgradient in effektive Rauigkeitslänge	46
Anhang E (informativ) Beschreibung eines zweiten Windschirms.....	47
E.1 Allgemeines	47
E.2 Zweiter Windschirm	47
E.3 Dämpfung	47
E.4 Messverfahren	47
E.5 Weitere Anforderungen.....	48
E.6 Beispiele für zweite Windschirme	48

	Seite
E.7 Beispiele für Dämpfung	49
Anhang F (normativ) Kleine WEA.....	52
F.1 Einleitung	52
F.2 Definition von kleinen WEA	52
F.3 Messungen der Windgeschwindigkeit	52
F.4 Windgeschwindigkeitsbereich	53
F.5 Schallmessungen	53
F.6 Angaben im Bericht	53
Anhang G (informativ) Luftabsorption.....	55
Literaturhinweise.....	57
Bild 1a – Anordnung des Mikrofons – Draufsicht	32
Bild 1b – Anordnung des Mikrofons – Vertikaler Querschnitt	32
Bild 1 – Anordnung des Mikrofons.....	32
Bild 2 – Foto des Mikrofons und der schallharten Platte	33
Bild 3 – Anordnung der Mikrofon-Messpunkte – Draufsicht	34
Bild 4a – WEA mit horizontaler Achse	35
Bild 4b – WEA mit vertikaler Achse	35
Bild 4 – Darstellung zu den Definitionen von R_0 und des schrägen Abstandes R_1	35
Bild 5 – Fließdiagramm für das Datenverarbeitungsverfahren.....	36
Bild 7 – Ablaufdiagramm für die Bestimmung der tonalen Wahrnehmbarkeit.....	37
Bild 8 – Veranschaulichung des Pegels $L_{70\%}$ im kritischen Frequenzband	38
Bild 9 – Veranschaulichung der Linien, die unterhalb des Bemessungspegels $L_{70\%} + 6$ dB liegen.....	38
Bild 10 – Veranschaulichung des Pegels $L_{pn,avg}$ und der als „maskierend“ klassifizierten Linien	39
Bild 11 – Veranschaulichung der Klassifizierung aller Spektrallinien	39
Bild E.1 – Schallharte Messplatte mit Mikrofon und zweitem Windschirm. Ein Teil der Platte mit dem Referenzmikrofon ist links zu sehen.....	48
Bild E.2 – Zweiter Windschirm basierend auf einem Stahldrahtgestell und windschützendem Gewebe	49
Bild E.3 – Beispiel für die in Tabelle 2 dargestellte Dämpfung.....	51
Bild F.1 – Zulässiger Bereich für den Standort des Windmessmastes als Funktion von β – Draufsicht.....	54
Bild G.1 – Beispiel eines Terzspektrums	56
Tabelle A.1	41
Tabelle C.1 – Beispiele möglicher Werte für Messunsicherheitskomponenten des Typs B, welche relevant sind für den immissionsrelevanten Schalleistungspegel	44
Tabelle D.1 – Rauigkeitslänge.....	45
Tabelle E.2 – Beispiel für die Aufzeichnung der Dämpfung	50
Tabelle G.1 – Atmosphärische Absorption eines Reintones bei 1 000 Hz und Standardbedingungen (15 °C Lufttemperatur, 70 % relative Luftfeuchte) für verschiedene Messabstände.....	55

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 88/324/CD:2008 „Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 88 „Wind turbine systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 383 „Windenergieanlagen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61400-11 (VDE 0127-11):2007-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) alle Abschnitte wurden überarbeitet;
- b) Anhänge E, F und G neu hinzugefügt.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
—	IEC 60386:1972 + A1:1988	DIN IEC 60386:1995-04	—
EN 61672-1:2003	Vorgänger: IEC 61672-1:2002	DIN EN 61672-1:2003-10	—
—	Nachfolger: IEC 61672-1:2003	—	—
EN 61672-2:2003	IEC 61672-2:2003	DIN EN 61672-2:2004-08	—
EN 61672-3:2006	Vorgänger: IEC 61672-3:2006	DIN EN 61672-3:2007-05	—
—	Nachfolger: IEC 61672-3:2007	—	—
EN 60688:1992 + A1:1999 + A2:2001	IEC 60688:1992 + A1:1997, modifiziert + A2:2001	DIN EN 60688:2002-04	—
EN 60942:2003	IEC 60942:2003	DIN EN 60942:2004-05	—
EN 61260:1995 + A1:2001	IEC 61260:1995 + A1:2001	DIN EN 61260:2003-03	—
EN 61400-12-1:2006	IEC 61400-12-1:2005	DIN EN 61400-12-1 (VDE 0127-12-1):2007-02	VDE 0127-12-1
—	IEC 61400-12-2	—	—
—	IEC/TS 61400-14	—	—
—	ISO/DIS 7196	—	—

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61672-1:2003-10, *Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2002); Deutsche Fassung EN 61672-1:2003*

DIN EN 61672-2:2004-08, *Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 2: Baumusterprüfungen (IEC 61672-2:2003); Deutsche Fassung EN 61672-2:2003*

DIN EN 61672-3:2007-05, *Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 3: Periodische Einzelprüfung (IEC 61672-3:2006); Deutsche Fassung EN 61672-3:2006*

DIN EN 60688:2002-04, *Elektrische Messumformer zur Umwandlung von Wechselstromgrößen in analoge oder digitale Signale (IEC 60688:1992 + A1:1997, modifiziert + A2:2001); Deutsche Fassung EN 60688:1992 + A1:1999 + A2:2001*

DIN EN 60942:2004-05, *Elektroakustik – Schallkalibratoren (IEC 60942:2003); Deutsche Fassung EN 60942:2003*

— Entwurf —

E DIN IEC 61400-11 (VDE 0127-11):2009-01

DIN EN 61260:2003-03, *Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven (IEC 61260:1995 + A1:2001) Deutsche Fassung EN 61260:1995 + A1:2001*

DIN EN 61400-12-1 (VDE 0127-12-1):2007-02, *Windenergieanlagen – Teil 12-1: Messung des Leistungsverhaltens einer Windenergieanlage (IEC 61400-12-1:2005); Deutsche Fassung EN 61400-12-1:2006*

DIN IEC 60386:1995-04, *Messverfahren für Geschwindigkeitsschwankungen bei Tonaufzeichnungs- und -wiedergabegeräten (IEC 60386:1972 + A1:1988)*

Windenergieanlagen – Teil 11: Schallmessverfahren

Einleitung

Zweck dieses Teils der IEC 61400 ist es, eine einheitliche Methode zu bieten, welche die Übereinstimmung und Genauigkeit bei der Messung und Auswertung der Geräuschemission von Windenergieanlagen (WEA) sicherstellt. Diese Norm wurde mit der Erwartung erstellt, angewendet zu werden von:

- WEA-Herstellern, die bestrebt sind, den konkreten Anforderungen an die Geräuschabstrahlung und/oder an ein mögliches Deklarationsverfahren nachzukommen (z. B. IEC 61400-14 (TS));
- WEA-Käufern, um derartige Anforderungen an die Geräuschemissionswerte festzulegen;
- WEA-Betreibern, die die Einhaltung der angegebenen oder geforderten akustischen Spezifikationen für neue oder modifizierte Anlagen nachweisen müssen;
- WEA-Planern oder Genehmigungsbehörden, die die genauen rechtmäßigen Anforderungen an die akustischen Spezifikationen neuer oder modifizierter Anlagen im Hinblick auf Schallschutzbestimmungen definieren müssen.

Diese Norm stellt eine Anleitung zur Messung, Auswertung und Ergebnisdarstellung im Hinblick auf die komplexen Geräuschemissionen einer Windenergieanlage dar. Die Norm dient allen Beteiligten, die mit der Planung, Herstellung, Installation, Genehmigung, Gesetzgebung, Nutzung bzw. dem Betrieb von WEA zu tun haben. Die in dieser Norm empfohlenen Mess- und Auswerteverfahren sollten von allen Parteien angewendet werden, um sicherzustellen, dass die kontinuierliche Entwicklung sowie der Betrieb von WEA bezogen auf die Umweltbelange im Rahmen einer einheitlichen und eindeutigen Kommunikation stattfindet. Die in dieser Norm beschriebenen Verfahren der Messung und Berichterstellung lassen genaue Ergebnisse erwarten, die von Dritten wiederholt werden können.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 61400 beschreibt Geräuschemessverfahren, die es ermöglichen, die Geräuschemission einer WEA zu charakterisieren. Dabei werden Messmethoden für den Nahbereich der WEA angewandt, um durch die Schallausbreitung bedingte Fehler zu vermeiden, jedoch wiederum in ausreichender Entfernung, um die WEA als Punktquelle betrachten zu können. Die beschriebenen Verfahren unterscheiden sich in mancher Hinsicht von denjenigen, die für behördliche Lärmuntersuchungen herangezogen würden. Sie sollen die Charakterisierung der WEA-Gerauschemissionen über einen Bereich von Windgeschwindigkeiten und Richtungen ermöglichen. Die Vereinheitlichung der Messverfahren erleichtert zudem den Vergleich unterschiedlicher WEA.

Die Verfahren beinhalten Methoden, die eine einheitliche und genaue Charakterisierung der Geräuschemission einer einzelnen WEA ermöglichen. Die Verfahren beinhalten im Einzelnen:

- Angabe der Messpunkte bei der Geräuschemessung;
- Anforderungen an die Erfassung akustischer und meteorologischer Daten sowie relevanter Betriebsdaten der WEA;
- Auswertung der Messdaten und Inhalt des Messberichtes; sowie
- Definition spezifischer akustischer Parameter und zugehöriger Größen, die zur schallschutztechnischen Bewertung erforderlich sind.

Diese Norm ist nicht beschränkt auf WEA einer bestimmten Größe oder eines bestimmten Typs. Die in dieser Norm beschriebenen Messverfahren erlauben eine vollständige Beschreibung der Geräuschemission einer WEA. Werden in einzelnen Fällen weniger umfangreiche Messungen benötigt, werden diese entsprechend den relevanten Abschnitten dieser Norm durchgeführt. Ein vereinfachtes Verfahren für kleine WEA ist in einem Anhang beschrieben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60386:1972, *Method of measurement of speed fluctuations in sound recording and reproducing equipment*

IEC 61672-1:2003, IEC 61672-2:2003, IEC 61672-3:2007, *Sound level meters*

IEC 60688:1992, *Electrical measuring transducers for converting a.c. electrical quantities to analogue or digital signals, Amendment 1 (1997), Amendment 2 (2001)*

IEC 60942:2003, *Electroacoustics – Sound calibrators*.

IEC 61260:1995, *Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters*.

IEC 61400-12-1:2005, *Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Begriffe.

