

# Untersuchung der Schallausbreitung einer definierten hochliegenden Schallquelle

Lasse Roeßler, Henning Busch, Bernd Dörries

Ingenieurbüro für Akustik Busch GmbH, 24119 Kronshagen, E-Mail: lr@akustik-busch.de

## Einleitung

Hochliegende Schallquellen haben mit dem Ausbau der Windenergie und den immer höher werdenden Windenergieanlagen (WEA) an Bedeutung gewonnen. Die Schallausbreitung von WEA wird gemäß DIN ISO 9613-2 [1] prognostiziert. Diese Norm ist bis zu einer mittleren Ausbreitungshöhe von 30 m definiert. Moderne WEA überschreiten diese Höhen z. T. deutlich. Es stellt sich daher die Frage, ob die DIN ISO 9613-2 [1] für die Berechnung der Schallausbreitung hochliegender Schallquellen geeignet ist und wie die Unsicherheit der berechneten Schallpegel von der Ausbreitungshöhe abhängt. Der Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik hat eine Anpassung des Prognoseverfahrens für die Geräusche von WEA erarbeitet und den fachlich interessierten Kreisen einen Entwurf als sogenanntes Interimsverfahren [2] zur Diskussion gestellt.

Als Beitrag zu dieser Diskussion hat der Autor im Rahmen seiner Masterarbeit die Schallausbreitung einer definierten Schallquelle in verschiedenen Höhen vermessen. Zusätzlich wurden Schallausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1] und gemäß Interimsverfahren [2] durchgeführt. Die berechneten Schallpegel wurden mit den Messwerten verglichen.

## Messung der Schallausbreitung

Das gemessene Signal wurde mithilfe eines Lautsprechers mit hoher Schallleistung erzeugt. Der Lautsprecher wurde dafür am Servicekran einer WEA befestigt und in unterschiedlichen Höhen betrieben.

Die Richtcharakteristik des Lautsprechers wurde vor den Messungen bestimmt. Wegen der geringen Fremdgeräusche und dem hohen Schallleistungspegel konnte bis ca. 1.400 m Entfernung zum Lautsprecher mit Störgeräuschabständen von mehr als 6 dB gemessen werden.

In Zusammenarbeit mit der Windtest Grevenbroich GmbH konnten Messungen an einer WEA im Testwindpark Grevenbroich an zwei meteorologisch voneinander unabhängigen Tagen und den darauffolgenden Nächten durchgeführt werden (19.1.2017, 14.02.2017). Die Nabenhöhe der WEA betrug 80 m. Es wurden Messpunkte in ca. 130 m, 500 m, 750 m, 1.000 m und 1.400 m Entfernungen aufgestellt. Realisiert werden konnten Schallquellenhöhen von ca. 30 m, 60 m und 80 m. Diese entsprechen einer mittleren Ausbreitungshöhe gemäß DIN ISO 9613-2 [1] von ca. 15 m, 30 m und 40 m. Die Immissionsmessungen wurden in Anlehnung an DIN 45645-1 [3] auf Stativen in ca. 4 m Höhe durchgeführt.

## Wetter

Die Ausbreitungsbedingungen wurden während der Messungen mit einer tragbaren Wetterstation und zwei 130 m hohen Messmasten aufgezeichnet. Während der beiden Messungen herrschten begünstigte Schallausbreitungsbedingungen. Die Messungen wurden alle in Mitwindrichtung durchgeführt. Zusätzlich traten in beiden Messnächten Temperaturinversionen auf. In der ersten Messnacht am 19.01.2017 herrschte Bodenfrost. Es wird daher angenommen, dass die gemessenen Schallpegel eher am oberen Ende des Vertrauensbereiches der zu erwartenden Werte liegen.

## Signale

Während der Messungen wurden zwei unterschiedliche Signale über den Lautsprecher abgespielt (rosa Rauschen, aufgezeichnetes WEA-Geräusch). Durch den frequenzabhängigen Wirkungsgrad des Lautsprechers ergab sich für das rosa Rauschen ein Ausgangssignal mit einem energetischen Maximum bei 1 kHz bis 2 kHz. Für das WEA-Geräusch ergab sich ein energetisches Maximum bei ca. 500 Hz.

