

Henrik Møller und Christian Sejer Pedersen

Tieffrequenter Lärm von großen Windkraftanlagen

AALBORG UNIVERSITET

Tieffrequenter Lärm von großen Winkraftanlagen

Übersetzung der dänischen Studie

Lavfrekvent støj fra store vindmøller

Von Henrik Møller und Christian Sejer Pedersen

Abteilung für Akustik
Aalborg Universität 2010

Tieffrequenter Lärm von großen Windkraftanlagen
ISBN 978-87-92328-30-4
© Copyright 2010 Henrik Møller und Christian Sejer Pedersen

Herausgegeben von:
Abteilung für Akustik
Institut für Elektronische Systeme
Aalborg Universitet
Fredrik Bajers Vej 7, B5
DK-9220 Aalborg Ø, Danmark
Telefon (+45) 9940 8710, telefax (+45) 9815 2144
E-mail acoustics@acoustics.aau.dk

Anmerkung des Übersetzers

In dem nachfolgenden Bericht werden die Begriffe *Schalldruck* und *Schallleistung* verwendet.
Der Schalldruck wird in Pa (Pascal) gemessen = L_p (beschreibt die Stärke des Schalls, abhängig vom Abstand zur Schallquelle).

Die Schallleistung wird in W (Watt) gemessen = L_w (beschreibt die Schallquelle, nicht abhängig vom Abstand).

Zur besseren Darstellung werden beide in der logarithmischen Größe dB (Dezibel) dargestellt.
Der *Schalldruckpegel* (dB) [Schallfeldgröße] ist daher nicht mit dem *Schallleistungspegel* (dB) [Schallenergiegröße] zu verwechseln.

INHALT

VORWORT	5
ZUSAMMENFASSUNG.	6
1 EINLEITUNG	7
1.1 Tieffrequenter Schall und Infraschall	7
1.2 Frühere Studien	7
1.2.1 Schlussbetrachtung der Resultate der früheren Studien	11
1.3 Kurzbeschreibung der Studien.	11
2. METHODEN	12
2.1 Windkraftanlagen	12
2.2 Emittierte Schallleistung	12
2.3 Outdoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn	13
2.4 Schalldämmung	13
2.5 Indoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn	14
2.6 Statistische Methoden	14
3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen.	14
3.1 Emittierte Schallleistung	15
3.1.1 L_{WA} und L_{WALF}	15
3.1.2 Schallleistungspegel in den 1/3-Oktavbändern.	16
3.1.3 Toninhalt	19
3.1.4 Direktivität	20
3.1.5 Bedeutung der Windgeschwindigkeit	22
3.2 Outdoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn	22
3.3 Schalldämmung	24
3.3.1 Unzulänglichkeiten der Schalldämmungsmessmethode.	25
3.4 Indoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn	26
3.4.1 Der dänische Lärmrichtwert für Häuser	28
4. Generelle Betrachtungen	28
4.1 Lärm als Funktion der WKA-Größe	28
4.2 Variationen der WKA	29
4.3 Daten des Projektes WINDFARMperception	30
4.4 Tonkomponenten	32
4.5 Erdreflexion	34
4.6 Fenster	34
4.7 Geschätzte Schallleistungen noch größerer WKA	34
4.8 Atmosphärische Verhältnisse	38
5. Schlussfolgerungen	40
Referenzen	42

VORWORT

Windkraftanlagen werden immer größer, und es entstehen Bedenken, dass der Lärm von den WKA sich auf der Frequenzskala nach unten bewegt und der Anteil am tieffrequenten Lärm und Infraschall steigen wird und ein Niveau erreicht, wo es die Anwohner stören kann. Die Tagespresse berichtet regelmäßig über Rumpeln und lästigen Lärm von großen Windkraftanlagen und es wird oft behauptet, dass der Lärm sich sehr weit verbreitet. Die wissenschaftliche Literatur über Infraschall und tieffrequente Geräusche von großen Windkraftanlagen ist dagegen eher begrenzt.

Dies war der Hintergrund für ein dänisches Projekt, in dem Delta, eine Beratungsgesellschaft und offizielles Akustiklabor der dänischen Umweltagentur, zur Messung und Aufzeichnung des Lärms großer WKA vorgesehen war. Aalborg Universität sollte dann Hörexperimente in deren Labor durchführen zur Beurteilung der Belästigung durch die WKA und mit anderen verwandten Belästigungen durch Lärmquellen, wie z.B. Verkehrslärm, vergleichen. Die Studie sollte das gesamte Spektrum des Lärms umfassen, aber besondere Aufmerksamkeit sollte dem tieffrequenten Lärm und Infraschall gewidmet werden. Die Studie sollte außerdem ein Speziallabor für niederfrequenten Schall an der Universität Aalborg [1,2] nutzen und im Übrigen das Engagement und die Erfahrung der Universität, die sie über Jahrzehnte in der Erforschung niederfrequenten Schalls und Infraschalls gewonnen hat, ausnutzen.

Leider musste Aalborg Universität das Projekt beenden, bevor die Hörversuche durchgeführt werden konnten, weil Delta nicht in der Lage oder nicht bereit war, etliche Fragen, die von Bedeutung für die Auswahl und Dokumentation von Tonaufnahmen für die Hörexperimente gewesen wären, zu klären. Es wurde der Universität auch nicht ermöglicht, Zugriff auf alle Aufnahmen zu bekommen, was nach Auffassung der Autoren des vorliegenden Berichts, absolut notwendig für eine begründete Auswahl der Aufnahmen für diese Versuche gewesen wäre. Die Hörtests sind daher nicht durchgeführt worden, weshalb dieser Bericht auf die Analyse und Diskussion über die physikalischen Messungen begrenzt ist.

Die Studie erhielt eine finanzielle Unterstützung aus dem Energie-Forschungs-Programm der dänischen Energieagentur und von der Universität Aalborg.

Aalborg, 11.Juni 2010

Henrik Møller und Christian Sejer Pedersen

ZUSAMMENFASSUNG

Die Studie analysierte Daten aus 48 großen und kleinen Windkraftanlagen. Die Ergebnisse zeigen, dass große Windkraftanlagen (2,3 bis 3,6 MW) relativ mehr niederfrequentes Rauschen⁽¹⁾ als kleine Windkraftanlagen (bis zu 2 MW) emittieren. Entfernt sich das Rauschen von der WKA erhöht sich der niederfrequente Anteil, weil die Luft-Absorption die hohen Frequenzen mehr reduziert als die tiefen.

Schaut man auf den A-bewerteten Schalldruck im Bereich der betroffenen Anwohner-Distanzen, belegen die tiefen Frequenzen einen wesentlichen Teil des Lärms. Es besteht daher kein Zweifel, dass der niederfrequente Anteil des Lärmspektrums relevant ist für die Lärmbelästigung der Anwohner in der Nähe von großen Windkraftanlagen.

Der tieffrequente Lärm kann auch drinnen stören, natürlich abhängig von der Geräuschkämmung. Wenn der maximale Lärmpegel im Freien in der Nähe des maximal zulässigen in Dänemark⁽²⁾ liegt, ist das Risiko groß, dass ein erheblicher Teil der Nachbarn vom tieffrequenten Lärm gestört wird, auch im Innenbereich.

Der Unterschied der tieffrequenten Geräusche von kleinen zu großen Anlagen kann als eine Frequenz-Verschiebung nach unten in dem relativen Frequenzspektrum von etwa 1/3 Oktav ausgedrückt werden. Eine weitere Verschiebung von ähnlicher Größe ist wahrscheinlich für 10 MW-Turbinen mit einem entsprechenden Anstieg der Lärmbelästigung.

Windkraftanlagen emittieren auch Infraschall⁽³⁾, aber in Anbetracht der Empfindlichkeit des Menschen gegenüber solchen Frequenzen, ist hier die Rede von sehr niedrigen Niveaus. Selbst sehr nahe an den WKA liegt der Schalldruck weit unter dem normalen Hörempfinden. Infraschall wird daher nicht als ein Problem der WKA, deren Konstruktion und Größe den untersuchten entsprachen, betrachtet.

Die emittierte A-bewertete Schallleistung steigt proportional mit der Leistung der WKA oder wahrscheinlich noch mehr. Deshalb kontaminieren große Windkraftanlagen das gleiche - oder noch größeres - Gebiet mit Lärm, verglichen mit kleinen Turbinen mit der gleichen elektrischen Gesamtleistung.

Es gibt Unterschiede von mehreren Dezibel Lärm von verschiedenen WKA der gleichen Größe, selbst wenn diese vom gleichen Typ und Modell sind. Während der Planungsphase muss deshalb eine Sicherheitsmarge kalkuliert werden um sicherzustellen, dass die gebauten WKA die Lärmgrenzwerte einhalten. Es gibt hierfür eine internationale technische Spezifikation, aber diese wird oft nicht angewendet.

Unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen kann der Lärm von Windkraftanlagen noch lästiger sein, und - vor allem der tieffrequente Anteil - sich viel weiter ausbreiten als bisher angenommen. Es ist notwendig, hierüber mehr Wissen von diesen Phänomenen und deren Auswirkung zu erwerben.

¹ Lärm im Frequenzbereich 20-200 Hz

² Ein A-bewerteter Schalldruckpegel von 44 dB

³ Schall mit Frequenzen unter 20 Hz

1 EINLEITUNG

1.1 Tieffrequenter Schall und Infraschall

Ein paar einleitende Bemerkungen über tieffrequenten Schall und Infraschall sind sicher zweckmäßig. Für eine umfassende Beschreibung des menschlichen Gehörs bei niedrigen Frequenzen und Infraschall, siehe z.B. Møller og Pedersen [3].

Es wird allgemein davon ausgegangen, dass die untere Grenze des menschlichen Gehörs bei etwa 20 Hertz (abgekürzt Hz, gleich Schwingungen pro Sekunde) liegt, und bei Frequenzen unterhalb 20 Hz werden die Begriffe *Infraschall* und *infrasonisch* verwendet. Der Frequenzbereich 20-200 Hz wird als tieffrequenter Bereich beschrieben (manchmal mit einer etwas anderen Obergrenze).

Für viele Menschen ist es aber überraschend, dass das Gehör nicht bei 20 Hz aufhört. Ist der Schalldruck groß genug, können Menschen sogar bis 1 oder 2 Hertz Infraschall hören. Der Ton wird durch die Ohren wahrgenommen, aber die subjektive Qualität ist anders als der Klang bei höheren Frequenzen. Unterhalb 20 Hz verschwindet die tonale Bewertung, der Ton bekommt einen diskontinuierlichen Charakter, und es entsteht ein Druckempfinden auf dem Trommelfell. Bei wenigen Hertz verändert sich die Wahrnehmung hin zu diskontinuierlichen separaten Druckspitzen, und es ist sogar möglich, die einzelnen Schwingungen zu erkennen und zu zählen.

Bei niedrigen Frequenzen und vor allem Infraschall überschreitet das Hörempfinden (die subjektive Schallgröße) die Hörschwelle steiler als bei höheren Frequenzen (Whittle et al. [4], Møller und Andresen [5], Bellmann et al. [6], ISO 226 [7]), und Schall, der die Hörschwelle nur geringfügig überschreitet, kann nicht nur als kräftig sondern auch als belästigend empfunden werden (Andresen und Møller [8], Møller [9], Inukai et al. [10], Subedi et al. [11]). Weil die Hörschwelle für jeden Menschen unterschiedlich ist, kann ein Ton, der für manche Menschen unhörbar oder nur sehr schwach erfasst wird, von anderen kräftig und belästigend empfunden werden. Tieffrequenter Lärm, der über der Hörschwelle liegt, kann auch die Arbeitsleistung beeinträchtigen (Waye et al. [12]) und Schlafstörungen verursachen (Waye et al. [13]). Es gibt keine glaubwürdige Dokumentation über physiologische und psychologische Wirkungen des Infraschalls oder tieffrequenten Schalls unterhalb der Hörschwelle (siehe z.B. Berglund und Lindvall [14]).

Infraschall wird mit der G-Bewertungsskurve [15] gemessen, welcher den Frequenzbereich 1-20 Hz deckt. Bei der normalen Hörschwelle (Whittle et al. [4], Yeowart und Evans [16], Yamada et al. [17], Landström et al. [18], Watanabe und Møller [19] und Inukai et al. [10]) liegt der G-gewichtete Schalldruckpegel bei 95-100 dB. Normalerweise rechnet man nicht damit, dass Menschen G-gewichtete Schalldruckpegel unterhalb 90 dB [15] oder 85 dB [20] registrieren können.

1.2 Frühere Studien

Es gibt viele Studien, die sich theoretisch mit den Mechanismen beschäftigen, die tieffrequenten Lärm und Infraschall von Windenergieanlagen verursachen, während es sehr begrenzt ist, was es an Original-Studien über Lärm von kompletten WKA gibt. Nachfolgend werden nur WKA mit einer horizontalen Achse besprochen.

Hubbard und Shepherd [21] und Shepherd und Hubbard [22] überprüften die Litteratur über WKA-Lärm, besonders mit Schwerpunkt auf Studien der NASA, über mehr als 2 Jahrzehnte, und die sich mit WKA bis zu einer Größe von 4,2 MW befassten. Es wurde festgestellt und anhand von numerischen Modellen beschrieben, dass die harmonischen Schwingungen der Rotoren durch die Unterschiede der Windgeschwindigkeiten über die Rotorfläche entsteht und, bezogen auf WKA mit dem Rotor auf der Leeseite (Hinterläufer), durch die Impulse verursacht durch die Flügel, wenn diese den Windschatten durchqueren. Besonders der letzte Mechanismus ist verantwortlich für ein hohes Maß an diskreten Frequenzen von Infraschall und niedrigen Frequenzen von Windenergieanlagen mit dem Rotor im Windschatten. Es entsteht auch das "Breitband"-Rauschen (stochastisches, kontinuierliches Spektrum) bei schwachen und infrasonischen Frequenzen aufgrund

der Turbulenzen in der zuströmenden Luft. Turbulenz in Zustrom ist die Hauptursache für das Breitband-Rauschen unterhalb einiger hundert Hertz. Die Schallausbreitung von Windkraftanlagen wurde ebenfalls untersucht, dabei wurde beobachtet und durch die atmosphärische Refraktion erläutert, dass die Ausbreitung der tiefen Frequenzen in Leerichtung (Darstellung am Beispiel einer Schwingung mit 16,8 Hz) ab einer gewissen Distanz zylindrisch geschah und nicht, wie gewöhnlich bei Berechnungen angenommen, sphärisch. Dies bedeutet, dass der Schalldruck 3 dB abnimmt bei einer Verdoppelung der Distanz, und nicht 6 dB. Dass WKA-Lärm innerhalb Räumen manchmal eher empfunden wird als außerhalb, wird mit den in den Räumen entstehenden Resonanzen und der unzulänglichen Isolierung der Häuser gegen tiefe Frequenzen erklärt. Der Infraschallanteil des Spektrums lag unterhalb der Hörschwelle in allen gemeldeten und untersuchten Beschwerden über WKA-Lärm, aber es wurde behauptet, dass Infraschall die Ursache der fühlbaren Vibrationen und des Klirrens und Klapperns der Fenster und der lose an den Wänden hängenden Gegenständen war, welches zu den negativen Reaktion gegenüber WKA-Lärm beitrug. Mit einigen der gleichen Mühlen als Beispiele zeigte Guidati et al. [23], dass die Interaktion zwischen Flügeln und Turm auch bei Turbinen mit dem Rotor in Windrichtung (Luvläufer) ein infratonales und niederfrequentes Rauschen erzeugt, aber deutlich weniger als bei Windenergieanlagen mit dem Rotor auf Leeseite (Leeläufer).

Legerton et al. [24] maß den Lärm von zwei 450 kW Windkraftanlagen in einer Entfernung von 100 m. Die gemeldeten Schallpegel für 1/3-Oktavbänder bis zu 20 Hz lagen weit unter der normalen Hörschwelle für reine Töne, während die Schallpegel im 31,5 Hz-Band knapp unterhalb der Schwelle lagen.

Betke et al. [25] und Betke und Remmers [26] präsentierten eine Technik zur Reduzierung der Windgeräusche bei der Messung des tieffrequenten Lärms der WKA. Sie benutzten zwei Mikrofone, die in einem Abstand von 10 m zueinander in den Boden platziert wurden und einer Kreuzkorrelationstechnik. In einem Abstand von 200 m zu einer 500 kW Anlage schien das Frequenzspektrum kontinuierlich zu sein, wenn mit einer sehr feinen Auflösung der Frequenz analysiert wurde, jedoch mit Spitzen in den Flügel-Durchgangs-Frequenzen und deren Harmonischen. Der G-bewertete Schalldruckpegel war bei dem Abstand 63,9 dB.

Jakobsen [27] überprüfte Daten aus den drei erwähnten Studien in den vorangegangenen Texten, suchte weitere Informationen in den ursprünglichen Messungen und nahm Kontakt auf mit den Autoren. Er schätzte die G-gewichteten Schallpegel für 10 WKA (50 kW bis 4,2 MW) und stellte fest, dass diese bei WKA mit dem Rotor in Windrichtung 70 dB niedriger oder weniger sind in einer Entfernung von 100 m, während sie bei WKA mit dem Rotor im Lee 10-30 dB höher sind. Hieraus ließ sich schlussfolgern, dass selbst dicht an den Turbinen mit Rotor in Windrichtung wird der G-bewertete Pegel sowohl außerhalb als auch innerhalb eines Gebäudes unterhalb der in Dänemark maximal zulässigen Schwelle von 85 dB für tieffrequenten Lärm und Infraschall liegen [20]. Bei WKA mit Rotor auf der Leeseite kann diese Grenze bei Abständen bis zu mehreren 100 Meter überschritten werden. Aber auch bei WKA mit Rotor im Windschatten war der Infraschallpegel zu niedrig, um die Beschwerden, die in den ursprünglichen Studien bei bis zu 2 Km Abständen gemeldet wurden, zu erklären. In einem Versuch, eine alternative Erklärung zu finden, schätzte Jakobsen den Indoor-A-bewerteten Pegel des 10-160 Hz Frequenzbereiches, eine Messung, die in den dänischen Leitlinien für niedrige Frequenzen verwendet wird. Der empfohlene Abend- bzw. Nachthöchstwert von 20 dB für Immobilien wurde in allen Fällen überschritten bis auf eine. Auf der anderen Seite waren die üblichen Outdoor-A-bewerteten Pegel in diesen Fällen auch hoch genug, um die Beschwerden zu erklären (47-61 dB), daher ist es nicht möglich zu sagen, ob die Beschwerden aufgrund des normalen oder tieffrequenten Lärms erfolgten. (Jakobsen bezog sich irrtümlicherweise auf 25 dB als Nachthöchstwert).

Van den Berg [28] hatte darauf hingewiesen, dass die Flügel beim Vorbeiflug am Turm Lärm im

Infraschallbereich erzeugen, aber auch zu einer Modulation der höheren Frequenzen führen, sodass ein 'swish-swish' Geräusch entsteht. In einer stabilen Atmosphäre, wie sie oft nachts vorkommt, ist der Unterschied der Windgeschwindigkeiten an Flügelspitze und -basis viel größer als zu anderen Zeiten, und das verstärkt die Modulation und verändert das Swish-Geräusch zu einem "Klappern, Klopfen und Stampfen". Bei einem Windpark mit 17 2 MW-WKA war dies sehr deutlich in einer Mindestentfernung von 1 Km zu hören. Es wurden Messungen vorgenommen, 100 m von jeweils 2 WKA und 750 m von der nächsten Reihe von 10 Anlagen entfernt. Sogar die gemessenen Schallpegel im kürzesten Abstand zu den WKA lagen weit unterhalb der Hörschwelle für die 1/3-Oktavbänder bis 20 Hz. Die Pegel für 1/3-Oktavbänder zwischen 31,5 und 40 Hz und höher lagen oberhalb der Hörschwelle, sogar bis 750 m.

Pedersen und Møller [30] analysierten den Indoor-niederfrequenten-Lärm und Infraschall in vier Häusern in der Nachbarschaft von einer oder mehreren WKA (0,6-2,75 MW) in einem Abstand zur nächsten WKA zwischen 90-525 m. Es wurden keine hörbaren Harmonische gemessen außer im niederfrequenten Bereich, in mehreren Fällen sogar mit einem Ton-Charakter. Die G-bewerteten Pegel lagen bei 65 dB und niedriger, also weit unter der Hörschwelle. Die Schlussfolgerung war daher, Infraschall wird nicht die Ursache für Beschwerden sein. A-bewertete Pegel für Frequenzen 10-160 Hz lagen unterhalb der dänischen Vorgabe für Abend/Nachtwerte für Immobilien (20 dB) [20]. Die höchsten Werte wurden bei einer niedrigen Windgeschwindigkeit (6,6 m/s) gemessen in einem Abstand von nur 90 m, oder etwas weiter entfernt (325 m) bei der einzigen Messung mit einer höheren Windgeschwindigkeit (9,4 m/s). Die Messungen wurden nach der dänischen Richtlinie vorgenommen, allerdings fehlte ein Kläger, um die Stellen mit dem höchsten Lärm auszuweisen, welches nach der Methode [20] wichtig ist. Die Ergebnisse wurden nicht hinsichtlich Hintergrundgeräuschen bereinigt, aber es wurde sehr darauf geachtet, die Messungen ohne Fremdstörungen durchführen zu können. Zusätzliche Messungen in zwei Häusern deuten an, dass Menschen höheren Werten ausgesetzt werden können an anderen Messpunkten im Raum, als mit der offiziellen Methode. Die Ergebnisse waren nicht eindeutig aussagekräftig in Bezug auf tieffrequenten Lärm, und die Untersuchung war daher ein Teil des Motivs für das aktuelle Projekt.

