

Trends hören . 2018 Jan-Dez; 22: 2331216518789551.

PMCID: PMC6081752

Online veröffentlicht am 7. August 2018

PMID: [30084316](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30084316/)

doi: [10.1177 / 2331216518789551](https://doi.org/10.1177/2331216518789551)

übersetzt aus

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6081752/>

Ein Überblick über die möglichen wahrnehmungsbezogenen und physiologischen Auswirkungen von Windkraftanlagengeräuschen

[Simon Carlile](#) , ^{1, 2} [John L. Davy](#) , ^{3, 4} [David Hillman](#) , ⁵ und [Kym Burgemeister](#) ⁶

¹Faculty of Medicine, University of Sydney, Australia

²Starkey Hearing Research Centre, Berkeley, CA, USA

³Royal Melbourne Institute of Technology University, Australia

⁴CSIRO Infrastructure Technologies, Clayton South, Australia

⁵Sir Charles Gairdner Hospital, Nedlands, Australia

⁶Arup, East Melbourne, Australia

Simon Carlile, Faculty of Medicine, University of Sydney, NSW 2006 Australia. Email:

simonc@physiol.usyd.edu.au

Received 2018 Apr 18; Revised 2018 Jun 24; Accepted 2018 Jun 25.

Copyright © The Author(s) 2018

Creative Commons Non Commercial CC BY-NC: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 License (<http://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is attributed as specified on the SAGE and Open Access pages (<https://us.sagepub.com/en-us/nam/open-access-at-sage>).

Abstrakt

In dieser Übersicht wird die Art des von Windkraftanlagen erzeugten Geräusches berücksichtigt, wobei der Schwerpunkt auf dem Niederfrequenzschall (LF) und dem Infraschall (IS) liegt, um die Nützlichkeit der Schallmessungen zu verstehen, bei denen Menschen arbeiten und schlafen. Ein zweiter Schwerpunkt betrifft die Hinweise auf Mechanismen der physiologischen Transduktion von LF / IS oder die Hinweise auf somatische Wirkungen von LF / IS. Während die aktuellen Beweise die Transduktion nicht endgültig belegen, handelt es sich um einen starken Anscheinsfall. Es gibt wesentliche offene Fragen bezüglich der Messung und Ausbreitung von LF und IS und ihrer Kodierung durch das Zentralnervensystem, die für mögliche Wahrnehmungs- und physiologische Wirkungen relevant sind. Eine Reihe möglicher Forschungsbereiche wird identifiziert.

Schlüsselwörter: Hörübertragung, Infraschall, niederfrequenter Schall, Windkraftanlagengeräusche

Einführung

In den letzten Jahren hat die Debatte über die Auswirkungen von Windkraftanlagenlärm (WTN) auf die menschliche Gesundheit zugenommen. Kürzlich wurde eine Reihe von Übersichten veröffentlicht (z. B. [Knopper et al., 2014](#) ; [McCunney et al., 2014](#) ; [Schmidt & Klokke, 2014](#) ; Van Kamp & Van Den Berg, 2017), einige unter der Schirmherrschaft verschiedener Regierungsstellen in Australien ([National Health and Medical Research Council, 2015](#)), Kanada ([Council of Canadian Academies, 2015](#)) und Frankreich ([Lepoutre et al., 2017](#)), wobei einige in der indexierten wissenschaftlichen

Literatur erscheinen (zuletzt die Health Canada-Studie; D. . [Michaud, 2015](#) ; DS . [Michaud et al, 2016a](#) , [2016b](#); DS [Michaud, Keith et al., 2016](#)). Viele dieser Studien haben einen epidemiologischen Ansatz gewählt, der verschiedene Metaanalysen der vorhandenen Forschungsberichte zu den gesundheitlichen Auswirkungen von WTN umfasst. Im Gegensatz dazu zeigt die populäre Presse ein weitgehend polarisiertes Bild, in dem der Diskurs oft weniger informiert und einfühlsamer erscheint als wissenschaftlich fundiert.

Es gibt eindeutig komplexe Faktoren im Zusammenhang mit Beschwerden über WEA, die neben den Gesundheits- und Sicherheitsbedenken auch finanzielle und andere wesentliche Faktoren sowie mögliche Wechselwirkungen mit der Wahrnehmung von Geräten durch Einzelpersonen, einschließlich ihres Aussehens und der von ihnen verursachten Geräusche, umfassen. Diese Faktoren tragen alle potenziell zur Belästigung durch WEA bei. Viele dieser Bedenken - manchmal auch als Nocebo-Effekte bezeichnet - wurden kürzlich in der Literatur [besprochen](#) ([Chapman & Crichton, 2017](#) ; CH [Hansen, Doolan & Hansen, 2017](#)). Es scheint jedoch wenig Diskussion (oder systematische Überprüfung) über mögliche wahrnehmungsbezogene und physiologische Wirkungen von WTN auf der Ebene des Individuums gegeben zu haben. Dies ist die Hauptmotivation für diese Überprüfung. Diese Überprüfung berücksichtigt nicht die wichtige Frage, ob WTN angesichts der zuvor erwähnten Überprüfungen und Debatten die menschliche Gesundheit beeinflusst, sondern konzentriert sich auf zwei wichtige grundlegende Fragen. Im ersten Abschnitt werden aktuelle Forschungsergebnisse untersucht, in denen die Art des von WEA erzeugten Schalls untersucht wird, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf dem niederfrequenten Schall (LF) und dem Infraschall (IS) sowie auf den Mechanismen seiner Erzeugung, Ausbreitung und Messung der Exposition des Menschen liegt. Das Ziel dieses ersten Teils ist es, die Genauigkeit und Nützlichkeit von Messungen dieses Schalldrucks an Orten zu verstehen, an denen Menschen arbeiten und schlafen. Das zweite Problem betrifft die Frage, ob es plausible Mechanismen für die Transduktion von LF / IS oder Hinweise auf somatische Wirkungen von LF / IS gibt. Dies ist eine wichtige Frage, da ein Schlüsselement in jedem Argument, das versucht, die WTN-Exposition mit Krankheit in Verbindung zu bringen, das Ausmaß ist, in dem dieser Klang einen somatischen Einfluss haben kann. Abschließend werden einige der vorhandenen Peer-Review-Untersuchungen überprüft, in denen die Wahrnehmungseffekte der Exposition gegenüber LF und IS im Labor untersucht werden. Einige der vorhandenen Peer-Review-Untersuchungen, die die Wahrnehmungseffekte der Exposition gegenüber LF und IS im Labor untersuchen, werden überprüft. Einige der vorhandenen Peer-Review-Untersuchungen, die die Wahrnehmungseffekte der Exposition gegenüber LF und IS im Labor untersuchen, werden überprüft.

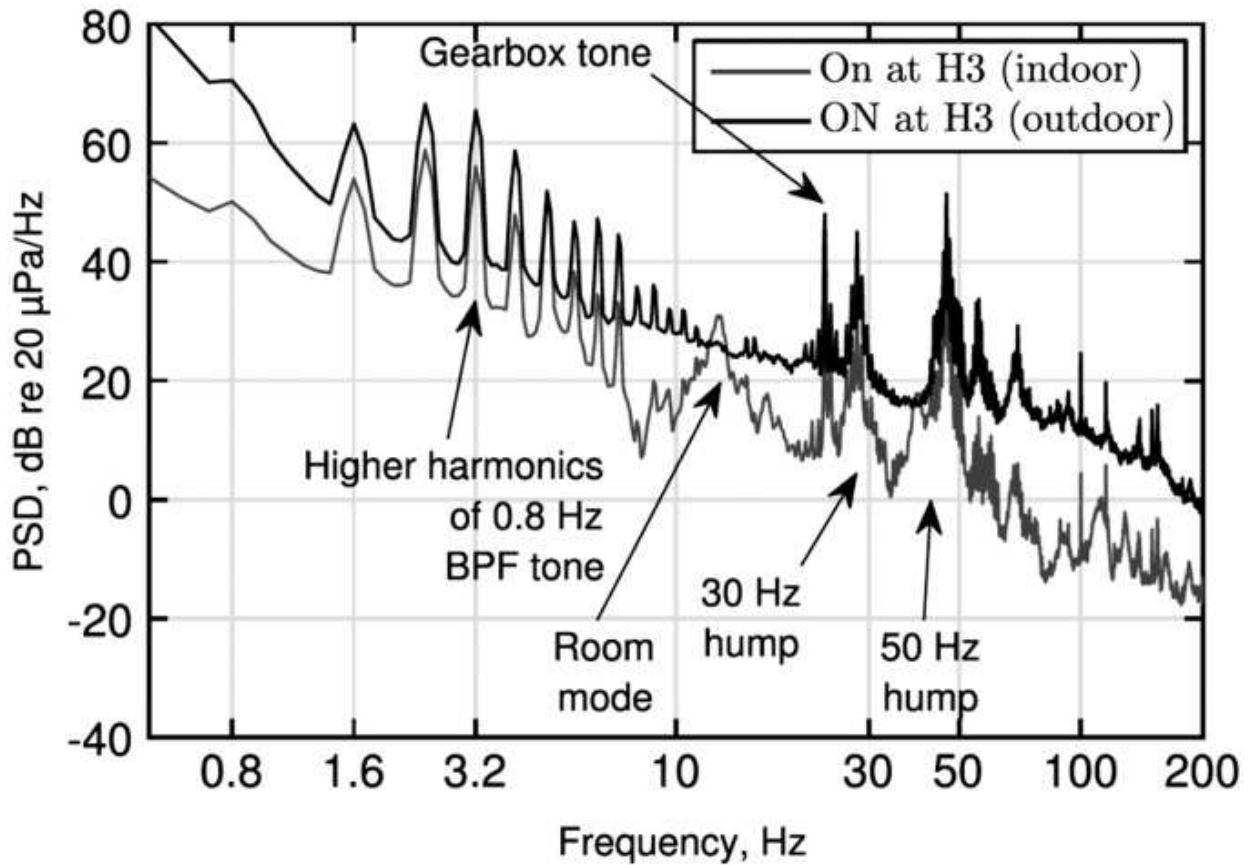
Diese Überprüfung beschränkte sich weitgehend auf die wissenschaftliche Literatur, die durch die relevanten Peer-Review-Artikel in indexierten Zeitschriften dargestellt wird.