3.1

immissionsrelevanter Schallleistungspegel

L_{WA} (in dB bezogen auf 1 pW)

A-bewerteter Schallleistungspegel bezogen auf 1 pW einer Punktschallquelle im Zentrum der Rotorebene der WEA, von der die gleiche Geräuschemission in Mitwindrichtung ausgeht, wie von der vermessenen WEA; L_{WA} wird beim Mittel des Windgeschwindigkeitsbins in Nabenhöhe bestimmt

3.2

immissionsrelevanter Schallleistungspegel bezogen auf die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe

$L_{WA,10m}$ (in dB bezogen auf 1 pW)

A-bewerteter Schallleistungspegel bezogen auf 1 pW einer Punktschallquelle im Zentrum der Rotorebene der WEA, von der die gleiche Geräuschemission in Mitwindrichtung ausgeht, wie von der vermessenen WEA; $L_{WA,10m}$ wird bei ganzzahligen Windgeschwindigkeitswerten in 10 m Höhe innerhalb des gemessenen Windgeschwindigkeitsbereiches bestimmt

3.3

Wahrnehmbarkeitsschwelle

L_a (in dB bezogen auf 20 μ Pa)

frequenzabhängige, durch Hörtests ermittelte Bemessungskurve, welche das subjektive Ansprechen eines „typischen“ Hörers auf Töne verschiedener Frequenzen widerspiegelt

3.4

A- oder C-bewerteter Schalldruckpegel

L_A bzw. L_C (in dB bezogen auf 20 μ Pa)

Schalldruckpegel, gemessen mit einer Frequenzbewertung A bzw. C entsprechend den Spezifikationen nach IEC 61672

3.5

Mittel des Bins

Mittelwert eines Windgeschwindigkeitsbins

3.6

Einfallswinkel

ϕ (in °)

Winkel zwischen der Ebene der Mikrofon-Platte und der Verbindungslinie zwischen Mikrofon und Mittelpunkt des Rotors

3.7

maximale Leistung

P_{max} (in kW)

maximale Leistung der leistungsoptimierten Betriebsart

3.8

gemessene Windgeschwindigkeit in Höhe Z

$V_{Z,m}$ (m/s)

Windgeschwindigkeit in Höhe Z, mit einem am Messmast angebrachten Anemometer gemessen

3.9

gemessene Gondel-Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe

$V_{nac,m}$ (m/s)

Windgeschwindigkeit, mit Gondelanemometer in Nabenhöhe gemessen

3.10

normierte Gondel-Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe

$V_{nac,n}$ (m/s)

normierte Windgeschwindigkeit, mit Gondelanemometer in Nabenhöhe gemessen und entsprechend den Standard-Wetterbedingungen korrigiert

3.11

normierte Windgeschwindigkeit, abgeleitet von der Leistungskurve

$V_{P,n}$ (m/s)

normierte Windgeschwindigkeit, abgeleitet von der Leistungskurve unter Standard-Wetterbedingungen

3.12

normierte Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe während Fremdgeräuschemessungen

$V_{B,n}$ (m/s)

normierte Windgeschwindigkeit, mit einem Anemometer in Nabenhöhe gemessen

3.13

normierte Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe

$V_{H,n}$ (m/s)

normierte Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe

3.14

normierte Windgeschwindigkeit in Höhe Z

$V_{Z,n}$ (m/s)

normierte Windgeschwindigkeit in Höhe Z, mit einem am Messmast angebrachten Anemometer gemessen

3.15

Referenzabstand

R_0 (in m)

horizontaler Abstand zwischen der Turmmittellinie der WEA und den vorgeschriebenen Mikrofonpositionen

3.16

Referenzrauigkeitslänge

z_{0ref} (in m)

Rauigkeitslänge von 0,05 m zur Umrechnung der Windgeschwindigkeit auf Referenzbedingungen

3.17

Schalldruckpegel

L_p (in dB bezogen auf 20 μ Pa)

zehnfache dekadische Logarithmus des Verhältnisses des mittleren, quadratischen Schalldruckes zum Quadrat des Bezugsschalldruckes von 20 μ Pa

3.18

tonale Wahrnehmbarkeit

$\Delta L_{a,k}$ (in dB)

Differenz zwischen der Tonhaltigkeit und der Wahrnehmbarkeitsschwelle in jedem Windgeschwindigkeitsbin, wobei k das Mittel des Windgeschwindigkeitsbins ist

3.19

Tonhaltigkeit

ΔL_k (in dB)

Differenz zwischen dem Pegel des Tones und dem Pegel des maskierenden Geräusches innerhalb der kritischen Bandbreite um den Ton in jedem Windgeschwindigkeitsbin, wobei k das Mittel des Windgeschwindigkeitsbins ist

3.20

Windgeschwindigkeitsbin

Windgeschwindigkeitsintervall, 0,5 m/s breit, in das ganzzahlige und halbzahlige Windgeschwindigkeitswerte eingruppiert werden und das am unteren Ende offen und am oberen Ende geschlossen ist

3.21

Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe

V_{10} (m/s)

Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe für die Angabe des immissionsrelevanten Schallleistungspegels und der Spektren bezogen auf 10 m Höhe

4 Symbole und Einheiten

D	Rotordurchmesser (Horizontalachsen-WEA) bzw. Äquatordurchmesser (Vertikalachsen-WEA)	(m)
H	Höhe des Rotormittelpunktes (Horizontalachsen-WEA) bzw. Höhe der Rotor-Äquatorebene (Vertikalachsen-WEA) über Bodenniveau am WEA-Standort	(m)
L_A oder L_C	A- oder C-bewerteter Schalldruckpegel	(dB)
L_{Aeq}	äquivalenter Dauerschalldruckpegel (A-bewertet)	(dB)
$L_{pn,j,k}$	Schalldruckpegel des maskierenden Geräusches innerhalb einer kritischen Bandbreite im j -ten Spektrum beim k -ten Windgeschwindigkeitsbin	(dB)
$L_{pn,avg,j,k}$	mittlerer Analysenband-Schalldruckpegel der Stützstellen des maskierenden Geräusches im j -ten Spektrum beim k -ten Windgeschwindigkeitsbin	(dB)
$L_{pt,j,k}$	Schalldruckpegel des Tones bzw. der Töne im j -ten Spektrum beim k -ten Windgeschwindigkeitsbin	(dB)
$L_{WA,k}$	immissionsrelevanter Schallleistungspegel, wobei k ein Mittelwert des Windgeschwindigkeitsbins ist	(dB)
P_m	gemessene elektrische Leistung	(W)
P_n	normierte elektrische Leistung	(W)
R_i	schräger Abstand zwischen Rotormittelpunkt und Messpunkt i , wobei $i = 1, 2, 3$ oder 4	(m)
R_0	Referenzabstand	(m)
S_0	Bezugsfläche, $S_0 = 1 \text{ m}^2$	(m ²)
T_C	Lufttemperatur	(°C)
T_K	absolute Lufttemperatur	(K)
σ_A, σ_B	Messunsicherheitskomponenten angegeben als Standardabweichung	(dB)
V_H	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe, H	(m/s)
V_P	Windgeschwindigkeit, aus Leistungskurve abgeleitet	(m/s)
V_z	Windgeschwindigkeit in der Höhe z	(m/s)
V_{nac}	Windgeschwindigkeit gemessen mit dem Gondelanemometer	(m/s)
f	Tonfrequenz	(Hz)
f_c	Mittenfrequenz des kritischen Frequenzbandes	(Hz)
p	Luftdruck	(kPa)
z_0	Rauigkeitslänge	(m)
z_{0ref}	Referenzrauigkeitslänge, 0,05 m	(m)

z	Höhe des Anemometers	(m)
κ	Neigungswinkel der linearen Regression zwischen der normierten und der gemessenen Windgeschwindigkeit	(–)
α	Versatzwinkel der linearen Regression zwischen der normierten und der gemessenen Windgeschwindigkeit	(m/s)
$\Delta_{Ltn,j,k}$	Tonhaltigkeit des j-ten Spektrums bei der k-ten Windgeschwindigkeit	(dB)
ϕ	Einfallswinkel	(°)

5 Verfahrensbeschreibung

Dieser Teil der IEC 61400 legt die Verfahren zur Messung, Auswertung und Ergebnisdarstellung der Geräuschemission von WEA fest. Die Anforderungen an die Messgeräte und Kalibrierung sind näher festgelegt, um die Genauigkeit und Einheitlichkeit der akustischen und anderen Messungen sicherzustellen. Die nicht-akustischen Messungen, die notwendig sind, um die für die Ermittlung der Geräuschemission relevanten atmosphärischen Bedingungen zu bestimmen, sind ebenfalls näher erläutert. Angeführt sind alle zu messenden und darzustellenden Parameter sowie die zur Bestimmung dieser Parameter notwendige Datenverarbeitung.

Aus der Anwendung des in dieser Internationalen Norm beschriebenen Verfahrens resultieren die A-bewerteten immissionsrelevanten Schallleistungspegel, Spektren und tonale Wahrnehmbarkeit bei Mittelwerten des Windgeschwindigkeitsbins in Nabenhöhe und in 10 m Höhe einer einzelnen WEA. Die tonale Wahrnehmbarkeit liefert Angaben zu vorhandenen Tönen im Geräusch. Die ermittelte Tonhaltigkeit liefert keine Angaben zur Tonhaltigkeit bei anderen Messabständen. Wahlweise können die Messungen an zusätzlichen Messpunkten durchgeführt werden, um Angaben zur Richtcharakteristik zu erzielen.

Das Verfahren gilt für alle Windgeschwindigkeiten. Der zu dokumentierende Bereich der Windgeschwindigkeiten bezieht sich auf die spezifische WEA und wird als die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe definiert, die der 0,8- bis 1,3fachen Windgeschwindigkeit bei 85 % der maximalen Leistung entspricht.

Die Messungen werden in geringer Entfernung zur WEA durchgeführt, um den Einfluss der Geländeeigenschaften, der atmosphärischen Bedingungen und der windinduzierten Geräusche zu minimieren. Um den Dimensionen der zu prüfenden WEA Rechnung zu tragen, wird in einem von der Größe der WEA abhängigen Referenzabstand R_0 gemessen.

Die Messungen werden mit einem Mikrofon auf einer schallharten Platte am Boden durchgeführt, um das windinduzierte Geräusch am Mikrofon und den Einfluss unterschiedlicher Bodeneigenschaften zu minimieren.

Messungen der Schalldruckpegel, Schalldruckspektren, der Windgeschwindigkeiten und der elektrischen Leistung werden zeitgleich über kurze Zeiträume und über einen großen Bereich von Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe durchgeführt. Die Schalldruckpegel und -spektren bei Mittelwerten des Windgeschwindigkeitsbins werden ermittelt und für die Berechnung der A-bewerteten immissionsrelevanten Schallleistungspegel und -spektren verwendet.

Informative Anhänge enthalten:

- andere mögliche Geräuschcharakteristiken von WEA und deren Quantifizierung (Anhang A);
- Ermittlung der Turbulenzintensität (Anhang B);
- Ermittlung der Messunsicherheit (Anhang C);
- effektive Rauiglängslänge (Anhang D);
- Klassifizierung eines zweiten Windschirms (Anhang E);
- kleine WEA (Anhang F).

6 Messgeräte

6.1 Akustische Messgeräte

Die nachfolgend aufgeführten Messgeräte sind notwendig, um die in dieser Norm dargestellten akustischen Messungen durchzuführen.

6.1.1 Geräte zur Bestimmung des A-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegels

Die Geräte müssen die Anforderungen an einen Schallpegelmesser der Klasse 1 nach IEC 61672 erfüllen. Der Durchmesser des Mikrofons darf nicht größer als 13 mm sein.

6.1.2 Geräte zur Bestimmung der Terzspektren

Über die Anforderungen für Schallpegelmesser der Klasse 1 hinaus müssen die Geräte mindestens über den Frequenzbereich von 20 Hz bis 11 200 Hz einen konstanten Frequenzgang haben. Die Filter müssen den Anforderungen nach IEC 61260, Klasse 1 entsprechen.

Die äquivalenten Dauerschalldruckpegel der Terzbänder müssen gleichzeitig für die Mittenfrequenzen von 20 Hz bis 10 kHz bestimmt werden.

6.1.3 Geräte zur Bestimmung der Schmalbandspektren

Die Geräte müssen den relevanten Anforderungen nach IEC 61672 für Messgeräte der Klasse 1 im Frequenzbereich von 20 Hz bis 11 200 Hz genügen.

6.1.4 Mikrofon mit schallharter Platte und Windschirm

Das Mikrofon muss mittig auf einer ebenen, schallharten Platte, mit der Membran senkrecht zur Platte und mit der Achse in Richtung WEA angebracht werden, siehe Bilder 1 und 2. Die runde Platte muss einen Durchmesser von mindestens 1,0 m besitzen; das Material muss schallhart sein, so z. B. eine mindestens 12,0 mm dicke Sperrholz- oder harte Spanplatte oder eine mindestens 2,5 mm dicke Metallplatte. Eine größere Platte wird besonders bei einem weichen Boden empfohlen. Für den Ausnahmefall einer geteilten Platte (d. h. nicht einteilig) ist zu berücksichtigen, dass die Teile in derselben Ebene auszurichten sind und der Spalt kleiner als 1 mm sein und außermittig sowie parallel zur Mikrofonachse liegen muss, wie in Bild 1a dargestellt.

Der in Verbindung mit dem am Boden positionierten Mikrofon zu verwendende Windschutz muss aus einem ersten und gegebenenfalls zusätzlich einem zweiten Windschirm bestehen. Der erste Windschirm besteht aus der Hälfte einer Kugel aus offenporigem Schaumstoff mit einem Durchmesser von etwa 90 mm und wird mittig um die Mikrofonmembran angebracht (siehe Bild 2).