Die Beratungsfirma Hayes McKenzie Partnership Ltd. [31] maß in einem Abstand von 360 m in Lee eines Windparks mit zwölf 1,65 MW WKA Infraschall. Bei Windgeschwindigkeiten bis 20 m/s betrugen die G-bewerteten Pegel bis zu 80 dB. In einem anderen Abschnitt der Untersuchung wurden in drei Häusern tieffrequenter Lärm gemessen, deren Bewohner sich über den Lärm von Windparks mit 3-16 WKA beschwert hatten. WKA-Größe und Abstand zu den Windparks wurde nur in einem Fall angegeben (drei 1,3 MW, Abstand 1030 m). Hieraus wurde geschlossen, dass im Bereich 10-160 Hz die Pegel niedriger waren als die von Moorhouse et al. [32, 33] dem britischen Innen-, Lebensmittel- und Landwirtschaftsministerium vorgeschlagen waren, und niedriger als die dänische Richtlinie 20 dB [20]. Nichtsdestotrotz zeigen die Messergebnisse, dass beide Grenzwerte in zwei von drei Häusern überschritten wurden. In dem einen Haus oft, bis das Mikrofon woanders im Raum platziert wurde. Es wurde damit begründet, dass das Mikrofon in der ersten Position eher Lärm von einem naheliegenden Wasserlauf als von den WKA aufnahm. Die Verfasser dieser Studie zweifeln sehr daran, dass die Umsetzung des Mikrofons die tieffrequenten Geräusche und den Infraschall des Wasserlaufes und nicht der WKA ausschließen sollte. Sowohl die britischen wie auch die dänischen Richtlinien schreiben vor, den Lärm dort zu messen, wo er am stärksten ist. Außerdem ist es nicht möglich anhand der Messergebnisse zu beurteilen, ob der Lärm am ersten Messpunkt (oder beide) überwiegend von dem Lärm des Wasserlaufes dominiert war. In dem anderen Haus lagen nur zwei Beschwerden vor während der Messperiode, bei einer wurden die britischen und dänischen Richtwerte überschritten. Ein Fenster war geöffnet, und es daher wurde behauptet, dass beide Richtlinien geschlossene Fenster während der Messungen verlangen. Das ist jedoch nicht korrekt. Die britischen Dokumente beinhalten keine Instruktionen über die Stellung der Fenster während der Messungen, sondern verlangen eine ausführliche Befragung der belästigten

Person über die äußeren Umstände während der Belästigung, und es ist logisch anzunehmen, dass diese Umstände dann auch während der Messungen vorherrschen. Die dänischen Richtlinien schreiben explizit vor, die Messungen bei geöffneten Fenstern durchzuführen, falls der Beschwerdeführer der Meinung sein sollte, der Lärm wäre dann kräftiger.

Jacobsen [34] benutzte die emittierte Schallleistung (primär bei 8 m/s Windgeschwindigkeit) von 10 verschiedenen WKA in den Größen 850 kW bis 3 MW, um den Schalldruckpegel in Abständen 200 – 800 m zu berechnen. Die A-bewerteten Pegel für außen und innen wurden für den Frequenzbereich 10 – 160 Hz berechnet, die Werte im Haus mit Hilfe von Schallkonstanten, die in der dänischen Anweisung vorgeschrieben sind bei der Bestimmung von Infraschall, der von Schnellfähren ausgeht. Es wurde angenommen, dass die A-bewerteten Pegel im Hause nicht den Wert 20 dB für Abend/Nacht überschreiten, es sei denn die A-bewerteten Pegel im Freien überschreiten im kompletten Frequenzbereich den Wert 45 dB. Bei einem Außenwert knapp unter 45 dB liegt der Innenwert über 20 dB bei ca. der Hälfte der Messungen. Es wurde behauptet, dass die Schallisolierung der Stadthäuser [nicht publiziert] wohl besser sei als die angenommenen Bauten, die als Hintergrundmaterial für die Regulierung des Fährnlärms.

Lee et al. [37] und Jung et al. [38] maßen den Lärm von zwei WKA, Rotor in Windrichtung, mit jeweils 660 kW und 1,5 MW. Der A-bewertete Lärm stieg mit der Windgeschwindigkeit an bei der 1,5 MW WKA, während für die 660 kW WKA der Lärm einigermaßen konstant blieb. Die WKA hatten eine Stall- bzw. Pitchregelung, die nicht vorhandene Steigerung des A-bewerteten Lärms soll ein Merkmal, so wird behauptet, der Pitchregelung sein. Es wird weiter behauptet, dass diese Form der Regelung vorzugsweise bei großen WKA angewendet wird. Der Infraschallbereich wurde von den Flügel-Durchgangs-Frequenzen und ihren Harmonischen dominiert, der Lärmpegel stieg mit der steigenden Windgeschwindigkeit bei beiden WKA. Sorgen wurde hinsichtlich des Infraschalls und des tieffrequenten Schalls geäußert, weil diese bei großen WKA mit einer Pitchregelung zum Problem werden könnten, da diese Regelung zwar den A-bewerteten Lärm reduziert aber nicht den tieffrequenten Lärm und Infraschall. Es wurde daraus geschlossen, dass der tieffrequente Anteil des Lärms für eine durchschnittliche Person hörbar ist und wahrscheinlich zu Klagen führen wird, und dass der Infraschall ebenso Anlass zu Klagen wegen Klirrens u.a. von Fenstern geben wird. Bei dieser Schlussfolgerung wurde der Abstand zu den WKA nicht mitgeteilt, aber aus den Daten des Berichtes kann hergeleitet werden, dass der Abstand sehr klein gewesen sein muss, etwa in der Größenordnung 70 – 100 m.

Gastmeier und Howe [39] maßen den Lärm in einem Haus, das 325 m entfernt von der am nächsten liegenden WKA einer Gruppe von mehreren Anlagen. Die Windgeschwindigkeit betrug 5 m/s. Es wurde behauptet, dass der Schallpegel mindestens 30 dB unterhalb der normalen Hörschwelle (nach Watanabe und Møller [19]) bei allen Frequenzen unterhalb 20 Hz lag. Die Skizze im entsprechenden Aufsatz verglich fälschlicherweise die Schmalbandpegel mit den Hörschwellen für reine Töne, aber die Verfasser des Aufsatzes behaupten, dass trotzdem reichlich Spielraum bis zur Hörschwelle vorhanden ist.

Ramakrishnan [40] maß den Lärm dicht an einer einzelnen WKA mit 660 kW und dicht an einer einzelnen WKA eines Windparks mit mehr als 50 Anlagen mit je 1,5 MW. Die G-bewerteten Pegel lagen bei beiden Messungen um die 70 dB.

Harrison [41] machte aufmerksam auf die Turbulenzen in der zuströmenden Luft, dass, weil diese entscheidend für den emittierten tieffrequenten Lärm sind, mehr Gewicht auf die Berücksichtigung dieser Turbulenzen während der Messungen und Berechnungen gelegt werden muss. Ein besonderes Problem ist außerdem, dass die Turbulenzen im Strömungsabriss der WKA verstärkt werden und dass diese Tatsache bei den Schall-Messungen nicht berücksichtigt werden. Barthelmie et al. [42] zeigte, dass die Turbulenzen extrem verstärkt werden mindestens bis zu Abständen, die

das 4-fache des Rotorflächendurchmessers betragen. Strömungsabriss-Turbulenz kann somit bedeutsam für den emittierten tieffrequenten Schall der Windparks sein.

1.2.1 Schlussbetrachtung der Resultate der früheren Studien

Die vorstehenden Studien haben eine Reihe unterschiedlicher Methoden benutzt, und die meisten der gewonnenen Daten können daher nicht direkt miteinander verglichen werden. Keine der Studien haben systematisch die Entwicklung des tieffrequenten Schalls und des Infraschalls mit den Leistungsgrößen der WKA. In manchen der Studien fehlen grundlegende Informationen, wie Informationen über die WKA(s), Abstand zu denen bei der Messung, Richtung und Höhe, Windgeschwindigkeit, Bandbreite der Messungen, Hintergrundlärm, Schallisolierung der Häuser bei Messungen in den Räumen, usw. usw. Nichtsdestotrotz scheint es möglich zu, einige Schlussfolgerungen zu gewinnen.

Der Durchgang der Flügel in Gebieten mit variierender Windgeschwindigkeit und -stärke moduliert das Geräusch bei höheren Frequenzen mit der Flügel-Durchgangs-Frequenz, aber schafft auch infrasonische und tieffrequente Elemente. Die Unterschiede in der Windgeschwindigkeit und -stärke liegt an der variierenden Höhe über den Boden, atmosphärische Turbulenzen und das Vorhandensein des WKA-Turmes. Der Lärm von den mechanischen Teile kann auch eine Rolle spielen. Die Modulation des Schalls bei höheren Frequenzen kann aufgrund der niedrigen Modulationsfrequenz fälschlicherweise als Infraschall ausgelegt werden.

Für WKA mit dem Rotor in Windrichtung vor dem Turm ('Luvläufer') liegt der Infraschall weit unterhalb der Hörschwelle, sogar dicht an der WKA. Für WKA mit dem Rotor im Windschatten ('Leeläufer') produziert der Flügel beim Durchgang des Windschattengebietes Infraschall, der die normale Hörschwelle direkt an der WKA überschreiten kann und möglicherweise auch ein Klirren der Fenster in größeren Entfernungen verursachen kann. Die meisten modernen WKA, aber nicht alle, haben ihren Rotor in Windrichtung.

Für die tieffrequenten Bereiche sind die Ergebnisse weniger sicher. Die Indikationen der Untersuchungen weichen voneinander ab, und es ist nicht möglich Schlussfolgerungen aus dem Vorstehenden zu ziehen, in welchem Umfang tieffrequenter Lärm der WKA Belästigungen hervorruft. Die Antwort hängt vermutlich ab von WKA-Typ, Abstand, atmosphärische Verhältnisse, ob man sich inner- oder außerhalb eines Hauses aufhält usw..

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass über die Originalstudien hinaus Unmengen Zusammenfassungen, Wiederaufbereitungen, Weißbücher, Informationsmappen, Websites usw. über tieffrequenten Lärm und Infraschall existieren. Viele dieser Arbeiten sind von Organisationen publiziert worden, die oft eifrig für oder gegen WKA agieren, und daher leider oft mit zweifelhaftem Inhalt sind. Eine Reihe Symptome und Effekte werden manchmal durch das Vorhandensein von tieffrequentem- oder Infraschall begründet, ohne irgendeine Beweisführung. Oft werden die Unterschiede der Begriffe tieffrequenter Schall und Infraschall nicht aufgezeigt, und als Ergebnis hiervon werden Belästigungen durch tieffrequenten Schall oft abgewiesen, nur weil Infraschall nicht vorhanden ist (zum Teil mit Recht, wie man aus dem Vorgenannten entnehmen kann). Es wird (immer noch) oft behauptet, dass Infraschall nicht hörbar ist und manchmal sogar tieffrequenter Schall auch nicht, oder es wird erzählt, dass beides nur von besonders empfindlichen Menschen gehört werden kann – was alles falsch ist. Bewertungskurven werden missverstanden oder missbraucht um den Eindruck zu erwecken, es werden dramatisch hohe oder unbedeutend niedrige Schallpegel dargestellt. Manchmal werden sogar politische Statements als wissenschaftliche Beiträge deklariert.

1.3 Kurzbeschreibung der Studie

Im Laufe des Projektes wurde der Lärm von vier großen Windkraftanlagen gemessen, Lärmdaten

von 44 anderen kleinen und großen WKA eingeholt, und die Isolierung gegen tieffrequenten Lärm in 10 Räumen in normalen Wohnhäusern gemessen. In dieser Niederschrift werden Daten aus dem Projekt verwendet, um die Abhängigkeit der emittierten Schallleistung von der AKW-Leistungsgröße zu untersuchen. Die Frequenz-Spektren der Quellen werden analysiert und diskutiert, und besonders die Hypothese, dass das Spektrum Richtung tiefere Frequenzen tendiert bei großen WKA, wird untersucht. Außen- und Innenspektren in bestimmten Abständen zu den WKA werden analysiert und diskutiert. Die Messungen und das Einholen der Daten lag in der Hand der Firma Delta, viele Details können in den Originalberichten eingesehen werden [43, 44, 45, 46].

2 Methoden

2.1 Windkraftanlagen

Insgesamt 48 WKA waren Gegenstand der Studie. Vier Prototypen mit einer elektrischen Bruttoleistung von 2 MW wurden von Delta als ein Teil des Projektes gemessen (WKA 1-4), während die Daten von sieben anderen 2 MW WKA von Delta außerhalb der Studie durch Messungen eingeholt wurden (WKA 5-11) [43, 44]. Die Daten von 37 WKA mit einer Bruttoleistung von 2 MW oder weniger wurden früherer Delta-Messungen entnommen [45]. Von den kleineren WKA werden einige mehrmals erwähnt, diese werden daher als für diesen Typ mehrfach gemessen gewertet. Alle WKA hatten Dreiblattflügel mit dem Rotor in Windrichtung (Luvläufer).

2.2 Emittierte Schallleistung

Die Schallleistung, die von WKA emittiert wird, wurde in Übereinstimmung mit dem IEC 61400-11 [47] gemessen. Das Prinzip dieser Richtlinie besteht aus dem Messen des, von einer reflektierenden horizontalen Metallplatte die auf dem Boden in einem Abstand gleich der WKA-Höhe platziert ist, reflektierten Schalls. Der gemessene Schalldruckpegel wird dann zum Schallleistungspegel eines imaginären Punktes im Zentrum des Rotors konvertiert, aus welchem derselbe Schall in die Aufnahmerrichtung emittiert werden würde. Das Ergebnis wird als ein *apparenter Schallleistungspegel* bezeichnet, wobei das Wort *apparenter* den Umstand unterstreicht, dass es sich nicht um den wahren Schall handelt sondern um die Schallleistung, die in der Messrichtung 'gesehen' wird. [**Apparent**, (aus dem lateinischen *apparens*, *apparentis*, von *apparere* 'erscheinen') scheinbar, wie beobachtet. (Die Große Dänische offene Enzyklopädie, Herausgeber Gyldendal)].

Der apparente A-bewertete Schallleistungspegel, L_{WA} , wurde für die 1/3-Oktavbänder bestimmt. Außerdem wurde eine besondere Tieffrequenzmaßeinheit, L_{WALF} , der A-bewertete Schallleistungspegel, für die 1/3-Oktavbänder im Bereich 10-160 Hz, berechnet. Der A-bewertete Schalldruckpegel für diesen Frequenzbereich, L_{pALF} , wird in den dänischen Richtlinien für tieffrequenten Lärm eingesetzt.[20].

Das Wort apparent ist wenig mundgerecht und selten benutzt im Dänischen, aber leider gibt es kein anderes Wort für den englischen Begriff 'apparent sound power level'. Der einzige Schallleistungspegel in dieser Studie welcher nicht ein apparenter Schallleistungspegel ist, tritt in dem folgenden Abschnitt 2.3 auf, daher wird das Wort apparent in dem folgenden Teil des Berichtes weggelassen, inkl. Ergebnisabschnitt und Schlussfolgerungen.

Für alle WKA wurden die Gegenwinddaten gesammelt (Lee), die Richtung wurde Referenzrichtung genannt, bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s (10 m über Grund). Die Windgeschwindigkeit wird oft bevorzugt bei solchen Messungen, und die meisten Auswertungen in dieser Studie sind bei dieser Geschwindigkeit erstellt. Die WKA 1-4 wurden auch bei anderen Geschwindigkeiten gemessen. Für die Einschätzung der Menge der reinen Töne wurde der tonale hörbare Inhalt (tonal audibility), ΔL_{ta} , der WKA 1-4 bestimmt, und um Einblick in die Abhängigkeit der Schallimmission bei einer möglichen Windrichtungsänderung zu bekommen, wurden die WKA 1-3

auch bei einer Richtungsabweichung von $\pm 60^\circ$ zu den Seiten im Verhältnis

zur Wind-Referenzrichtung über Grund gemessen. Alle WKA wurden in dem Standardfrequenzbereich 50 bis 10 kHz gemessen, die meisten bis zu 31,5 oder 25 Hz gemessen, die WKA 1-4 sogar bis 4 Hz.

2.3 Outdoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn

Der Schalldruckpegel im Freien, L_p , bei WKA-Nachbarn wurde nach der Richtlinie ISO 9613-2 [48] gemessen mit der Abweichung, dass statt ganze Oktavbänder 1/3 Oktavbänder angewendet wurden.

Die Richtung zu den WKA-Nachbarn ist waagerechter als die Richtung, in der der apparente Schallleistungspegel gemessen wurde, aber in Ermangelung präziserer Daten wurden der Schallleistungspegel plus Richtungsfaktor, $L_w + D_c$, durch den apparenten Schallleistungspegel (L_{WA}) ersetzt für die Referenzrichtung. Die Dämpfung als Ursache der atmosphärischen Absorption, A_{atm} , wurde mit Hilfe der Daten aus ISO 9613-1 [49] für 10° C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % berechnet. Für die 'Dämpfung' durch die Erdoberfläche, L_{gr} , wurden -1,5 dB angesetzt, was bedeutet, dass die Messungen ein Aufschlag von 1,5 dB bekommen. Die beiden übrigen Bestimmungen bez. der Dämpfung in ISO 9613-2 (Dämpfungen durch Barrieren A_{bar} und andere A_{misc}) wurden auf Null gesetzt.

Wird der schräge Abstand vom Rotorzentrum bis Messpunkt mit d bezeichnet, und die Dämpfungskonstante α , wird

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right) - 11 \text{ dB} - \alpha \cdot d + 1.5 \text{ dB} \quad (1)$$

Diese Berechnung entspricht der dänischen Richtlinie zur Regulierung des Lärms von WKA [50].

2.4 Schalldämmung

Um den tieffrequenten Lärm in Häusern messen zu können, wurde die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen in 10 Räumen gemessen, in 5 normalen Häusern je 2 Räume [46].

Aus einem Lautsprecher, der auf der Erde platziert war und in einem Einfallswinkel von 45° zur Hausfassade stand, wurde Schall emittiert. Der rechtwinklige Abstand zum Haus betrug mindestens 5 m. Der Lautsprecher wurde mit Breitbandlärm gespeist, der Tiefpassfilter im Einklang mit dem Equalizer auf 250 Hz eingestellt um die Lautsprechercharakteristik auszugleichen. Der Schalldruckpegel im Freien wurde an der Außenfassade in 1,5 m Höhe über dem Dielenniveau des Empfängerraumes gemessen. Der Wert *Outdoor-Schalldruckpegel* wurde bestimmt indem den gemessenen Pegeln 6 dB abgezogen wurden. Das aufgestellte Arrangement im Freien enthält etliche Elemente der Methoden nach ISO 140-5 [51], aber eine einzelne Methode wurde nicht eingehalten.

Bei niedrigen Frequenzen kann der Indoor-Schallpegel im selben Raum sehr variieren, und es wird allgemein vorausgesetzt, dass für die Bestimmung des Lärmniveaus der gemessene Pegel eher den höchsten Durchschnittspegel darstellen sollte als den allgemeinen Durchschnittspegel (s. z.B. Jakobsen [52], Simmons [53] und Pedersen et al. [54]). Um dies zu erfüllen, wurde der Mittelwert der Messungen in vier willkürlichen dreidimensionalen Ecken, d.h. wo Diele oder Decke auf zwei Wände treffen, genommen um den Wert *Indoor-Schalldruckpegel* zu bestimmen. Ecken, bei denen konzentrierte Transmissionswege auftreten könnten (z.B. Ventilationsschächte, Fenster oder Türen) wurden jedoch gemieden, und die gewählten Ecken repräsentierten zusammen alle Oberflächen. Pedersen et al. [54] hat gezeigt, dass diese Methode einen guten Schätzwert für den Schallpegel liefert, welcher mit 10 % im Raum überschritten wird d.h. fast den Maximumpegel im Raum

darstellt, aber ohne die Schallpegel die nur zu einem geringen Teil im Raum vorhanden sind. Dass die 3D-Eckenmethode geeignet ist, den maximale Schallpegel zu schätzen, dem Menschen normalerweise in einem Raum ausgesetzt werden können, wird bestätigt durch die Daten von Brunskog und Jacobsen [55], die 100 verschiedene Frequenz/Raum-Kombinationen simulierten, jede mit zwei verschiedenen Nachhallzeiten. Sie fanden, dass die 3D-Eckenmethode recht zentral das Ziel trifft, welches als das maximale Niveaus im Raum bezeichnet wird, ausgenommen sind die Positionen näher als 1 m zur Wand (durchschnittliche Fehlerquote unter 1 dB, Standardabweichung der Fehler 3-4 dB abhängig von der Nachhallzeit).

Die Schalldämmung in den 1/3-Oktav-Bändern wurde im Bereich 8-200 Hz gemessen, und sie wurde berechnet als Unterschied zwischen *Outdoor-Schalldruckpegel* und *Indoor-Schalldruckpegel*.

Es wurden auch zusätzliche Indoor-Messungen unternommen nach den dänischen Richtlinien zur Messung von tieffrequentem Lärm [20]. Diese Methode verlangt zwei Messungen an Punkten im Raum, an denen, bei normalem Gebrauch des Raumes (mit bestimmten geometrischen Begrenzungen), Personen Schall ausgesetzt sind, und eine Messung in der Nähe einer Ecke des Raumes (0,5-1,0 m von der Wand, 1,0-1,5 m über dem Boden). Die Messungen wurden in Übereinstimmung mit diesen Vorgaben gemacht. Mittlerweile wird diese Methode eingesetzt bei Lärmbeschwerden, und es ist vorgegeben, dass die beiden Nicht-Eck-Positionen Stellen sein sollen, an denen der Beschwerdeführer den Lärm am kräftigsten empfindet. Ohne einen Kläger und ohne den belästigenden Lärm wäre es nicht möglich gewesen, die Forderungen zu erfüllen. Obwohl die geometrischen Bedingungen der Messmethode erfüllt waren, waren die Messungen nicht im Einklang mit der Methode an sich, und die Resultate sind daher nicht dokumentiert. Es muss angenommen werden, dass die Methode für die Messung der Schalldämmung ungeeignet ist, es sei denn dem Prozedere wird die Vorgabe hinzugefügt, eine Art Suche nach den Maximumpegeln zu unternehmen.

2.5 Indoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn

Die Schalldruckpegel in einem Haus wurden bestimmt, indem der Wert der Schalldämmung von dem Outdoor-Schalldruckpegel subtrahiert wurde, wobei beide Werte in den 1/3-Oktavbändern angegeben waren.

2.6 Statistische Methoden

Die Unterschiede sind mit *Student's t-tests* getestet worden, und der höchste p-Wert, der als signifikant angesehen und auch berichtet wird, ist 0,05. Im Zwei-Sample-Tests sind nicht die selben Varianten vorausgesetzt wie für zwei Samples, deshalb wird die *Welch's* Anpassung des *t-tests* und die *Welch-Satterthwaite* 'Freiheitsgrade' (degrees of freedom). Einseitige Tests werden verwendet, wenn die Hypothese eine bestimmte Richtung der Unterschiede umfasst, während zweiseitige Tests an den übrigen Stellen verwendet wird. Als Beispiel beinhaltet die Hypothese, dass das Frequenzspektrum sich nach unten (tiefer) bewegt bei größeren WKA, dass die relativen Schallpegel der großen WKA größer bei niedrigen Frequenzen sein werden und kleiner bei höheren Frequenzen. Daher werden bei niedrigen und hohen Frequenzen einseitige Test verwendet, während bei Frequenzen im mittleren Bereich (315-1600 Hz) zweiseitige Tests verwendet werden.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Drei WKA, eine mit 1650 kW und zwei mit je 2,3 MW, wurden dem Material zu einem späten Zeitpunkt hinzugefügt, und es sind keine Daten über die 1/3-Bänder dieser Anlagen vorhanden, daher können nur über die Ergebnisse für L_{WA} und L_{WALF} berichtet werden. Unglücklicherweise wurden 20 Hz Hochpassfilter eingesetzt bei einigen der Messungen (Richtungen Referenz, linke und rechte für

WKA 1, Referenzrichtung für WKA 3), daher wurde vor dem Auswerten der Messdaten der Einfluss der Filter kompensiert, indem die Filtercharakteristik von den Messergebnissen subtrahiert wurden. Hochfrequenzlärm der Frequenzwandler beeinflussten einige der Messungen bei Frequenzen oberhalb 5 kHz, daher werden die Ergebnisse bei diesen Frequenzen für die WKA 1-4 nicht berücksichtigt. Es sind einige Unstimmigkeiten bei den Daten vorhanden, die Delta in verschiedenen Ergebnissen, Tabellen und Figuren angegeben hat. Die Ergebnisse dieser Studie beruhen auf den am wenigsten behandelten Daten, welche mit wenigen Ausnahmen die absoluten Schallleistungspegel in den 1/3-Oktavbändern sind.