WTN , LF und IS

Es gibt eine Reihe potenzieller Schallgeneratoren, die von WEA erzeugt werden, einschließlich mechanischer Generatoren (Getriebe, elektrische Generatoren, Kühlsysteme usw. in der WT-Gondel) sowie Wechselwirkungen zwischen den beweglichen Schaufeln und der Luft, insbesondere bei Abweichungen in Durchfluss, Einfallswinkel und Druck.

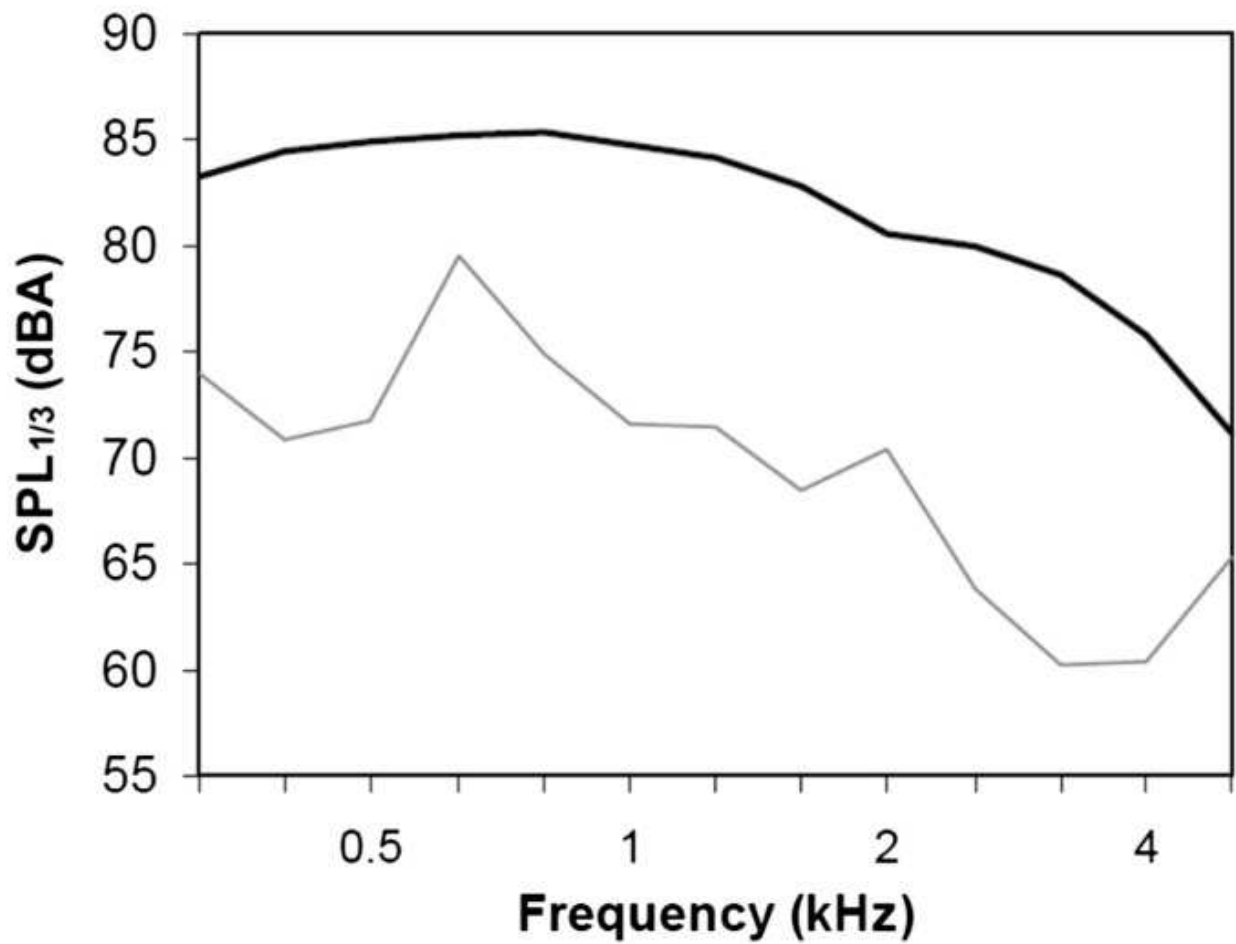
Schall, der von rotierenden Schaufeln auf modernen Aufwind-WTs erzeugt wird (wobei sich der Rotor aus der Richtung des Windes auf der Vorderseite der Gondel befindet), resultiert teilweise aus einer Wechselwirkung zwischen dem Luftstrom, der durch die rotierende Schaufel gestört wird, die mit dem Stützturm zusammenwirkt (z. B. [Jung, Cheung, Cheong & Shin, 2008](#) ; [Sugimoto, Koyama, Kurihara & Watanabe, 2008](#) ; ausführlicher [Überblick über](#) Van den Berg, 2006; [Zajamšek, Hansen, Doolan & Hansen, 2016](#)). Der durch diesen Mechanismus erzeugte Schall ist tonaler Natur mit einer Grundfrequenz bei der Blattdurchgangsfrequenz (BPF) und einer Reihe von ungefähr sechs Harmonischen ([Abbildung 1](#); Für weitere Einzelheiten siehe [Schomer, Erdreich, Pamidighantam & Boyle, 2015](#) , ihre [Abbildungen 2](#) und [Wenn Sie 3](#)). Die Grundfrequenz ist abhängig von der

Rotationsgeschwindigkeit und der Anzahl der Schaufeln. Bei einem modernen WT liegt die von diesem Mechanismus erzeugte Schallenergie im Allgemeinen deutlich unter 20 Hz.