Der Schallleistungspegel des Lautsprechers wurde vor jeder Messung für beide Signale bestimmt. Für das rosa Rauschen ergab sich ein Schallleistungspegel von ca. 131 dB(A), für das WEA-Geräusch von ca. 118 dB(A). Die vor der Messung bestimmten Schallleistungspegel wurden während der Messung mit einer Emissionsmessung gemäß DIN ISO 61400-11 [4] überwacht und bestätigt. Die auf den Schallleistungspegel normierten Oktavbänder der beiden Signale sind in Abbildung 1 dargestellt.

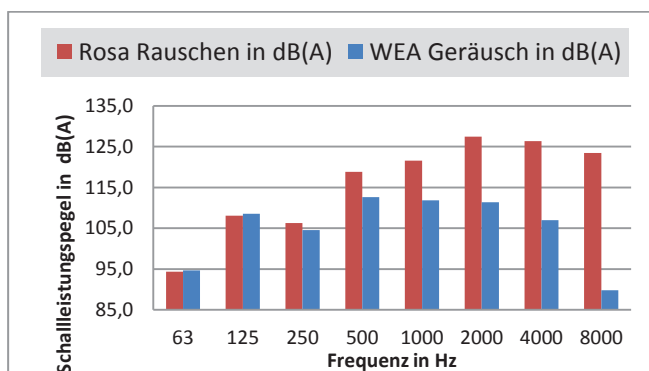


Abbildung 1: Oktavbänder des Lautsprechers mit rosa Rauschen (Rot) und WEA Geräusch (Blau) normiert auf den Schallleistungspegel in dB(A).

Die gemessenen Schalldruckpegel und die Wetterdaten wurden geprüft und anschließend um das Fremdgeräusch und die Richtwirkung des Lautsprechers korrigiert.

Die Messzeit je Messhöhe und Signal betrug ca. 30 min. Die Messungen am Tag wurden vor Sonnenuntergang und die Nachtmessungen nach 24:00 Uhr durchgeführt. Das WEA-

Geräusch konnte aus organisatorischen Gründen nur während der zweiten Messung abgespielt werden.

### Schallausbreitungsberechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1] und Interimsverfahren [2]

Begleitend wurden Schallausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1] und Interimsverfahren [2] durchgeführt. Dabei wurde die Berechnung mit alternativer Bodendämpfung der DIN ISO 9613-2 [1] und auf die 500 Hz-Oktave reduzierter Luftdämpfung mit dem Standardwert für 10 °C Lufttemperatur und 70 % Luftfeuchtigkeit ausgeführt. Dies entspricht dem zur Zeit angewendeten Prognoseverfahren bei WEA.

Das Interimsverfahren [2] ist eine Anpassung der DIN ISO 9613-2 [1] für die Geräusche von WEA und unterscheidet sich von diesem in drei Punkten:

- Die alternative Bodendämpfung  $A_{gr}$  wird im Interimsverfahren durch den Wert  $A_{gr} = -3$  dB ersetzt.
- Der Term  $D_{\Omega}$ , der bei Verwendung der alternativen Bodendämpfung in die Richtwirkungskorrektur  $D_C$  eingefügt wird, entfällt.
- Die Luftdämpfung wird spektral berechnet.

### Vergleich von Messung und Berechnung

Für den Vergleich wurden die Messwerte einer Messung gemittelt und in Tag und Nacht unterteilt. Die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Werten wurden dann über der jeweiligen Entfernung zum Lautsprecher in Diagrammen aufgetragen. Zur Bildung der Differenzen wurde der prognostizierte Wert vom Messergebnis subtrahiert. Negative Werte bedeuten also, dass die gemessenen Schallpegel niedriger sind als die berechneten Werte. Das Geräusch wurde dann durch die Berechnung überschätzt.