3.1 Emittierte Schalleistung

3.1.1 L_{WA} und L_{WALF}

Abbildung 1 zeigt L_{WA} und L_{WALF} aller WKA in Bezug zur WKA-Leistung. Die waagerechte Achse ist logarithmisch dargestellt wegen der Übereinstimmung mit der senkrechten Dezibel-Achse, die in ihrer Natur logarithmisch ist. Die einfachen Zusammenhänge zwischen emittierter akustischer Leistung und nomineller elektrischer Leistung der WKA werden daher durch gerade Linien dargestellt, die Regressionslinien sind zusätzlich eingefügt.

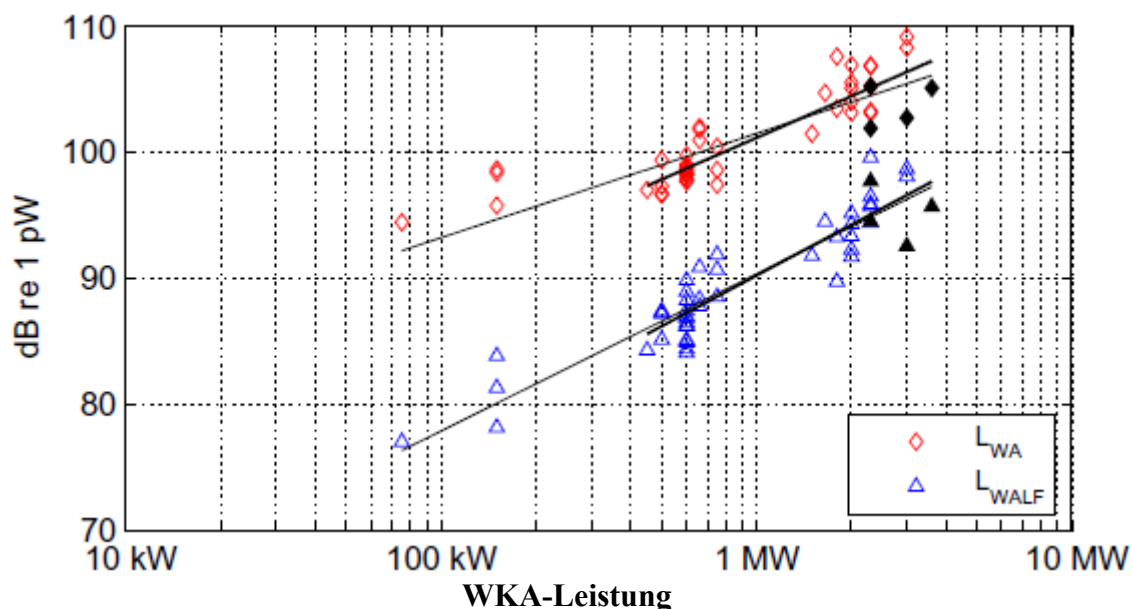


Abb 1. Schalleistungspegel (L_{WA} und L_{WALF}) in Abhängigkeit der Leistung für 48 WKA. Referenzrichtung, Windgeschwindigkeit 8 m/s. Regressionslinien: Alle WKA enthalten (dünne Linien), vier WKA unter 450 kW nicht mitgerechnet (dicke Linien). Schwarze Symbole zeigen WKA 1-4.

Man sieht, wenig überraschend, dass L_{WA} und L_{WALF} beide ansteigen mit der ansteigenden Leistung der WKA. Es wird auch erkannt, dass L_{WALF} stärker steigt als L_{WA} , welches bedeutet, dass der relative Anteil an tieffrequentem mit der WKA-Leistung ansteigt. Der Unterschied der Neigung der Regressionslinien (dünne Linien) für alle Daten ist statistisch signifikant ($t=3,94$; d.f.=90,0; einseitig $p<0,001$). Weil behauptet werden könnte, dass die vier kleinen WKA nicht die heutigen modernen WKA repräsentieren, sind auch Regressionslinien ohne diese eingezeichnet (dicke Linien). Die Neigung ist ein bisschen größer als wenn alle WKA enthalten sind und der Unterschied ist gering, aber immer noch statistisch signifikant ($t=1,82$; d.f.=79,8; einseitig $p=0,036$).

Der relative Anteil des tieffrequenten Schalls kann bestimmt werden mit $L_{WALF} - L_{WA}$, und die lineare Regression dieser Größe hat mit allen WKA eingerechnet eine signifikante positive Neigung

($t=5,42$; d.f.=46; einseitig $p=0,001$) als auch ohne die vier kleinsten WKA ($t=2,54$; d.f.=42; einseitig $p=0,007$).

In Abb. 1 lässt sich auch erkennen, dass einige Variationen innerhalb der leistungsgleichen WKA vorhanden sind. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt können WKA mit der selben Leistungsgröße gleiche oder auch unterschiedliche Modelle sein oder, bei einigen WKA unterhalb 2 MW, die selbe Anlage bei mehreren Messungen sein.

3.1.2 Schallleistungspegel in den 1/3-Oktavbändern

Die Schallleistungspegel in den 1/3-Oktavbändern werden in Abbildung 2 dargestellt.

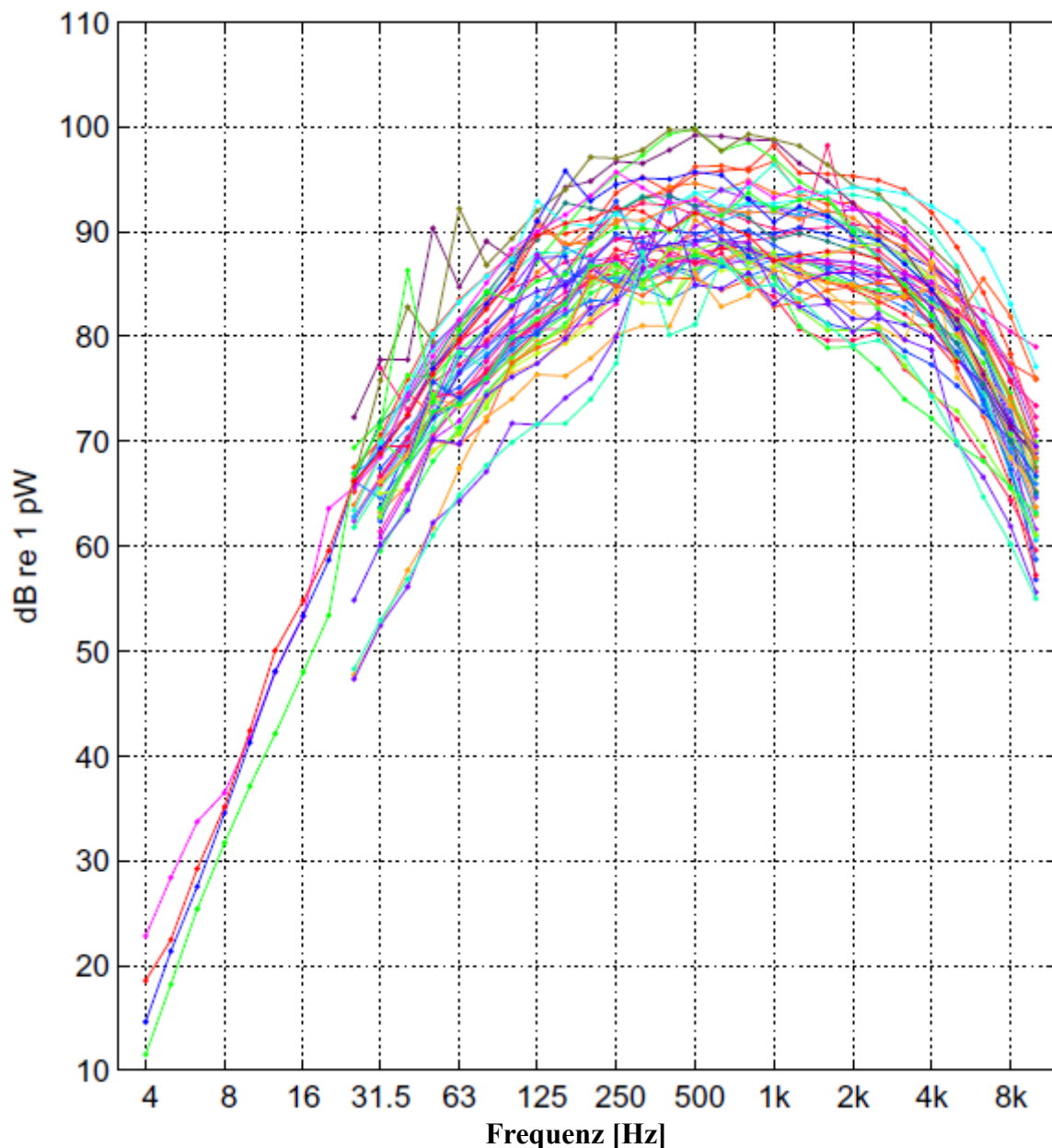


Abb. 2. A-bewertete Schallleistungspegel in den 1/3-Oktavbändern. 45 WKA mit nomineller Leistung zwischen 75 kW und 3,6 MW.

Bezüglich des Infraschallanteils des Spektrums ist der G-bewertete [15] Schallleistungspegel, der aus den Pegeln der 1/3-Oktavbänder bis 20 Hz berechnet wurde, 122-128 dB für die vier WKA, von denen Messergebnisse im entsprechenden Frequenzbereich vorliegen. Selbst dicht an der WKA, z.B. in einem Abstand von 150 m zum Rotorzentrum, würde dies nur einen G-bewerteten Schall-druckpegel von 69-75 dB ergeben, welches weit unterhalb der normalen Hörschwelle [3] liegt. Diese Berechnung berücksichtigt nicht evtl. Nahgebietphänomene, z.B. von einem Flügel, der sehr nahe vorbeifliegt.

Bei den Frequenzen mit Daten von allen WKA variiert der Schallpegel zwischen den WKA um 20 dB oder mehr. Dieses ist zu erwarten, da die WKA einen großen Bereich mit nominellen Leistungsdaten abdeckt. Um deutlicher mögliche spektrale Unterschiede zwischen den WKA zu zeigen sind die Schallpegel normiert worden, um den gesammelten A-bewerteten Schallleistungspegel L_{WA} an einer einzigen WKA zu zeigen. Das Ergebnis in in Abbildung 3 dargestellt.

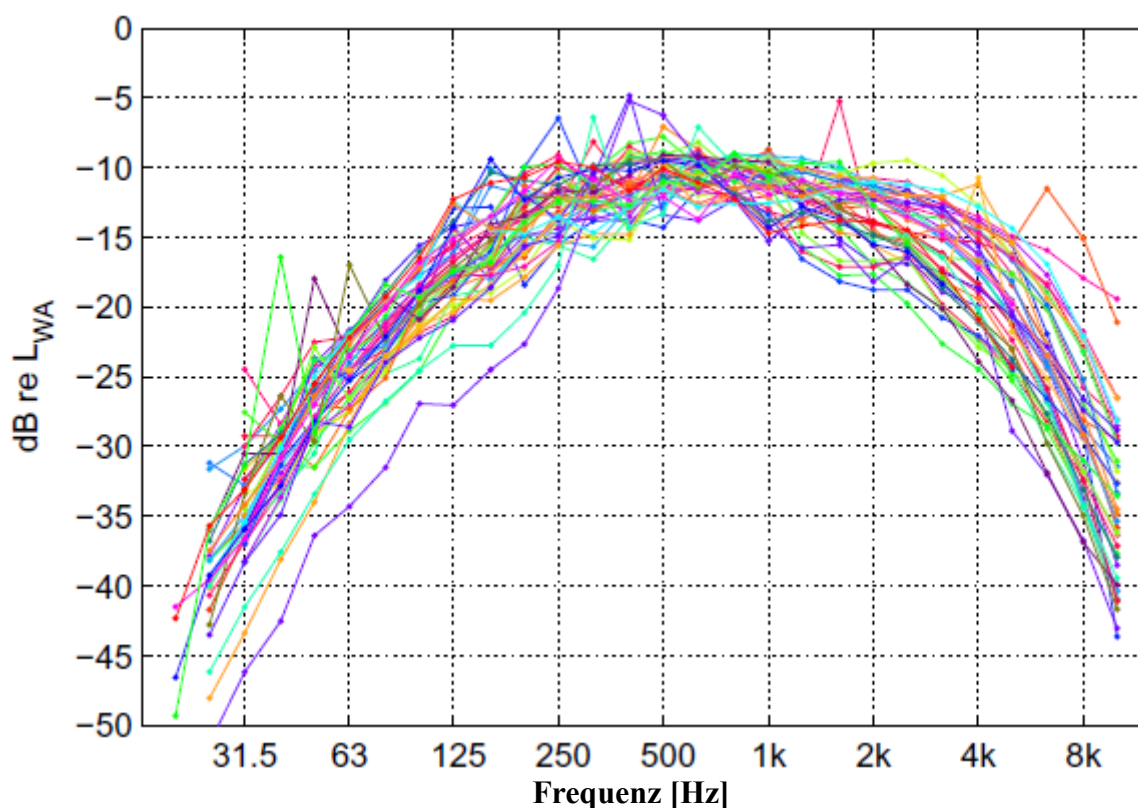


Abb. 3. Normierte A-bewertete Schallleistungspegel in 1/3-Oktavbändern. 45 WKA mit einer nominellen Leistung zwischen 75 kW und 3,6 MW. (Normiert bedeutet, dass der L_{WA} für die einzelne WKA von allen Niveaus in den 1/3-Oktavbändern subtrahiert sind).

Ein eventueller Unterschied im Spektrum zwischen kleinen und großen WKA ist untersucht worden durch eine Aufteilung in zwei Gruppen: WKA bis einschließlich 2 MW und WKA darüber. Abbildung 4 zeigt den Mittelwert und die Standardabweichung vom Mittelwert (standard error of mean, s.e.m.) für jede der beiden Gruppen.

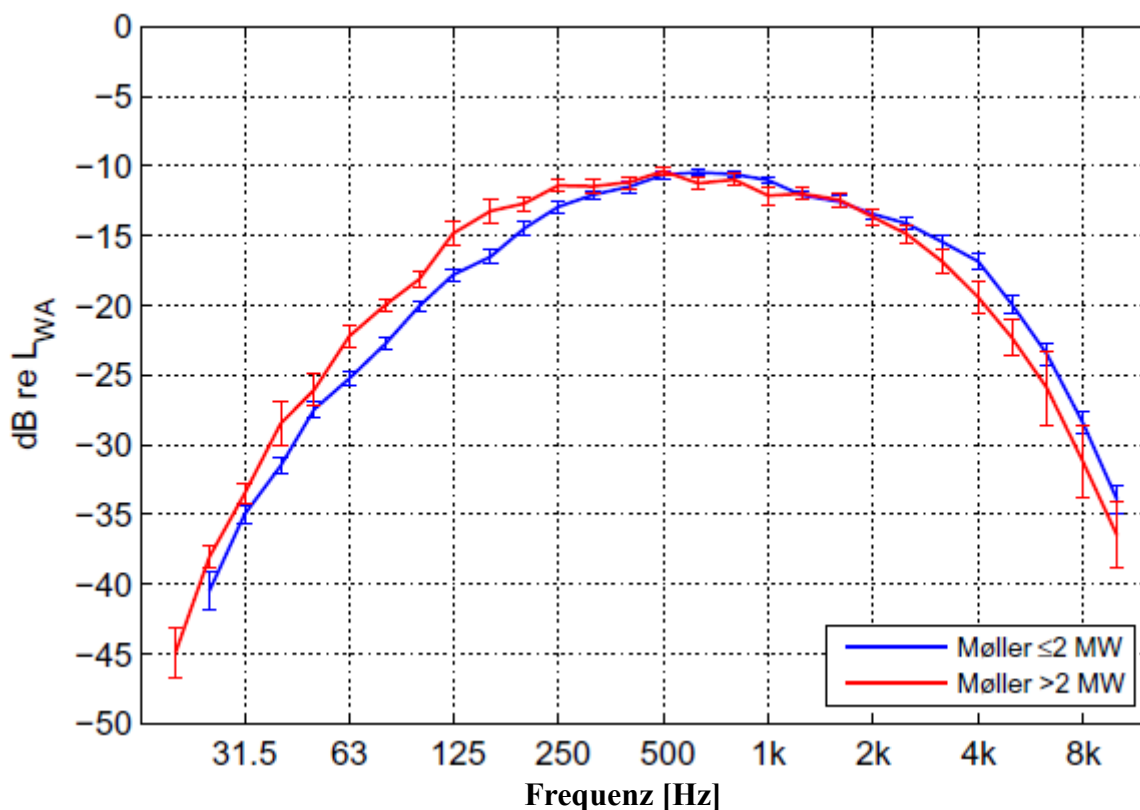


Abb. 4. Normierte A-bewertete Schallleistungspegel in 1/3-Oktavbändern. Mittelwerte für zwei WKA-Gruppen: ≤ 2 MW und > 2 MW. Die senkrechten Striche geben ± 1 Standardabweichung vom Mittelwert an (s.e.m.).

Das Spektrum liegt für die größeren WKA deutlich niedriger in der Frequenz als für die kleineren. Der Unterschied der Schallpegel ist signifikant für alle 1/3-Oktavbänder im Frequenzbereich 63-250 Hz und bei 4 kHz ($t=[3,49; 4,52; 2,81; 3,27; 3,49; 2,63; 2,52; -2,10]$, d.f.=[14,3; 23,1; 17,0; 13,5; 13,6; 23,8; 22,6; 12,5], einseitig $p=[0,002; <0,001; 0,006; 0,003; 0,002; 0,007; 0,010; 0,028]$). Wenn die vier kleinsten WKA nicht mit berechnet werden ist der Unterschied signifikant bei den selben Frequenzen plus 5 kHz ($t=[2,94; 4,09; 2,22; 2,76; 2,97; 1,93; 1,83; -2,07; -1,93]$, d.f.=[11,7; 18,0; 14,5; 11,1; 11,6; 18,7; 20,1; 12,9; 11,7], einseitig $p=[0,006; <0,001; 0,022; 0,009; 0,006; 0,035; 0,041; 0,030; 0,039]$).

Die signifikanten Unterschiede zwischen kleinen und großen WKA sind moderat, 1,5-3,2 dB, aber wie in der Einleitung erwähnt (Abschnitt 1.1), können selbst kleine Unterschiede bei den tiefen Frequenzen auf die Schall-Wahrnehmung der Menschen einwirken. Hinzu kommt, dass falls die tiefen Frequenzen ausschlaggebend für die Abstände zur Wohnbebauung sein sollen, können kleine Unterschiede großen Einfluss auf die Festlegung der notwendigen Abstände haben.

Abbildung 5 zeigt den Mittelwert der kleinen WKA bis einschließlich 2 MW und die einzelnen WKA über 2 MW.

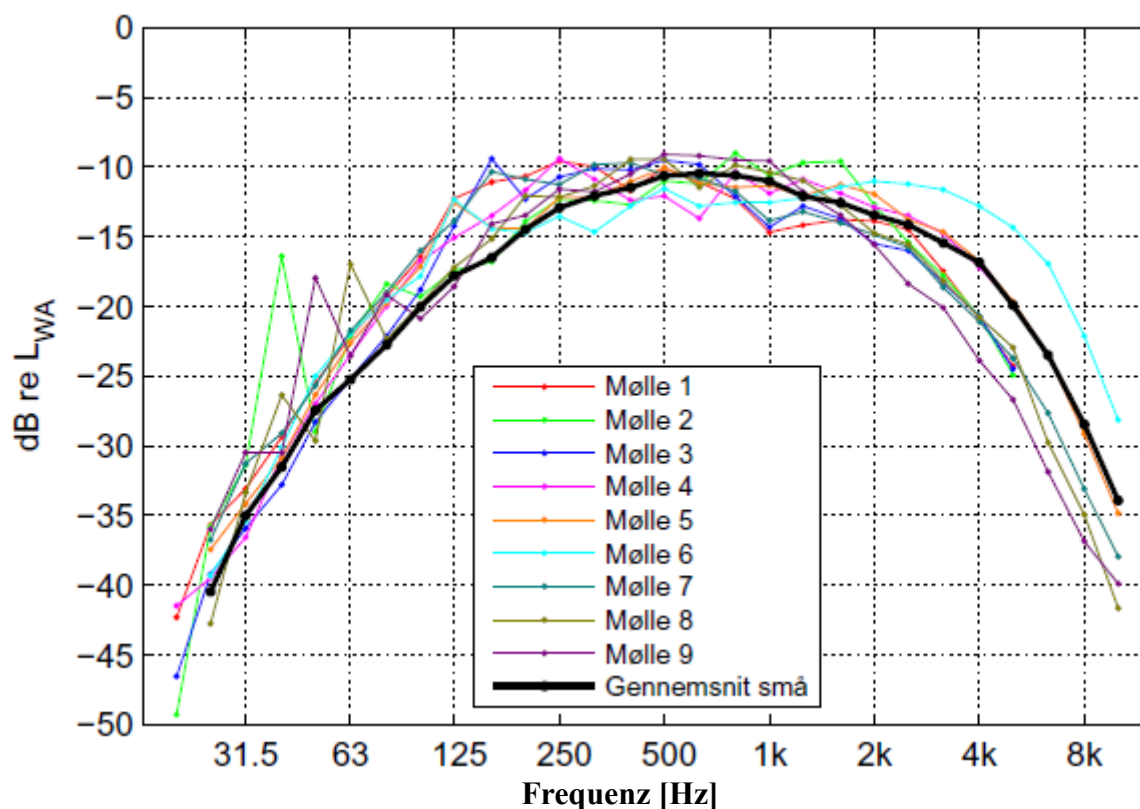


Abb. 5. Normierte A-bewertete Schallleistungspegel in 1/3-Oktavbändern. Mittelwert von 36 WKA ≤ 2 MW (dicke schwarze Linie) und 9 individuellen WKA > 2 MW.