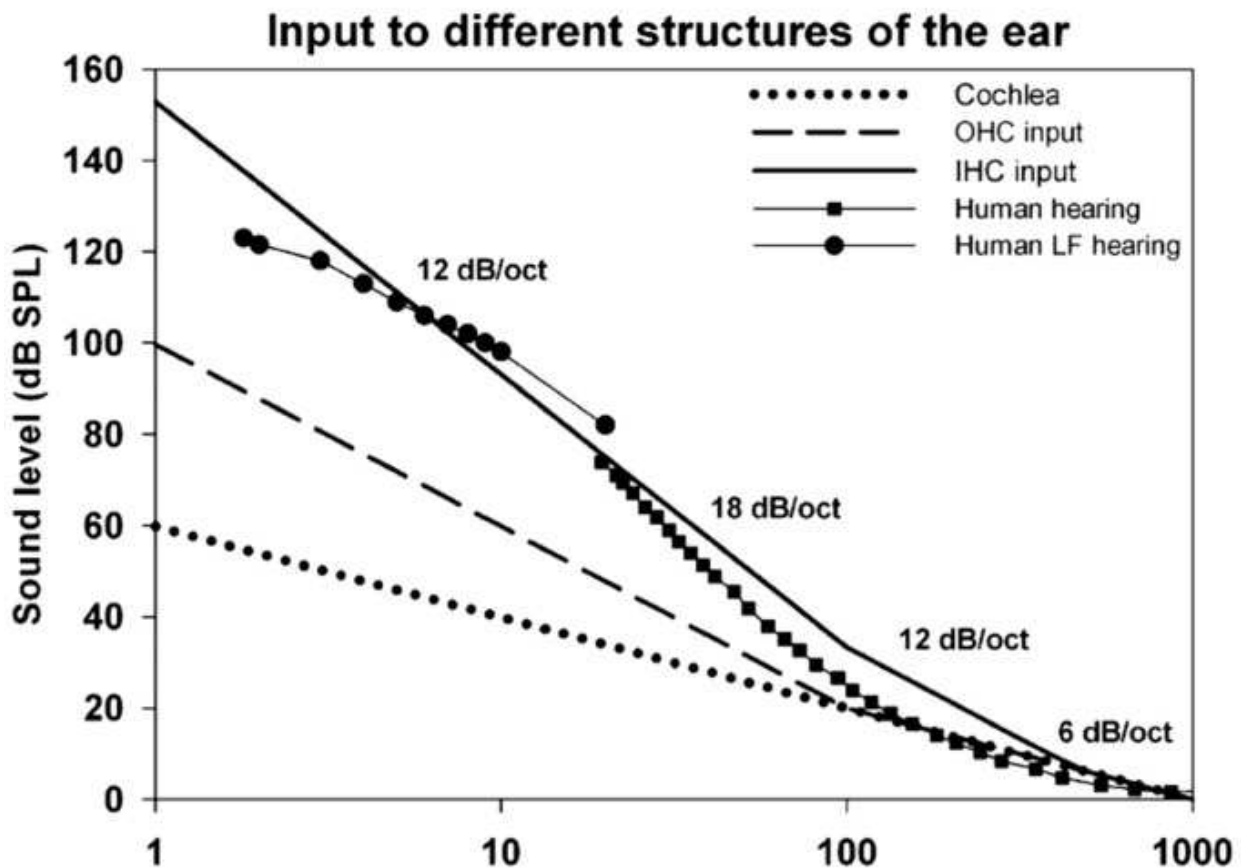
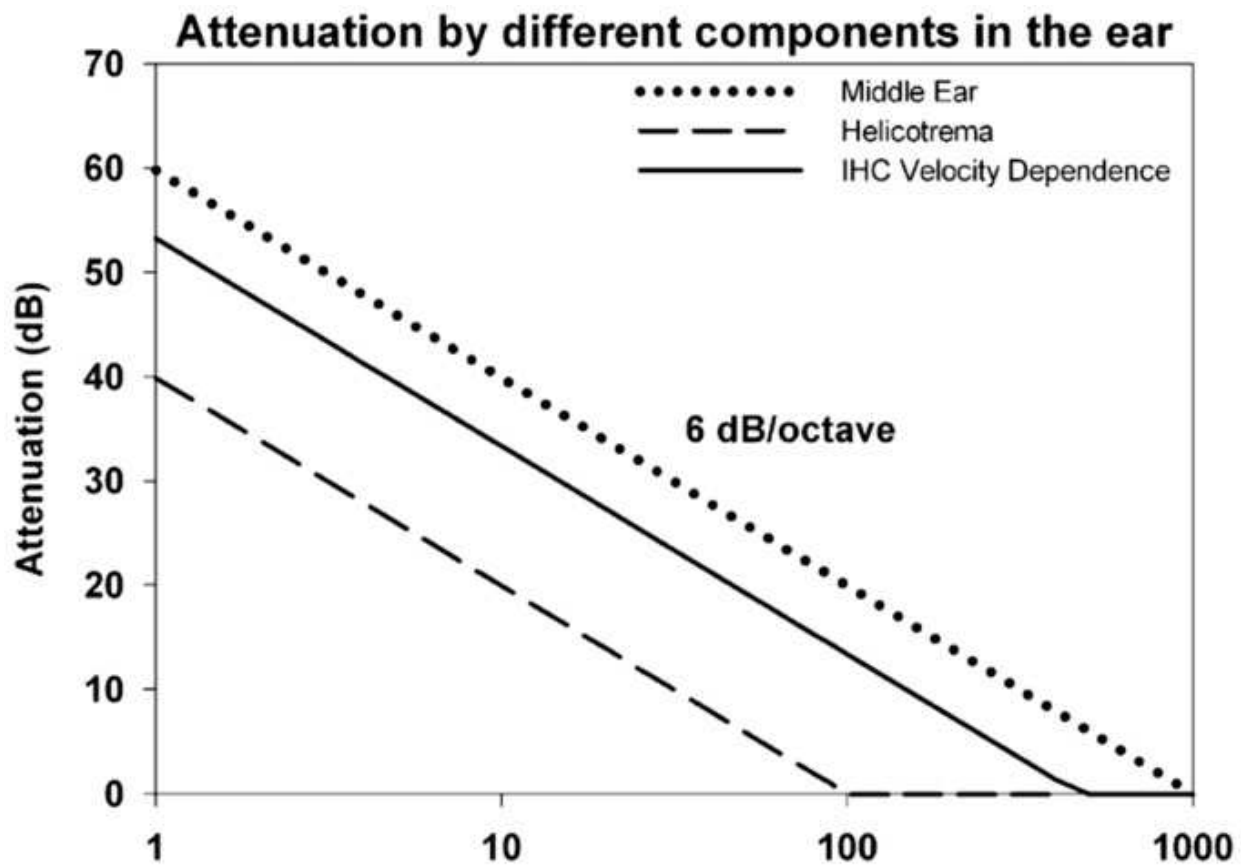
[Abbildung 1.](#)

Vergleich der spektralen Dichte im Innen- und Außenbereich, aufgezeichnet in einer unbewohnten Wohnung, etwa 3 km von einer Windkraftanlage entfernt. BPF = Blattdurchgangsfrequenz; PSD = Leistungsspektraldichte. *Quelle:* Wiedergabe mit Genehmigung von Zajamsek et al. (2016), Abbildung 4.



Figur 2.

A-gewichtete durchschnittliche Spektren von Nabengeräuschen (dünne Linie) und Schaufelgeräuschen (dicke Linie), die von einer dreiflügeligen Pitch-gesteuerten GAMESA G58-Windkraftanlage (Rotordurchmesser 58 m) unter Verwendung einer akustischen Anordnung von 148 Panasonic WM-61-Mikrofonen 58 aufgenommen wurden m gegen den Wind von der Turbine. *Quelle:* Wiedergabe mit Genehmigung von [Oerlemans et al. \(2007\)](#).



[In einem separaten Fenster öffnen](#)

Figur 3.

Oberes Feld: Geschätzte Eigenschaften von Hochpassfiltern im Zusammenhang mit der Cochlea-Signalverarbeitung (basierend auf [Cheatham & Dallos, 2001](#)). Die Kurven zeigen die niederfrequente Dämpfung durch das Mittelohr (6 dB / Oktave unter 1000 Hz), das Helicotrema (6 dB / Oktave unter 100 Hz) und durch die Flüssigkeitskopplung des IHC, die zur Abhängigkeit des IHC vom Stimulus führt

Geschwindigkeit (6 dB / Oktave unter 470 Hz). Unteres Feld: Kombination der drei Prozesse im oberen Feld zu Schwellenwertkurven, die Folgendes zeigen: Eingabe in die Cochlea (gepunktet) als Ergebnis der Mittelohrschwächung, Eingabe in das IHC als Ergebnis zusätzlicher Filterung durch das Helikotrema und Eingabe in das IHC aufgrund ihrer Geschwindigkeitsabhängigkeit. Zum Vergleich ist die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs im hörbaren Bereich (ISO226, 2003) und die Empfindlichkeit des Menschen gegenüber Infraschall dargestellt ([Moller & Pedersen, 2004](#))). Die summierten Filterfunktionen berücksichtigen die steile (18 dB / Oktave) Abnahme der Empfindlichkeit unter 100 Hz. OHC = äußere Haarzellen; **IHC = innere Haarzellen**; LF = Niederfrequenzton.

Quelle: Wiedergabe mit Genehmigung von [Salt and Hullar \(2010\)](#) ,Figur 3.

Andere Schallquellen sind das aerodynamische Geräusch, das durch den Luftstrom über und hinter der Hinterkante der Schaufeln (Hinterkantengeräusch) und das mechanische Geräusch der Gondelausrüstung erzeugt wird. Im Gegensatz zum BPF-Rauschen ist das aerodynamische Rauschen der Schaufeln breitbandig mit einem Tiefpass-Roll-Off (~ 5 dB pro Oktave > 1 kHz; [Figur 2](#);; [Oerlemans, Sijtsma & López, 2007](#) , ihre Abbildungen 5, 9 und 11). Die Mittenfrequenz (500–750 Hz, A-gewichtet) hängt von der Größe und Stromerzeugungskapazität der Turbine mit einer Abwärtsverschiebung von etwa 1/3 Oktave ab, wobei Turbinen mit 2,3 bis 3,6 MW mit Turbinen mit <2 MW in Begleitung eines Verwandten verglichen werden Erhöhung des Energieanteils bei niedrigen Frequenzen für größere Turbinen ([Möller & Pedersen, 2011](#)).

Zusammenfassend gibt es sowohl vom theoretischen als auch vom empirischen Standpunkt aus zahlreiche Belege dafür, dass eine Komponente der von einem WT erzeugten Schallenergie im niedrigen und infraschallischen Frequenzbereich liegt. Es gibt drei weitere Eigenschaften von LF, die für das Verständnis der von WTs erzeugten Schallmessungen relevant sind.

Erstens haben sowohl Modellierungs- als auch Messdaten gezeigt, dass die atmosphärische Grenzschicht, die sich vom Boden bis zwischen 100 und Tausenden von Metern erstreckt, unter verschiedenen gängigen meteorologischen Bedingungen als **niederfrequenter Wellenleiter** fungieren kann (zur Übersicht siehe [Marcillo, Arrowsmith](#)), [Blom & Jones, 2015](#)). Mit einer stabilen Grenzschicht, die nachts üblich ist, tritt LF-Strahlung als zylindrische Welle auf und folgt einem zweidimensionalen [Abklingmodell](#) (–3 dB pro Verdoppelung der Entfernung), wenn sie vor dem Wind einer Quelle gemessen wird ([Zorumski & Willshire, 1989](#)) im Gegensatz zu einem dreidimensionalen Abklingmodell für höherfrequenten hörbaren Schall. **Unter solchen Bedingungen fallen daher die LF- und IS-Pegel mit der Entfernung langsamer ab als bei höheren Frequenzen.** In Übereinstimmung damit wurde kürzlich die [Schallausbreitung](#) am BPF eines Windparks mit 60 Turbinen mit besonders empfindlichen Geräten **bis zu 90 km** von der Quelle gemessen ([Marcillo et al., 2015](#)).