Der zweite Windschirm kann benutzt werden, um bei hohen Windgeschwindigkeiten genügend Störabstand bei tiefen Frequenzen zu erhalten.

Bei Verwendung eines zweiten Windschirms muss dessen Einfluss auf den Frequenzgang dokumentiert werden und die Messwerte sind entsprechend in Terzbändern zu korrigieren. Ein Kalbrierverfahren für die Dämpfung eines zweiten Windschirms kann gemeinsam mit Empfehlungen für die Auslegung und Anforderungen an eine Dämpfung Anhang E entnommen werden.

6.1.5 Akustischer Kalibrator

Das komplette Geräuschemesssystem, das Aufzeichnungs-, Datenerfassungs- oder Datenverarbeitungssystem eingeschlossen, muss unmittelbar vor und nach der Messung bei einer oder mehreren Frequenzen mit Hilfe eines akustischen Kalibrators am Mikrofon kalibriert werden. Der Kalibrator muss den Anforderungen nach IEC 60942:2003, Klasse 1 entsprechen und darf nur im Rahmen der für ihn festgelegten Umgebungsbedingungen benutzt werden.

6.1.6 Datenaufnahme- und -wiedergabesysteme

Ein Datenaufnahme-/wiedergabesystem ist ein erforderlicher Bestandteil des Messsystems, und die gesamte Messkette muss den relevanten Anforderungen der IEC 61672 an Messgeräte der Klasse 1 entsprechen, sofern für spätere Analysen verwendet.

6.2 Nicht-akustische Messgeräte

Die im Folgenden aufgeführten Messgeräte sind notwendig, um die in dieser Norm dargestellten nicht-akustischen Messungen durchzuführen.

6.2.1 Anemometer

Das Anemometer, die entsprechende Signalverarbeitung eingeschlossen, darf im Windgeschwindigkeitsbereich von 4 m/s bis 12 m/s maximal $\pm 0,2$ m/s von dem Kalibrierungswert abweichen. Es muss geeignet sein, Mittelwerte über Zeiträume zu bilden, die synchron zu denjenigen der akustischen Messungen sind.

Da das Gondelanemometer während der Messungen in-situ kalibriert ist (8.1.1.2), bezieht sich die Forderung nach einer Kalibrierung nicht auf das Gondelanemometer. Die Kalibrierung des Gondelanemometers kann vom WEA-Kontrollsystem geliefert werden. Das Gondelanemometer darf nicht für Fremdgeräuschmessungen verwendet werden.

6.2.2 Elektrischer Wirkleistungsumformer

Der elektrische Wirkleistungsumformer, Spannungs- und Stromwandler eingeschlossen, muss den Anforderungen an die Genauigkeit nach IEC 60688, Klasse 1 entsprechen. Das Leistungssignal kann vom Hersteller bereitgestellt werden, sofern die erforderliche Genauigkeit gewährleistet ist.

6.2.3 Sonstige Messgeräte

Es werden eine Kamera und Geräte zur Längenmessung benötigt. Die Temperatur muss mit einer Messunsicherheit von ± 1 °C gemessen werden. Der Luftdruck muss mit einer Messunsicherheit von ± 1 kPa gemessen werden.

6.3 Rückführbare Kalibrierung

Die folgenden Messgeräte müssen regelmäßig überprüft und in einem Labor kalibriert werden, das die Rückführbarkeit auf ein entsprechendes nationales oder ein Primär-Normal sicherstellt. Der maximal zulässige Zeitraum seit Durchführung der letzten Kalibrierung beträgt für die einzelnen Messgeräte:

- akustischer Kalibrator (12 Monate);
- Mikrofon (24 Monate);
- integrierender Schallpegelmesser (24 Monate);
- Spektralanalysator (36 Monate);
- Datenaufnahme-/wiedergabesystem (24 Monate), sofern für spätere Analysen verwendet;
- Anemometer (24 Monate);
- elektrischer Wirkleistungsumformer (24 Monate);
- Temperaturumformer (24 Monate);
- Luftdruckumformer (24 Monate).

Wenn der akustische Kalibrator als Teil des integrierenden Schallpegelmessers kalibriert wird, darf das größte Kalibrierintervall auf 24 Monate erweitert werden.

Werden die Messungen der Temperatur und des Luftdruckes nur zum Zweck allgemeiner Daten zu Wetterbedingungen während der Messungen durchgeführt, ist eine interne Verifizierung des Messgerätes ausreichend.

Ein Gerät ist zusätzlich dann zu kalibrieren, wenn es repariert wurde oder der Verdacht auf Fehlfunktion oder Beschädigung vorliegt.

7 Messungen und Durchführung der Messungen

Zur vollständigen Beschreibung der Geräuschemission einer WEA sind die folgenden Messpunkte erforderlich.

7.1 Messpunkte für akustische Messungen

Es sind Messungen an einer bzw. optional an drei weiteren Mikrofonpositionen durchzuführen. Diese vier Positionen müssen entsprechend der Darstellung in Bild 3 um den Mittelpunkt des WEA-Turmes angeordnet sein. Dabei dient, wie in Bild 3 dargestellt, die Position in der Mitwindrichtung als Referenzmesspunkt. Für die Richtung der Messpunkte ist ein Bereich von $\pm 15^\circ$ bezogen auf die Mitwindrichtung während der Messungen einzuhalten. Die Mitwindrichtung kann anhand der Gierstellung ermittelt werden. Der horizontale Abstand R_0 jeder Mikrofonposition zu der WEA-Turmmittellinie muss demjenigen entsprechen, der in Bild 3 dargestellt ist, wobei eine Abweichung von $\pm 20\%$, höchstens $\pm 30\text{m}$, zulässig ist; der Abstand ist auf $\pm 2\%$ zu messen.

Wie in Bild 4a dargestellt, ist der Referenzabstand R_0 für WEA mit horizontaler Achse gegeben als:

$$R_0 = H + \frac{D}{2} \quad (1)$$

Dabei ist

H der vertikale Abstand des Rotormittelpunktes vom Erdboden; und

D der Rotordurchmesser der WEA.

Wie in Bild 4b dargestellt, ist die Referenzabstand R_0 für WEA mit vertikaler Achse gegeben als:

$$R_0 = H + D \quad (2)$$

Dabei ist

H der vertikale Abstand der Äquatorebene des Rotors vom Erdboden; und

D der äquatoriale Rotordurchmesser der WEA.

Um die Beeinflussung der Messergebnisse durch den Rand der schallharten Platte zu minimieren, muss sichergestellt werden, dass die Platte flach auf den Boden positioniert wird. Jegliche Ränder oder Spalten an oder unter der Platte sollten durch Erde o. ä. Material ausgeglichen werden. Der Einfallswinkel ϕ muss, wie in Bild 4 dargestellt, zwischen 25° und 40° liegen. Dies kann eine Anpassung des Messpunktes innerhalb der oben aufgeführten Toleranzen erforderlich machen.

Der Messpunkt muss so gewählt werden, dass die berechnete Beeinflussung der Messwerte durch jegliche reflektierende Strukturen wie z. B. Gebäude oder Wände weniger als 0,2 dB beträgt.

7.2 Akustische Messungen

Aus den akustischen Messungen müssen die folgenden Informationen bezüglich der Geräuschemission einer WEA bei Mittelwerten des Windgeschwindigkeitsbins bestimmt werden können:

- der immissionsrelevante Schallleistungspegel;
- die Terzbandpegel;
- die tonale Wahrnehmbarkeit.

Optional können Messungen bezüglich der Richtcharakteristik, des Infraschalls, tieffrequenter Geräusche sowie der Impulshaltigkeit durchgeführt werden.

7.2.1 Anforderungen an die akustischen Messungen

Für alle akustischen Messungen gelten die folgenden Anforderungen:

- Die komplette Messkette muss bei wenigstens einer Frequenz, vor und nach jeder Messung oder wenn die Mikrofone wegen eines Ortswechsels neu angeschlossen wurden, kalibriert werden.
- Alle akustischen Signale müssen für spätere Überprüfungen aufgezeichnet und gespeichert werden.
- Zeiträume mit vorübergehenden Fremdgeräuschen (z. B. durch Flugzeuge) sind für die Auswertungen zu vernachlässigen.
- Bei abgeschalteter WEA ist unter Verwendung des gleichen Messaufbaus unmittelbar vor oder nach jeder Messreihe zur Bestimmung des WEA-Geräusches das Fremdgeräusch bei vergleichbaren Windverhältnissen zu messen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass das gemessene Fremdgeräusch hinsichtlich des Fremdgeräusches repräsentativ ist, welches während der Geräuschmessung bei laufender Anlage auftrat. Es wird empfohlen, das Fremdgeräusch mehrmals während der Messdauer zu bestimmen, um den gleichen Bereich der Windgeschwindigkeiten abzudecken, wie beim Gesamtgeräusch.
- Die Messungen müssen einen Bereich der Windgeschwindigkeit umfassen, der so weit ist, wie praktisch möglich. Um einen hinreichend großen Bereich der Windgeschwindigkeit abzudecken, ist es u. U. notwendig, die Messungen in mehreren Messreihen durchzuführen.

Des Weiteren gelten die folgenden Anforderungen für die einzelnen akustischen Messungen.

7.2.2 A-bewerteter Schalldruckpegel

Der A-bewertete, äquivalente Dauerschalldruckpegel des Geräusches der WEA muss am Referenzmesspunkt in einer Messreihe mit mindestens 180 gleichzeitig mit der Windgeschwindigkeit aufgenommenen Wertepaaren gemessen werden. Jeder Messwert muss dabei über eine Zeitspanne von mindestens 10 s gemittelt sein. In jedem Windgeschwindigkeitsbin müssen mindestens 10 Messwerte vorliegen.

Für das Fremdgeräusch müssen, wie vorstehend beschrieben, insgesamt mindestens 180 Wertepaare in den entsprechenden Windgeschwindigkeitsbereichen gemessen werden.

7.2.3 Terzband-Messungen

Terzspektren werden gleichzeitig mit den Schalldruckpegeln als das energetische Mittel über einen Zeitraum von 10 s gemessen. Es sind mindestens die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 20 Hz bis einschließlich 10 kHz zu messen.

Für die Messung der Fremdgeräusche bei abgeschalteter WEA gelten dieselben Anforderungen.

7.2.4 Schmalbandmessungen

Schmalbandspektren werden gleichzeitig mit dem Schalldruckpegel als das energetische Mittel über einen Zeitraum von 10 s gemessen.

7.2.5 Optionale akustische Messungen an den Messpunkten 2, 3 und 4

Messungen an den Nicht-Referenzmesspunkten müssen den Anforderungen für die Referenzmesspunkte entsprechen.

Die Messungen an den Nicht-Referenzmesspunkten sollten zeitgleich mit den entsprechenden Messungen am Referenzmesspunkt durchgeführt werden. Die Messungen an den drei Nicht-Referenzmesspunkten können getrennt durchgeführt werden, jedoch jeweils zeitgleich mit Messungen am Referenzmesspunkt.

7.2.6 Andere optionale Messungen

Es wird empfohlen, zusätzliche Messungen durchzuführen, um Geräuschemissionen bestimmten Charakters, welche mit den Messverfahren dieser Norm nicht beschrieben werden, zu quantifizieren.

Besonderheiten der Geräuschemission könnten sein: Infraschall, tieffrequente Geräusche, eine Modulation breitbandiger Geräusche, Impulse oder ungewöhnliche Geräusche (z. B. Jaulen, Zischen, Quietschen oder

Summen), deutliche Impulse im Geräusch (z. B. ein Knallen, Klappern, Klicken oder Knacken) oder Geräusche, die von ihrem Charakter her ungewöhnlich genug sind, um Aufmerksamkeit zu erregen. Diese Bereiche werden in Anhang A diskutiert, wo auch mögliche Bewertungen umrissen werden. Die Bewertungen sind nicht allgemein anerkannt und dienen lediglich zur Orientierung.

8 Nicht-akustische Messungen

Die folgenden nicht-akustischen Messungen sind durchzuführen. Messproben der Windgeschwindigkeit, elektrischen Leistung und Umdrehungszahl des Rotors sind mit mindestens 1 Hz vorzunehmen.