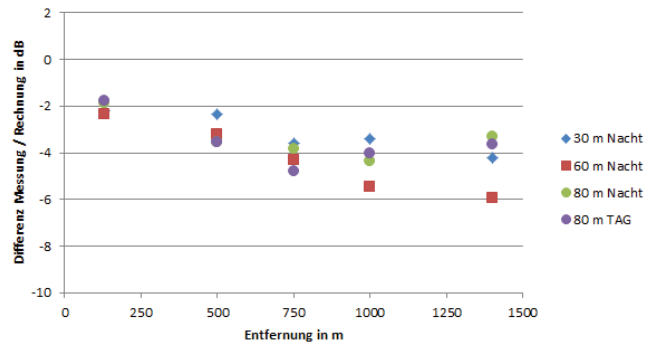
#### Vergleich mit Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1]

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Messwerte des rosa Rauschens während der ersten Messung (19.01.2017) mit den prognostizierten Werten gemäß DIN ISO 9613-2 [1] mit alternativer Bodendämpfung und auf die 500 Hz-Oktave reduzierter Luftdämpfung. Es zeigt sich, dass die Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1] das Geräusch ausnahmslos überschätzen. Die prognostizierten Schallpegel für das rosa Rauschen sind 2 dB bis 6 dB lauter als die gemessenen Schalldruckpegel.

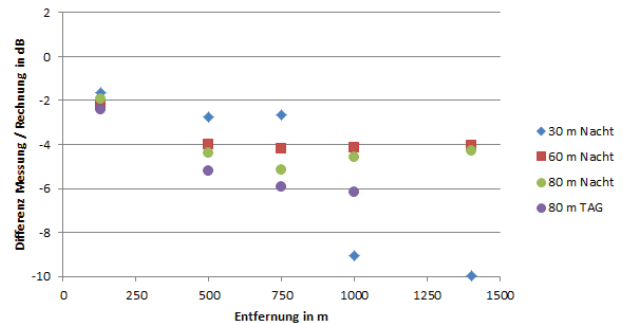
Abbildung 3 zeigt den Vergleich zwischen den Messwerten der zweiten Messung (14.02.2017) des rosa Rauschens und der berechneten Werte gemäß DIN ISO 9613-2 [1]. Die berechneten Schallpegel sind um 2 dB bis 10 dB höher als das rosa Rauschen.

Auffällig sind die Werte für 30 m Schallquellenhöhe in ca. 1.000 m und 1.400 m Abstand. Diese Messwerte lagen um ca. 4 dB niedriger als die Werte am ersten Messtag. Die

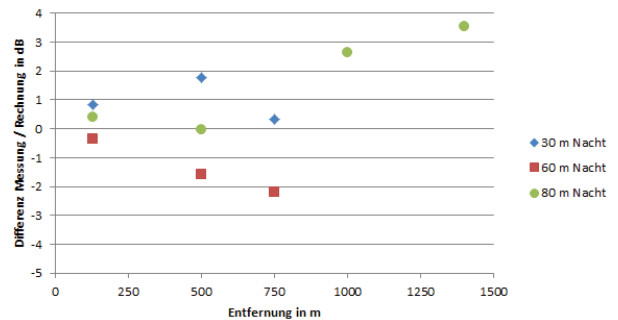
berechneten Werte überschätzen die Messwerte des zweiten Messtages um bis zu 10 dB. Die Qualität der Messwerte ist mit einem Störgeräuschabstand von größer 6 dB gemäß DIN 45645-1[3] hinreichend.



**Abbildung 2:** Differenz zwischen Messung rosa Rauschen (19.01.2017) und Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1] mit alternativer Bodendämpfung und Luftdämpfung 500 Hz.



**Abbildung 3:** Differenz zwischen Messung rosa Rauschen (14.02.2017) und Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1] mit alternativer Bodendämpfung und Luftdämpfung 500 Hz.



**Abbildung 4:** Differenz zwischen Messung WEA-Geräusch (14.02.2017) und Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1] mit alternativer Bodendämpfung und Luftdämpfung 500 Hz.

Abbildung 4 zeigt die Differenz zwischen der Messung des WEA-Geräuschs am zweiten Messtag und den Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1]. Für Lautsprecherhöhen von ca. 30 m und ca. 60 m konnten nur Messwerte bis ca. 750 m ausgewertet werden, da in größeren Entfernungen der Störgeräuschabstand zu gering war. Die Messwerte mit dem niederfrequenten WEA-Geräusch werden im Gegensatz zu den Messwerten des rosa Rauschens erstmals unterschätzt. Die Messungen ergaben also höhere Pegel als berechnet. Bei bis zu 750 m Abstand werden die gemessenen Pegel um bis zu 2 dB unterschätzt.