Zweitens haben IS und LF Wellenlängen, die mit den Abmessungen von Gebäudestrukturen wie Häusern vergleichbar sind, was auch **resonante Wechselwirkungen mit diesen Strukturen** ermöglicht. Jüngste hochauflösende Daten, die innerhalb und außerhalb von Wohnungen aufgezeichnet wurden, zeigen eine solche Resonanz von Gebäudehohlräumen im Bereich von 10 bis 20 Hz ([Pedersen, Møller & Waye, 2007](#) ; [Schomer et al., 2015](#) ; [Zajamšek et al., 2016](#)) zusammen mit andere Gebäuderesonanzen über einen Bereich von 2 bis 80 Hz. **Drittens ist die Schalldämpfung durch Gebäudewände bei niedrigen Frequenzen im Vergleich zu höherfrequenten Geräuschen viel geringer** (KL Hansen, Hansen & Zajamšek, 2015; [Thorsson et al., 2018](#)) und sehr unregelmäßig wegen der Gebäuderesonanzen. Diese beiden Beobachtungen zeigen, dass äußere Messungen des LF- und IS-Drucks nicht unbedingt gute Prädiktoren für den inneren Schalldruck sind, da diese von den besonderen Eigenschaften der Struktur abhängen.

Genaue Messungen der Schalldruckpegel von LF und IS um WTs sind aufgrund der sehr langen Schallwellenlängen bei so niedrigen Frequenzen und der hohen Anfälligkeit von Messmikrofonen für

atmosphärische Turbulenzen (dh Windgeräusche) **kompliziert**. Spezielle Strategien wie sehr leistungsstarke Windschutzscheiben ([Dauchez, Hayot & Denis, 2016](#) ; K. Hansen, Zajamsek & [Hansen, 2014](#) ; [Turnbull, Turner & Walsh, 2012](#) ; [Zajamšek et al., 2016](#)) und die Verwendung von Mikrofonarrays mit ausgefeilter Signalverarbeitung ([Walker, 2013](#)) wird gebraucht. Es gibt eine komplexe Beziehung zwischen der Windgeschwindigkeit und dem Einfallswinkel, den atmosphärischen Bedingungen, dem Gelände, der Entfernung zur Quelle und der Anzahl und Verteilung der Quellen sowie der Messung von LF und IS (für eine hervorragende Übersicht siehe [Van den Berg, 2006](#)). Externe Maßnahmen werden durch Windgeräusche und andere Wechselwirkungen mit dem Messgerät erschwert. Die überwiegende Mehrheit der Messungen erfolgt extern (und nicht intern, wenn die größte Behinderung gemeldet wird) und verwendet **eine A-Gewichtung, die die LF- und IS-Frequenzen effektiv herausfiltert**. Selbst niedrigere Passgewichte (z. B. C-Gewichtung) schließen wichtige niedrige Frequenzen insbesondere beim BPF und den ersten Harmonischen aus. Maßnahmen, die außerhalb von Wohnungen durchgeführt werden, sind nicht unbedingt gute Prädiktoren für den Innendruck von Wohnungen, in denen Menschen den größten Teil ihrer Zeit verbringen (insbesondere schlafen). Interne Messungen sind wiederum kompliziert und werden von Akustikern aufgrund des Einflusses der Raummodi und der beruflichen Geräuschquellen wie Kühlschränke und anderer Haushaltsgeräte häufig vermieden. Dass es in und um Windparks eine breite Palette von gemeldeten LF- und IS-Werten gibt, sollte angesichts der Vielfalt der relevanten Faktoren nicht überraschen (z. [Jung et al., 2008](#) ; [Schomer et al., 2015](#) ; [Sugimoto et al., 2008](#) ; [Van den Berg, 2006](#)). Angesichts einiger der später besprochenen physiologischen Arbeiten (insbesondere in Bezug auf Hydrops und Basalmembranvorspannung) kann sich die Verwendung eines **Dosimetrieansatzes für die LF- und IS-Exposition als geeignetere Maßnahme** zur Bestimmung der Exposition des Menschen erweisen, obwohl dies die Entwicklung neuer Geräte und Messtechniken.

Schalldruck-Gewichtungsskalen und WTN

Die oben genannten Überlegungen deuten darauf hin, dass ein vollständiges Verständnis der von WEA emittierten Schallenergie sorgfältige Mess- und Modellierungsansätze erfordert, die für den gesamten Bereich möglicher Schallfrequenzen empfindlich sind. Während die derzeitige Praxis des Messens und Analysierens von WTN unter Verwendung einer A-gewichteten Korrektur Bequemlichkeit und Praktikabilität bietet, wird sie notwendigerweise einen Großteil der tatsächlich von einem WT emittierten LF-Energie herausfiltern. Dieser Ansatz scheint durch praktische Messüberlegungen und die Annahme motiviert zu sein, dass aus Sicht der menschlichen Wahrnehmung die Empfindlichkeit des auditorischen Systems gegenüber dem Schallpegel (Lautheitswahrnehmung) nichtlinear ist und bei Frequenzen unter 1 kHz, die -50 erreichen, sehr stark abfällt dB um 20 Hz ([Keith et al., 2016](#) ; [Yokoyama, Sakamoto & Tachibana, 2014](#)). Diese Autoren argumentierten auch, dass der A-bewertete Schallpegel eines Windparks in hohem Maße mit den Schallpegeln von LF und IS korreliert, sodass A-bewertete Maßnahmen als Proxy für LF- und IS-Pegel fungieren könnten. Diese Annahme basiert jedoch auf 1/3 Oktave C-gewichteten Maßen, die sich nur auf 16 Hz erstrecken und weit über dem BPF liegen, und stimmt nicht mit einigen neueren Daten überein (z. B. [Hansen, Walker, Zajamsek & Hansen, 2015](#) ; [Schomer et al., 2015](#)). Wie bereits erwähnt, gibt es auch komplizierende Faktoren in Bezug auf den möglichen Unterschied in der Ausbreitung von IS und LF im Vergleich zu den mittleren bis hohen Frequenzen, für die Menschen empfindlich sind. Dies deutet darauf hin, dass selbst wenn A-gewichtete Maße mit der gesamten WT-Energie an einem bestimmten Punkt im Raum korreliert sind, dies möglicherweise keinen ausreichenden Hinweis auf die relativen Schallpegel in anderen Entfernungen von der Quelle liefert (siehe auch [Möller & Pedersen, 2011](#)).

Es besteht eindeutig ein Bedarf an mehr Forschung und Entwicklung von Methoden, um das Ausmaß der Exposition von Personen gegenüber LF und IS genau zu messen und zu bewerten, insbesondere in der gebauten Umgebung, in der Personen leben und schlafen. Um klar zu sein, muss sich diese Arbeit zunächst auf die Sammlung hochwertiger wissenschaftlicher Daten konzentrieren, um Einblicke in die Mechanismen und Prozesse im Spiel zu erhalten. Während dies später Auswirkungen auf Methoden

zur Durchführung akustischer Messungen im Feld haben kann, muss der Schwerpunkt zunächst auf der Erfassung hochwertiger wissenschaftlicher Daten liegen, um die Fragen der Schallausbreitung und der Exposition des Menschen zu beantworten.

Wahrnehmungsempfindlichkeit

Die **Wahrnehmungsempfindlichkeit** gegenüber LF und IS wird seit mehr als 80 Jahren untersucht (Übersicht in [Møller & Pedersen, 2004](#)), und obwohl es keinen internationalen Standard gibt, stimmen die experimentellen Daten gut überein. **Der Schwellenwert steigt stark von 80 dB (SPL) bei 20 Hz auf etwa 124 dB SPL bei 2 Hz an.** Zu den Wahrnehmungseffekten gehören auch Vibrationen und das Druckgefühl am Trommelfell. In Übereinstimmung mit diesen Daten haben [Yokoyama et al. \(2014\)](#) gezeigt, dass Zuhörer im Labor bei Konzentrationen von bis zu 56 dBA unempfindlich gegenüber resynthetisiertem WTN waren.

Aus einer Vielzahl von biomechanischen und anderen physiologischen Gründen ist bekannt, dass die Cochlea ein stark nichtlinearer Wandler ist. Angesichts der relativ hohen Schallpegel, die erforderlich sind, um eine Wahrnehmungsreaktion auf IS zu erreichen, **stellt sich die Frage, ob dies eine neuronale Transduktion bei der Grundfrequenz oder eine Empfindlichkeit gegenüber nichtlinearen Verzerrungsprodukten darstellt,** die auf der Basilarmembran erzeugt werden. Während die Transduktionsmechanismen später genauer betrachtet werden, zeigen neuere Daten zur funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) ([Dommes et al., 2009](#); [Weichenberger et al., 2015](#)) eine auditive kortikale Aktivierung eines 12-Hz-Tons bei allgemein breiten Schwellenwerten im Einklang mit denen von [Møller und Pederson \(2004\)](#) überprüft. Dies weist darauf hin, dass unabhängig davon, ob IS als fundamentale oder als Folge nichtlinearer Verzerrungsprodukte transduziert wird, dies zur Aktivierung des auditorischen Kortex führt und eine primäre neuronale Darstellung dieser akustischen Reize liefert.