Die großen WKA liegen über dem Wert der kleinen WKA in fast jedem 1/3-Oktavband unterhalb 315 Hz. Einige haben eine Spitze in einer oder mehreren 1/3-Oktavbänder, welches tonalen Komponenten geschuldet sein könnte. Töne können von den mechanischen Teilen der WKA kommen, z.B. Getriebekasten oder Hilfsmechanismen wie Generatoren-Kühlung (siehe z.B. Wagner et al. [56]).

Bei den hohen Frequenzen wird das Bild durch ein atypisches Muster der WKA 6 ab der Frequenz über 2 kHz unterbrochen. Es gibt keine anderen Daten für diese WKA, z.B. bei einer anderen Windgeschwindigkeit oder anderen Richtung, die zur Kontrolle hätten herhalten können, ob dieser Ausriss wirklich vom Flügellärm stammt und nicht etwa von elektrischen Komponenten wie bei einigen der anderen WKA (siehe einleitende Anmerkungen zum Abschnitt 3). Wenn die WKA 6 bei diesen Frequenzen herausgenommen wird, liegen die großen WKA auf oder unter dem Mittelwert der kleinen WKA in fast jedem 1/3-Oktavband über 2 kHz. Der Unterschied der Mittelwerte der zwei Gruppen ist in diesem Fall signifikant für alle 1/3-Oktavbänder im Frequenzbereich 2,5-10 kHz ($t=[-1,83; -2,49; -3,47; -3,18; -2,42; -2,76; -2,64]$, d.f.=[15,2; 15,6; 14,5; 14,8; 4,1; 4,6; 6,3], einseitig $p=[0,044; 0,012; 0,002; 0,003; 0,036; 0,022; 0,018]$).

3.1.3 Toninhalt

Tonanalysen zeigen, dass die Töne generell in Schallpegel und Frequenz variieren abhängig von der Windgeschwindigkeit. Abbildung 6 zeigt die kräftigsten hörbaren Töne der WKA 1-4.

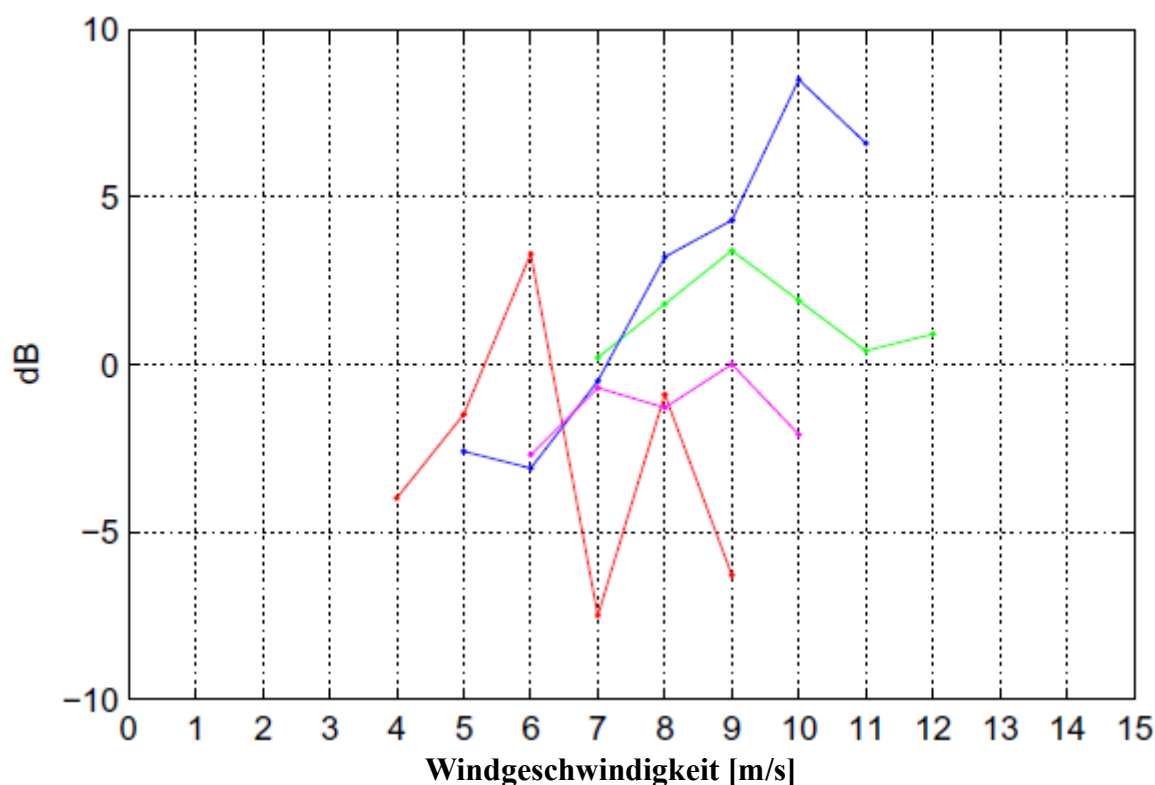


Abb. 6. Hörbare Töne, ΔL_{ta} , als Funktion der Windgeschwindigkeit für WKA 1-4, Referenzrichtung. Farbcode wie in Abb. 5.

Die Werte liegen unter 3-4 dB, mit Ausnahme der WKA 3, bei höheren Windgeschwindigkeiten. Für die WKA 1 und 3 gelten die Werte eines Tones, der mit der Windgeschwindigkeit variiert im Bereich 110-145 Hz, ungefähr im selben Frequenzbereich beider WKA. Für WKA 2 gelten die Werte eines Tones mit fast konstanter Frequenz um die 40 Hz. WKA 4 hat mehrere Töne mit höheren Frequenzen, und verschiedene Frequenzen im Bereich 800-1400 Hz dominieren wechselseitig abhängig von der Windgeschwindigkeit. Es können Spitzen in den entsprechenden 1/3-Oktavbändern in Abbildung 5 für die beiden WKA mit Toninhalt über 0 dB bei 8 m/s (WKA 2, 40 Hz; WKA 3, 160 Hz).

ISO 1996-2 [57] beschreibt ein Tonzuschlag, der verwendet werden soll, wenn die hörbaren Töne 4 dB übersteigen. Nationale Grenzen für den Tonzuschlag können variieren, z.B. fordern die dänischen Regeln hörbare Töne über 6,5 dB, bevor der Zuschlag gegeben wird [58].

Nur eine WKA übertrifft die 4 dB Grenze und das nur bei höheren Windgeschwindigkeiten, bei denen oft keine Regeln bez. WKA-Lärm existieren. Es ist ziemlich überraschend, dass nicht mal der am deutlichsten hörbare Ton im Bereich der 1/3-Oktavbändern, 40 Hz Ton der WKA 4, einen Tonzuschlag bekommt. Wahrscheinlich liegt es daran, dass die kritischen Bänder, die bei der Toneinschätzung benutzt werden, bei tiefen Frequenzen sehr breit sind. Es liegt außerhalb des Rahmens dieser Studie einzuschätzen, ob diese Töne als gut hörbar empfunden werden könnten trotz fehlendem Zuschlag.

3.1.4 Direktivität

Abbildung 7 zeigt die Direktivität der drei WKA, für die diese gemessen wurde.

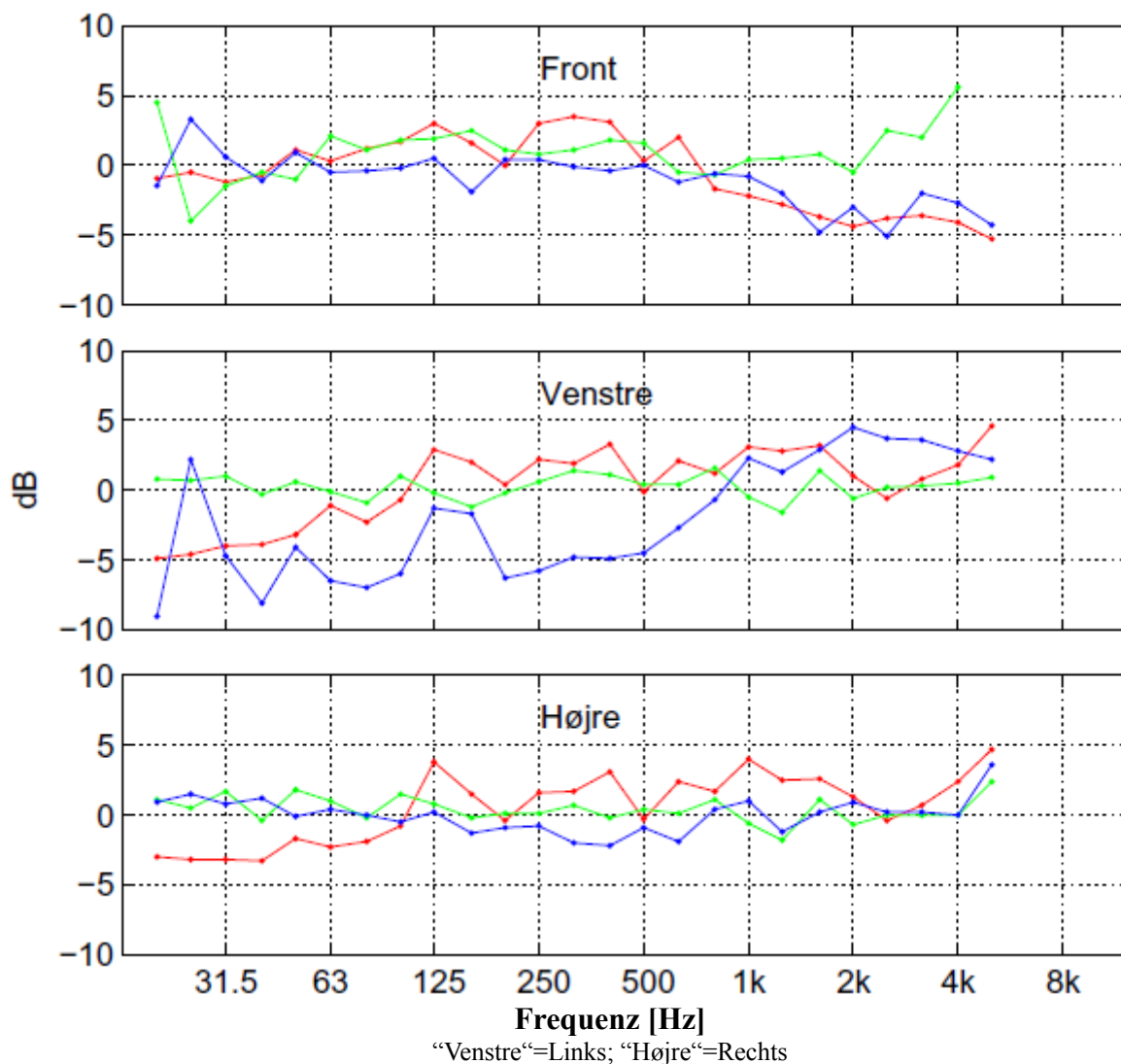


Abb. 7. Direktivität für WKA 1-3. Windgeschwindigkeit 8 m/s ausgenommen WKA 2, Frontrichtung, die bei 10 m/s gemessen wurde (und verglichen mit der Referenzrichtung bei 10 m/s). Wegen Lärm von den elektrischen Komponenten während der Messung fehlen die Daten für WKA 2, Frontrichtung bei 5 kHz. Farbcodes der WKA wie in Abb. 5.

Die Daten variieren etwas zwischen den WKA, und es ist schwer ein generelles Muster zu finden. Man sieht sowohl höhere als auch niedrigere Pegel in anderen Richtungen als die Referenzrichtung. Bei den tiefsten Frequenzen würde man eine niedrige Direktivität erwarten, aber dies ist nicht zu erkennen. Eine gemessene Richtwirkung kann die wahre Richtwirkung spiegeln, aber wenn die wichtigste Lärmquelle sich auf der einen Seite der Rotorfläche befindet, z.B. auf einem abwärts bewegenden Flügel wie von Oerlemans und Schepers [59] und Oerlemans et al. [60] gezeigt, sind die Messungen an der Seite dichter an der Quelle, welches eine falsche Indizierung der Richtwirkung geben könnte.

Eine mögliche Fehlerquelle für die Direktivität ist, dass die Messungen in den verschiedenen Richtungen nicht immer in der selben Periode gemacht wurden. Jede der anderen Richtungen wurden ganz sicher immer gleichzeitig mit der Referenzrichtung gemessen, aber alle zusammen wurden nicht gleichzeitig gemessen. Es gibt nur einen Satz Daten für die Referenzrichtung, und dieser kann

somit nicht für alle Richtungen gelten. Bei niedrigen Frequenzen kann ein schlechtes Signal/Lärm-Verhältnis Ursache großer Unsicherheit sein.

Die Richtung von einer WKA zu einer Wohnbebauung ist typischerweise waagerechter als die Richtung zu den Messpunkten. Besonders wenn Schall von den synchronen Vibrationen der Flügel und/oder Turm emittiert wird, ist es wahrscheinlich, dass die Emission mehr rechtwinklig zur Rotorfläche und/oder zum Turm, d.h. sehr nah an einer waagerechten Ebene, sein wird. Über dieses Thema ist mehr Wissen erwünscht.

3.1.5 Bedeutung der Windgeschwindigkeit

Abbildung 8 zeigt L_{WA} als Funktion der Windgeschwindigkeit für die vier WKA, für die Daten vorhanden sind.

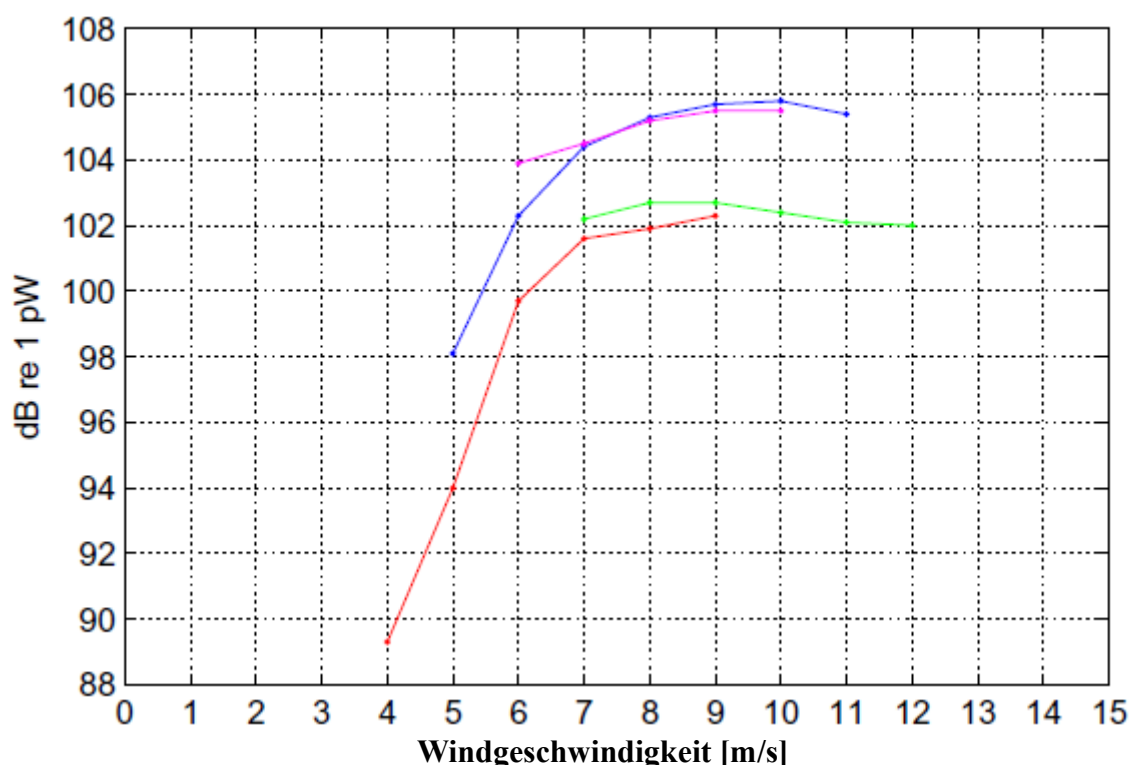


Abb. 8. A-bewerteter Schallleistungspegel, L_{WA} , als Funktion der Windgeschwindigkeit für die WKA 1-4. Farbcodes wie in Abb. 5.

Der Lärm steigt mit der Windgeschwindigkeit, aber die Kurve wird flacher ab 7-8 m/s. Die vier WKA sind alle mit einer Pitch-Regulierung versehen, und die Abflachung der Kurven stimmt überein mit den Beobachtungen von z.B. Lee et al. [37] und Jung et al. [38] bezogen auf pitch-regulierte WKA.

3.2 Outdoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn

Für jede der großen WKA ist der Abstand berechnet, bei der der A-bewertete Schalldruckpegel auf 35 dB gefallen ist. Pedersen und Waye [61] haben gezeigt, dass der Anteil der stark belästigten Personen bei diesem Schalldruckpegel bis über 5 % reicht (Pedersen et al. [62]). Pedersen und Nielsen [63] haben einen Mindestabstand zu Wohnbebauungen empfohlen, der einen WKA-Lärm unterhalb 33-38 dB sicherstellt. Die Begrenzung auf 35 dB für WKA wird z.B. in Schweden und in

ruhigen Gebieten [64] vorgeschrieben. Dies ist auch die Richtlinie in Dänemark für Gebiete mit offener und niedriger Bebauung (Nacht) und für Erholungsgebiete (Abend, Nacht und Wochenende) bei Gewerbelärm [65] (aber nicht für WKA-Lärm [50]). 35 dB scheint daher eine ganz vernünftige Begrenzung für WKA-Lärm zu sein.

Tabelle 1 zeigt Abstände zu den einzelnen WKA mitsamt verschiedenen Schlüsselzahlen an der 35 dB Grenze.

	Mølle									Middel små
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Afstand [m]	629	647	879	822	679	758	713	1227	1144	453
L_{pA} [dB]	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
L_{pALF} [dB]	28,8	26,7	28,9	27,6	28,0	29,1	28,8	27,0	27,0	24,8
$L_{pALF}-L_{pA}$ [dB]	-6,2	-8,3	-6,1	-7,4	-7,0	-5,9	-6,2	-8,0	-8,0	-10,2
L_{pG} [dB]	59,1	54,5	55,0	58,0						

“Mølle“=Mühle; “Middel små“=Mittelwert kleine WKA ; “Afstand“=Abstand

Tabelle 1. Schlüsselzahlen bei dem Abstand einer WKA, wo der A-bewertete Schalldruckpegel 35 dB ist. Der Abstand ist die Schräge zum Rotorzentrum, welcher für die aktuellen WKA fast einer waagerechten Linie gleichkommt.

Der kleinste Abstand, bei der die 35 dB eingehalten werden, variiert deutlich bei den großen WKA, obwohl diese in etwa gleich groß sind (2,3-3,6 MW). Der Abstand variiert von etwas über 600 m bis mehr als 1200 m.

Die Bereiche der 1/3-Oktavbänder bei diesen Abständen sind in Abbildung 9 gezeigt.

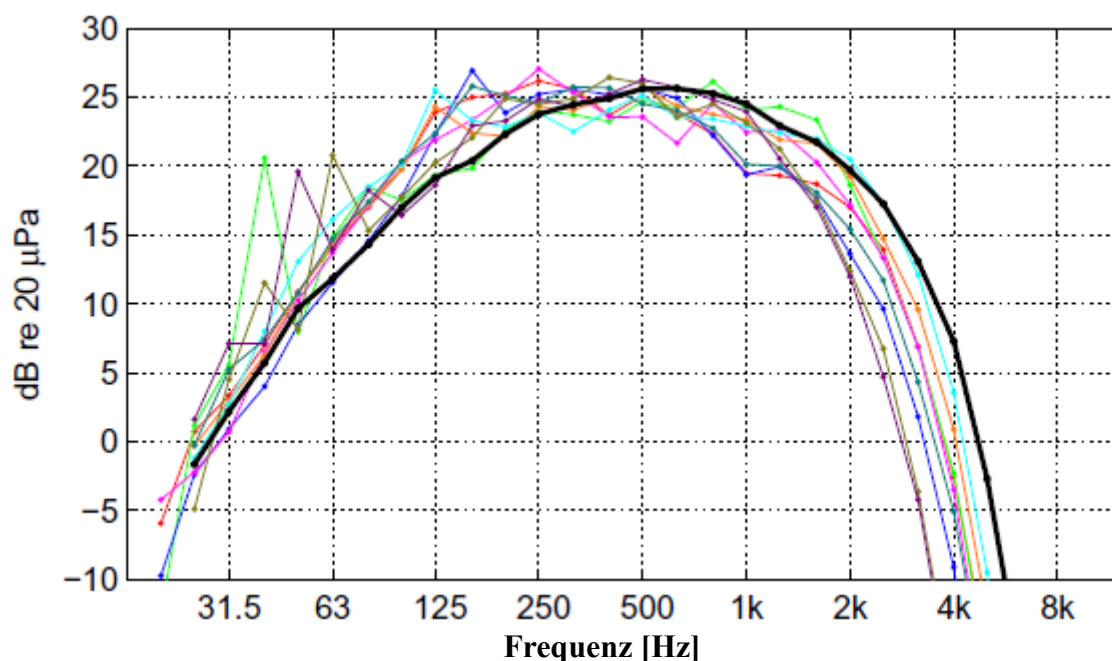


Abb. 9. A-bewerteter Schalldruckpegel in 1/3-Oktavbändern bei dem Abstand einer einzelnen WKA, wo der gesamte A-bewertete Schalldruckpegel 35 dB ist (siehe Tabelle 1). Farbcodes wie in Abb. 5.

Bei diesen Abständen ist die Absorptionsfähigkeit der Luft von Bedeutung. Dieser wirkt besonders im Bereich der hohen Frequenzen, und das Resultat ist, dass die Verschiebung des Bereiches in Richtung niedrigere Frequenzen deutlicher ist als bei den Schallleistungspegeln (vergleiche Abb. 5).

Es ist wichtig anzumerken, dass für mehrere WKA der größte Pegel der 1/3-Oktavbänder bei 250 Hz oder niedriger liegt, sogar wenn die A-bewerteten Pegel ausgewertet werden (Abb. 9). Es steht somit zweifellos fest, dass der tieffrequente Teil des Bereiches eine wichtige Rolle in den Lärmbelastigungen der Anwohner spielt, und dass tieffrequenter Schall bei der Einschätzung der Lärmbelastigung von großen WKA ernst genommen werden muss.

In vielen Fällen werden höhere A-bewertete Pegel als 35 dB im Freien zugelassen. Zum Beispiel erlauben die dänischen Richtlinien 44 dB bei Häusern außerhalb der Wohn- oder Erholungsgebiete [50]. Aus visuellen Gründen erlauben die dänischen Richtlinien keine Wohnhäuser näher an WKA als die vierfache WKA-Höhe, und bei dieser Entfernung ist der Schalldruckpegel oft unter 44 dB, wenn von einer einzelnen WKA die Rede ist. Es können aber ohne weiteres Pegel von 44 dB bei Abständen auftreten, die mehr als die vierfache Höhe der WKA betragen, wenn mehrere WKA in einem Windpark stehen. Tabelle 2 zeigt den Abstand zu kleinen Windparks, bei der der A-bewertete Schalldruckpegel 44 dB beträgt, sowie verschiedene Schlüsselzahlen für diesen Abstand.