8.1 Messungen der Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit ist aus Messungen der erzeugten elektrischen Leistung über eine Leistungskurve zu ermitteln.

Für die Abschnitte der Leistungskurve, die den Anforderungen von Gleichung (3) nicht entsprechend, ist ein Gondelanemometer zu verwenden. Ist kein Gondelanemometer verfügbar, ist ein Anemometer an der Gondel anzubringen. Leitlinien für das Anbringen des Gondelanemometers sind in IEC 61400-12-2 zu entnehmen.

Die mittels Gondelanemometer gemessene Windgeschwindigkeit muss für die auf den Rotor auftreffende Windgeschwindigkeit repräsentativ sein.

Für Messungen des Fremdgeräusches ist ein an einem Messmast in 10 m Höhe angebrachtes Anemometer zu verwenden. Die Position des Messmastes mit 10 m Höhe sollte relativ störungsfrei sein und die freie Windströmung am WEA-Standort repräsentieren.

Windgeschwindigkeitsdaten müssen erfasst werden und es sind die gleichen Mittelungszeiträume wie für die Geräuschmessung zu wählen.

An einer WEA auftretende Windturbulenzen können deren aerodynamische Geräuschemission beeinflussen. Eine Bewertung von Turbulenzen ist in Anhang C beschrieben.

8.1.1 Bestimmung der Windgeschwindigkeit während des Betriebs der WEA

8.1.1.1 Bestimmung der Windgeschwindigkeit aus der Leistungskurve

Die Leistungskurve gibt die Abhängigkeit der Leistung von der in Nabenhöhe wieder. Für die meisten WEA kann die Windgeschwindigkeit aus der gemessenen elektrischen Leistung bestimmt werden. Die Korrelation zwischen dem gemessenen Schallpegel und der gemessenen elektrischen Leistung ist bis zu dem Punkt der maximalen Leistung sehr hoch.

Die Windgeschwindigkeit $V_{P,n}$ dabei ist vorzugsweise die nach IEC 61400-12-1 rückführbar gemessene Leistungskurve für dieselbe oder ansonsten für eine WEA des gleichen Typs mit den gleichen Komponenten und Einstellungen zu verwenden. Die muss den Zusammenhang von Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und der von der WEA erzeugten elektrischen Leistung bei Standardklimabedingungen von 15 °C und 101,3 kPa widerspiegeln.

Für die elektrische Leistung sind die gleichen Mittelungszeiträume wie für die Geräuschmessung zu wählen.

Die verwendbaren Intervalle der Leistungskurve sind ausnahmslos Intervalle, für die keine duplizierten Werte verfügbar sind und der Neigungswinkel der Leistungskurve einschließlich Messunsicherheit positiv ist.

Die Anforderung an den Neigungswinkel der Leistungskurve ist für jedes beliebige Intervall der Leistungskurve erfüllt, wenn Folgendes gilt:

$$(P(i + 1) - tol) - (P(i) + tol) > 0 \quad (3)$$

Dabei ist

- i die Anzahl der Windgeschwindigkeitsbins der Leistungskurve;
- $P(i)$ der Wert der Leistungskurve bei Windgeschwindigkeitsbin i ;
- tol die Toleranz des Leistungsmesswertes.

Alle dementsprechenden Leistungskurvenintervalle werden als zulässiger Bereich der Leistungskurve bezeichnet. Für diese Intervalle gilt:

$$V_{H,n} = V_{P,n}$$

$V_{H,n}$ ist die normierte Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe.

8.1.1.2 Bestimmung der Windgeschwindigkeit mittels Gondelanemometer

Für alle Datenpunkte mit Leistungspegeln aus den zulässigen Abschnitten der Leistungskurve wird eine lineare Regression zwischen der von der Leistungskurve abgeleiteten Windgeschwindigkeit $V_{P,n}$ und der gemessenen Windgeschwindigkeit $V_{nac,m}$ erstellt. Neigungswinkel κ und Versatzwinkel μ sind abzuleiten. Diese Regression ist dann auf die gemessene Windgeschwindigkeit von Datenpunkten in geringeren Höhen, deren Leistungspegel außerhalb der zulässigen Abschnitte der Leistungskurve liegen, anzuwenden, um die normierte Windgeschwindigkeit mittels Gleichung (4) abzuleiten.

$$V_{nac,n} = \kappa V_{nac,m} + \mu \quad (4)$$

Dabei ist

- $V_{nac,m}$ die mittels Gondelanemometer gemessene Windgeschwindigkeit;
- $V_{nac,n}$ die normierte Windgeschwindigkeit vom Gondelanemometer, korrigiert auf Nabenhöhe.

Außerhalb des zulässigen Bereiches der Leistungskurve gilt $V_{H,n} = V_{nac,n}$.

8.1.2 Bestimmung der Windgeschwindigkeit während Messungen des Fremdgeräusches

Bei Messungen des Fremdgeräusches ist die Windgeschwindigkeit mit einem Anemometer in 10 m Höhe zu bestimmen. Bei in-situ-Kalibrierung ist die Windgeschwindigkeit am 10-m-Messmast während der gesamten Messungen zu bestimmen.

Für alle Datenpunkte mit Leistungspegeln aus den zulässigen Abschnitten der Leistungskurve wird eine lineare Regression zwischen der von der Leistungskurve abgeleiteten Windgeschwindigkeit $V_{P,n}$ und der gemessenen Windgeschwindigkeit $V_{10,m}$ erstellt. Neigungswinkel κ_{10} und Versatzwinkel μ_{10} sind zu ermitteln. Diese Regression ist dann auf die gemessene Windgeschwindigkeit der bei der Messung des Fremdgeräusches erzielten Datenpunkte anzuwenden, um die normierte Windgeschwindigkeit mittels Gleichung (5) abzuleiten.

$$V_{B,n} = \kappa_{10} V_{10,m} + \mu_{10} \quad (5)$$

Dabei ist

- $V_{10,m}$ die mittels Anemometer in 10 m Höhe gemessene Windgeschwindigkeit;
- $V_{B,n}$ die normierte Windgeschwindigkeit aus dem Anemometer in 10 m Höhe, korrigiert auf Nabenhöhe.

Während der Messung des Fremdgeräusches gilt $V_{H,n} = V_{B,n}$.

8.2 Mitwindrichtung

Die Mitwindrichtung wird überwacht, um sicherzustellen, dass ausschließlich Daten für die Analyse verwendet werden, deren Messpunkte innerhalb von 15° in ihrer Soll-Azimuth-Position in Bezug auf die Mitwindrichtung liegen. Es wird empfohlen, die Gierstellung des WEA-Kontrollers zeitgleich mit den anderen Kontrollersignalen zu bestimmen.

8.3 Andere atmosphärische Bedingungen

Lufttemperatur und -druck sind mindestens alle 2 h in einer Höhe von mindestens 1,5 m zu messen und aufzuzeichnen.

8.4 Rotorgeschwindigkeit und Messung des Blatteinstellungswinkels

Die Messung und Protokollierung der relevanten WEA-Kontrollparameter wie Rotorgeschwindigkeit und Blatteinstellungswinkel werden empfohlen. Die Rotorgeschwindigkeit ist zwingend erforderlich. Diese Daten müssen während der Messungen bestimmt und können vom WEA-Kontroller erhalten werden.

9 Datenauswertung

9.1 Allgemeine Verfahrensweise

Zweck dieses Verfahrens ist die Erzeugung von Schallleistungsspektren in Terzbändern und Gesamt-Schalldruckpegeln mittels statistischer Verfahren.

In diesem gesamten Abschnitt beruht die Genauigkeit auf der Standardabweichung.

Geräusch und Windgeschwindigkeit werden in Messzeitintervallen von 10 s gemessen und gemittelt, wodurch eine große Anzahl Datenpunkte erzielt wird. Geräusch wird sowohl als L_{Aeq} als auch als Terzspektrum bestimmt. Für jeden Datenpunkt wird das Terzspektrum entsprechend dem Messwert von L_{Aeq} normiert. Die Datenpunkte werden Bins zugeordnet und gemittelt, wodurch sich die mittlere Windgeschwindigkeit, das mittlere Terzspektrum und die zugehörigen Standardabweichungen ergeben. Für jedes Terzspektrum wird der Wert am Mittel des Bins durch lineare Interpolation zwischen den nächstgelegenen Bin-Mittelwerten ermittelt, wodurch sich ein Terzspektrum am Mittel jedes Bins ergibt.

Das nachfolgend beschriebene Verfahren gilt sowohl für Gesamtgeräusch als auch für Fremdgeräusch.

An jedem Mittel eines Windgeschwindigkeitsbins wird das Terzspektrum der WEA durch Korrektur des Gesamtgeräusch-Terzspektrums am Mittel des Bins mit dem Fremdgeräuschspektrum am Mittel des Bins bestimmt.

In der nachfolgenden Beschreibung werden die folgenden Indizes und tiefgestellten Zeichen verwendet:

Index 'i' bezeichnet die Nummer des Terzbandes, Index 'j' bezeichnet die Nummer des Messzeitintervalls von 10 s, Index 'k' bezeichnet die Nummer des Windgeschwindigkeitsbins.

Das tiefgestellte Zeichen 'o' steht für das gemessene Terzspektrum und 'n' für das normierte Spektrum. Die tiefgestellten Zeichen 'A' und 'B' stehen für Fehler vom Typ A bzw. B. Die tiefgestellten Zeichen 'T', 'B' und 'C' bezeichnen, ob es sich um Gesamtgeräusch, Fremdgeräusch bzw. korrigiertes Fremdgeräusch handelt.

ANMERKUNG Die Genauigkeit der meisten Messgeräte ist als Messunsicherheit angegeben. Die Messunsicherheit ist in eine Standardabweichung umzurechnen, bevor sie im nachfolgenden Text verwendet wird. Leitlinien dazu sind Anhang C zu entnehmen.

Die Einzelheiten des Verfahrens sind nachfolgend beschrieben und im Fließdiagramm in Bild 5 dargestellt.

9.2 Berechnung des Schalldruckpegels

Das Geräusch wird als ein äquivalenter Schalldruckpegel L_{Aeq} und ein Terzspektrum von 20 Hz bis 10 kHz bestimmt. Der äquivalente Schalldruckpegel wird aus einer energetischen Summe des Terzspektrums $L_{Aeq,o}$ bestimmt und die Differenz $L_{Aeq} - L_{Aeq,o}$ wird bestimmt. Diese Differenz wird mit jeder einzelnen Linie innerhalb des Terzspektrums addiert, um das normierte Terzspektrum für jedes Messzeitintervall j zu erzielen.

$$L_{Aeq,o,j} = 10 \cdot \log \sum_i 10^{\left(\frac{L_{Aeq,i,j}}{10}\right)} \quad (6)$$

$$\Delta_j = L_{Aeq,j} - L_{Aeq,o,j} \quad (7)$$

$$L_{Aeq,n,i,j} = L_{Aeq,i,j} + \Delta_j \quad (8)$$

Dabei ist

- $L_{Aeq,o,j}$ der A-bewertete Schalldruckpegel berechnet aus dem Terzspektrum i im Messzeitintervall j ;
- $L_{Aeq,i,j}$ der A-bewertete Schalldruckpegel bei Terzband i im Messzeitintervall j ;
- $L_{Aeq,j}$ der A-bewertete Schalldruckpegel im Messzeitintervall j ;
- Δ_j die Differenz zwischen dem berechneten Schalldruckpegel des Terzspektrums und dem gemessenen Schalldruckpegel;
- $L_{Aeq,n,i,j}$ das normierte Terzband i im Messzeitintervall j .

Alle nachfolgenden Analysen werden unter Verwendung der Einzelmessergebnisse der normierten Terzspektren durchgeführt. Für jedes Terzband werden die Ergebnisse entsprechend der berechneten Windgeschwindigkeit während der Aufzeichnung Windgeschwindigkeitsbins zugeordnet. Mittelwert und Standardabweichung sowohl für Schalldruckpegel als auch Windgeschwindigkeit bei jedem Bin werden unter Verwendung der folgenden Gleichungen innerhalb jedes Windgeschwindigkeitsbin k berechnet.

Das Gesamtgeräusch und das Fremdgeräusch werden nach demselben Prinzip analysiert.