Eine neuere fMRI-Studie ([Weichenberger et al., 2017](#)) verfolgte einen anderen analytischen Ansatz unter Verwendung einer regionalen Homogenitäts-Ruhemodus-Analyse und eines relativ verlängerten (200 s) 12-Hz-Stimulus. Sie berichten, dass **unterschwellige Schallpegel** (2 dB unter dem gemessenen Schwellenwert) auch **Gehirnregionen aktivierten**, von denen bekannt ist, dass sie an der autonomen und emotionalen Verarbeitung beteiligt sind: Insbesondere der vordere cingulöse Kortex und die Amygdala - letztere sind vermutlich **mit Stress und Angst verbunden psychische Störungen**. Die Amygdala ist auch Teil des nicht-matiskalen Hörwegs, der die subkortikale Verarbeitung vermittelt und in das retikuläre Aktivierungssystem eingeht, eine Schlüsselkomponente, die Erregung und Schlaf reguliert (zur Diskussion siehe [Weichenberger et al., 2017](#)). Diese letztere Beobachtung liefert eine **Erklärung** dafür, wie eine unterschwellige IS-Stimulation zu Erregung führen und möglicherweise **Schlafstörungen vermitteln kann, über die einige Personen berichten.**

Im Zusammenhang mit der Frage der individuellen Unterschiede haben [Møller und Pedersen \(2004\)](#) die Beobachtung gemacht, dass der Dynamikbereich des Hörsystems bei niedrigen Frequenzen signifikant abnimmt, was sich in der extremen Komprimierung der Konturen gleicher Lautstärke bei 2 Hz (20–80 Phon von 130 bis 140 dB) zeigt. Dies weist darauf hin, dass bereits kleine Druckänderungen zu sehr großen Änderungen der Lautheitswahrnehmung führen können. Ebenso können kleine Schwankungen der Schwelle zwischen Individuen signifikante Unterschiede in der wahrgenommenen Lautstärke bei gleichem Druckpegelstimulus hervorrufen. Dies würde auch zu Unterschieden bei den Schwellenwerten führen, die im Zusammenhang mit dem jüngsten Bericht von [Weichenberger et al.](#) Einige der individuellen Unterschiede bei den berichteten physiologischen Wirkungen von WTN erklären könnten. Ein einfacher Test dieser Vorhersage wäre die Messung der IS-Schwellenwerte von Personen, die physiologische Auswirkungen einer WTN-Exposition melden, im Vergleich zu Personen, die unter denselben Expositionsbedingungen keine Auswirkungen melden. Wenn sich dies als diskriminierend herausstellen würde, würden einfache IS-Schwellenwerte einen Indikator für die wahrscheinliche Anfälligkeit für WTN liefern. Solche Messungen könnten

Wahrnehmungsimpressionen beinhalten ([Kuehler, Fedtke & Hensel, 2015](#)) oder objektive Bewertungen wie fMRI ([Weichenberger et al., 2017](#)) oder Magnetenzephalologie ([Bauer et al., 2013](#)).

Physiologische Transduktion von LF und IS

Bevor die Beweise für eine mögliche sensorische oder andere Übertragung von LF und IS betrachtet werden, ist es nützlich, diese Diskussion in einen Kontext zu setzen. Wie im Abschnitt Einführung angegeben, ist das Ausmaß, in dem Schallenergie den menschlichen Körper wahrnehmungsmäßig oder somatisch beeinflussen kann, eine kritische Komponente bei jedem Argument, das versucht, den Schallpegelausgang von WEA (oder einem mechanischen Gerät) mit einer Krankheit in Verbindung zu bringen. Wenn es keinen Einfluss gibt, ist es schwierig zu argumentieren, dass gemeldete gesundheitliche Auswirkungen durch Geräusche oder Vibrationen hervorgerufen werden könnten. Beispielsweise sind Menschen in städtischen Umgebungen täglich erheblichen Qualitäten schwacher Mikrowellenstrahlung in Form von Kommunikationsübertragungen (Radio, Fernsehen, Mobilfunknetz usw.) ausgesetzt, ohne dass bekannte gesundheitliche Auswirkungen bekannt sind ([Valberg, Van Deventer & Repacholi, 2007](#)). Dies wäre wahrscheinlich eine Folge der Tatsache, dass Mikrowellenstrahlung bei diesen Expositionsniveaus kein wirksamer Reiz für die Wahrnehmung oder den Körper des menschlichen Körpers ist. Im Gegensatz dazu gibt es viele Debatten und Meinungen darüber, ob das menschliche Nervensystem empfindlich gegenüber Infraschall und LF ist, die von WTs emittiert werden. Leider gibt es nur sehr wenige von Experten begutachtete Veröffentlichungen, die die möglichen physiologischen Mechanismen berücksichtigen, die der sensorischen Transduktion von LF und IS zugrunde liegen könnten. Es gibt eine viel größere Auswahl an Meinungsbeiträgen zu diesem Thema in verschiedenen Formaten (populärwissenschaftliche Magazine, Zeitungsartikel sowie selbstveröffentlichte Monographien und Newsletter). Anschließend werden wir hauptsächlich Berichte oder Überprüfungen in von Experten begutachteten wissenschaftlichen Veröffentlichungen berücksichtigen.

In einer Übersicht in *Hearing Research*, [Salt and Hullar \(2010\)](#) skizzieren Sie eine Reihe möglicher Mechanismen, durch die LF und IS die Funktion des Innenohrs beeinflussen und zu einer neuronalen Stimulation führen können, die als Schall wahrgenommen werden kann oder nicht. Diese Autoren beschreiben, wie das Innenohr unter normalen physiologischen Umständen bemerkenswert unempfindlich gegenüber LF und IS ist. Dies ergibt sich aus der Notwendigkeit, den Sinnesapparat mechanisch auf Geräusche von größtem biologischen Interesse abzustimmen (in diesem Fall von 100 Hz bis zu einigen Kilohertz, was der Bereich der menschlichen Kommunikation und der unbeabsichtigten Bewegungsgeräusche von Raubtieren oder Beutetieren ist). Folglich würden die anatomischen Strukturen der Cochlea als Reaktion auf große mechanische Verschiebungen, die sich aus der Stimulation selbst durch LFs mit relativ niedrigem Druck ergeben würden (für Geräusche mit konstantem Druck, Die Partikelverschiebung ist umgekehrt proportional zur Frequenz (+6 dB pro Oktave).

Es gibt drei Hauptmechanismen, die diese Schutzdämpfung bereitstellen (siehe [Figur 3](#); [Salt & Hullar, 2010](#); Für eine sehr detaillierte Übersicht siehe [Dallos, 2012](#)). Erstens sind die Bandpass-Eigenschaften des Mittelohrs ungefähr auf 1 kHz zentriert und dämpfen Frequenzen unterhalb dieser bei 6 dB / Oktave. Bei einem konstanten Druck entspricht dies umgekehrt der Zunahme der Partikelverschiebung, so dass bei Frequenzen unter 1 kHz die Bewegung der Stapes und die Amplitude der in die Cochlea eingegebenen Verschiebung konstant sind. Zweitens wird die niederfrequente Stimulation der Cochlea durch das Verschieben von Perilymphflüssigkeit zwischen den Kammern der Scala Tympani und der Scala Vestibuli durch das Helikotrema verringert, was zu einer Dämpfung von 6 dB / Oktave bei Frequenzen unter 100 Hz führt. Drittens sind die auditorischen Transduktionsrezeptoren, die inneren Haarzellen (IHC), empfindlich gegenüber der Flüssigkeitsgeschwindigkeit in der Cochlea, was zu einer weiteren Dämpfung von 6 dB Oktave unter etwa 470 Hz führt. Diese drei Mechanismen addieren sich linear, um die Stimulation des IHC um 18 dB

/ Oktave zwischen 100 Hz und 20 Hz zu reduzieren.

[Salt und Hullar \(2010\)](#) machen die wichtige Beobachtung, dass die äußeren Haarzellen (OHC) empfindlich gegenüber Verschiebungen sind (dh sie sind mechanisch gekoppelt und nicht flüssigkeitsgekoppelt an die Tektorialmembran), was für niedrige Frequenzen konstant ist, also auch unter physiologischen Bedingungen. Unter normalen Bedingungen sollten sie bei diesen niedrigen Frequenzen mit niedrigeren Schallpegeln als der IHC stimuliert werden. Diese Vorhersage wird durch die Schwellenwerte der endolymphatischen Potentiale in der Meerschweinchen-Cochlea für 5-Hz-Stimuli bestätigt, die den durch die OHC-Aktivität gesteuerten Strialstrom darstellen ([Salt, Lichtenhan, Gill & Hartsock, 2013](#)). Im Gegensatz zu den ursprünglichen Schätzungen der OHC-Schwelle (~ 40 dB niedriger als IHC bei 5 Hz; [Salt & Hullar, 2010](#)), **Verstärkungsberechnungen in der späteren Arbeit legen nahe, dass die menschliche apikale Cochlea in ähnlicher Weise bei etwa 55 dB bis 65 dB SPL (entsprechend -38 bis -28 dBA) aktiviert werden könnte. Diese überraschend hohe Empfindlichkeit von OHCs gegenüber LF (im Vergleich zur IHC-Aktivierung und Wahrnehmungsschwelle)** wird durch neuere Arbeiten zur Untersuchung der spontanen otoakustischen Emissionen beim Menschen stark unterstützt ([Drexl, Krause, Gürkov & Wiegrebe, 2016](#); siehe auch [Drexl, Otto et al., 2016](#); [Jeanson, Wiegrebe, Gürkov, Krause & Drexl, 2017](#); [Kugler et al., 2014](#)). Es ist seit geraumer Zeit bekannt, otoakustische Emissionen von menschlichen Verzerrungsprodukten (z. B. [Hensel, Scholz, Hurttig, Mrowinski & Janssen, 2007](#)) sowie In-vivo-Tierdaten (z. [Patuzzi, Sellick & Johnstone, 1984](#)), dass LF und IS die Cochlea-Verarbeitung beeinflussen und dass das Cochlea-Aquädukt IS-Frequenzen in das Innenohr leitet ([Traboulsi & Avan, 2007](#)). Die Wahrnehmungs- und anderen nachgelagerten Konsequenzen sind jedoch noch nicht gut untersucht. Der neuere Fokus auf die Modulation der OHC-Aktivität liefert wahrscheinlich wichtige Erkenntnisse über die physiologischen Auswirkungen von IS und LF auf die Cochlea-Verarbeitung. Während die sensorische Rolle von OHCs derzeit nicht gut verstanden ist, transportieren sie sensorische Informationen über afferente Fasern vom Typ II in das Gehirn und spielen wahrscheinlich eine Rolle bei der Signalisierung der versetzten Vorspannung (und damit des Betriebspunkts) der Basilarmembran und damit beeinflussen auch die IHC-Transduktion.