	Mølle									Middel små
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Afstand [m]	530	546	831	759	585	679	631	1241	1142	393
L_{pA} [dB]	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0
L_{pALF} [dB]	37,9	35,9	38,1	36,8	37,2	38,3	38,0	36,3	36,3	33,9
$L_{pALF} - L_{pA}$ [dB]	-6,1	-8,1	-5,9	-7,2	-6,8	-5,7	-6,0	-7,7	-7,7	-10,1
L_{pG} [dB]	68,4	63,9	64,6	67,4						

Tabelle 2. Schlüsselzahlen bei dem Abstand, wo der A-bewertete Gesamtschalldruckpegel 44 dB ist. Die Windparks bestehen aus 2 Reihen mit je 6 identischen WKA., 300 m interner Abstand in beiden Richtungen (200 m bei kleinen WKA). Der Messpunkt liegt zentral vor der langen Seite. Der Abstand ist die Schräge zur nächsten WKA.

3.3 Schalldämmung

Während der Messungen gab es ernste Probleme mit Hintergrundgeräuschen bei den drei niedrigsten Frequenzen. 18 Messungen mit einem Signal/Lärm-Verhältnis unter 1,3 dB wurden kassiert. Sieben Raum/Frequenz-Kombinationen mussten daher aus den Messungen in nur zwei oder drei 3D-Ecken berechnet werden. Zwei Raum/Frequenz-Kombinationen, bei denen nur eine Messung aus einer 3D-Ecke vorlagen, wurden nicht berechnet. Abbildung 10 zeigt die Schalldämmung für die 10 Räume.

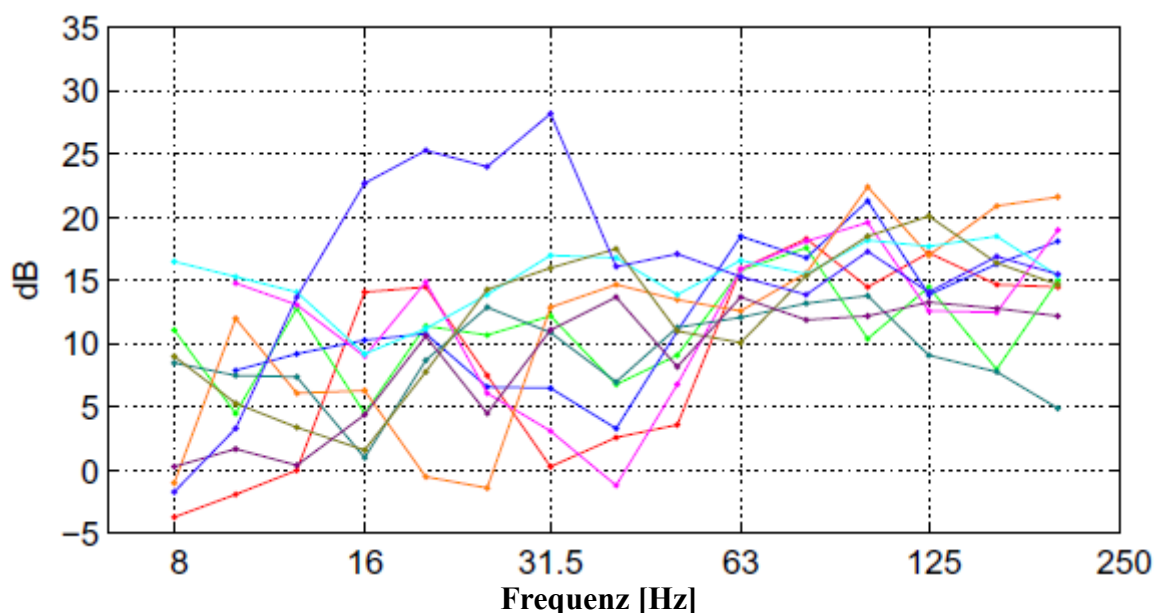


Abb. 10. Gemessene Schalldämmung für 10 Räume.

Bei den Frequenzen 63-200 Hz haben die Räume mit wenigen Ausnahmen eine Schalldämmung von 10-20 dB. Richtung tieferer Frequenzen fällt die Dämmung, und die Unterschiede zwischen den Räumen werden größer. Einige Räume zeigen eine sehr kleine oder sogar negative Dämmung bei bestimmten Frequenzen. Ein einzelner Raum hat eine ungewöhnlich hohe Dämmung im Bereich 16-31,5 Hz. Dieser war ein kleines Zimmer, der für die Aufbewahrung von Möbel und anderes benutzt wurde. Der Raum kann daher nicht als ein typischer Aufenthaltsraum gesehen werden, und dessen Daten werden nicht in den weiteren Berechnungen benutzt.

Bitte beachten, dass bei jedem 1/3-Oktavband bezieht sich der Pegel auf den Maximumpegel, dem man in dem Raum normalerweise ausgesetzt werden könnte (Abschnitt 4). Die Dämmwerte sind daher, besonders im oberen Teil des Frequenzbereiches, niedriger als die traditionellen Dämmwerte für technische Zwecke, bei denen man typischerweise den durchschnittlichen Pegel im Raum benutzt.

3.3.1 Unzulänglichkeiten der Schalldämmungsmessmethode

Ein Mangel der angewandten Messmethode ist, dass die Beschallung auf die Fassade des Hauses fokussiert ist. In einer Situation, in der das Haus mit WKA-Lärm beschallt wird, ist das ganze Haus inkl. Dach, bei niedrigen Frequenzen auch die Rückseite des Hauses, fast der gleichen Schallstärke ausgesetzt. Während der Messung waren die anderen Flächen weniger betroffen auf Grund der Richtungswirkung des Lautsprechers, höheren Abstandes zum Lautsprecher, Schattenwirkung usw..

Ein weiteres Problem ist, dass der Outdoor-Schalldruckpegel einfach durch die Subtraktion von 6 dB vom gemessenen Schallpegel an der Fassade berechnet wird. Dies setzt voraus, dass die Fassade groß genug ist, um alle Frequenzen zu reflektieren, eine Vermutung, die sicher nicht für die niedrigsten Frequenzen zutrifft. Eine bessere Lösung hätte sein können, den Schalldruckpegel des Lautsprechers im Freien ohne reflektierende Flächen zu bestimmen (Erdboden ausgenommen), und diesen Wert dann für die Berechnung einsetzen.

Die Probleme mit den Hintergrundgeräuschen hätten vermutlich gelöst werden können mit Hilfe moderner Technik, die die Zusammenhänge zwischen Außen- und Innensignalen berücksichtigt, z.B. die maximum-length-sequence (MLS) Technik. Eine Alternative wäre auch gewesen, den

Schalldruckpegel anzuheben, indem jedes 1/3-Oktavband einzeln gemessen wird statt den kompletten Frequenzbereich gleichzeitig.

3.4 Indoor-Schalldruckpegel bei WKA-Nachbarn

Abbildung 11 zeigt die Indoor-Schalldruckpegel der 1/3-Oktavbänder für alle 81 Kombinationen der 9 WKA und 9 Räume im Abstand mit einem gesamten A-bewerteten Outdoor-Schalldruckpegel von 35 dB. Bitte beachten, dass die Pegel in den Räumen den geschätzten maximalen Schalldruck darstellen, dem man normalerweise ausgesetzt werden würde, und nicht den durchschnittlichen Schalldruckpegel (siehe Abschnitt 2.4).

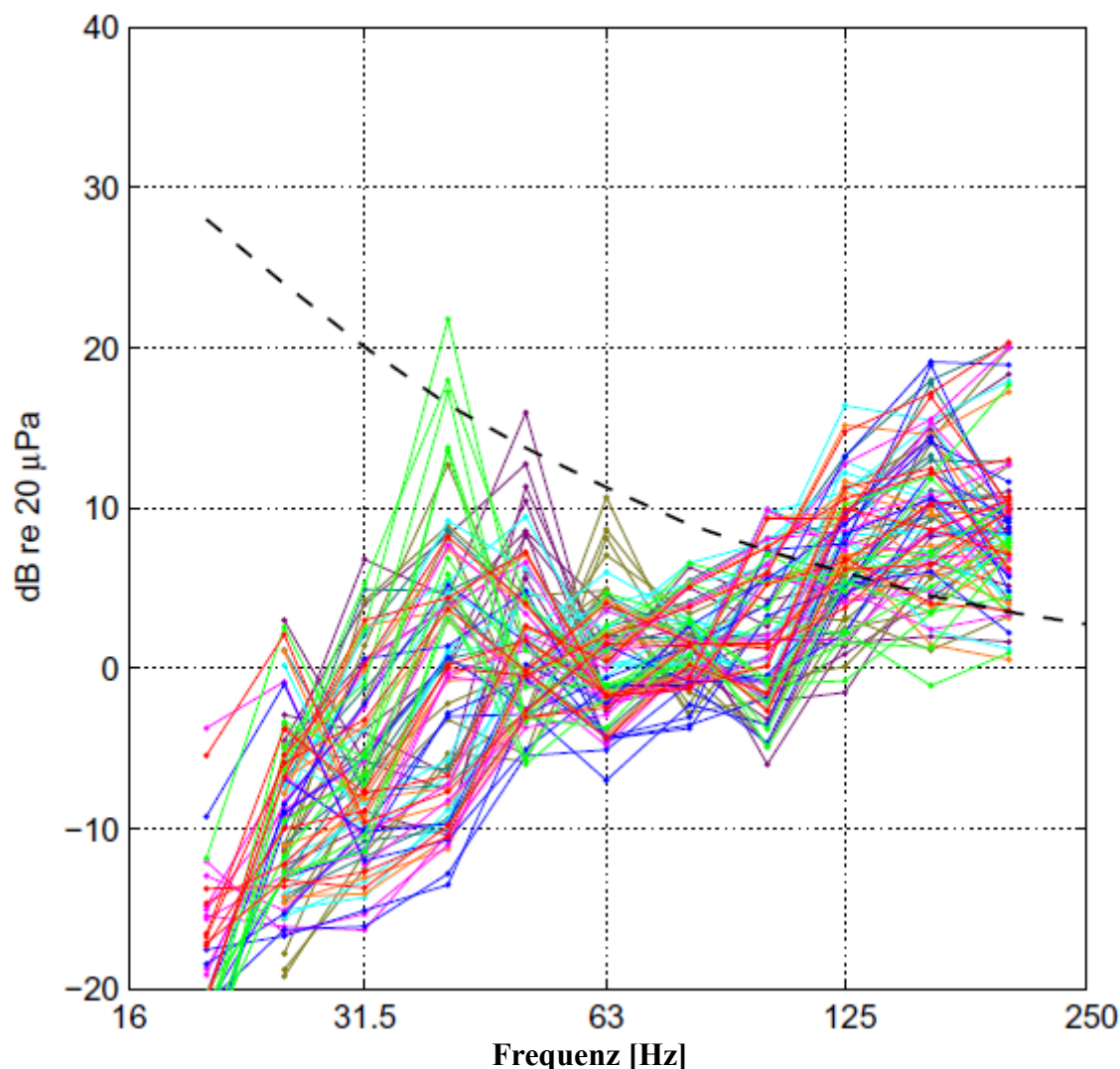


Abb. 11. Indoor A-bewertete Schalldruckpegel für 1/3-Oktavbänder in einem Abstand zu einer WKA, bei dem der totale A-bewertete Schalldruckpegel im Freien 35 dB ist (s. Tabelle 1). 81 WKA/Raum-Kombinationen. Die gestrichelte Linie ist die Hörschwelle gemäß ISO 389-7 [29]. Die farbigen Linien sind die WKA, Farbcode wie in Abb. 5.

Es werden große Unterschiede zwischen den WKA/Raum-Kombinationen erkannt. Die meisten Variationen haben ihre Ursache in den unterschiedlichen Raumdämpfungen, ausgenommen bei 63 und 80 Hz, wo sowohl Raum als auch WKA an den Variationen zu gleichen Teilen beteiligt sind. Die Werte bei 40 Hz im oberen Teil der Intervalle haben ihre Ursache in dem hohen Schallleistungspegel einer einzelnen WKA, während die hohen Werte bei 200 Hz an der niedrigen Schall-

dämmung eines einzelnen Raumes liegt.

Man erkennt an der eingefügten Hörschwelle (gestrichelte Linie), dass der tieffrequente Schall in vielen WKA/Raum-Kombinationen zu hören ist, besonders bei den höchsten der tiefen Frequenzen. Der Schall wird nicht besonders stark sein, aber wie schon in der Einleitung erwähnt, kann tieffrequenter Schall belästigend sein, obwohl er nicht besonders weit über der Hörschwelle liegt (Abschnitt 1.1), und manche Personen können die Geräusche in Abb. 11 als belästigend empfinden.

Abbildung 12 zeigen Indoor-Schalldruckpegel für die Situation in Tabelle 2, in der der A-bewertete Schalldruckpegel eines Windparks 44 dB im Freien ist.

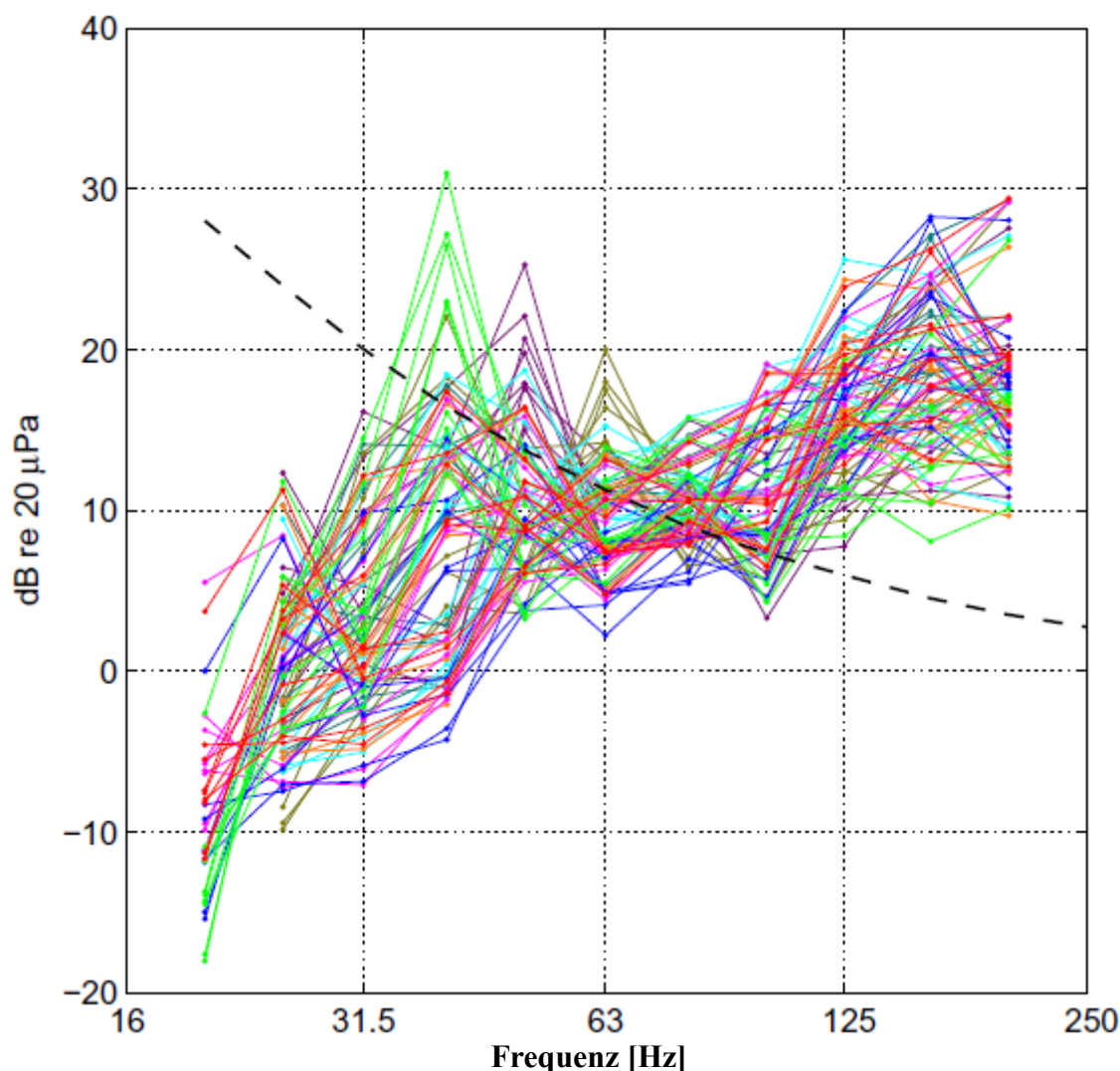


Abb. 12. Indoor A-bewertete Schalldruckpegel für 1/3-Oktavbänder in einem Abstand zu einem Windpark, bei dem der totale A-bewertete Schalldruckpegel im Freien 44 dB ist (siehe Tabelle 2). 81 WKA/Raum-Kombinationen. Die gestrichelte Linie ist die Hörschwelle gemäß ISO 389-7 [29]. Die farbigen Linien sind die WKA, Farbcode wie in Abb. 5.

Hier gibt es hörbaren Schall an manchen Stellen in allen Räumen und von allen WKA. In mehr als der Hälfte aller Fälle (48 von 81) wird die normale Hörschwelle mit mehr als 15 dB in einem oder mehreren 1/3-Oktavbändern überschritten, und es besteht das Risiko, dass ein bedeutsamer Teil der Anwohner von dem Schall belästigt wird.

Mit Hinblick auf die Vermeidung von Schlafstörungen empfiehlt das WHO bei kontinuierlichem Lärm eine Höchstgrenze von 30 dB für den A-bewerteten Schalldruckpegel in Räumen [66], aber mit der Bemerkung, für den Fall eines großen Anteils von tieffrequentem Lärm, „*wird eine noch niedrigere Schwelle empfohlen, weil tieffrequenter Lärm kann das Entspannen und den Schlaf selbst bei niedrigem Schalldruck stören*“. Wie viel niedriger die Schwelle sein sollte wird nicht angegeben, aber der totale A-bewertete Schalldruckpegel wird deutlich die (z.B.) 25 dB Schwelle an etlichen Stellen in Abb. 12 übersteigen, es sei denn der Schalldruckpegel über 200 Hz ist ungewöhnlich niedrig.

3.4.1 Der dänische Lärmrichtwert für Häuser

Der dänische Abend/Nacht-Lärmrichtwert für Häuser (L_{pALF}) liegt bei 20 dB, er gilt aber nicht für Messungen an einzelnen Positionen sondern für Schalldruckpegel gemessen mit der Methode, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben. Diese nutzt den Energiemittelwert von drei Messungen an drei Positionen: Eine Position in der Nähe einer Ecke im Raum und zwei Positionen, an denen der Kläger den Lärm am stärksten empfindet. Geht man davon aus, dass der Kläger solche Positionen korrekt ausweist, wird das Resultat der Methode - Energiemittelwert mit einer Eckenmessung - immer noch dicht am Maximumpegel liegen.

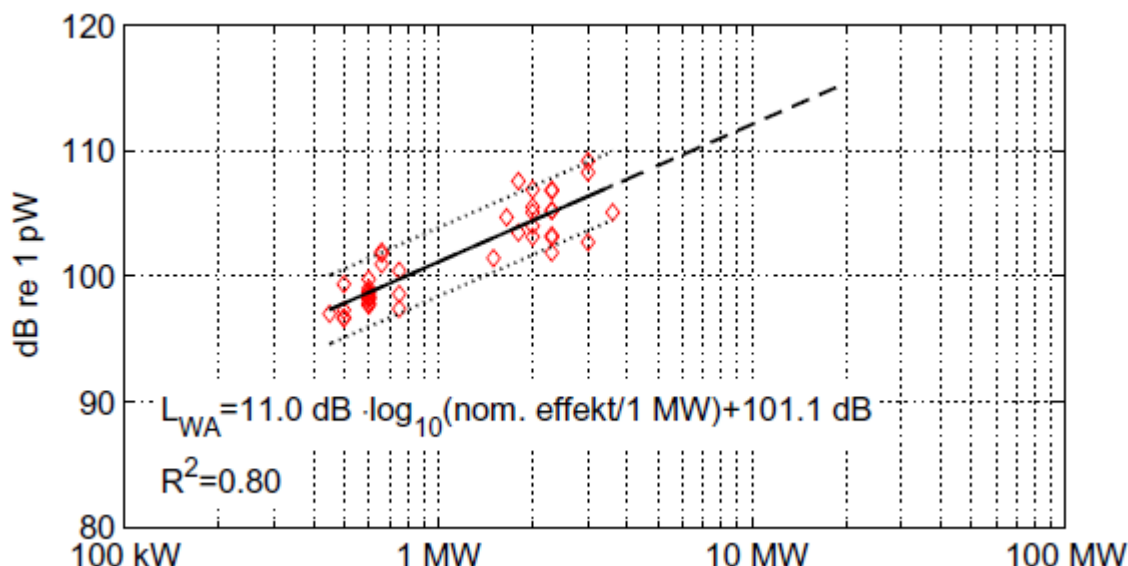
Es ist nicht möglich unmittelbar den Maximumpegel aus L_{pALF} nur durch Addition der Werte der 1/3-Oktavbänder aus Abb. 11 und Abb. 12 zu finden, da die verschiedenen 1/3-Oktavbänder ihr Maximum an verschiedenen Positionen im Raum haben können. Aber 40 der 81 WKA/Raum-Kombinationen in Abb. 12 überschreiten einen A-bewerteten Schalldruckpegel von 20 dB in mindesten einem 1/3-Oktavband im 10-60 Hz Frequenzbereich, und es ist durchaus legitim damit zu rechnen, dass der gesamte Schalldruckpegel für diesen Frequenzbereich (L_{pALF}) 20 dB übersteigen wird für noch mehr WKA/Raum-Kombinationen.

Es soll erwähnt werden, dass WKA von den generellen dänischen Richtlinien für tieffrequenten Lärm ausgenommen sind seit 2006 [20], als die Bekanntmachung über Lärm der WKA aktualisiert wurde [50]. Das Argument war, dass L_{pALF} in Häusern nicht 20 dB übersteigen wird, wenn die normalen Grenzwerte für den Außenbereich eingehalten werden [67]. Dies trifft möglicherweise auf kleine WKA zu, aber wie zu sehen ist, liegt der Schalldruckpegel in den Häusern oft über 20 dB für große WKA über 2 MW.

