

Von der Strömung zum Druck – Schall von Windenergieanlagen

Entstehung, Ausbreitung, Wirkung auf den Menschen und Beurteilung

Johannes Baumgart

Schall von Windenergieanlagen (WEA) wirkt auf den Menschen. Für das Verständnis der Ursachen sind die Zusammenhänge von Schallentstehung, Ausbreitung, Wahrnehmung und Beurteilung bedeutend. Die maßgeblichste Schallquelle bei modernen WEA ist die Bewegung des Rotorblattes in der Luft. Der Schall entsteht durch unterschiedliche Mechanismen und hat ein breitbandiges Rauschen. Dieses Signal unterliegt zeitlichen Schwankungen und ist mit einem Infraschallsignal überlagert. In der Umgebung erreicht das Geräusch die Anwohnerschaft und erfordert daher eine faire Beurteilung.

Einleitung

Bei der zunehmenden Umstellung von fossiler auf regenerative Energieproduktion spielt der Strom aus Wind eine wichtige Rolle. Windenergieanlagen (WEA) erzeugen aus der vorhandenen Luftbewegung elektrischen Strom (Abbildung 1). Um die Netzkapazitäten nicht zu überlasten, ist es ein Ziel, den Strom möglichst in räumlicher Nähe zum Ort des Bedarfs zu produzieren. Dies hat bei in der Fläche besiedelten Bereichen zur Konsequenz, dass Anlagen in der Umgebung von bewohnten Gebieten errichtet werden. Zwar arbeiten moderne WEA mit einem hohen Wirkungsgrad, jedoch sind Ertragsverluste unvermeidlich. So auch bei den Rotorblättern, die sich an ihrer Spitze im Volllastbetrieb mit mehreren hundert Stundenkilometern durch die Luft bewegen. Dies geht nicht geräuschlos vonstatten. Durch die hohen Geschwindigkeiten ist eine Schallentstehung nicht zu vermeiden. Der Schall ist in der Umgebung wahrnehmbar und macht an Grundstücksgrenzen nicht Halt. Von Anwohnern kann er zum Teil als belästigend wahrgenommen werden [1]. Ein gesundes Maß darf die Schallimmission für die Menschen im Einflussbereich von WEA nicht überschreiten. Mit dem Bundes-Immissionsschutzgesetz ist ein rechtlicher Rahmen für den Schutz der Bevölkerung in der Umgebung derartiger technischer Anlagen geschaffen.

Im folgenden Text wird ein kurzer Überblick über die Thematik von der Schallentstehung an der WEA bis hin zur Wirkung auf den Menschen gegeben. Es

From Flow to Pressure – Noise from Wind Turbines Generation, propagation, impact on people, and assessment

Noise from wind turbines (WTG) affects people. In order to understand how, knowledge of the relationships between sound generation, propagation, perception and assessment is essential. The key noise source of modern wind turbines is the motion of the rotor blades through the air. Different mechanisms generate the noise, which has a broadband character. This signal is subject to temporal fluctuations and is overlaid with an infrasound component. In the surrounding area, the noise reaches the local residents and therefore requires a fair assessment.

handelt sich dabei um keine umfassende Wiedergabe des aktuellen Forschungsstandes, wie es in Übersichtsartikeln [2–4] zur Thematik üblich ist. Schwerpunkt ist ein Überblick über den Ablauf von der Schallentstehung, Wirkung auf den Menschen bis zur Beurteilung der Schallimmission im Kontext der aktuellen Genehmigungsverfahren in Deutschland.

Energie des Windes

Grundlage für den Betrieb von WEA ist Wind. Die Kräfte des strömenden Windes zeigen sich in ihrer Wirkung an Bäumen und Schirmen; beim Radfahren und Laufen sind sie direkt spürbar, jedoch nur

Abb. 1: Windenergieanlagen (WEA) bei Biebersdorf, Brandenburg.





Abb. 2: Umströmung von Brückenpfeilern. Die von links kommende Strömung trifft auf die Pfeiler. Staut sich zunächst an und fließt dann beschleunigt herum, dabei fällt der Wasserspiegel ab. (Elbe in Dresden, Albertbrücke)

indirekt für das menschliche Auge sichtbar. Klarer erkennbar sind Strömungskräfte beispielsweise bei der Umströmung eines Hindernisses im Wasser. Betrachten wir einen Brückenpfeiler in einem Fluss (Abbildung 2): An der Stelle, wo die Strömung auf den Pfeiler trifft und abgebremst wird, hebt sich der Wasserspiegel an; dagegen bildet sich im Bereich der Flanke, wo das Hindernis umströmt wird, eine Senke. Die Höhe des Wasserspiegels und die Fließgeschwindigkeit hängen voneinander ab.