Berechnung der mittleren Schallspektren und Messunsicherheit je bin

Der mittlere Schalldruckpegel, $\bar{L}_{i,k}$, des Terzbandes i in Windgeschwindigkeitsbin k wird unter Verwendung von Gleichung (9) berechnet.

$$\bar{L}_{i,k} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{\left(\frac{L_{i,j,k}}{10}\right)} \right) \quad (9)$$

Dabei ist

- N die Gesamtanzahl von Messzeitintervallen im Bin;
- $L_{i,j,k}$ der Schalldruckpegel des Terzbandes i der Messung j in Windgeschwindigkeitsbin k .

Die Standardabweichung vom Typ A, $\sigma_{\bar{L}_{i,k},A}$, vom mittleren Schalldruckpegel des Terzbandes i in Windgeschwindigkeitsbin k wird unter Verwendung von Gleichung (10) berechnet.

$$\sigma_{Li,k,A} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (L_{i,j} - \bar{L}_{i,k})^2}{N \cdot (N-1)}} \quad (10)$$

Dabei ist

$\bar{L}_{i,k}$ das mittlere Schalldruckspektrum in Windgeschwindigkeitsbin k;

$L_{i,j}$ der Schalldruckpegel des Terzbandes i des Messzeitintervalls j.

Die kombinierte Standardabweichung vom Typ B, $\sigma_{Li,j,B}$, vom mittleren Schalldruckpegel des Terzbandes i in Windgeschwindigkeitsbin k für jedes Messzeitintervall j wird unter Verwendung von Gleichung (11) berechnet.

$$\sigma_{Li,j,B} = \sqrt{\sigma_{Li,j,B1}^2 + \sigma_{Li,j,B2}^2 + \dots} \quad (11)$$

Dabei ist

$\sigma_{Li,j,B}$ die Standardabweichung vom Typ B von Quelle 1 vom mittleren Schalldruckpegel des Terzbandes i für jedes Messzeitintervall j.

Die Gesamt-Standardabweichung, $\sigma_{Li,k,B}$, vom mittleren Schalldruckpegel des Terzbandes i in Windgeschwindigkeitsbin k wird unter Verwendung von Gleichung (12) berechnet.

$$\sigma_{Li,k,B} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_{Li,j,B}^2} \quad (12)$$

Dabei ist

$\sigma_{Li,j,B}$ die kombinierte Standardabweichung vom Typ B vom mittleren Schalldruckpegel des Terzbandes i für jedes Messzeitintervall j, siehe Gleichung (11).

Die Gesamt-Standardabweichung, $\sigma_{Li,k}$, vom mittleren Schalldruckpegel des Terzbandes i in Windgeschwindigkeitsbin k wird unter Verwendung von Gleichung (13) berechnet.

$$\sigma_{Li,k} = \sqrt{\sigma_{Li,k,A}^2 + \sigma_{Li,k,B}^2} \quad (13)$$

Berechnung der Windgeschwindigkeit und Messunsicherheit je bin

Die mittlere Windgeschwindigkeit, $\bar{V}_k$, in Bin k wird unter Verwendung von Gleichung (14) berechnet.

$$\bar{V}_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N V_{j,k} \quad (14)$$

Dabei ist

N die Gesamtanzahl von Messungen in Windgeschwindigkeitsbin k;

$V_{j,k}$ der Mittelwert der Windgeschwindigkeit des Messzeitintervalls j in Windgeschwindigkeitsbin k.

Die Standardabweichung vom Typ A, $\sigma_{v,k,A}$, von der mittleren Windgeschwindigkeit in Windgeschwindigkeitsbin k wird unter Verwendung von Gleichung (15) berechnet.

$$\sigma_{V,k,A} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (V_j - \bar{V}_k)^2}{N \cdot (N-1)}} \quad (15)$$

Dabei ist

V_j die mittlere Windgeschwindigkeit bei Bin-Messung j;

$\bar{V}_k$ die mittlere Windgeschwindigkeit in Bin k, siehe Gleichung (14).

Die Standardabweichung vom Typ B, $\sigma_{Vj,B}$, von der Windgeschwindigkeit für jedes Messzeitintervall j wird unter Verwendung von Gleichung (16) berechnet.

$$\sigma_{Vj,B} = \sqrt{\sigma_{Vj,B1}^2 + \sigma_{Vj,B2}^2 + \dots} \quad (16)$$

Dabei ist

$\sigma_{Vj,B1}$ die Standardabweichung vom Typ B von Quelle 1 von der mittleren Windgeschwindigkeit für jedes Messzeitintervall j.

Die Standardabweichung vom Typ B, $\sigma_{V,k,B}$, von der mittleren Windgeschwindigkeit in Bin k wird unter Verwendung von Gleichung (17) berechnet.

$$\sigma_{V,k,B} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \sigma_{Vj,B}^2} \quad (17)$$

Dabei ist

$\sigma_{Vj,B}$ die kombinierte Standardabweichung vom Typ B von der mittleren Windgeschwindigkeit für jedes Messzeitintervall j, siehe Gleichung (16).

Die Gesamt-Standardabweichung von der Windgeschwindigkeit in Bin k, $\sigma_{V,k}$, wird unter Verwendung von Gleichung (18) berechnet.

$$\sigma_{V,k} = \sqrt{\sigma_{V,k,A}^2 + \sigma_{V,k,B}^2} \quad (18)$$

Die zugehörige Kovarianz, $\sigma_{LV,i,k}$, wird unter Verwendung von Gleichung (19) berechnet.

$$\sigma_{LV,i,k} = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (V_{j,k} - \bar{V}_k) \cdot (L_{i,j,k} - \bar{L}_{i,k}) \quad (19)$$

Dabei ist

$V_{j,k}$ die mittlere Windgeschwindigkeit bestimmt in Messzeitintervall j;

$\bar{V}_k$ der Mittelwert der Windgeschwindigkeit für Bin k, siehe Gleichung (14);

$L_{i,j,k}$ der gemessene Schallpegel des Terzbandes i im Messzeitintervall j in Windgeschwindigkeitsbin k;

$\bar{L}_{i,k}$ der Mittelwert des Schallpegels des Terzbandes i in Bin k, siehe Gleichung (9).

Berechnung der Schallpegel bei Bin-Mittelwerten einschließlich Messunsicherheit

Sowohl für den Gesamtgeräuschpegel und das Fremdgeräusch werden Schätzwerte für den Schalldruckpegel des Terzbandes i bei beliebiger Windgeschwindigkeit unter Verwendung linearer Interpolation zwischen den nächstliegenden Bin-Mittelwerten berechnet. Parameterbezogene Darstellung, wie in Gleichung (20) beschrieben, kann verwendet werden.

$$\begin{pmatrix} V \\ L \end{pmatrix}(t) = (1-t) \cdot \begin{pmatrix} \bar{V}_k \\ \bar{L}_{i,k} \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} \bar{V}_{k+1} \\ \bar{L}_{i,k+1} \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\bar{V}_k \leq V < \bar{V}_{k+1}$$

Wird dies verwendet, wird der t -Wert bei einer festgelegten Windgeschwindigkeit v berechnet als

$$t = \frac{(V - \bar{V}_k)}{(\bar{V}_{k+1} - \bar{V}_k)} \quad (21)$$

und der geschätzte Schalldruckpegel bei dieser Windgeschwindigkeit wird berechnet als

$$L_V(t) = (1-t) \cdot \bar{L}_k + t \cdot \bar{L}_{k+1} \quad (22)$$

Die Standardabweichung des berechneten Schalldruckpegels bei Windgeschwindigkeit v wird berechnet unter Verwendung von

$$\sigma_{LV}(t) = \sqrt{\sigma_L^2 \left(t - \frac{\sigma_{LV}^2(t)}{\sigma_V^2(t)} \right)} \quad (23)$$

Dabei ist

$$\sigma_L^2(t) = (1-t)^2 \cdot \sigma_{L,k}^2 + t^2 \cdot \sigma_{L,k+1}^2$$

$$\sigma_{LV}(t) = (1-t)^2 \cdot \frac{\sigma_{LV,k}}{N_k} + t^2 \cdot \frac{\sigma_{LV,k+1}}{N_{k+1}}$$

$$\sigma_V^2(t) = (1-t)^2 \cdot \sigma_{V,k}^2 + t^2 \cdot \sigma_{V,k+1}^2$$

N_k die Anzahl der Messungen in Windgeschwindigkeitsbin k ;

N_k in Gleichung (23) gleicht die Verwendung der Standardabweichung von den Mittelwerten der Geräuschpegel und Windgeschwindigkeit aus.

Liegt der Bin-Mittelwert der Windgeschwindigkeit unterhalb des Bin-Mittelwertes am höchsten Bin, ist Extrapolation zum Bin-Mittelwert zulässig. Liegt der Bin-Mittelwert der Windgeschwindigkeit oberhalb des Bin-Mittelwertes am niedrigsten Bin, ist Extrapolation zum Bin-Mittelwert zulässig. Extrapolation ist nur für Bins mit mindestens 10 Messdatenpunkten zulässig.

Liegt der Gesamtgeräuschpegel, $L_{V,T,i,k}$, um mindestens 3 dB oberhalb des Fremdgeräuschpegels, $L_{V,B,i,k}$, in jedem Terzband, werden der Schalldruckpegel nach Fremdgeräuschkorrektur und die zugehörige Standardabweichung des Wertes berechnet unter Verwendung von

$$L_{V,c,i,k} = 10 \cdot \log \left(10^{\left(\frac{L_{V,T,i,k}}{10} \right)} - 10^{\left(\frac{L_{V,B,i,k}}{10} \right)} \right) \quad (24)$$

$$\sigma_{c,i,k} = \frac{\sqrt{\left(\sigma_{LV,T,i} \cdot 10^{\left(\frac{L_{V,T,i}}{10} \right)} + \sigma_{LV,B,i} \cdot 10^{\left(\frac{L_{V,B,i}}{10} \right)} \right)^2}}{10^{\left(\frac{L_{V,T,i}}{10} \right)} - 10^{\left(\frac{L_{V,B,i}}{10} \right)}} \quad (25)$$

Bei Bins oder Terzbändern, bei denen der Schallpegel, $L_{V,t,i}$, den Fremdgeräuschpegel, $L_{V,B,i}$, um weniger als 3 dB überschreitet, wird eine 3-dB-Korrektur angewendet und die Messunsicherheit so berechnet, als ob die Differenz 3 dB beträgt. Gleichung (26)

$$\sigma_{c,i,k} = 1 \cdot \frac{\sqrt{\left(\sigma_{LV,T,i} \cdot 10^{\left(\frac{L_{V,T,i}}{10} \right)} \right)^2 + \left(\sigma_{LV,B,i} \cdot 10^{\left(\frac{L_{V,T,i}-3}{10} \right)} \right)^2}}{10^{\left(\frac{L_{V,T,i}}{10} \right)} - 10^{\left(\frac{L_{V,T,i}-3}{10} \right)}} \quad (26)$$

Sind keine Daten zum Fremdgeräuschpegel vorhanden, wird der geschätzte Gesamtgeräuschpegel als Schätzwert für den korrigierten Schalldruckpegel verwendet. In diesem Fall wird das Ergebnis mit * gekennzeichnet.

9.3 Immissionsrelevante Schalleistungspegel

Innerhalb jedes Bins wird der immissionsrelevante Schalleistungspegel für jedes Terzband, $L_{WA,i,k}$, aus dem bezüglich des Fremdgeräusches korrigierten Schalldruckpegel, $L_{V,c,i,k}$, bei den Mitteln des Windgeschwindigkeitsbins wie folgt berechnet:

$$L_{WA,i,k} = L_{V,c,i,k} - 6 + 10 \log \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right] \quad (27)$$

Dabei ist

- $L_{V,c,i,k}$ der unter Referenzwetterbedingungen gemessene, bezüglich des Fremdgeräusches korrigierte A-bewertete Schalldruckpegel im Terzband i bei den ganzzahligen Windgeschwindigkeitswerten k ;
- R_1 der schräge Abstand vom Rotormittelpunkt zum Mikrofon, in Meter, wie in Bild 4 dargestellt; und
- S_0 die Bezugsfläche, $S_0 = 1 \text{ m}^2$.