4. Generelle Betrachtungen

4.1 Lärm als Funktion der WKA-Größe

Das Datenmaterial ergibt einen nützlichen Überblick, welche Schallleistung von den WKA verschiedener Größen emittiert wird, und mit Vorsicht können die Ergebnisse benutzt werden, die Schallleistungspegel der größeren WKA der Zukunft zu veranschlagen. Abbildung 13 wiederholt die Daten aus Abbildung 1, jetzt mit einer Extrapolation für höhere nominelle elektrische Leistungen mitsamt Daten für die eingesetzte Regressionslinie.



Nominelle elektrische Leistung

Abb. 13. Schallleistungspegel (L_{WA}) als Funktion der WKA-Größe. Windgeschwindigkeit 8 m/s, vier WKA unter 450 kW nicht mitgerechnet. Lineare Regressionslinie, standard error of estimates (s.e.e)=1,64 dB. Extrapolation (gestrichelte Linie), 90 % Vertrauensintervall basierend auf s.e.e. (gepunktete Linie).

Die Regressionslinie in Abb. 13 entspricht dem folgenden Zusammenhang zwischen der Schallleistung P_A und der nominellen elektrischen Leistung, P_E : (*hældning* = Neigung)

$$P_A = \textit{konstant}_1 \cdot \left(\frac{P_E}{1 \text{ MW}} \right)^{\frac{\textit{hældning}}{10 \text{ dB}}} \quad (2)$$

Neigung ist die Neigung der Regressionslinie, und $\textit{konstant}_1$ kann aus dem letzten Glied der Gleichung für die Regressionslinie berechnet werden. Da die Neigung 11 dB ist, ist der Exponent 1,1, was bedeutet, dass die Schallleistung überproportional mit der nominellen elektrischen Leistung steigt. Dem Verlauf der Linie folgend, emittiert eine WKA doppelter Größe mehr als die doppelte Schallleistung.

Die Fläche eines Kreises, in der eine gegebene Lärmschwelle überschritten wird, ist besonders interessant. Der Radius des Kreises lässt sich aus Gleichung (1) entnehmen (Diameter= d), und wenn die atmosphärische Absorption, die hauptsächlich bei hohen Frequenzen und großen Abständen von Bedeutung ist, weggelassen wird, findet man, dass die Fläche proportional mit der Schallleistung wächst. Durch Einsatz der Gleichung (2) folgt, dass

$$A = \textit{konstant}_2 \cdot P_A = \textit{konstant}_2 \cdot \textit{konstant}_1 \cdot \left(\frac{P_E}{1 \text{ MW}} \right)^{\frac{\textit{hældning}}{10 \text{ dB}}} \quad (3)$$

$\textit{konstant}_2$ ist abhängig von der Lärmschwelle.

Mit der Neigung der Regressionslinie steigt das Gebiet mit Lärm also mehr als proportional zur nominellen elektrischen Leistung. Dies ist ein bemerkenswertes Ergebnis, wenn man bedenkt, dass die Entwicklung dahin tendiert, immer größere WKA einzusetzen, und sogar, auf jeden Fall in Dänemark, die Strategie umsetzt, viele kleine WKA mit wenigen großen zu ersetzen. Vom Standpunkt der Lärmverunreinigung aus ist dies, so kommt es einem vor, ein Schritt zurück. Wenn der installierte Effekt derselbe ist, werden große WKA ein größeres Gebiet mit Lärm treffen, als kleine WKA es würden.

Es soll hinzugefügt werden, dass die Neigung der Regressionslinie nicht signifikant höher ist als 10 dB (90 % Vertrauenintervall [9,53 dB; 12,40 dB], $p(\text{Neigung} \leq 0 \text{ dB}) = 0,133$. Mit einer Neigung von 10 dB ist das Lärmgebiet dasselbe für große WKA wie für kleine WKA mit derselben installierten elektrischen Leistung.

4.2 Variationen der WKA

Jeder Datenpunkt in Abb. 13 beruht auf Messungen an einer einzelnen WKA. Wegen der Variationen der WKA desselben Modells sollte als Vorsorge ein höherer Schallleistungspegel bei der Projektplanung angesetzt werden. Laut IEC TS 61400-14 [68] müssen die Hersteller Werte angeben, die das 1,645-fache der Standardabweichung zwischen WKA mit einem höheren Wert als dem Mittelwert des gegebenen Modells entsprechen. Dieser Wert entspricht den oberen Wert von 90 % des Konfidenzintervalls, welches bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit 5 % beträgt für den Fall, dass eine zufällig ausgewählte WKA mehr Lärm als spezifiziert emittiert.

Die Größe dieses Sicherheitsspielraumes ist somit abhängig von den Variationen zwischen den WKA des aktuellen Modells. In Abb. 13 liegt die Standardabweichung für WKA gleicher Größe und Fabrikat im Bereich 1,6-3,5 dB, wenn man von der WKA-Größe absieht, die wiederholte Messungen an einer oder mehreren physischen WKA umfassen. Weil die Standardabweichung mit 1,645 multipliziert werden muss, ergibt es typischerweise eine Abweichung von etlichen Decibel.

Broneske [69] hat ausgewiesen, dass WKA-Hersteller oft Werte angeben, die nicht den Sicherheitsspielraum beinhalten, die in IEC TS 61400-14 angegeben sind. Die Verfasser dieser Studie haben auch den Eindruck, dass die Mindestabstände zu Wohnbebauungen oft mit Lärmdaten berechnet werden, denen ein passender Sicherheitsspielraum fehlt. Der Gebrauch von Daten ohne Sicherheitsspielraum wie z.B. Mittelwerte für eine gegebene WKA, Messungen einer einzelnen WKA, oder 'beste Schätzung' für eine WKA der Zukunft erfolgt prinzipiell mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 %, dass die real installierte(n) WKA mehr Lärm emittieren wird als angenommen, und dass die Lärmschwelle überschritten wird, falls das Projekt grenznah an die erlaubten Werte geplant wurde.

Es soll angemerkt werden, dass selbst kleinste Änderungen des Schallleistungspegels bedeutende Änderung der Abstandskriterien ergeben. Als Beispiel wird ein 3 dB höherer Schallleistungspegel eine Erhöhung der Abstandsforderung um 41 % ergeben, wenn nur von einer einzelnen WKA die Rede ist.

4.3 Daten des Projektes WINDFARMperception

Van den Berg et al. [70] hat eine Studie gemacht über die visuellen und akustischen Einwirkungen der WKA auf die Anwohner in der Nachbarschaft. In einem Teil der Studie (bekannt als das Projekt WINDFARMperception) wurden Lärmspektren eingeholt. Schallleistungspegel gemessen in 1/3-Oktavbändern bei 8 m/s an WKA mit Leistungen von 80 kW bis 3 MW wurden für die Berechnung der Schalldruckpegel bei den Anwohnern herangezogen. Nur vier WKA sind über 2 MW, aber wenn drei 2 MW WKA der Gruppe hinzugerechnet werden, ist es möglich, einen relevanten Vergleich großer und kleiner WKA zu erstellen.

Abbildung 14 zeigt die Mittelwerte für $\text{WKA} < 2 \text{ MW}$ und $\text{WKA} \geq 2 \text{ MW}$.

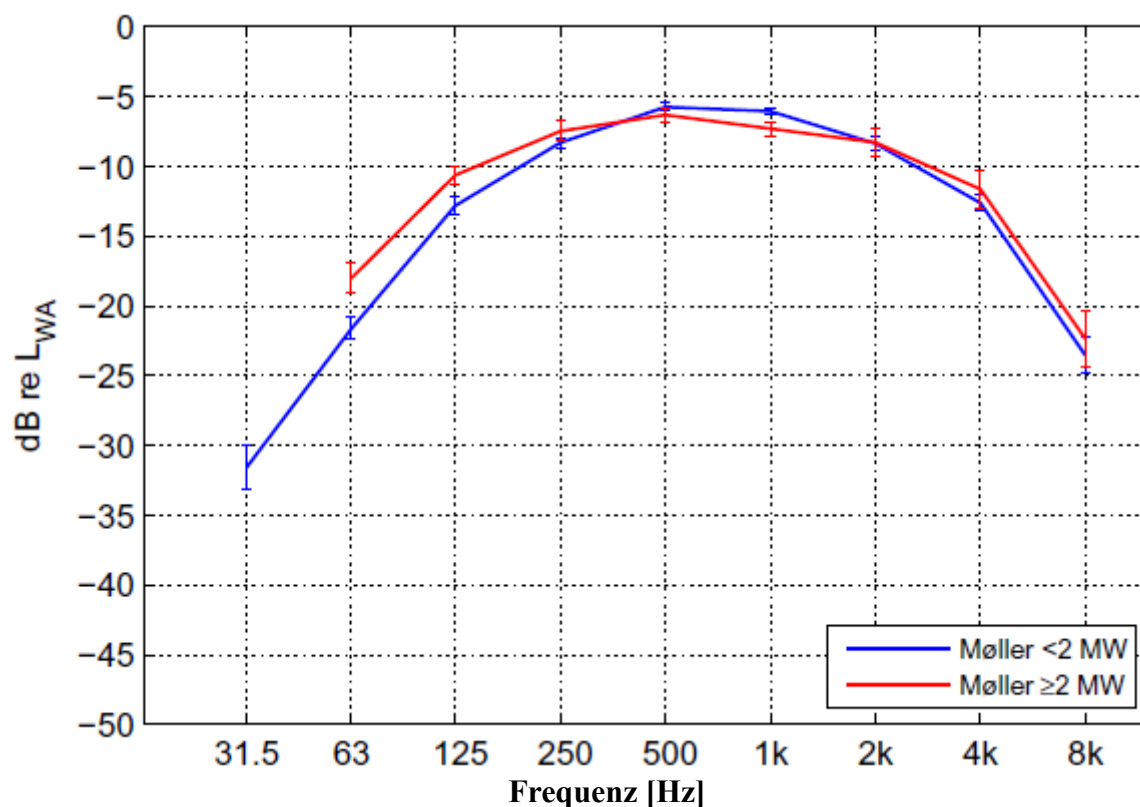


Abb. 14. Normierter A-bewerteter Schallleistungspegel in 1/3-Oktavbändern, Mittelwert für zwei Gruppen WKA: < 2 MW und ≥ 2 MW. Daten aus van den Berg et al. [70, Appendix D]. Senkrechte Striche stehen für ± 1 standard error of mean. (Keine der großen WKA wurde im 31.5-Hz Oktavband gemessen).

Auch mit diesen Daten liegt der tieffrequente Anteil klar höher für große WKA als für kleine. Die Pegelunterschiede bei 63 und 125 Hz sind statistisch signifikant ($t=[2,70; 2,39]$, d.f.= [12,8; 16,9], einseitig $p=[0,009; 0,015]$).

Die Unterschiede (3,6 und 2,2 dB) sind in der selben Größenordnung wie die Unterschiede in dieser Studie (vergleiche mit Abb. 4).

Ein Vergleich mit den Daten aus dieser Studie, umgerechnet nach 1/3-Oktavbänder, zeigt darüber hinaus fast gleiche Werte in beiden Studien, siehe Abb. 15. Die Daten derselben WKA-Gruppe aus beiden Studien sind nicht signifikant verschieden bei irgendeiner Frequenz. (Es gibt keine Überlappung in den originalen Daten).

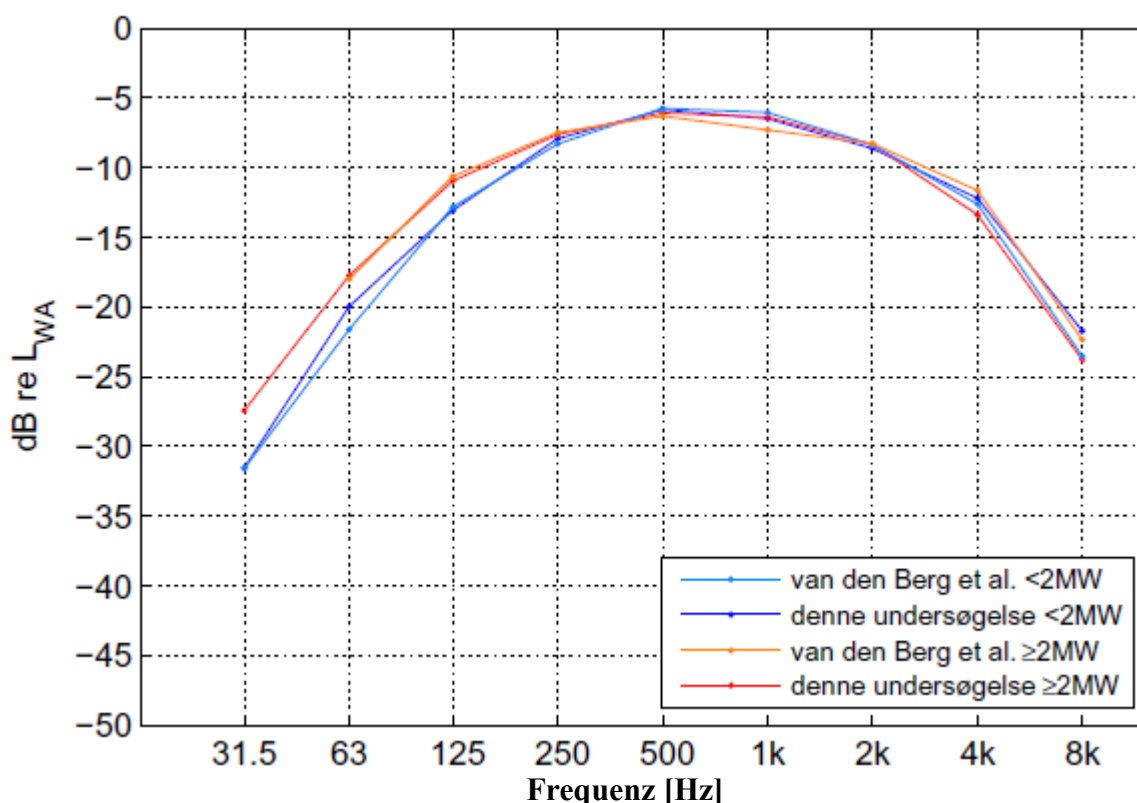


Abb. 15. Normierter A-bewerteter Schallleistungspegel in 1/3-Oktavbändern, Mittelwert für zwei Gruppen WKA: < 2 MW und ≥ 2 MW und von zwei Studien: van den Berg et al. [70, Appendix D] und dieser Studie.
denne undersøgelse=diese Untersuchung

4.4 Tonkomponenten

Søndergaard und Madsen [71] schlussfolgern 1) dass *“die Frequenzspektren des aerodynamischen Lärms der großen WKA nicht wesentlich abweichen von denen der kleineren WKA. Das bedeutet, dass der tieffrequente Lärm der großen WKA nicht gewichtiger ist als der von den kleineren“*, 2) dass eine festgestellte *“schwache Steigerung des relativen Anteils an tieffrequentem Lärm hauptsächlich den Getriebetönen bei Frequenzen unter 200 Hz geschuldet sind“*, und 3) dass dies *“nicht ungewöhnlich ist für Prototypen, und normalerweise sind die produktionsreifen WKA verbessert worden in Bezug auf Lärmemission und speziell in Bezug auf hörbare Töne des Lärms“*.

Diese Schlussfolgerungen sind mittlerweile nicht durch passende Statistiken oder andere Analysen untermauert worden. Die erwähnte Trennung des aerodynamischen Lärms und des Getriebelärms ist nicht erklärt, und keine Daten hierüber sind angegeben. Mit Blick auf die Entwicklung des Lärms von Prototypen bis kommerzielle WKA sind keine Daten oder Referenzen angegeben. Schaut man auf die WKA in dem Projekt, ist es unklar, inwieweit die WKA 5-11 Prototypen sind oder nicht, weil WKA anonym sind, und die Informationen von Bericht zu Bericht variieren. In dem ursprünglichen Bericht [44] sind nur die WKA 1-4 als Prototypen benannt, aber der komplette zusammengefasste Bericht verweist auf alle WKA über 2 MW als Prototypen. Wenn die WKA 5-11 faktisch Prototypen sind, bedeutet dies, dass die Schlussfolgerung 3) gefasst wurde ohne die Daten für fertig entwickelte große WKA. Wenn die WKA 5-11 aber fertig entwickelte WKA sind, ist es wert zu bemerken, dass auch mehrere von diesen deutliche Spitzen in den 1/3-Oktavbändern haben (Abb. 5), und dass deren Lärmemission (L_{WA} und L_{WALF}) nicht niedriger ist als die der WKA 1-4, vielleicht ganz im Gegenteil (Abb. 1).

In Bezug auf die Reduzierung des tonalen Lärms, beziehen sich Søndergaard und Madsen mehrmals auf den Tonzuschlag als ein Mittel um sicherzustellen, dass die Töne faktisch reduziert werden, ehe die WKA auf den Markt kommen, und sie benutzen Ausdrücke wie *“die notwendige Reduzierung der Töne“* [71] und *“...reduced to a level where there is no penalty, according to the danish rules...“* [44, 71], (*“...reduziert zu einem Niveau, bei dem keine Zuschläge geben muss nach dänischem Recht...“*, Übersetzung des Verfassers). Søndergaard und Madsen haben offensichtlich das Faktum ignoriert, dass die Ergebnisse ihrer Tonanalysen keine Tonzuschläge auslösen bei keinem der WKA (Abschnitt 3.1.3).

Ein genauerer Blick auf die Daten ergibt, dass obwohl einige der Spitzen in den 1/3-Oktavbändern bei niedrigen Frequenzen sehr deutlich sind, die Spitzen nicht generell verantwortlich sind für den Unterschied zwischen kleinen und großen WKA. Abbildung 16 zeigt eine gedachte Situation, in der alle Spitzen unter 200 Hz von den großen WKA entfernt sind, indem die Pegel in den Spitzen durch Pegel ersetzt werden, die durch lineare Interpolation zwischen den Niveaus in den beiden benachbarten 1/3-Oktavbändern entstehen. 1-3 Spitzen der einzelnen WKA sind entfernt worden, mit Ausnahme der WKA 4, die nicht Spitzen in diesem Frequenzbereich hat. Nur das Entfernen der 40 Hz-Spitze der WKA 2 bewirkt eine Veränderung des Mittelwertes der großen WKA mit mehr als 1,0 dB.

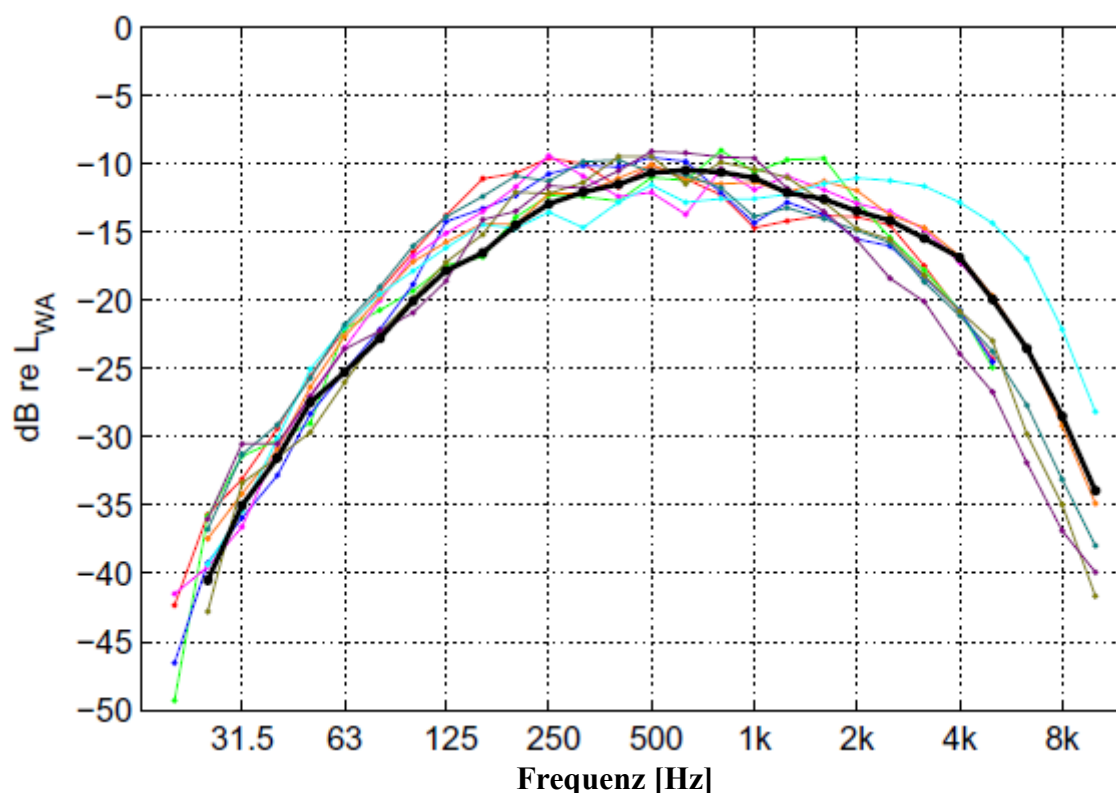


Abb. 16. Normierte A-bewertete Schallleistungspegel im 1/3-Oktavband. Mittelwert von 36 WKA ≤ 2 MW (dicke schwarze Linie) und individuellen WKA > 2 MW. Die Spitzen in den 1/3-Oktavbändern sind entfernt worden, indem die Pegel in den Spitzen durch Pegel ersetzt werden, die durch lineare Interpolation zwischen den Pegeln in den beiden benachbarten 1/3-Oktavbändern entstehen. Farbcode der WKA wie in Abb. 5.

Generell liegen die Mittelwerte der großen WKA im tieffrequenten Bereich immer noch über denen der kleinen WKA. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten der großen (>2 MW) und der kleinen WKA (≤ 2 MW) ist weiterhin signifikant in den selben 1/3-Oktavbändern wie schon mit den Spitzen (63-160 Hz (unverändert über 160 Hz): $t=[3,03; 3,59; 2,81; 2,83; 3,18]$, d.f.=[22,4; 23,6; 17,0; 19,2; 18,9], einseitig $p=[0,003; <0,001; 0,006; 0,005; 0,003]$).

Die auffallende Übereinstimmung mit den Spektren von den Berg's et al. [71] (Abb. 15) stützt die These, dass die Spektren der großen WKA der vorliegenden Studie repräsentativ ist für WKA dieser Größe.