Bevor die Auswirkungen einer möglichen Funktionsstörung dieses Systems betrachtet werden, sollten die zuvor genannten Auswirkungen zusammengefasst werden. Das gesunde menschliche Ohr dämpft die niederfrequente Eingabe in die IHCs unter etwa 100 Hz (~ 18 dB / Oktave) erheblich. **Es ist wahrscheinlich, dass die OHCs bei sehr niedrigen Frequenzen (<20 Hz) auf Stimuli reagieren, deren Werte weit unter denen liegen, die die Aktivierung der IHCs bewirken.** Es ist die akustische Stimulation des IHC, die den wirksamen Wahrnehmungsstimulus für das Hören darstellt. OHCs haben jedoch auch einen sensorischen (afferenten) Input für das Gehirn, obwohl es unwahrscheinlich ist, dass ihre Stimulation per se zu einer auditorischen Wahrnehmung führt. An dieser Stelle ist es **wichtig** zu betonen, dass die von [Salt und Hullar \(2010\)](#) **beschriebenen** Mechanismen sind plausibel und basieren auf einer Vielzahl fundierter Forschungsergebnisse. Sie sind für sich genommen kein Beweis für die direkte Übertragung von LF und IS durch das Innenohr. Die Auswirkungen von LF auf die OHC-Aktivität könnten jedoch die Transduktion durch die IHC modulieren, und solche Auswirkungen wären wahrscheinlich wahrnehmbar.

Diese Daten liefern jedoch einen starken Anscheinsbeweis für die neuronale Transduktion von LF und IS, der sowohl im Tier- als auch im Menschenmodell auf funktioneller und wahrnehmungsbezogener Ebene ordnungsgemäß untersucht werden muss. Einige Kritiker von [Salt und Hullar \(2010\)](#) haben argumentiert, dass der zur Stimulierung der OHCs erforderliche LF- und IS-Spiegel viel höher ist als der in der Nähe von Windparks. Angesichts der **Bandbreite technischer Probleme bei der Durchführung solcher akustischen Messungen** und der Vielfalt der zuvor überprüften gemeldeten Pegel ist diese Behauptung in ähnlicher Weise durch die verfügbaren akustischen Daten begrenzt. Darüber hinaus untersuchten die jüngsten Arbeiten das Endokochlea-Potenzial von Meerschweinchen ([Salt et al., 2013](#)) und die otoakustischen Emissionen des Menschen (z. B. [Drexl, Otto et al., 2016](#); [Kugler et al., 2014](#)).

zeigen eine noch höhere Empfindlichkeit von OHCs gegenüber LF im Vergleich zu der durch die IHC-Aktivität vermittelten Wahrnehmungsschwelle als zuerst vorhergesagt. Dies legt die Notwendigkeit einer Überprüfung solcher Schlussfolgerungen nahe.

[Salz und Rumpf \(2010\)](#) Überprüfen Sie auch die Folgen einiger pathologischer Zustände des Innenohrs im Hinblick auf das Potenzial, die Empfindlichkeit gegenüber LF und IS zu erhöhen. Beispielsweise verringert eine Blockierung oder ein erhöhter Widerstand des Helikotrens durch einen Zustand wie endolymphatische Hydrops den Flüssigkeits-Shunt und verringert die Dämpfung für Frequenzen <100 Hz um bis zu 6 dB. Akute endolymphatische Hydrops können durch Exposition gegenüber niedrigen Frequenzen induziert werden, obwohl die Beziehung komplex ist und darauf hindeutet, dass ein dosimetrischer Ansatz zur Exposition am aussagekräftigsten sein könnte. Hydrops würden auch zu Änderungen des Arbeitspunkts der Basilarmembran führen, was zu einer Vielzahl von Änderungen der sensorischen IHC-Transduktion führen würde, einschließlich einer erhöhten Verzerrung. Ein weiterer von Salt und Hullar in Betracht gezogener Mechanismus ist die erhöhte Flüssigkeitskopplung von Vestibularzellen an den Schalleingang, die durch Änderungen der Eingangsimpedanz des Vestibularsystems unter Bedingungen wie überlegener Kanaldehysenz (SCD) hervorgerufen wird, was zu schallinduziertem Schwindel oder Schwindel führen kann, Übelkeit und Nystagmus (Tullio-Phänomene).

[Schomer et al. \(2015\)](#) untersuchen auch mögliche physiologische Mechanismen, die die Auswirkungen von LF und IS vermitteln könnten. Sie ziehen einen Zusammenhang zwischen den nauseogenen Wirkungen einer niederfrequenten vestibulären Stimulation bei Seekrankheit und der möglichen vestibulären Stimulation durch IS unter normalen Hörbedingungen (im Gegensatz zu pathologischen Bedingungen von SCD). Unter Verwendung von Daten, die von der US Navy zur nauseogenen Wirksamkeit der niederfrequenten vestibulären Stimulation durch Ganzkörperbewegung gesammelt wurden, fanden sie eine **signifikante Überlappung zwischen den effektivsten nauseogenen Frequenzen und dem BPF moderner und größerer WTs**. Unter Verwendung eines Modells erster Ordnung zeigen sie auch eine Äquivalenz besser als die Größenordnung zwischen der Kraft, die auf die Otokonie im Vestibularapparat ausgeübt wird, die durch eine Ganzkörperbewegung von 0,7 Hz bei 5 m/s^2 erzeugt wird Spitze und durch IS von 0,7 Hz bei 54 dB (SPL). Aufbauend auf früheren anatomischen Arbeiten ([Uzun-Coruhlu, Curthoys & Jones, 2007](#)) haben Schomer et al. argumentieren, dass ein Druck, der normal zur Oberfläche der Makula im Innenohr ist, einen wirksamen Reiz für die vestibulären Haarzellen darstellt, genauso wie die bloße Bewegung zwischen der Otokonialmembran, die während der linearen Beschleunigung des Kopfes erzeugt wird. Obwohl dies eine plausible Erklärung ist, ist es wichtig zu erkennen, dass dieser Vorschlag höchst spekulativ ist und noch keine Daten zur Unterstützung dieser letzteren Behauptung vorgelegt wurden. [Leventhall \(2015\)](#) hat dieses Modell ebenfalls in Frage gestellt, allerdings nicht in einem von Experten geprüften Forum. Bemerkenswert ist jedoch, dass der Vergleich mit der Seekrankheit das Argument verstärkt, dass ein dosimetrischer Ansatz zur Exposition geeigneter sein könnte als Messungen des Spitzen- oder quadratischen mittleren Schalldrucks.

Wahrnehmungseffekte der Laborexposition gegenüber LF und IS

Eine Reihe von Laborstudien hat menschliche Zuhörer direkt IS und LF ausgesetzt (z. B. [Crichton, Dodd, Schmid, Gamble & Petrie, 2014](#); [Tonin, Brett & Colagiuri, 2016](#)), die entweder direkt von WT aufgezeichnet wurden (z. B. [Yokoyama et al., 2014](#)) oder synthetisiert, um Schlüsselemente dieser Aufzeichnungen zu reproduzieren (z. B. [Tonin et al., 2016](#)). Es wurde über eine Reihe von Expositionssymptomen berichtet, es wurden jedoch keine systematischen oder signifikanten Auswirkungen von IS und LF nachgewiesen.

Im Allgemeinen waren die Stichprobengrößen relativ klein (z. B. $n = 2$, Hansen, Walker et al., 2015; $n = 72$, [Tonin et al., 2016](#)), wobei Studien wahrscheinlich statistisch unterversorgt sind (siehe ergänzendes Material). Die Belichtungszeiten lagen in der Größenordnung von Minuten bis zu

einigen 10 Sekunden, wobei die verschiedenen Präsentationsstufen über und unter den im Feld angegebenen IS / LF-Werten lagen.