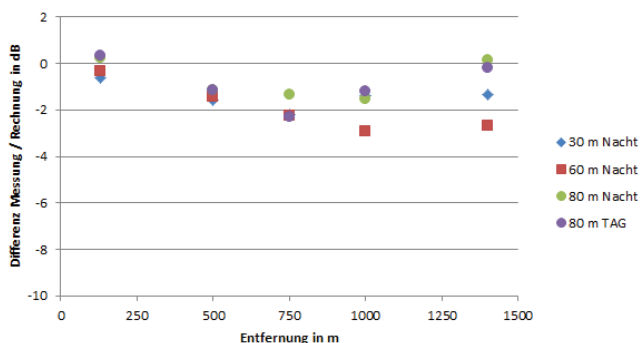
In 1.000 m und 1.400 m Abstand waren die Messungen um bis zu ca. 4 dB lauter als die berechneten Werte.

**Vergleich mit Berechnungen gemäß Interimsverfahren**  
 In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse von beiden Messungen mit den Schallprognosen gemäß Interimsverfahren [2] verglichen. Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die Pegeldifferenzen zwischen den Messungen mit rosa Rauschen und den Prognosen gemäß Interimsverfahren [2].

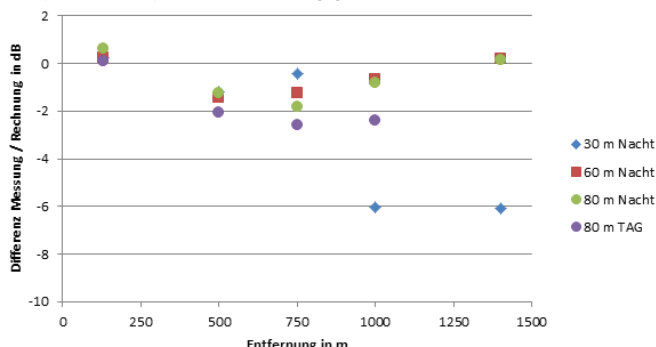
Abbildung 5 zeigt den Vergleich mit der ersten Messung am 19.01.2017, Abbildung 6 den Vergleich mit der zweiten Messung vom 14.02.2017. Die Vergleiche weisen einen ähnlichen Verlauf wie bei den Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1] auf.

Die Geräusche des Lautsprechers mit rosa Rauschen wurden mit dem Interimsverfahren [2] ebenfalls überschätzt. Die Differenz zwischen Messung und Berechnung liegt zwischen 0 dB und 3 dB und ist somit geringer, als die bei der Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1].

Die Differenzen in der zweiten Messnacht mit einer Lautsprecherhöhe von ca. 30 m in 1.000 m und 1.400 m Abstand (s. Abbildung 6) liegen zwar deutlich unter den Werten von 500 m und 750 m, jedoch sind sie mit ca. -6 dB statt ca. -10 dB um ca. 4 dB geringer als bei der Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1].



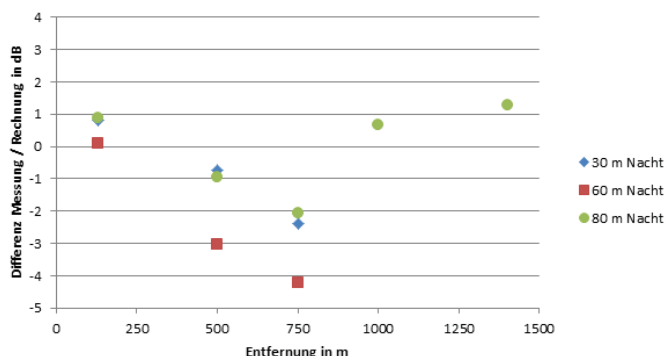
**Abbildung 5:** Differenz zwischen Messung rosa Rauschen (19.01.2017) und Berechnung gemäß Interimsverfahren [2].