4.5 Erdreflexion

In den Berechnungen der Schalldruckpegel an den Wohnhäusern wird die Erdreflexion durch einen Zuschlag von 1,5 dB zum direkten Schallsignal berücksichtigt. Wie im Abschnitt 2.3 erwähnt, wird der Wert 1,5 dB in den dänischen Richtlinien für WKA vorgeschrieben [50]. Die schwedischen Richtlinien schreiben vor, dem direkten Schallsignal 3 dB zuzuschlagen (bei Abständen bis 1000 m) [72], ein Wert, welcher auch die ISO 9613-2 [48] beinhaltet für die tiefste angegebene Frequenz, 63 dB, unabhängig von der Erdoberfläche. Bei den Messungen des Schallleistungspegels der WKA [47] wird angenommen, dass die Erdreflexion so viel wie 6 dB zum Schalldruck hinzufügt. Es wird sicherlich eine reflektierende Metallplatte unter dem Mikrofon eingesetzt, aber die Platte hat nur einen geringen Effekt bei tiefen Frequenzen, wo die angenommene 6 dB Reflexion hauptsächlich durch die Erdoberfläche verursacht wird.

Eine mögliche destruktive Interferenz zwischen dem direkten Schall und der Erdreflexion, falls der Empfänger über der Erde liegt, wird einen geringen Einfluss bei tiefen Frequenzen haben. Bei einer angenommenen Quellhöhe von 75 m, einem waagerechten Abstand von 800 und einer Empfängerhöhe von 1,5 m wird die Verspätung zwischen direktem Schall und Erdreflexion nur 0,8 ms betragen, was sich erst in der Schallübertragung bei 625 Hz bemerkbar macht (gradlinige Schallausbreitung).

Mit dem Hintergrund ist es vernünftig anzunehmen, dass ein Zuschlag von 1,5 dB für die Erdreflexion zu wenig ist bei tiefen Frequenzen, und dass höhere Werte bis zu einem theoretischen Maximum von 6 dB passender wäre. Somit wird die Prozedur zur Berechnung des Schalldruckpegels im Freien bei den Anwohnern wahrscheinlich den tieffrequenten Schalldruck unterschätzen.

4.6 Fenster

Die Messungen der Schalldämpfung wurden bei geschlossenen Fenstern vorgenommen. Aber in großen Teilen der Welt, ziehen es die Menschen vor, zumindest bei mehr oder weniger geöffneten Fenstern zu schlafen, und die WHO empfiehlt, dass die Lärmrichtlinien dieses ermöglicht [66,73]. In Dänemark werden die Messungen des tieffrequenten Lärms in der Regel bei geschlossenen Fenstern vorgenommen, aber sollte der Kläger der Meinung sein, dass der Lärm stärker ist mit geöffneten Fenstern, müssen auch Messungen unter diesen Begebenheiten vorgenommen werden [20]. Es hätte daher relevant sein können, die Schalldämpfung auch mit teilweise geöffneten Fenstern gemessen zu haben um daraus die Indoors-Schalldruckpegel zu berechnen.

4.7 Geschätzte Schallleistungen noch größerer WKA

Im Abschnitt 3.1.2 konnte man den spektralen Unterschied zwischen kleinen und großen WKA sehen als Unterschiede in den normierten Schallleistungspegeln bei bestimmten 1/3-Oktavbändern. Als eine alternative Betrachtungsweise zeigt die Abbildung 17 normierte Spektren für große und kleine WKA, aber mit Daten für die kleinen WKA, die um ein 1/3-Oktav tiefer gesetzt wurden.

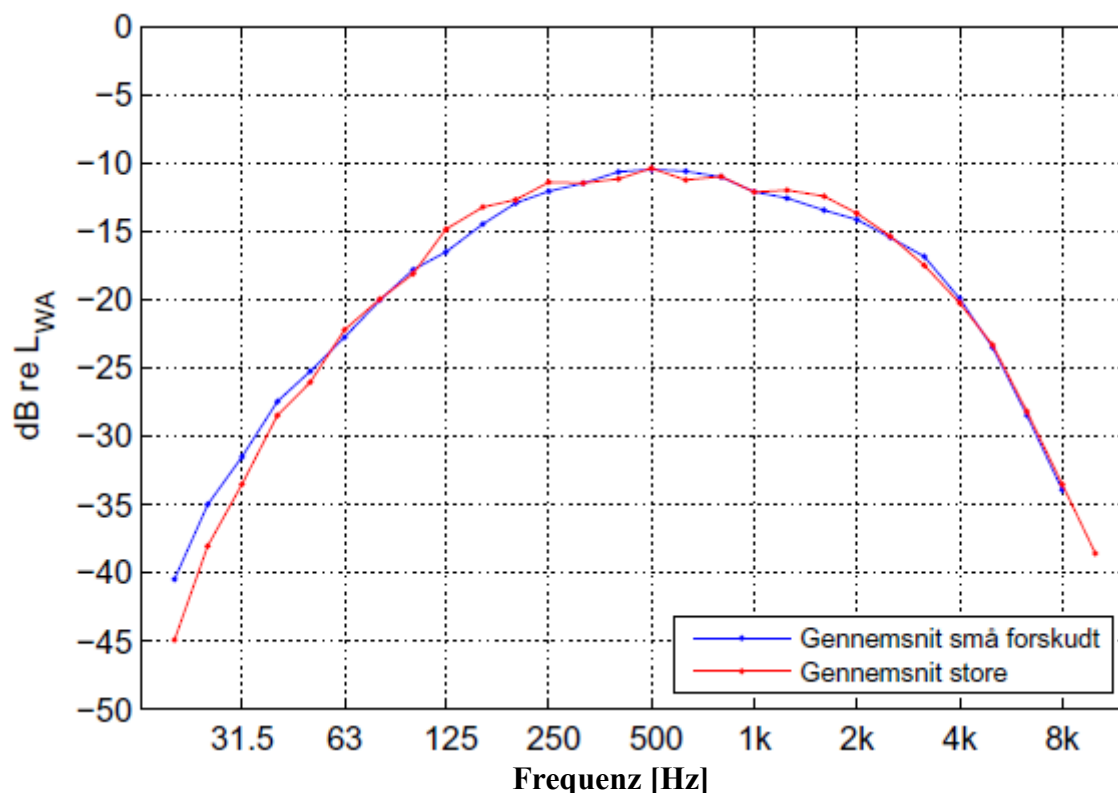


Abb. 17. Normierte A-bewertete Schallleistungspegel für 1/3-Oktavbänder. Mittelwerte für zwei Gruppen WKA: ≤ 2 MW und > 2 MW, Die Gruppe der kleinen WKA um 1/3-Oktav nach unten in der Frequenz verschoben. (WKA 6 ist über 2 kHz nicht mitgerechnet, siehe Abschnitt 3.1.2).

Gennemsnit små forskudt=Durchschnitt kleine verschoben; *Gennemsnit store*=Durchschnitt große

Die beiden Kurven liegen sehr dicht aneinander im größten Teil des Frequenzbereiches, welches bedeutet, dass das Spektrum an seiner Form festgehalten hat, aber um ein 1/3-Oktav in der Frequenz nach unten verschoben für kleine bis große WKA (vergleiche mit Abb. 4). Die Unterschiede bei den tiefsten Frequenzen können reell sein oder Unsicherheiten in den Messungen bei diesen Frequenzen wegen des Hintergrundlärms, eine Frage, die nicht vollständig mit dem vorhandenen Datenmaterial beantwortet werden konnte.

Für den Leser, der meinen möchte, dass eine Verschiebung von 1/3-Oktav bescheiden ist, ist es wert zu bemerken, dies entspricht einem musikalischen Intervall von einem großen Terz, also fast wie der Unterschied zwischen zwei Saiten einer Gitarre.

Die logarithmischen Mittelwerte der nominellen elektrischen Leistungen der kleinen und großen WKA liegen bei jeweils 650 kW und 2,6 MW, und die spektrale Verschiebung um 1/3-Oktav nach unten entspricht daher einer Verschiebung nach oben in der nominellen elektrischen Leistung mit einem Faktor der Größenordnung 4. Es wird daher relevant sein vorzuschlagen, dass das Lärmspektrum ca. um einen weiteren 1/3-Oktav nach unten verschoben wird für zukünftige WKA der 10 MW-Klasse.

Als Supplement zur linearen Regression und Extrapolation von L_{WA} in Abb. 13 ist ein Angebot zu den typischen Spektren der WKA im Bereich 2,5, 5 und 10 MW konstruiert worden zum möglichen (vorsichtigen) Gebrauch in zukünftigen Studien. Abbildung 18 zeigt ein Sechste-Ordnungs-Polynom Regression des Mittelwertes des relativen Spektrums für WKA über 2MW.

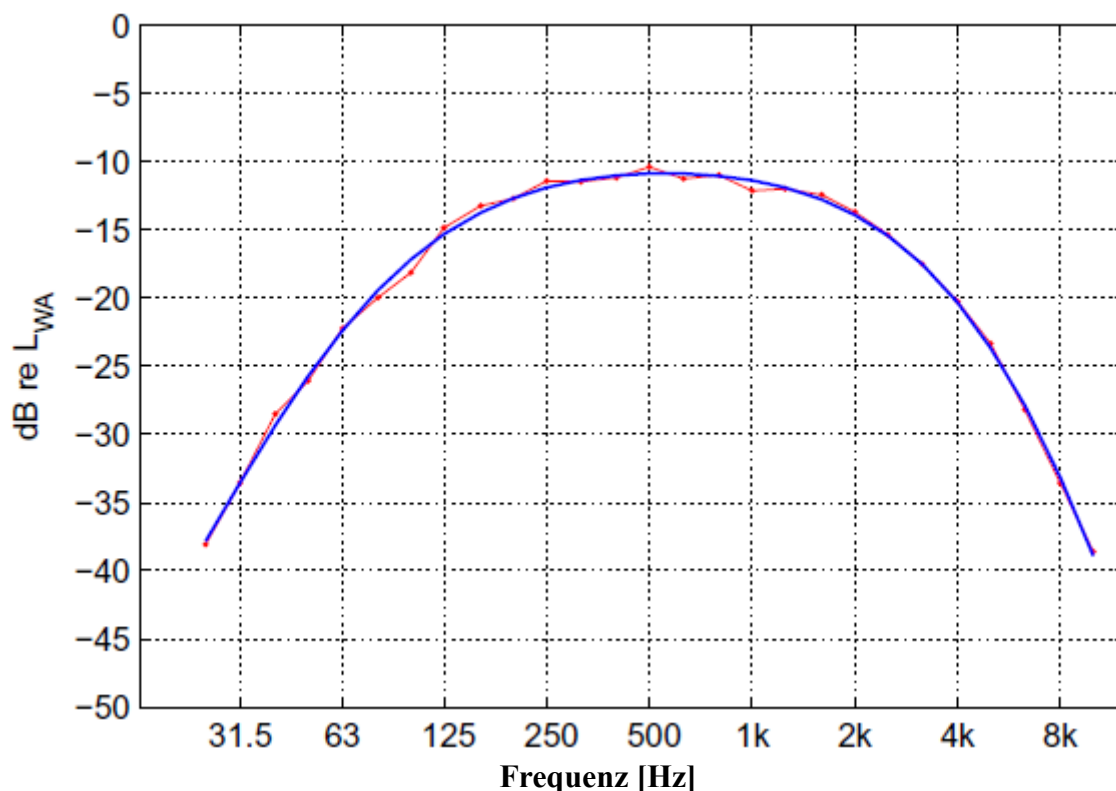


Abb. 18. Sechste-Ordnung-Polynom Regression (blaue Linie) des Mittelwertes der normierten A-bewerteten Schallleistungspegel (rote Linie mit runden Markierungen) für WKA mit nomineller Leistung > 2 MW. (WKA 6 nicht mitgerechnet über 2 kHz, siehe Abschnitt 3.1.2).

Tabelle 3 zeigt die relativen Schallleistungspegel in den 1/3- und 1/1- Oktavbändern für 2,5 MW WKA aus der Regression in Abb. 18 und, für 5 und 10 MW WKA, mit den entsprechenden Daten jeweils um 1/6 und 1/3 Oktav nach unten in der Frequenz verschoben. Außerdem zeigt die Tabelle die absoluten Pegel basierend auf der linearen Regression von L_{WA} in Abb. 13. Beachte, dass die Schätzungen auf den Mittelwerten der WKA basieren, und dass sie keinen Sicherheitszuschlag beinhalten wie im Abschnitt 4.2 erwähnt.

Die Tabellenwerte für das absolute Niveau in den 1/3.Oktaven sind außerdem in Abb. 19 gezeigt.

Frek. [Hz]	Relativt niveau i forhold til L_{WA}						Absolut niveau					
	1/3-oktaver			Oktaver			1/3-oktaver			Oktaver		
	2.5MW	5 MW	10 MW	2.5MW	5 MW	10 MW	2.5MW	5 MW	10 MW	2.5MW	5 MW	10 MW
25	-37,4	-35,3	-33,2				68,1	73,5	78,9			
31.5	-33,2	-31,1	-29,0	-27,2	-25,2	-23,3	72,3	77,7	83,1	78,3	83,6	88,8
40	-29,0	-27,0	-25,3				76,5	81,8	86,8			
50	-25,3	-23,6	-22,0				80,2	85,2	90,1			
63	-22,0	-20,5	-19,1	-16,7	-15,3	-14,0	83,5	88,3	93,0	88,8	93,5	98,1
80	-19,1	-17,8	-16,8				86,4	91,0	95,3			
100	-16,8	-15,8	-15,0				88,7	93,0	97,1			
125	-15,0	-14,2	-13,4	-10,0	-9,3	-8,6	90,5	94,6	98,7	95,5	99,5	103,5
160	-13,4	-12,8	-12,3				92,1	96,0	99,8			
200	-12,3	-11,9	-11,5				93,2	96,9	100,6			
250	-11,5	-11,2	-11,0	-6,8	-6,5	-6,3	94,0	97,6	101,1	98,7	102,3	105,8
315	-11,0	-10,8	-10,6				94,5	98,0	101,5			
400	-10,6	-10,6	-10,5				94,9	98,2	101,6			
500	-10,5	-10,5	-10,5	-5,8	-5,8	-5,8	95,0	98,3	101,6	99,7	103,0	106,3
630	-10,5	-10,6	-10,7				95,0	98,2	101,4			
800	-10,7	-10,8	-11,0				94,8	98,0	101,1			
1000	-11,0	-11,3	-11,5	-6,3	-6,5	-6,8	94,5	97,5	100,6	99,2	102,3	105,3
1250	-11,5	-11,9	-12,4				94,0	96,9	99,7			
1600	-12,4	-12,9	-13,5				93,1	95,9	98,6			
2000	-13,5	-14,3	-15,1	-8,8	-9,5	-10,2	92,0	94,5	97,0	96,7	99,3	101,9
2500	-15,1	-16,0	-17,2				90,4	92,8	94,9			
3150	-17,2	-18,4	-20,0				88,3	90,4	92,1			
4000	-20,0	-21,6	-23,3	-14,7	-16,1	-17,8	85,5	87,2	88,8	90,8	92,7	94,3
5000	-23,3	-25,3	-27,5				82,2	83,5	84,6			
6300	-27,5	-29,9	-32,8				78,0	78,9	79,3			
8000	-32,8	-35,6	-38,5	-26,1	-28,7	-31,5	72,7	73,2	73,6	79,4	80,1	80,6
10000	-38,5	-41,9	-45,2				67,0	66,9	66,9			
L_{WA}							105,5	108,8	112,1	105,5	108,8	112,1

Tabelle 3. Die geschätzten relativen und absoluten A-bewerteten Schallleistungspegel für WKA um die 2,5, 5 und 10 MW basierend auf dem Sechste-Ordnungs-Polynom Approximation des mittleren relativen Niveaus für WKA > 2 MW aus Abb. 18 und L_{WA} aus der linearen Regression in Abb. 13. Relative Niveaus um 1/6 und 1/3 Oktav nach unten verschoben für jeweils 5 und 10 MW. Approximation justiert mit +0,38 dB um ein totales relatives Niveau von 0 dB zu erreichen, welches der Mittelwert der relativen Daten (und deren Approximation) nicht notwendigerweise beinhaltet. Beachte, dass die Schätzungen auf den Mittelwerten der WKA basieren, und dass sie keinen Sicherheitszuschlag beinhalten wie im Abschnitt 4.2 erwähnt.

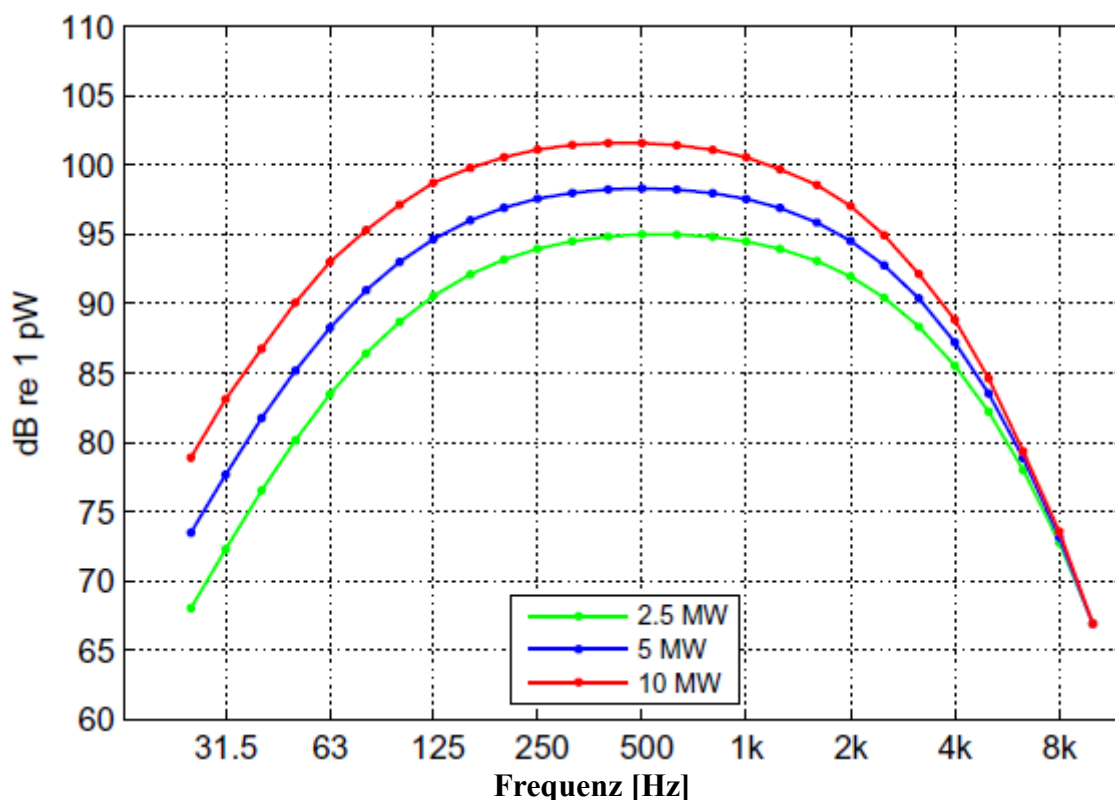


Abb. 19. geschätzte A-bewertete Schalleistungspegel in den 1/3-Oktavbändern für WKA um die 2,5, 5 und 10 MW. Werte und Bedingungen wie in Tabelle 3.

4.8 Atmosphärische Verhältnisse

Alle bisherigen Berechnungen setzen eine sphärische Schallausbreitung voraus, d.h. eine Reduktion des Schalldruckpegels um 6 dB bei einer Verdopplung des Abstandes. Unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen, z.B. mit einer Temperaturinversion oder 'low-level-jets', kann in einer bestimmten Höhe eine reflektierende Luftschicht vorhanden sein, und damit ähnelt die Schallausbreitung über eine gewisse Distanz einer zylindrischen Ausbreitung, die nur eine Reduzierung um 3 dB bei einer Verdopplung des Abstandes ergibt. Bei niedrigen Frequenzen wurde dies von Hubbard und Shepherd [21] beobachtet und z.B. von Zorumski und Willshire [74] und Johansson [75] erklärt. Über Wasser rechnen die schwedischen Richtlinien generell mit einer zylindrischen Ausbreitung bei einem Abstand über 200 m, ein Abstand der fein übereinstimmt mit den Daten von Bolin et al. [76], die Reflexionen nachwiesen in einer Höhe mit der Größenordnung 100-200 m.

Mit einer zylindrischen Ausbreitung ab 200 m gilt folgende Gleichung (für Abstände über 200 m)

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{200 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right) - 10 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{200 \text{ m}} \right) - 11 \text{ dB} - \alpha \cdot d + 1,5 \text{ dB} \quad (4)$$

Tabelle 4 und Abbildung 20 zeigen jeweils Schlüsselzahlen und Schalldruckpegel in den 1/3-Oktavbändern in dem Abstand, an dem der A-bewertete Schalldruckpegel auf 35 dB gefallen ist unter der Voraussetzung einer zylindrischen Ausbreitung ab 200 m.

	Mølle									Middel små
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Afstand [m]	1476	1414	2373	2100	1562	1829	1776	3482	3152	827
L_{pA} [dB]	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
L_{pALF} [dB]	29,7	28,2	30,3	29,2	29,4	30,7	30,0	29,7	29,6	25,6
$L_{pALF}-L_{pA}$ [dB]	-5,3	-6,8	-4,7	-5,8	-5,6	-4,3	-5,0	-5,3	-5,4	-9,4
L_{pG} [dB]	60,4	56,2	57,1	60,0						

Tabelle 4. Schlüsselzahlen bei dem Abstand, wo der totale A-bewertete Schalldruckpegel 35 dB ist. Zylindrische Ausbreitung wird ab 200 m angenommen. Der Abstand ist als eine Schräge zum Rotorzentrum angegeben, welcher bei den aktuellen WKA-Höhen dicht an dem waagerechten Abstand liegt. (*Middel små=Mittelwert kleiner WKA*)

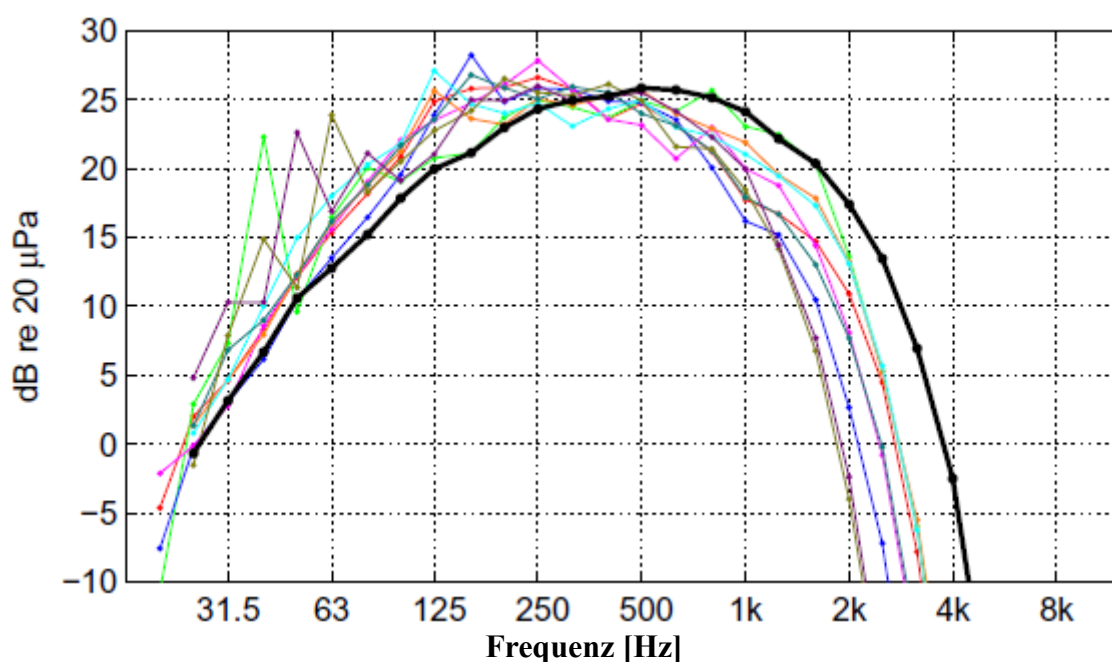


Abb. 20. A-bewertete Schalldruckpegel in 1/3-Oktavbändern an dem Abstand, bei dem der totale A-bewertete Schalldruckpegel 35 dB ist (siehe Tabelle 4). Zylindrische Ausbreitung wird angenommen ab 200 m. Farbcodes der WKA wie in Abb. 5.