Einige Freifeld-Stimulus-Wiedergabesysteme haben keinen Ton bei den BPF- und Harmonischenfrequenzen niedriger Ordnung geliefert ([Yokoyama et al., 2014](#)), während andere die Kopfhörerwiedergabe verwendet haben ([Tonin et al., 2016](#)). Viele Studien wurden nicht verblindet oder doppelt verblindet, während andere speziell entwickelt wurden, um die Auswirkungen von Nachfrageeigenschaften durch Manipulation der Erwartung zu untersuchen (z. B. [Crichton et al., 2014](#) ; [Tonin et al., 2016](#)). Die letztgenannten Studien haben nicht überraschend gezeigt, dass die Manipulation der Erwartung hinsichtlich der physiologischen Auswirkungen von WT IS und LF einen moderaten Einfluss auf die Anzahl und Stärke der Symptome hat, die von Probanden unabhängig von den Lärmbelastungsbedingungen gemeldet wurden. Interessant, [Tonin et al. \(2016\)](#) berichten in ihrer Doppelblindstudie auch, dass das Vorhandensein von IS die Besorgnis über die gesundheitlichen Auswirkungen einer WTN-exprimierten Postexposition erhöht, obwohl die Probanden angaben, den IS-Stimulus nicht zu hören.

Zusammenfassend erscheint **ein Anscheinsbeweis für die Existenz einer sensorischen Transduktion von LF und IS und deren Repräsentation im Nervensystem.** Während eine Reihe plausibler Mechanismen vorgeschlagen wurde, muss der tatsächliche Transduktionsmechanismus noch demonstriert werden. Es gibt einige laborbasierte Studien, in denen die Exposition gegenüber aufgezeichneten oder simulierten WTN untersucht wird, aber die aktuellen Daten zu potenziellen Wahrnehmungs- oder physiologischen Faktoren sind nicht schlüssig.

Allgemeine Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Obwohl dies keine erschöpfende Übersicht über diese Literatur ist, zeigt diese Übersicht, dass es Fragen bezüglich der Messung und Ausbreitung von LF und IS und ihrer Kodierung durch das Zentralnervensystem gibt (z. B. [Dommes et al., 2009](#) ; [Weichenberger et al., 2017](#)) die für die möglichen wahrnehmungsbezogenen und physiologischen Auswirkungen von WTN relevant sind, für die wir jedoch kein gutes wissenschaftliches Verständnis haben. In diesen Bereichen gibt es viele Streitigkeiten und Meinungen, die aus wissenschaftlicher Sicht in den Daten nicht begründet sind, einfach weil nur wenige Daten verfügbar sind, die diese Probleme wirksam angehen. Dies rechtfertigt einen klaren Aufruf zum Handeln für Ressourcen und Unterstützung zur Förderung einer qualitativ hochwertigen wissenschaftlichen Forschung in diesen Bereichen.

Einige der Forschungsfragen, die sich aus dieser Überprüfung ergeben, umfassen Folgendes:

1. Eine vollständigere Charakterisierung und Modellierung des von einzelnen WTs erzeugten Klangs und der großen Aggregationen, aus denen der moderne Windpark besteht. Diese Forschung muss das Spektrum vom BPF bis zu seinen höheren Harmonischen berücksichtigen und die verschiedenen Ausbreitungsmodelle berücksichtigen, die für verschiedene Frequenzbereiche gelten, zusammen mit den Auswirkungen von Gelände, atmosphärischen Bedingungen und anderen möglichen Modifikatoren des Klangs.
2. Die Entwicklung eines umfassenderen Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen WTN und den gebauten Strukturen, in denen Menschen leben und schlafen. Bei solchen Untersuchungen müssen die verschiedenen Anregungsmodi berücksichtigt werden, einschließlich Substratvibration, Hohlraumresonanzen (einschließlich Helmholtz-Resonanz und Verbindung von Räumen) und unterschiedliche Schalldämmung von Baumaterialien. Es müssen neue Methoden entwickelt werden, um die akute und chronische Exposition (Dosimetrie) genau und effektiv zu messen und Wind und andere Störungen bei den Messungen zu steuern.
3. Struktur- und Luftfahrttechnikforschung, um Wege zur Minimierung der BPF-Erzeugung und anderer potenziell störender Schallquellen zu finden.

4. Forschung zur direkten Untersuchung der Auswirkungen von IS auf die Cochlea und den Vestibularapparat. Obwohl verschiedene Theorien aufgestellt wurden, wie IS und LF transduziert werden und das Zentralnervensystem anregen könnten, gibt es nur wenige direkte Daten, die belegen, ob und wie dies geschieht.
5. Forschung zum besseren Verständnis der neuronalen Konnektivität der mutmaßlichen Wandler im Innenohr und zum Verständnis der Konsequenzen ihrer möglichen Aktivierung durch IS und LF, ungeachtet der jüngsten Bildgebungsdaten des Gehirns, die eine unterschiedliche Aktivierung verschiedener Hirnstrukturen (einschließlich des auditorischen Kortex) durch zeigen IS.
6. Forschung zur besseren Charakterisierung der Physiologie von Personen, die über eine Anfälligkeit für WTN berichten, mit dem Schwerpunkt darauf, ob diese Personen einen statistischen Schwanz einer normalverteilten Population darstellen oder eine andere Dysfunktion oder Pathologie aufweisen, die die Anfälligkeit vermittelt (z. B. SCD oder lymphatische Hydrops). Insbesondere ist eine Untersuchung der Hypothese erforderlich, dass kleine individuelle Unterschiede in der Schwellenempfindlichkeit gegenüber IS der unterschiedlichen Aktivierung des anterioren cingulären Kortex und der Amygdala bei unterschwelligem Schallpegeln zugrunde liegen könnten.

This is not intended to be an exhaustive list of possible research areas. A research initiative to encourage and develop a very wide diversity of proposals is warranted as it is from the depth, capacity, and ingenuity of the researchers that work in these areas that the insights and the most effective research questions will come.

Supplemental Material

Supplemental material for A Review of the Possible Perceptual and Physiological Effects of Wind Turbine Noise:

[Click here for additional data file.](#) ^(612K, pdf)

Supplemental material for A Review of the Possible Perceptual and Physiological Effects of Wind Turbine Noise by Simon Carlile, John L. Davy, David Hillman and Kym Burgemeister in Trends in Hearing

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the help of Dr. Christophe Micheyl in developing the statistical model in the supplementary material.

Declaration of Conflicting Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The authors disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: The authors thank the Secretariat at the Australian Government Department of the Environment and Energy for their support for the Independent Scientific Committee on Wind Turbines.

References

- Bauer, M., Baker, C., Barham, R., Hensel, J., Kling, C., Trahms, L., ... Sander, T. (2013). Magnetoencephalography of deep lying auditory sources using acoustical devices for infra- and ultrasound stimulation. *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik*. doi:10.1515/bmt-2013-4135. [[PubMed](#)]
- Chapman S., Crichton F. (2017) Wind turbine syndrome: A communicated disease, Sydney, Australia: Sydney University Press. [[Google Scholar](#)]
- Cheatham M., Dallos P. (2001) Inner hair cell response patterns: Implications for low-frequency hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110(4): 2034–2044. doi:10.1121/1.1397357. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Council of Canadian Academies (2015) Understanding the evidence: Wind turbine noise, Ottawa, ON: The Expert Panel on Wind Turbine Noise and Human Health, Council of Canadian Academies. [[Google Scholar](#)]
- Crichton F., Dodd G., Schmid G., Gamble G., Petrie K. (2014) Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines. *Health Psychology* 33(4): 360–364. doi:10.1037/a0031760. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Dallos P. (2012) *The auditory periphery biophysics and physiology*, New York, NY: Elsevier. [[Google Scholar](#)]
- Dauchez N., Hayot M., Denis S. (2016) Effectiveness of nonporous windscreens for infrasonic measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139(6): 3177–3181. doi:10.1121/1.4954260. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Dommes E., Bauknecht H., Scholz G., Rothmund Y., Hensel J., Klingebiel R. (2009) Auditory cortex stimulation by low-frequency tones—An fMRI study. *Brain Research* 1304: 129–137. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Drexler M., Krause E., Gürkov R., Wiegrebe L. (2016) Responses of the human inner ear to low-frequency sound. In: van Dijk P., Başkent D., Gaudrain E., de Kleine E., Wagner A., Lanting C. (eds) *Physiology, psychoacoustics, and cognition in normal and impaired hearing*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, pp. 275–284. . doi:10.1007/978-3-319-25474-6_29. [[Google Scholar](#)]
- Drexler M., Otto L., Wiegrebe L., Marquardt T., Gürkov R., Krause E. (2016) Low-frequency sound exposure causes reversible long-term changes of cochlear transfer characteristics. *Hearing Research* 332: 87–94. doi:10.1016/j.heares.2015.12.010. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Hansen C. H., Doolan C. J., Hansen K. L. (2017) Effects of wind farm noise and vibration on people. In: Hansen C. H., Doolan C. J., Hansen K. L. (eds) *Wind farm noise: Measurement, assessment*, Chichester, England: John Wiley, pp. 436–475. . doi:10.1002/9781118826140. [[Google Scholar](#)]
- Hansen, K., Walker, B., Zajamsek, B., & Hansen, C. (2015, April). *Perception and annoyance of low frequency noise versus infrasound in the context of wind turbine noise*. Paper presented at the Sixth International Meeting on Wind Turbine Noise, Glasgow, Scotland.
- Hansen K., Zajamsek B., Hansen C. (2014) Identification of low frequency wind turbine noise using secondary windscreens of various geometries. *Noise Control Engineering Journal* 62(2): 69–82. doi:10.3397/1/376207. [[Google Scholar](#)]
- Hansen K. L., Hansen C. H., Zajamšek B. (2015) Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences. *Building and Environment* 94: 764–772. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.017. [[Google Scholar](#)]
- Hensel J., Scholz G., Hurrting U., Mrowinski D., Janssen T. (2007) Impact of infrasound on the human cochlea. *Hearing Research* 233(1): 67–76. doi:10.1016/j.heares.2007.07.004. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- ISO, B. (2003). 226: 2003: Acoustics—Normal equal-loudness-level contours. *International Organization for Standardization*, 63.
- Jeanson L., Wiegrebe L., Gürkov R., Krause E., Drexler M. (2017) Aftereffects of intense low-frequency sound on spontaneous otoacoustic emissions: Effect of frequency and level. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 18(1): 111–119. doi:10.1007/s10162-016-0590-8.