Die Konstante von 6 dB in Gleichung (27) trägt der ungefähren Schalldruckverdoppelung Rechnung, die bei Geräuschmessungen auf einer Platte am Boden auftritt.

Der Schätzwert für den A-bewerteten Schalleistungspegel in Bin k wird durch energetische Aufsummierung aller Werte der Terzband-Schalleistungswert berechnet. Die Standardabweichung des A-bewerteten Schalleistungspegels wird unter Verwendung von Gleichung (29) berechnet.

$$L_{WA,k} = 10 \cdot \log \sum 10^{\left(\frac{L_{WA,i,k}}{10} \right)} \quad (28)$$

Werden bei der Aufsummierung mit * gekennzeichnete Terzbandwerte verwendet, ist das Ergebnis mit * zu kennzeichnen, um anzuzeigen, dass der berechnete Schallleistungspegel durch Fremdgeräusche beeinflusst sein kann.

$$\sigma_{LWA,k} = \frac{\sqrt{\sum \left(\sigma_{c,i,k} 10^{\left(\frac{L_{WA,i,k}}{10} \right)} \right)^2}}{\sum 10^{\left(\frac{L_{WA,i,k}}{10} \right)}} \quad (29)$$

Empfehlungen für die Standardabweichungen sind Anhang C zu entnehmen.

9.4 Immissionsrelevante Schallleistungspegel bezogen auf die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe

Für die Berechnung des auf die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe bezogenen immissionsrelevanten Schallleistungspegels, $L_{WA,10m,k}$, bei ganzzahligen Windgeschwindigkeitswerten innerhalb des Messbereiches wird folgendes Verfahren verwendet:

Die entsprechende Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe, $V_{H,n}$, wird unter Verwendung von Gleichung (30) berechnet. Die zugehörigen Windgeschwindigkeiten werden als Windgeschwindigkeitswerten eingesetzt. Die lineare Interpolation und die Fremdgeräuschkorrektur werden wie in den Gleichungen (22) bis (27) berechnet.

$$V_H = V_{10} \cdot \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (30)$$

$L_{WA,10m,k}$ für ganzzahlige Windgeschwindigkeitswerte k innerhalb des Messbereiches mit der zugehörigen Messunsicherheit, $\sigma_{LWA,10m,k}$, wird unter Verwendung der Gleichungen (28) und (29) berechnet.

9.5 Tonale Wahrnehmbarkeit

9.5.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Präsenz von Tönen in dem Geräusch bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten ist auf der Basis von Schmalbandanalysen zu untersuchen.

Die Tonhaltigkeitsanalyse ist für denselben Windgeschwindigkeitsbereich wie für die Schallleistungsmessung durchzuführen. Die gesamte Messung ist in 10-s-Zeiträume zu unterteilen, wie in 7.2.4 festgelegt.

Jedem über 10 s energetisch gemittelten Spektrum werden Windgeschwindigkeitsbins zugeordnet. Die tonale Gesamt-Wahrnehmbarkeit eines festgelegten Windgeschwindigkeitsbins kann nur bestimmt werden, wenn mindestens 6 der Schmalbandspektren für dieses Windgeschwindigkeitsbin einen identifizierten Ton desselben Ursprungs aufweisen.

„Das Geräusch enthält keine tonale Wahrnehmbarkeit“ kann festgestellt werden, wenn

- weniger als 20 % von 10 oder mehr Spektren identifizierte Töne desselben Ursprungs enthalten;
- mehr als 20 % aller Spektren, jedoch weniger als 6, eine mittlere tonale Wahrnehmbarkeit (für einen Ton desselben Ursprungs) von ≤ -3 dB aufweisen.

Das Verfahren ist im Fließdiagramm in Bild 7 dargestellt.

E DIN IEC 61400-11 (VDE 0127-11):2009-01

Identifizierte Töne in unterschiedlichen Spektren werden als der gleiche Ton (Ton desselben Ursprungs) angesehen, wenn sie innerhalb $\pm 25\%$ der kritischen Bandbreite bei der Frequenz liegen. Töne desselben Ursprungs werden als ein Ton angesehen und aufgezeichnet.

Für jedes über 10 s energetisch gemittelte Spektrum mit identifiziertem Ton, $j = 1$ bis N , in jedem Windgeschwindigkeitsbin ist:

- der Schalldruckpegel, $L_{pt,j,k}$, des Tones bzw. der Töne zu bestimmen;
- der Schalldruckpegel des maskierenden Geräusches, $L_{pn,j,k}$, innerhalb der kritischen Bandbreite um den Ton zu bestimmen;
- die Tonhaltigkeit, $\Delta L_{tn,j,k}$, die Differenz zwischen dem Schalldruckpegel des Tones und dem Pegel des maskierenden Geräusches, zu bestimmen;
- die tonale Wahrnehmbarkeit, $\Delta L_{a,j,k}$, die Differenz zwischen der Tonhaltigkeit und der Wahrnehmbarkeitsschwelle des Tones zu bestimmen.

Die tonale Gesamt-Wahrnehmbarkeit, $\Delta L_{a,k}$, wird in jedem Windgeschwindigkeitsbin für jeden der identifizierten Töne als energetischer Mittelwert der Einzelwerte für $\Delta L_{a,j,k}$ ermittelt. Nur Spektren mit identifizierten Tönen dürfen berücksichtigt werden.

Die kritische Bandbreite ergibt sich wie folgt:

$$\text{Kritische Bandbreite} = 25 + 75 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \left[\frac{f_c}{1\,000} \right]^2 \right)^{0,69} \quad (31)$$

wobei f_c die Mittenfrequenz in Hz ist.

In Ausnahmefällen (d. h. bei sehr breiten, aus vielen Linien bestehenden Tönen oder bei einem maskierenden Geräusch, welches eine starke Änderung mit der Frequenz aufweist) führt diese Methode u. U. nicht zu korrekten Ergebnissen. In diesem Fall sind Abweichungen von der vorgeschriebenen Methode erforderlich und im Bericht zu dokumentieren.

9.5.2 Identifizierung möglicher Töne

Für die Klassifizierung von Spektrallinien ist eine vorläufige Identifizierung von Tönen erforderlich.

Für die Identifizierung möglicher Töne wird die folgende Methode angewandt:

- Suche lokaler Maxima im Spektrum;
- Berechnung der mittleren Energie innerhalb des mittig um jedes lokale Maximum positionierten kritischen Frequenzbandes, ausgenommen die Linie des lokalen Maximums und der beiden benachbarten Linien;
- übersteigt das lokale Maximum den mittleren Pegel des maskierenden Geräusches um mehr als 6 dB, handelt es sich um einen potenziellen Ton.

9.5.3 Identifizierter Ton

Ein identifizierter Ton ist ein möglicher Ton mit zwei oder mehr Spektrallinien, klassifiziert als „Ton“ nach 9.5.1.

9.5.4 Klassifizierung der Spektrallinien innerhalb der kritischen Bandbreite

Das kritische Frequenzband ist so zu positionieren, dass die Mittenfrequenz mit dem potenziellen Ton zusammenfällt. Für mögliche Töne mit Frequenzen zwischen 20 Hz und 70 Hz beträgt die kritische Bandbreite 20 Hz bis 120 Hz.

Für jedes kritische Frequenzband werden unter Anwendung der folgenden Methode alle Spektrallinien klassifiziert als Ton, maskierendes Geräusch oder keines von beiden:

- a) Der Schalldruckpegel $L_{70\%}$ ist zu berechnen, wobei, wie in Bild 8 dargestellt, $L_{70\%}$ der energetische Mittelwert aus 70 % derjenigen Spektrallinien innerhalb der kritischen Bandbreite mit den niedrigsten Pegeln ist.
- b) Es ist ein Bemessungspegel zu definieren, der, wie in Bild 9 dargestellt, $L_{70\%}$ plus 6 dB beträgt.
 - Eine Linie wird als „maskierend“ klassifiziert, wenn ihr Pegel kleiner ist als der Bemessungspegel. Wie in Bild 10 dargestellt, ist $L_{pn,avg}$ dann der energetische Mittelwert aller als „maskierend“ klassifizierten Linien.
 - Eine Linie wird als „Ton“ klassifiziert, wenn ihr Pegel den Wert von $L_{pn,avg}$ plus 6 dB überschreitet.
 - Wo es mehrere benachbarte Linien gibt, die als „Ton“ klassifiziert wurden, wird die Linie mit dem höchsten Pegel bestimmt. Benachbarte Linien werden dann nur in dem Fall als „Ton“ klassifiziert, wenn ihr Pegel den höchsten Pegel um maximal 10 dB unterschreitet.
 - Linien, die weder als „maskierend“ noch als „Ton“ klassifiziert werden können, werden als „keines von beiden“ klassifiziert. Diese Spektrallinien werden bei den nachfolgenden Auswertungen vernachlässigt. Die Klassifizierung der Linien innerhalb der kritischen Bandbreite ist in Bild 11 dargestellt.

9.5.5 Bestimmung des Tonpegels

Der Schalldruckpegel des Tones $L_{pt,j,k}$ ergibt sich aus der energetischen Aufsummierung aller Spektrallinien innerhalb der kritischen Bandbreite, die in 9.5.1 als „Ton“ klassifiziert wurden. Wo ein Ton zwei oder mehr benachbarte Linien umfasst, wird eine Korrektur bezüglich des Hanning-Fensters durchgeführt. Dies erfordert eine Division der energetischen Summe durch den Wert 1,5.

Bei mehr als einem vorhandenen Ton innerhalb der kritischen Bandbreite ist zu beachten, dass das vorstehend genannte Verfahren der energetischen Aufsummierung der Pegel dieser Einzeltöne entspricht.

9.5.6 Fremdgeräusch

Vom Fremdgeräusch ist ein Schmalbandspektrum für jedes Windgeschwindigkeitsbin zu erstellen. Durch einen Vergleich mit der entsprechenden Auswertung des WEA-Geräusches muss sichergestellt werden, dass die Töne nicht vom Fremdgeräusch herrühren; andernfalls kann die Tonhaltigkeit aufgrund des Fremdgeräusches nicht bestimmt werden. Darüber hinaus darf das Fremdgeräusch die Tonhaltigkeitsanalyse nicht wesentlich beeinflussen.

Es wird keine Fremdgeräuschkorrektur durchgeführt.

9.5.7 Bestimmung des Pegels des maskierenden Geräusches

Der Pegel des maskierenden Geräusches $L_{pn,j,k}$ ist wie folgt definiert:

$$L_{pn,j,k} = L_{pn,avg,j,k} + 10 \cdot \lg \left[\frac{\text{Kritische Bandbreite}}{\text{Effektive Geräuschbandbreite}} \right] \quad (32)$$

Dabei ist

$L_{pn,avg,j,k}$ der energetische Mittelwert derjenigen Spektrallinien innerhalb der kritischen Bandbreite, die als „maskierend“ klassifiziert wurden.

Die effektive Linienbreite entspricht dem 1,5fachen der Frequenzauflösung, so dass dieser Ausdruck die Korrektur bezüglich des Hanning-Fensters enthält.

9.5.8 Bestimmung der Tonhaltigkeit

Die Differenz zwischen dem Tonpegel $L_{pt,j,k}$ und dem Pegel des maskierenden Geräusches innerhalb des entsprechenden kritischen Frequenzbandes ist gegeben als:

$$\Delta L_{tn,j,k} = L_{pt,j,k} - L_{pn,j,k} \quad (33)$$

9.5.9 Bestimmung der Wahrnehmbarkeit

Für jeden Wert von $\Delta L_{tn,j,k}$ ist eine frequenzabhängige Korrektur durchzuführen, um die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs in Bezug auf Töne verschiedener Frequenzen zu kompensieren.

Die „tonale Wahrnehmbarkeit“ $\Delta L_{a,j,k}$ ist definiert als:

$$\Delta L_{a,j,k} = \Delta L_{tn,j,k} - L_a \quad (34)$$

wobei L_a die frequenzabhängige Bemessungskurve bezüglich der Wahrnehmbarkeit darstellt und definiert ist als:

$$L_a = -2 - \lg \left[1 + \left(\frac{f}{502} \right)^{2,5} \right] \quad (35)$$

wobei f die Frequenz des höchsten Tones innerhalb der kritischen Bandbreite in Hz ist.