Weitaus größere Abstände sind nötig (1414-3482 m) um auf 35 dB zu kommen, als bei einer rein sphärischen Ausbreitung, und die tieffrequente Charakteristik des Spektrums ist noch markanter geworden (vergleiche mit Tabelle 1 und Abb. 9). Zylindrische Ausbreitung kann die Zufälle erklären in denen behauptet wird, dass das Grummeln der WKA kilometerweit hörbar sind. Ein 'worst-case' Szenarium, das die Temperaturinversion mit einem WKA-Park kombiniert, welcher sich wie eine Linienquelle in einem bestimmten Abstandsbereich verhält, kann theoretisch gesehen die geometrische Dämpfung in diesem Gebiet auf 0 dB bringen. Es ist mittlerweile notwendig, mehr Wissen über die atmosphärischen Verhältnisse und die verschiedenen Abhängigkeiten zu erlangen.

Es gibt auch andere Phänomene in Relation zu den atmosphärischen Verhältnissen, welche eine gewisse Aufmerksamkeit verdienen. Es wird normalerweise angenommen, dass die Windgeschwindigkeit mit steigender Höhe über der Erde logarithmisch ansteigt, angefangen mit einer Geschwindigkeit von Null in einer Höhe entsprechend der sogenannten Rauigkeitslänge der Erdoberfläche. Wenn man die Rauigkeitslänge kennt, kann die Windgeschwindigkeit in allen Höhen aus einer Messung in einer einzelnen Höhe bestimmt werden. Die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m wird als Referenzwert für Messungen des WKA-Lärms genommen [47].

Mittlerweile haben mehrere Studien gezeigt, dass die realen Windgeschwindigkeitsprofile sehr variieren und oft vom angenommenen logarithmischen Profil erheblich abweichen (van den Berg [77], Botha [78], Palmer [79], Bowdler [80]). In einer stabilen Atmosphäre, wie sie oft nachts vorkommt, können die Varianten mit der Höhe viel größer sein als angenommen, z.B. mit einer hohen Windgeschwindigkeit in Rotorhöhe und nur wenig Wind am Boden. Eine große Variation der Windgeschwindigkeit quer über dem Rotorareal erhöht die Modulation des WKA-Lärms, und das normale Wischgeräusch der Flügel ändert sich in ein belästigendes, impulsartig wummerndes Geräusch wie z.B. von van den Berg [28, 81, 82] und Palmer [83] beschrieben. Der Effekt ist deutlicher bei den großen WKA, wo der Unterschied der Windgeschwindigkeit an der Rotoroberkante und -unterkante bedeutend sein kann. Dieser Effekt wird in der Regel nicht bei den Lärmmessungen erfasst, da diese hauptsächlich während der Tageszeiten ausgeführt werden, an denen das logarithmische Profil aber eher gewöhnlich ist.

Eine andere Konsequenz großer Varianten der Windgeschwindigkeit mit der Höhe ist, dass die WKA Lärm emittieren kann, der einer hohen Windgeschwindigkeit entspricht – und viel stärker als angenommen bei einer gemessenen Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe – während es auf dem Boden still ist. Es ist daher mehr WKA-Lärm vorhanden als erwartet, bei weniger Wind, und der WKA-Lärm wird daher nicht mit natürlichem windverursachten Schall maskiert worden sein, wie er vielleicht geworden wäre mit dem logarithmischen Profil.

Etliche Verfasser haben angeführt, dass das logarithmische Profil und eine Referenzhöhe von 10 m nicht zweckmäßig ist bei modernen, hohen WKA (z.B. van den Berg [81], Botha [78], Palmer [79], Almgren et al. [84]), und eine revidierte IEC 61400-11 will die reale Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe als Referenz einsetzen [85]. Windprofile und -statistik für das faktische Aufstellungsgebiet kann danach zur Berechnung des Lärms und Regulierung verwendet werden.

5. Schlussfolgerungen

Die Resultate bekräftigen die Hypothese, dass das WKA-Lärmspektrum mit steigender WKA-Größe sich nach unten in der Frequenz bewegt. Der tieffrequente Anteil des emittierten Schalls von großen WKA (2,3-3,6 MW) ist höher als der von den kleineren WKA (≤ 2 MW). Der Unterschied ist statistisch signifikant für die 1/3-Oktavbänder im Frequenzbereich 63-250 Hz. Der Unterschied kann auch als eine Verschiebung des Spektrums um etwa 1/3 Oktav. Eine weitere Verschiebung muss angenommen werden bei WKA in der Größenordnung 10 MW.

Betrachtet man den Outdoor-Schalldruckpegel in den relevanten Abständen zu Wohnhäusern, wird der tieffrequente Inhalt noch deutlicher. Der Grund hierfür ist, dass die Luftabsorption die hohen Frequenzen viel stärker reduziert als die tiefen. Selbst dann, wenn die A-bewerteten Pegel betrachtet werden, haben die tiefen Frequenzen einen wesentlichen Anteil an dem Lärm, und für viele der untersuchten WKA liegt das 1/3-Oktavband, welches den größten Schalldruckpegel hat, bei oder unter 250 Hz. Es ist daher über jeden Zweifel erhaben, dass der tieffrequente Anteil des Lärmspektrums eine wichtige Rolle in der Lärmbelästigung der Anwohner spielt.

Der tieffrequente Lärm in den Häusern variiert mit WKA, Schalldämpfung des Raumes und Position im Raum. Wenn der Lärm der großen untersuchten WKA einen A-bewerteten Outdoor-Schalldruckpegel von 44 dB hat, das maximal erlaubte in der dänischen Regulierung des Lärms von WKA, ist das Risiko gegeben, dass ein beträchtlicher Anteil der Bewohner von dem tieffrequenten Lärm belästigt werden, selbst im Haus. Die dänische Abend/Nacht-Schwelle von 20 dB bei A-bewertetem Schall im Frequenzbereich 10-160 Hz, die für industriellen Lärm gilt (aber nicht für WKA), wird überschritten werden in vielen Aufenthaltsräumen der anliegenden Wohnhäusern, die dicht an der Grenze von 44 dB liegen. Die Probleme werden deutlich reduziert mit einer Grenzwelle im Freien von 35 dB.

Die WKA emittieren ganz gewiss Infraschall (Schall unter 20 Hz), aber die Pegel sind niedrig, wenn man die Empfindlichkeit des Menschen für solche Frequenzen in Betracht zieht. Selbst dicht an den WKA liegt der Schalldruckpegel weit unter der normalen Hörschwelle, und der Infraschall wird daher nicht als ein Problem angesehen für WKA der selben Konstruktion und Größe wie die untersuchten.

Der tieffrequente Lärm von mehreren der untersuchten WKA beinhalten Töne, vermutlich vom Getriebekasten, die als Spitzen in den entsprechen 1/3-Oktavbändern auftauchen. Der Tonzuschlag hilft nicht abzusichern, dass die Töne entfernt oder reduziert werden, da die Töne nicht ausreichend ausgeprägt sind, überhaupt einen Tonzuschlag auszulösen. Der spektrale Unterschied zwischen großen und kleinen WKA ist übrigens immer noch statistisch signifikant, selbst wenn die Spitzen in den 1/3-Oktavbändern entfernt werden.

Die vorstehenden Schlussfolgerungen basieren auf Daten von WKA im Größenbereich 2,3-3,6 MW nomineller elektrischer Leistung. Probleme mit tieffrequentem Lärm werden erwartungsgemäß größer mit noch größeren WKA.

Die emittierte A-bewertete Schalleistung steigt proportional mit der elektrischen Leistung oder wahrscheinlich noch mehr. Deswegen verunreinigen große WKA dasselbe – oder ein noch größeres - Gebiet, verglichen mit kleinen WKA mit derselben gesamten elektrischen Leistung.

Der Lärm von verschiedenen WKA der selben Größe variiert mit mehreren Dezibel, selbst von WKA des selben Typs und Model. Daher ist es nicht relevant, Berechnungen bis zu den Bruchteilen eines Dezibels vorzunehmen und daran zu glauben, dass diese für die aktuellen WKA zutreffend sind, die zur Zeit aufgestellt werden. Es muss in der Planungsphase ein gewisser Sicherheits-spielraum eingerechnet werden um sicherzustellen, dass die praktisch errichteten WKA die Lärmgrenzen einhalten. Es gibt eine internationale technische Spezifikation hierüber, aber diese wird oft nicht angewendet.

Unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen, z.B. Temperaturinversion, kann der Lärm mehr belästigend sein und – besonders im tieffrequenten Teil – sich viel weiter verbreiten als normal angenommen. Die Notwendigkeit besteht, über diese Phänomene und deren Erscheinen mehr Wissen anzueignen.

Referencer

- [1] A. O. Santillan, C. S. Pedersen, M. Lydolf, "Experimental implementation of a low-frequency global sound equalization method based on free field propagation", *Applied Acoustics*, **68**, 1063-1085, 2007.
- [2] C. S. Pedersen, "Human hearing at low frequencies with focus on noise complaints", Ph.D. thesis, Aalborg University, Denmark (2008).
- [3] H. Møller, C. S. Pedersen, "Human hearing at low frequencies", *Noise & Health*, **6** (23), 37-57, 2004.
- [4] L. D. Whittle, S. J. Collins, D. W. Robinson, "The audibility of low frequency sounds", *J. Sound and Vibration*, **21** (4), 431-448, 1972.
- [5] H. Møller, J. Andresen, "Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **3** (2), 78-87, 1984.
- [6] M. A. Bellmann, V. Mellert, C. Reckhardt, H. Remmers, "Perception of sound and vibration at low frequencies", collected papers from the Joint Meeting "Berlin 99" of ASA, EAA and DAGA, Berlin, Germany, 1999, ISBN 3-9804568-5-4. Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**, 1297.
- [7] ISO 226 "Acoustics – Normal equal-loudness-level contours", International Organization for Standardization, Geneva, 2003.
- [8] J. Andresen, H. Møller, "Equal annoyance contours for infrasonic frequencies", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **3** (3), 1-9, 1984.
- [9] H. Møller, "Annoyance of audible infrasound", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **6** (1), 1-17, 1987.
- [10] Y. Inukai, N. Nakamura, H. Taya, "Unpleasantness and acceptable limits of low frequency sound", *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **19** (3), pp.135-140, 2000.
- [11] J. K. Subedi, H. Yamaguchi, Y. Matsumoto, M. Ishiharati, "Annoyance of low frequency tones and objective evaluation methods", *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **24** (2), 81 – 96, 2005.
- [12] K. P. Waye, J. Bengtsson, A. Kjellberg, S. Benton, "Low frequency noise "pollution" interferes with performance", *Noise & Health*, **4** (13), 33-49, 2001.
- [13] K. P. Waye, A. Clow, S. Edwards, F. Hucklebridge, R. Rylander, "Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality", *Life Sciences*, **72**, 863-875, 2003.
- [14] B. Berglund, T. Lindvall (Editors), "Community noise", Archives of the Center for Sensory Research, **2** (1), Stockholm University and Karolinska Institute, 1995, prepared for the World Health Organization.
- [15] ISO 7196, "Acoustics - Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements", International Organization for Standardization, Geneva, 1996.
- [16] N. S. Yeowart, M. J. Evans, "Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones", *J. Acoust. Soc. Am.*, **55** (4), 814-818, 1974.
- [17] S. Yamada, T. Kosaka, K. Bunya, T. Amemiya, "Hearing of low frequency sound and influence on human body", *Proc. Conference on Low Frequency Noise and Hearing*, 7-9 May 1980 in Aalborg Denmark, 95-102, 1980.
- [18] U. Landström, R. Lundström, M. Byström, "Exposure to infrasound - Perception and changes in wakefulness", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **2** (1), 1-11, 1983.

- [19] T. Watanabe, H. Møller, "Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **9** (3), 106-115, 1990.
- [20] "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø", Orientering fra Miljøstyrelsen, nr. 9, 1997.
- [21] H. H. Hubbard, K. P. Shepherd, "Aeroacoustics of large wind turbines", *J. Acoust. Soc. Am.*, **89** (6), 2495-2508, 1991.
- [22] K. P. Shepherd, H. H. Hubbard, "Physical characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines", *Noise Control Engineering Journal*, **36** (1), 5-15, 1991.
- [23] G. Guidati, R. Barei, S. Wagner, "An investigation of blade-tower-interaction noise (BTI) for horizontal axis wind turbines in upwind and downwind configuration. First steps towards modeling of aeroelastic effects", *Proc. 8th IEA Symposium*, November 1994, pp. 249-255.
- [24] M. L. Legerton, D. M. J. P. Manley, J. W. Sargent, D. J. Snow, P. Styles, "Low frequency noise & vibration levels at a modern wind farm", *Proc. 25th International Congress on Noise Control Engineering*, Inter-Noise 96, Liverpool, pp. 459-462.
- [25] K. Betke, M. Schultz-von Glahn, O. Goos, H. Remmers, "Messung der Infrasschallabstrahlung von Windkraftanlagen" (Measurement of infrasound emission from wind turbines), *Proc. DEWEK 1996*, pp. 207-210.
- [26] K. Betke, H. Remmers, "Messung und Bewertung von Tieffrequentem Schall" (Measurement and assessment of low-frequency sound), *Fortschritte der Akustik, DAGA 1998*, pp. 472-473.
- [27] J. Jakobsen, "Infrasound emission from wind turbines", *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **24** (3), pp. 145-155, 2005.
- [28] G. P. van den Berg, "Do wind turbines produce significant low frequency sound levels", 11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control, Maastricht, 2004.
- [29] ISO 389-7 "Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse field listening conditions", International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [30] C. S. Pedersen, H. Møller: "Vurdering af lavfrekvent støj og infralyd fra decentrale el-producerende anlæg", Afdeling for Akustik, Aalborg Universitet, ISBN 87-90834-74-7, Maj 2005.
- [31] "The measurement of low frequency noise at three UK wind farms", Hayes McKenzie Partnership Ltd. for Department of Trade and Industri (DTI), Contract No. W/45/00656/00/00, URN No. 06/1412, UK, 2006.
- [32] A. Moorhouse, D. Waddington, M. Adams, "Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance", Project report DEFRA NANR45, University of Salford, 2005.
- [33] A. Moorhouse, D. Waddington, M. Adams, "Procedure for the assessment of low frequency noise complaints", Project report DEFRA NANR45, University of Salford, 2005.
- [34] J. Jakobsen, "Lavfrekvent støj fra vindmøller", Notat, Miljøstyrelsen, 31. maj 2006.
- [35] "Bekendtgørelse om miljøgodkendelse af hurtigfærgeruter", Bekendtgørelse nr. 821, Miljøministeriet, København, 1997.
- [36] "Vurdering af lavfrekvent støj fra færger, part 2: Revideret metode til beregning af lydtrykniveauet indendørs", Delta Akustik & Vibration, Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 10, 1997.
- [37] S. Lee, S.-H. Shin, C. Cheong, S.-S. Jung, W. Cheung, "Low-frequency noise emission characterisation of upwind-type large wind turbines", *Proc. International Congress on Noise Control Engineering*, Inter-Noise 2007, Istanbul, Turkey.

- [38] S. S. Jung, W.-S. Cheung, C. Cheong, S.-H. Shin, "Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise", J. Korean Physical Society, **53** (4), 1897-1905, October 2008.
- [39] W. J. Gastmeier, B. Howe, "Recent studies of infrasound from industrial sources", Canadian Acoustics, **36** (3), 58-59, 2008.
- [40] R. Ramakrishnan, "Characteristics of wind turbine noise", Canadian Acoustics, **3**, 122-123, 2009.
- [41] J. P. Harrison, "Inadequacy of wind turbine noise regulations and their application", Canadian Acoustics, **37** (3), 156-157, 2009.
- [42] R. J. Barthelmie, L. Folkerts, F. T. Ormel, P. Sanderhoff, P. J. Eecen, O. Stobbe, N. M. Nielsen, J. Atmospheric and Oceanic Techn., **20**, 466-477, 2003.
- [43] B. Søndergaard, C. Ryom, "Low frequency noise from large wind turbines – Sound power measurement method", Report AV 135/08, Delta, April 2008.
- [44] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Results from sound power measurements", Report AV 136/08, Delta, revised version December 2008.
- [45] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Results from previous sound power measurements", Report AV 137/08, Delta, May 2008.
- [46] D. Hoffmeyer, B. Søndergaard, "Low frequency noise from large wind turbines – Measurements of sound insulation of facades", Report AV 1097/08, Delta, April 2008.
- [47] IEC 61400-11, "Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques", Second edition 2002 plus Amendment 1 2006, International Technical Commission, Geneva.
- [48] ISO 9613-2, "Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation", International Organization for Standardization, Geneva, 1996.
- [49] ISO 9613-1, "Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere", International Organization for Standardization, Geneva, 1993.
- [50] "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller", Bekendtgørelse nr. 1518 af 14. december 2006, Miljøministeriet, København.
- [51] ISO 140-5, "Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades", International Organization for Standardization, Geneva, 1998.
- [52] J. Jakobsen, "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer; Rumakustiske forhold ved lave frekvenser", Rapport AV67/96, Delta Akustik & Vibration, 1996.
- [53] C. Simmons, "Measurement of sound pressure levels at low frequencies in rooms. Comparison of available methods and standards with respect to microphone positions", Acta Acustica, **85** (1), 88-100, 1999.
- [54] S. Pedersen, H. Møller, K. P. Waye, "Indoor measurements of noise at low frequencies - Problems and solutions", J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **26** (4), 249-270, 2007.
- [55] J. Brunskog, F. Jacobsen, "Measurements of low-frequency noise in rooms", Notat, Miljøstyrelsen, 2008.
- [56] S. Wagner, R. Bareiß, G. Guidati, "Wind turbine noise", Springer Berlin, ISBN 3-540-60592-4, 1996.

- [57] ISO 1996-2, "Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels", Second Edition, International Organization for Standardization, Geneva, 2007.
- [58] "Måling af ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 6, Miljøstyrelsen, 1984.
- [59] S. Oerlemans, G. Schepers, "Prediction of wind turbine noise and comparison to experiment", Proc. Second International Meeting on Wind Turbine Noise, Lyon, 2007.
- [60] S. Oerlemans, M. Fisher, T. Maeder, K. Kögler, "Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations", AIAA Journal, **47** (6), 1470-1481, 2009.
- [61] E. Pedersen, K. P. Waye, "Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship", J. Acoust. Soc. Am., **116** (6), 3460-3470, 2004.
- [62] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, J. Bouma, "Response to noise from modern wind farms in The Netherlands", J. Acoust. Soc. Am., **126** (2), 634-643, 2009.
- [63] T. H. Pedersen, K. S. Nielsen, "Genevirkning af støj fra vindmøller", Rapport 150, Delta Akustik & Vibration, 1996.
- [64] "Buller från vindkraft – Riktvärden för ljud från vindkraft" (Noise from wind turbines – Recommended limits for sound from wind turbines), Naturvårdsverket, Stockholm, 2009.
- [65] "Ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 5, Miljøstyrelsen, 1984.
- [66] "Guidelines for community noise", B. Berglund, T. Lindvall, D. H. Schwela (editors), World Health Organization, Geneva, 1999.
- [67] "Høring af udkast til bekendtgørelse om støj fra vindmøller", Miljøstyrelsen, 30. oktober 2006.
- [68] IEC TS 61400-14, "Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values", International Technical Commission, Geneva, 2005.
- [69] S. Broneske, "Comparison of Wind Turbine Manufacturers' Noise Data for Use in Wind Farm Assessments", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.
- [70] Fritz van den Berg, Eja Pedersen, Jelte Bouma, Roel Bakker, "WINDFARMperception – Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents", Final report 3. June 2008, University of Groningen, University of Gothenburg.
- [71] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Summary and conclusions on measurements and methods", Report AV 140/08, Delta, revised version December 2008.
- [72] "Ljud från vindkraftverk" (Sound from wind turbines), Rapport 6241, Naturvårdsverket, Stockholm, 2001.
- [73] "Night noise guidelines for Europe", World Health Organization, Copenhagen, 2009.
- [74] W. E. Zorumski, W. L. Willshire Jr., "Downwind sound propagation in an atmospheric boundary layer", AIAA Journal, **5** (5), 515-523, 1989.
- [75] L. Johansson, "Sound propagation around off-shore wind turbines", Proc. 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, 2003, 1481-1487.
- [76] K. Bolin, M. Boué, I. Karasalo, "Long range sound propagation over a sea surface", J. Acoust. Soc. Am. **126** (5), 2191-2197, November 2009.
- [77] G. P. van den Berg, "Wind gradient statistics up to 200 m altitude over flat ground", Proc. First International Meeting on Wind Turbine Noise, Berlin, 2005.
- [78] P. Botha, "The use of 10 m wind speed measurements in the assessment of wind farm developments", Proc. First International Meeting on Wind Turbine Noise, Berlin, 2005.

- [79] W. K. G. Palmer, "Uncloaking the nature of wind turbines – using the science of meteorology", Proc. Second International Meeting on Wind Turbine Noise, Lyon, 2007.
- [80] D. Bowdler, "Wind Shear and its Effect on Noise Assessment", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.
- [81] G. P. van den Berg, "Effects of the wind profile at night on wind turbine sound", J. Sound and Vibration, **277**, 955-970, 2004.
- [82] G. P. van den Berg, "The beat is getting stronger: The effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines", J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **24** (1), 1-24, 2005.
- [83] W. K. G. Palmer, "A new explanation for wind turbine whoosh – wind shear", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.
- [84] M. Almgren, S. Schönfeld and J. Grönlund, "Sound Emission and Sound Propagation for Wind Turbines in Forest Terrains", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009,
- [85] B. Søndergaard, "The next version of the IEC 61400-11 measurement method", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.