- Jung S. S., Cheung W.-S., Cheong C., Shin S.-H. (2008) Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise. *Journal of the Korean Physical Society* 53(4): 1897–1905. [[Google Scholar](#)]
- Keith S. E., Feder K., Voicescu S. A., Soukhovtsev V., Denning A., Tsang J., van den Berg F. (2016) Wind turbine sound power measurements. *Journal of the Acoustical Society of America* 139(3): 1431–1435. doi:10.1121/1.4942405. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Knopper, L. D., Ollson, C. A., McCallum, L. C., Whitfield Aslund, M. L., Berger, R. G., Souweine, K., & McDaniel, M. (2014). Wind turbines and human health. *Frontiers in Public Health*, 2, 63. doi:10.3389/fpubh.2014.00063.
- Kuehler R., Fedtke T., Hensel J. (2015) Infrasonic and low-frequency insert earphone hearing threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America* 137(4): EL347–EL353. doi:10.1121/1.4916795. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Kugler, K., Wiegrebe, L., Grothe, B., Kössl, M., Gürkov, R., Krause, E., & Drexl, M. (2014). Low-frequency sound affects active micromechanics in the human inner ear. *Royal Society Open Science*, 1(2). doi:10.1098/rsos.140166. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)]
- Lepoutre, P., Avan, P., De Cheveigne, A., Ecotiere, D., Evrard, A. S., Moati, F., ... Toppila, E. (2017). *Evaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens* [Evaluation of the health effects of low sound and infrasonic frequencies due to wind farms]. Maisons-Alfort, France: IFSTTAR-Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.
- Leventhall, G. (2015, May). Application of regulatory governance and economic impact of wind turbines. *Submission to the Select Committee on Wind Turbines*. Retrieved from https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/Senate/Wind_Turbines/Wind_Turbines/Submissions?main_0_content_1_RadGrid1ChangePage=13_20.
- Marcillo O., Arrowsmith S., Blom P., Jones K. (2015) On infrasound generated by wind farms and its propagation in low-altitude tropospheric waveguides. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(19): 9855–9868. doi:10.1002/2014JD022821. [[Google Scholar](#)]
- McCunney R. J., Mundt K. A., Colby W. D., Dobie R., Kaliski K., Blais M. (2014) Wind turbines and health: A critical review of the scientific literature. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 56(11): e108–e130. doi:10.1097/JOM.0000000000000313. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Michaud D. (2015) Health and well-being related to wind turbine noise exposure: Summary of results. *The Journal of the Acoustical Society of America* 137(4): 2368–2368. doi:10.1121/1.4920604. [[Google Scholar](#)]
- Michaud D. S., Feder K., Keith S. E., Voicescu S. A., Marro L., Than J., van den Berg F. (2016. a) Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139(3): 1443–1454. doi:10.1121/1.4942391. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Michaud D. S., Feder K., Keith S. E., Voicescu S. A., Marro L., Than J., van den Berg F. (2016. b) Self-reported and measured stress related responses associated with exposure to wind turbine noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139(3): 1467–1479. doi:10.1121/1.4942402. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Michaud D. S., Keith S. E., Feder K., Voicescu S. A., Marro L., Than J., Lavigne E. (2016) Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139(3): 1455–1466. doi:10.1121/1.4942390. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Moller H., Pedersen C. S. (2004) Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise and Health* 6(23): 37. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Moller H., Pedersen C. S. (2011) Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129(6): 3727–3744. doi:10.1121/1.3543957. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

- National Health and Medical Research Council. (2015). *NHMRC statement and information paper: Evidence on wind farms and human health*. Canberra: Author (Australia). Retrieved from <http://bit.ly/1gC2yRy>.
- Oerlemans S., Sijtsma P., López B. M. (2007) Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration* 299(4): 869–883. doi:10.1016/j.jsv.2006.07.032. [[Google Scholar](#)]
- Patuzzi R., Sellick P., Johnstone B. (1984) The modulation of the sensitivity of the mammalian cochlea by low frequency tones. III. Basilar membrane motion. *Hearing Research* 13(1): 19–27. doi:10.1016/0378-5955(84)90091-1. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Pedersen S., Møller H., Waye K. P. (2007) Indoor measurements of noise at low frequencies —Problems and solutions. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 26(4): 249–270. doi:10.1260/026309207783571389. [[Google Scholar](#)]
- Salt A. N., Hullar T. E. (2010) Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research* 268(1–2): 12–21. doi:10.1016/j.heares.2010.06.007. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Salt A. N., Lichtenhan J. T., Gill R. M., Hartsock J. J. (2013) Large endolymphatic potentials from low-frequency and infrasonic tones in the guinea pig. *The Journal of the Acoustical Society of America* 133(3): 1561–1571. doi:10.1121/1.4789005. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Schmidt J. H., Klokke M. (2014) Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review. *PLoS One* 9(12): e114183 doi:10.1371/journal.pone.0114183. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Schomer P. D., Erdreich J., Pamidighantam P. K., Boyle J. H. (2015) A theory to explain some physiological effects of the infrasonic emissions at some wind farm sites. *The Journal of the Acoustical Society of America* 137(3): 1356–1365. doi:10.1121/1.4913775. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Sugimoto, T., Koyama, K., Kurihara, Y., & Watanabe, K. (2008, August 20–22). *Measurement of infrasound generated by wind turbine generator*. Paper presented at the SICE Annual Conference, The University of Electrocommunications, Japan.
- Thorsson P., Persson Waye K., Smith M., Ögren M., Pedersen E., Forssén J. (2018) Low-frequency outdoor–indoor noise level difference for wind turbine assessment. *The Journal of the Acoustical Society of America* 143(3): EL206–EL211. doi:10.1121/1.5027018. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Tonin R., Brett J., Colagiuri B. (2016) The effect of infrasound and negative expectations to adverse pathological symptoms from wind farms. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 35(1): 77–90. doi:10.1177/0263092316628257. [[Google Scholar](#)]
- Traboulsi R., Avan P. (2007) Transmission of infrasonic pressure waves from cerebrospinal to intralabyrinthine fluids through the human cochlear aqueduct: Non-invasive measurements with otoacoustic emissions. *Hearing Research* 233(1): 30–39. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Turnbull C., Turner J., Walsh D. (2012) Measurement and level of infrasound from wind farms and other sources. *Acoustics Australia* 40(1): 45–50. [[Google Scholar](#)]
- Uzun-Coruhlu H., Curthoys I. S., Jones A. S. (2007) Attachment of the utricular and saccular maculae to the temporal bone. *Hearing Research* 233(1): 77–85. doi:10.1016/j.heares.2007.07.008. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Valberg P. A., Van Deventer T. E., Repacholi M. H. (2007) Workgroup report: Base stations and wireless networks—Radiofrequency (RF) exposures and health consequences. *Environmental Health Perspectives* 115(3): 416 doi:10.1289/ehp.9633. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
- Van den Berg, G. P. (2006). *The sound of high winds. The effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise*. (Unpublished doctoral dissertation). University of Gronigen, the Netherlands.
- van Kamp I., van den Berg F. (2018) Health effects related to wind turbine sound, including low-frequency sound and infrasound. *Acoustics Australia* 46(1): 31–57.

doi:10.1007/s40857-017-0115-6. [[Google Scholar](#)]

Walker, B. (2013, August 28–30). *Infrasound measurement, interpretation and misinterpretation*. Paper presented at the Proceedings of the Fifth International Meeting on Wind Turbine Noise, Denver, CO.

Weichenberger M., Bauer M., Kühler R., Hensel J., Forlim C. G., Ihlenfeld A., Kühn S. (2017) Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold—Evidence from fMRI. *PLoS One* 12(4): e0174420 doi:10.1371/journal.pone.0174420.

[[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

Weichenberger M., Kühler R., Bauer M., Hensel J., Brühl R., Ihlenfeld A., Kühn S. (2015) Brief bursts of infrasound may improve cognitive function—An fMRI study. *Hearing Research* 328: 87–93.

doi:10.1016/j.heares.2015.08.001. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

Yokoyama S., Sakamoto S., Tachibana H. (2014) Perception of low frequency components in wind turbine noise. *Noise Control Engineering Journal* 62(5): 295–305. [[Google Scholar](#)]

Zajamšek B., Hansen KL, Doolan CJ, Hansen CH (2016) Charakterisierung von Windpark-Infraschall und niederfrequentem Lärm . *Journal of Sound and Vibration* 370 : 176–190. doi: 10.1016 / j.jsv.2016.02.001. [[Google Scholar](#)]

Zorumski W., Willshire, W. Jr. (1989) Niederfrequente Schallausbreitung in einer atmosphärischen Grenzschicht . *AIAA Journal* 27 : 6–12. [[Google Scholar](#)]

Artikel von Trends in Hearing werden hier mit freundlicher Genehmigung von **SAGE Publications** zur Verfügung gestellt