Es ist zu beachten, dass diese Bemessungskurve mit Hilfe von Hörtests ermittelt wurde und das subjektive Ansprechen eines „typischen“ Hörers auf zeitlich unveränderliche Töne verschiedener Frequenzen widerspiegelt.

Für $\Delta L_{a,j,k}$ ist ein energetisches Mittel, $\Delta L_{a,k}$, für jedes Windgeschwindigkeitsbin zu berechnen.

Tonale Wahrnehmbarkeit von Tönen in unterschiedlichen Spektren mit Mittenfrequenzen innerhalb 25 % der kritischen Bandbreite ist als tonale Wahrnehmbarkeit desselben Tones anzusehen. Tonale Wahrnehmbarkeit jedes Tones in den Spektren wird für jedes Bin angegeben.

Für eine tonale Wahrnehmbarkeit, welche die Bedingung

$$\Delta L_{a,k} \geq -3,0\text{dB} \quad (36)$$

erfüllt, sind die Werte zu dokumentieren. Für eine tonale Wahrnehmbarkeit, welche diese Bedingung nicht erfüllt, d. h., wenn gilt

$$\Delta L_{a,k} < -3,0\text{dB} \quad (37)$$

sind die Werte für $\Delta L_{a,k}$ als „Nicht wahrnehmbare Töne“ aufzuzeichnen.

10 Angaben im Bericht

Die Anlagendaten und ihre Betriebsbedingungen sind wie folgt im Bericht anzugeben.

10.1 Beschreibung der Windenergieanlage

Die Angaben zur WEA müssen folgende Informationen umfassen:

- Einzelheiten zur WEA:

- Hersteller;
- Typenbezeichnung;
- Seriennummer.
- Einzelheiten zur Betriebsweise:
 - Vertikal- oder Horizontalachs-Maschine;
 - Luv- oder Leeläufer;
 - Nabenhöhe;
 - horizontaler Abstand zwischen Rotormittelpunkt und Turmachse;
 - Rotordurchmesser;
 - Turmtyp (Gitter oder Rohr);
 - passiv stall-, aktiv stall- oder pitchgeregelte Anlage;
 - konstante oder variable Drehzahl;
 - Leistungskurve;
 - Rotordrehzahl bei Windgeschwindigkeitsbins;
 - Bemessungsleistung;
 - Version der Steuersoftware.
- Einzelheiten zum Rotor:
 - Rotorkontrolleinrichtungen;
 - Vorhandensein von Vortexgeneratoren, Stall-Strips oder sägezahnförmigen Blatthinterkanten;
 - Typ der Rotorblätter;
 - Seriennummer;
 - Anzahl der Rotorblätter.
- Einzelheiten zum Getriebe:
 - Hersteller;
 - Typenbezeichnung;
 - Seriennummer.
- Einzelheiten zum Generator:
 - Hersteller;
 - Typenbezeichnung;
 - Seriennummer;
 - Drehzahl.

10.2 Merkmale der Umgebung

In den Bericht sind die folgenden Informationen über die unmittelbare und weitere Umgebung der WEA und der Messpunkte aufzunehmen:

- Einzelheiten des Standortes einschließlich der Ortsangabe, eines Lageplans und anderer relevanter Informationen;
- Art der Landschaft (hügelig, flach, Klippen, Berge usw.) in dem umgebenden Gebiet (im Umkreis von mindestens 1 km);
- Oberflächencharakteristiken (z. B. Gras, Sand, Bäume, Büsche, Wasserflächen);
- nahe gelegene reflektierende Oberflächen wie Gebäude oder andere Gebilde wie Felsen, Bäume, Wasserflächen;

E DIN IEC 61400-11 (VDE 0127-11):2009-01

- andere nahe gelegene Schallquellen, die möglicherweise den Fremdgeräuschpegel beeinflussen können, wie andere WEA, Autobahnen, Industriekomplexe, Flughäfen;
- zwei Fotos, wovon eines vom Referenzmesspunkt aus in Richtung der WEA und eines vom Windmessmast aus in Richtung der WEA aufgenommen wurde;
- ein Foto des Mikrofons auf der am Boden positionierten schallharten Messplatte und deren unmittelbarer Umgebung (siehe Bild 2).

10.3 Messgeräte

Die folgenden Informationen über die Messgeräte sind aufzuführen:

- der/die Hersteller;
- Gerätebezeichnung und Typ;
- Seriennummer(n);
- andere relevante Informationen (wie das Datum der letzten Kalibrierung);
- Anemometerposition und Messhöhe für jede Messreihe;
- Einfluss eines zweiten Windschirmes, falls verwendet.

10.4 Akustische Daten

Es sind die folgenden akustischen Daten zu dokumentieren:

- die Lage jedes Mikrofonmesspunktes für jede Messreihe;
- der immissionsrelevante Schallleistungspegel $L_{WA,k}$ bei Mittelwerten des Windgeschwindigkeitsbins sowie jedem ganzzahligen Windgeschwindigkeitswert in 10 m Höhe;
- ein Diagramm, das alle Datenpaare des WEA-Geräusches und des Fremdgeräusches (mit unterschiedlichen Symbolen) am Messpunkt 1 zeigt. In der Darstellung sind lineare Achseneinteilungen für L_{Aeq} und V_s und eine Skalierung zu wählen, bei der 1 m/s 2 dB entspricht;
- tabellarische und grafische Darstellung der Terzpegel des Schallleistungsspektrums für jeden Mittelwert des Windgeschwindigkeitsbins; die Achseneinteilung ist so zu wählen, dass eine Oktave 10 dB entspricht, und die Pegel sind ggf. durch einen Stern (*) zu kennzeichnen.

Für jeden Mittelwert des Windgeschwindigkeitsbins k:

- $\Delta L_{tn,j,k}$ für jeden festgestellten Ton;
- ΔL_k für jeden festgestellten Ton;
- $\Delta L_{a,k}$ für jeden festgestellten Ton;
- Frequenz des Tones bzw. der Töne;
- ein typisches, über 10 s gemitteltes Spektrum, aus welchem die Klassifizierung der Spektrallinien für jeden festgestellten Ton ersichtlich ist;
- Zeit und Datum von jeder Messreihe.

Die folgenden akustischen Daten können optional dokumentiert werden:

- tieffrequente Geräusche;
- Infraschall;
- Impulshaltigkeit;
- Amplitudenmodulation;
- andere Geräuschcharakteristiken, sofern vorhanden.

10.5 Nicht-akustische Daten

Die folgenden nicht-akustischen Daten sind zu dokumentieren:

- die Methode zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit;
- die Drehgeschwindigkeit des Rotors;
- die Lufttemperatur;
- der atmosphärische Druck;
- die Rauigkeitslänge (Schätzwert);
- der Bereich der Windrichtung während der Messreihe.

Die folgenden nicht-akustischen Daten können optional dokumentiert werden:

- Abschätzungen oder Messungen der Turbulenzintensität während der Geräuschemessungen;
- die Angabe, ob die Daten zur Turbulenzintensität über Messungen oder über Rückschlüsse aus meteorologischen Bedingungen bestimmt worden sind.

10.6 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit der folgenden, im Bericht dokumentierten akustischen Größen ist auszuwerten und anzugeben:

- der immissionsrelevante Schallleistungspegel bei den Bin-Mittelwerten der Windgeschwindigkeit;
- das Terzspektrum des Geräusches am Referenzmesspunkt bei jedem Mittelwert des Windgeschwindigkeitsbins;

Eine Anleitung für die Auswertung der Messunsicherheit ist in Anhang C und im ISO-Dokument GUM „*Guide to the expression of uncertainty in measurement*“, gegeben.