**Abbildung 6:** Differenz zwischen Messung rosa Rauschen (14.02.2017) und Berechnung gemäß Interimsverfahren [2].

Abbildung 7 zeigt die Pegeldifferenzen zwischen der Messung mit dem niederfrequenten WEA-Geräusch und den Berechnungen gemäß Interimsverfahren [2] in der zweiten Messnacht. Bis 750 m wurden die Messwerte durch die Berechnung überschätzt. Die Messwerte an den Messpunkten 1.000 m und 1.400 m lagen dann jedoch über

den mit dem Interimsverfahren [2] berechneten Pegeln. In ca. 1.400 m Abstand betrug die Differenz ca. 1,3 dB und ist damit ca. 2 dB geringer als bei den Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1].



**Abbildung 7:** Differenz zwischen Messung WEA-Geräusch (14.02.2017) und Berechnung gemäß Interimsverfahren [2].

## Diskussion

Der Vergleich der beiden Messungen mit rosa Rauschen (energetischem Maximum zwischen 1 kHz und 2 kHz) und den Berechnungen gemäß Interimsverfahren [2] und DIN ISO 9613-2 [1] zeigt, dass beide Berechnungsverfahren die gemessenen Schallpegel überschätzen. Die berechneten Pegel lagen über den gemessenen. Die Differenz zwischen Messung und Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1] beträgt bis zu 6 dB. Die Differenz zwischen Berechnung gemäß Interimsverfahren [2] und Messung beträgt lediglich ca. 3 dB und ist somit nur etwa halb so groß.

Eine Erklärung für den um ca. 6 dB geringeren gemessenen Schallpegel der zweiten Messung mit 30 m Quellenhöhe konnte nicht gefunden werden. Auch eine erneute Analyse der Mess- und Wetterdaten zeigte nichts Auffälliges.

Die mit dem WEA-Geräusch gemessenen Schallpegel konnten bis ca. 750 m Abstand mit Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1] besser beschrieben werden, als mit den Berechnungen gemäß dem Interimsverfahren [2]. Das Interimsverfahren [2] überschätzte in diesem Bereich die Geräusche um bis zu 4 dB. In Entfernungen über 750 m wurden die Messwerte mit dem WEA-Geräusch durch die Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1] jedoch um bis zu 3,5 dB unterschätzt. Die Berechnungen gemäß Interimsverfahren [2] unterschätzen die Messwerte hier nur um ca. 1 dB und geben die Messung damit besser wieder als die Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1].

## Quellenhöhe

Der Vergleich der Mess- mit den Berechnungsergebnissen zeigt, dass die Schallquellenhöhe wider Erwarten nicht erkennbar mit der Höhe der gemessenen Schallpegel korreliert. Auch die Unterschiede zwischen den gemessenen und den berechneten Schallpegeln korrelieren nicht mit der Höhe der Schallquelle. Vielmehr zeigt sich, dass die Differenz zwischen Messung und Berechnung offenbar mehr von der Entfernung zur Schallquelle und vom Spektrum des abgestrahlten Signals abhängt.

### **Einfluss von Tages- und Nachtzeit**

Dank der freundlichen Unterstützung der Windtest Grevenbroich GmbH war es möglich, zwei Tag- und Nacht-Messungen durchzuführen und diese miteinander zu vergleichen. Es konnte nur in der zweiten Messnacht vom 14.02.2017 eine Differenz von ca. 1 dB zwischen Tag und Nacht festgestellt werden. Die Messwerte in der Nacht waren lauter als am Tag. Die Differenz von 1 dB liegt jedoch innerhalb der Messunsicherheit und trat nur in einer Nacht auf.

### **Einschränkungen**

Es konnten lediglich an zwei meteorologisch voneinander unabhängigen Tagen und den darauffolgenden Nächten gemessen werden. Für statistisch abgesicherte Aussagen wären mehr Messungen erforderlich.

Die maximale Schallquellenhöhe war auf die Nabenhöhe von 80 m der zur Verfügung stehenden WEA limitiert. Weiterführende Messungen könnten ggf. an WEA mit bis zu 140 m Nabenhöhe durchgeführt werden.