— Entwurf —

E DIN IEC 61400-11 (VDE 0127-11):2009-01

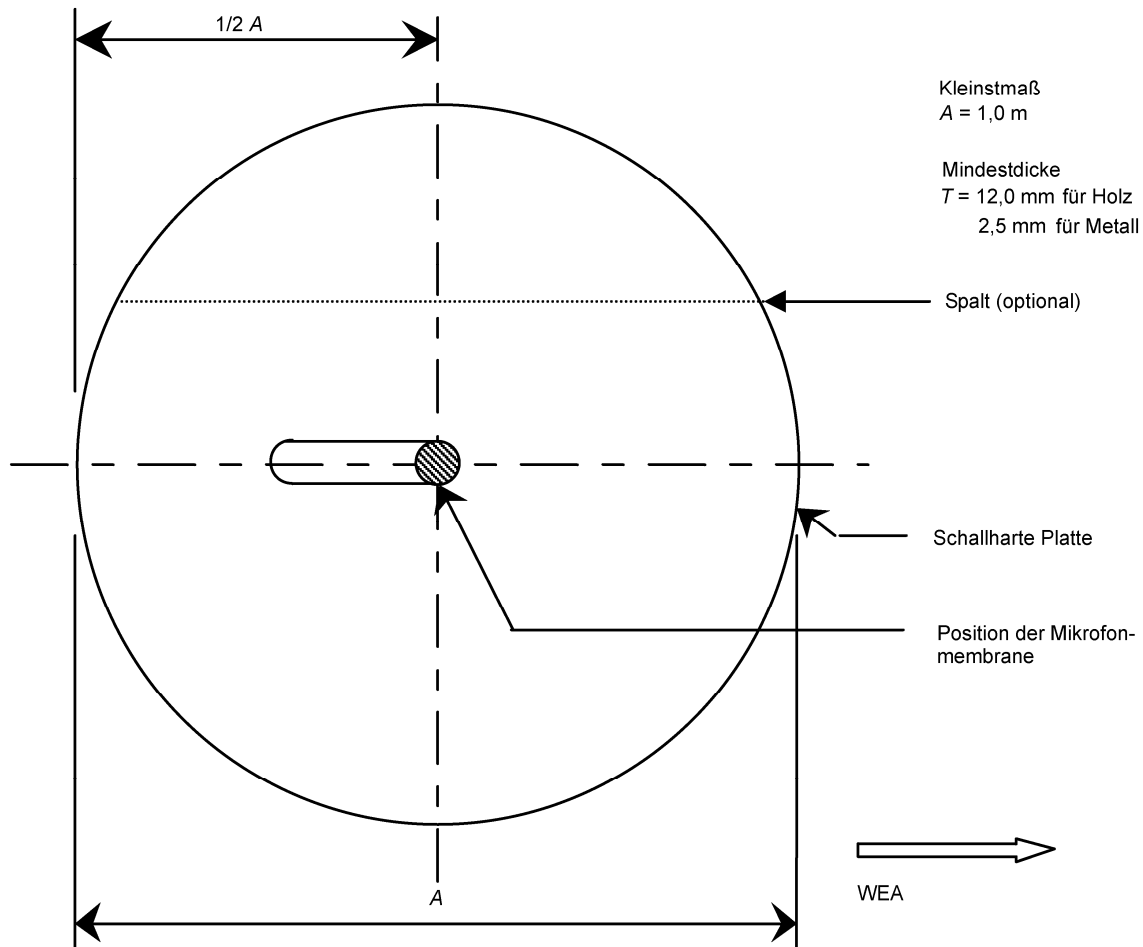


Bild 1a – Anordnung des Mikrofons – Draufsicht

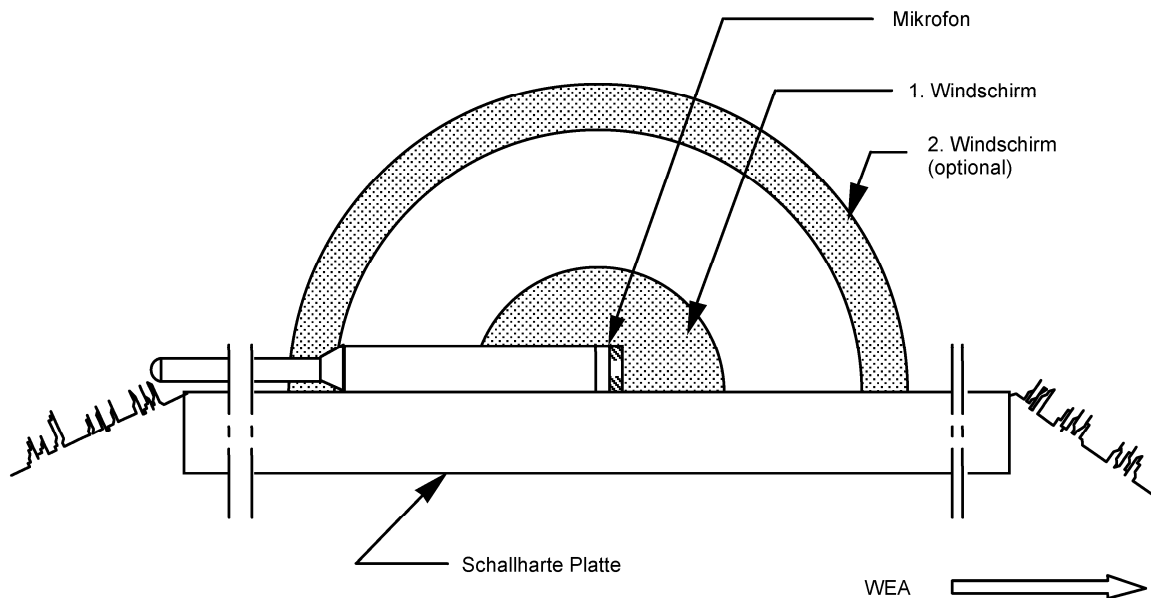


Bild 1b – Anordnung des Mikrofons – Vertikaler Querschnitt

Bild 1 – Anordnung des Mikrofons

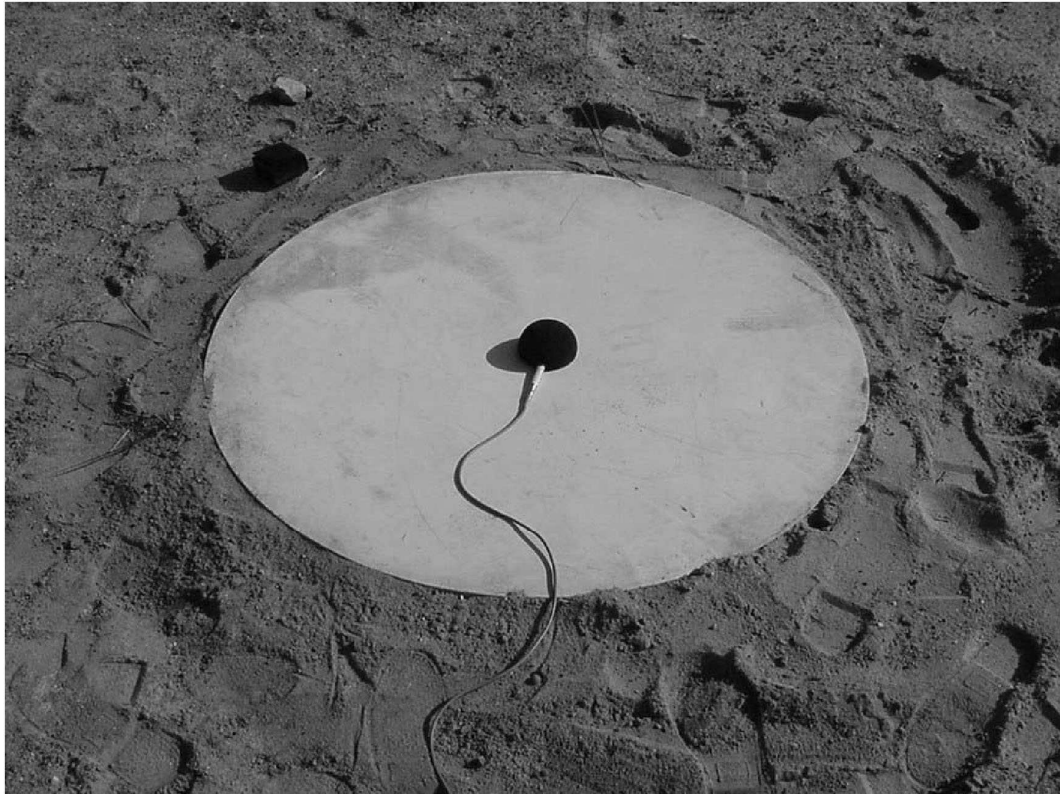


Bild 2 – Foto des Mikrofons und der schallharten Platte

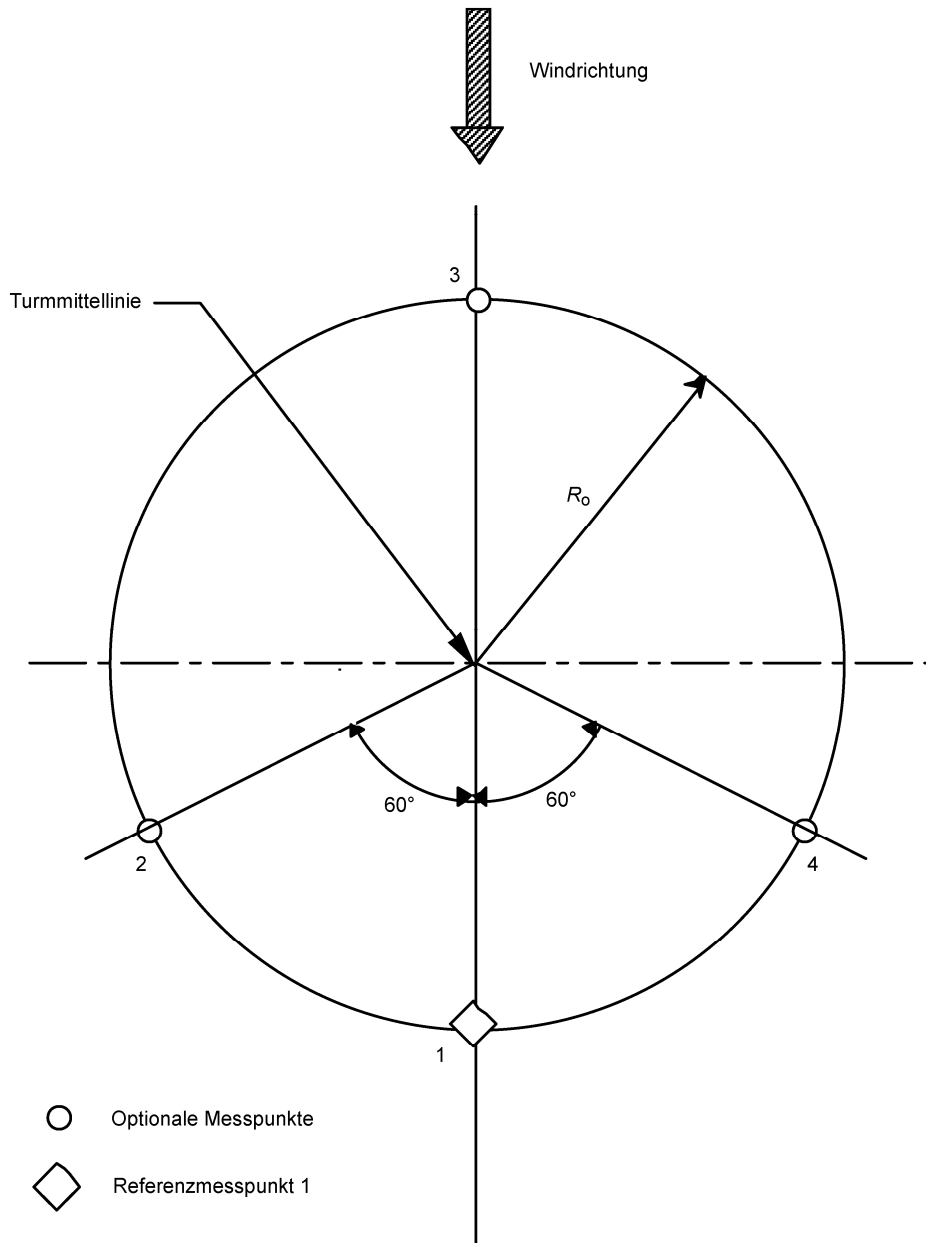


Bild 3 – Anordnung der Mikrofon-Messpunkte – Draufsicht

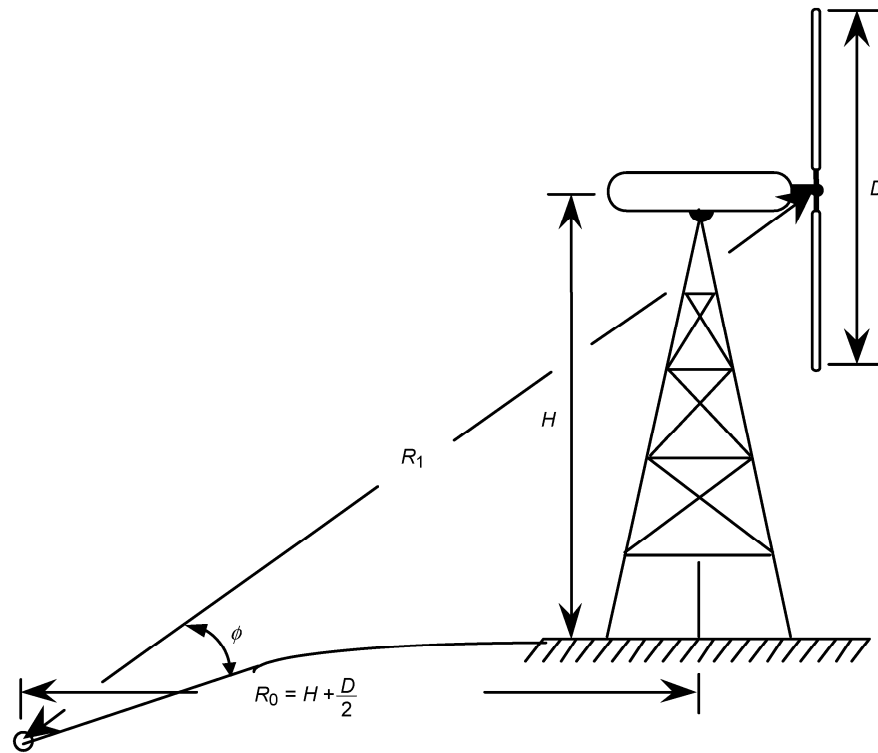


Bild 4a – WEA mit horizontaler Achse

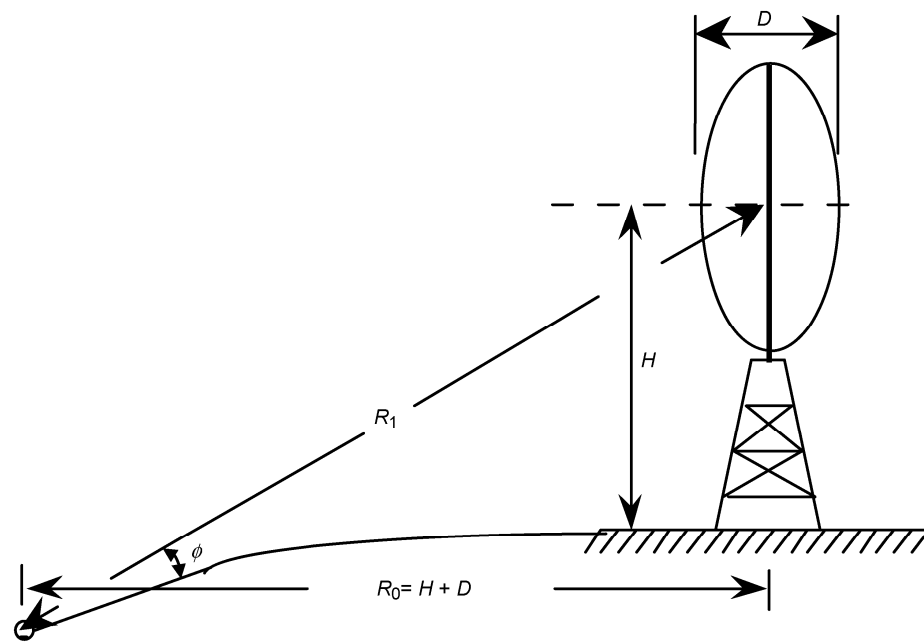


Bild 4b – WEA mit vertikaler Achse

Bild 4 – Darstellung zu den Definitionen von R_0 und des schrägen Abstandes R_1