Der verwendete Lautsprecher limitierte das abgestrahlte Spektrum auf einen Bereich von ca. 55 Hz bis 20 kHz. Das Spektrum könnte durch die Kombination mit einem Subwoofer erweitert werden.

### **Relevanz**

Bis zu einer Entfernung von ca. 750 m werden die Messergebnisse für das WEA-Geräusch durch die Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1] mit alternativer Bodendämpfung und der auf die 500 Hz-Oktave reduzierten Luftdämpfung am besten beschrieben. Die Berechnungen gemäß Interimsverfahren [2] überschätzen in diesem Bereich das gemessene WEA-Geräusch um ca. 2 dB stärker als die Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1].

Die Schallleistungspegel von WEA liegen derzeit bei ca. 105 dB(A). Gemäß den Messungen mit dem WEA-Geräusch ergeben sich bei ca. 750 m Abstand Pegelminderungen von ca. 70 dB. Durch eine einzelne WEA in 750 m Abstand von einem Wohnhaus ergäbe sich damit ein Immissionsanteil von ca. 35 dB(A). Der Immissionsrichtwert für Mischgebiete von 45 dB(A) nachts würde somit ab einer Anzahl von mehr als zehn gleich weit entfernt gelegenen WEA ausgeschöpft. Eine Überschätzung von 2 dB würde in diesem Rechenbeispiel dazu führen, dass anstatt zehn WEA nur noch sechs WEA realisiert werden könnten. Das Interimsverfahren [2] könnte damit zu einer Verschärfung der WEA-Genehmigungspraxis führen.

Bei 1.400 m Abstand ergab sich gemäß den Messungen eine Pegelminderung von ca. 75 dB. Somit würde eine WEA in 1.400 m Entfernung einen Immissionsanteil von ca. 30 dB(A) verursachen und liegt damit 15 dB(A) unterhalb des Immissionsrichtwertes für Mischgebiete in der Nacht. Gemäß dem Erlass [5] werden in Schleswig-Holstein geplante WEA, die den Immissionsrichtwert um mindestens 15 dB(A) unterschreiten, als nicht relevant angesehen und verursachen damit keine wahrnehmbaren zusätzlichen schädlichen Umwelteinwirkungen. Eine Anlage in 1.400 m

Entfernung wäre somit für die Bestimmung der Immissionen an einem benachbarten Wohnhaus nicht mehr relevant.

### **Fazit**

Die Messungen mit dem rosa Rauschen (energetischem Maximum zwischen 1 kHz und 2 kHz) wurden durch beide Berechnungsverfahren überschätzt. Die Differenzen zwischen Messung und Interimsverfahren [2] waren nur halb so groß wie im Vergleich mit der DIN ISO 9613-2 [1].

Die Messungen mit dem WEA-Geräusch (energetisches Maximum bei ca. 500 Hz) wurden bis ca. 750 m Entfernung mit den Berechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 [1] genauer wiedergegeben als mit den Berechnungen gemäß Interimsverfahren [2]. Ab ca. 1 km Abstand wurden die Messungen durch die Berechnung gemäß DIN ISO 9613-2 [1] deutlich unterschätzt. Die Berechnungen gemäß Interimsverfahren [2] konnten die Messung in diesen Entfernungen besser beschreiben und unterschätzten die Messung nur um ca. 1 dB.

Bei den Messungen mit Quellenhöhen von bis zu 80 m konnte zumindest keine signifikante Korrelation zwischen Schallpegel und Quellenhöhe festgestellt werden.

Die dem Interimsverfahren [2] zu Grunde liegende Theorie einer Schallquellenhöhenabhängigen Bodendämpfung konnte nicht verifiziert werden.

### **Literatur**

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung, ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1999.
- [2] NALS, Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen, Berlin: Beuth Verlag, 2015-05.01.
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung, DIN 45645-1: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen; Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1996.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung, DIN EN 61400-11: Windenergieanlagen-Teil 11: Schallmessverfahren, Berlin: VDE Verlag, 2006.
- [5] Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Anwendung der TA lärm bei der Genehmigung von Windkraftanlagen (WKA) in Schleswig-Holstein, Flintbek, 29.10.2012.