Zur Quantifizierung der Strömung greifen wir auf eine physikalische Beschreibung zurück. Die Ber-

noulli-Gleichung [5] beschreibt den Zusammenhang zwischen Wasserstandhöhe und Geschwindigkeit unter vereinfachenden Annahmen. Diese Energiebilanz entlang einer Stromlinie lautet:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h + p = \text{const.} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Summe aller drei Terme bleibt in dieser Beschreibung entlang einer Stromlinie konstant. Der erste Term ist der dynamische Anteil und ergibt sich aus der Bewegung mit der Geschwindigkeit v und der Dichte ρ des Fluids. Der zweite Term stellt den Gewichtsdruck dar, der sich aus der Dichte, der Höhe h über der Bezugshöhe und der Erdbeschleunigung g ergibt. Der letzte Term ist der statische Druck p .

Mit der Bernoulli-Gleichung können wir einen Einblick bekommen, wie es zu den unterschiedlichen Wasserhöhen am Brückenpfeiler kommt. Auf der Wasseroberfläche lastet der konstante Luftdruck. Am Ort der Zuströmung verlangsamt sich das Wasser und entsprechend nimmt der hydrostatische Anteil zu, die Oberfläche wird angehoben. An der Flanke umströmt das Wasser das Hindernis, die so beschleunigte Strömung hat eine höhere Geschwindigkeit und so einen erhöhten dynamischen Anteil: Die Oberfläche sinkt ab.



Make better spaces

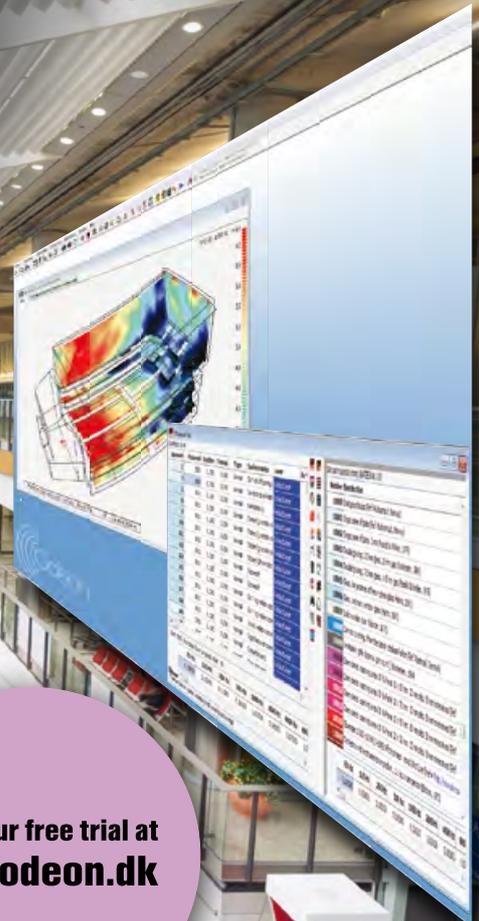
with the complete software solution for room acoustics

Elegant and user friendly interface

Fast and reliable simulations and measurements

Available as: **B** Basics, **I** Industrial, **A** Auditorium & **C** Combined

Start your free trial at
www.odeon.dk



Für WEA wird diese Umwandlung von Bewegung in Druck genutzt. Die kinetische Energie der Luft kommt mit der Windgeschwindigkeit bei der WEA an und wird dort über der von den Rotorblättern überstrichenen Fläche abgebremst. Über die Rotorblattflächen wird der Strömung Impuls entzogen und sie verlangsamt sich. Die daraus resultierenden Kräfte erzeugen über den Hebelarm ein Moment an der Nabe, was letztendlich den Stromgenerator antreibt. Dazwischen ist bei manchen Anlagentypen ein Getriebe geschaltet, um die Drehzahl des Rotors für den Generator zu erhöhen.

Nur ein Teil des Energiestroms, der mit der Windgeschwindigkeit eine Fläche in der Größe der vom Rotor überstrichenen Fläche ungestört durchströmt, kann von der WEA genutzt werden. Selbst bei reibungsfreier Strömung ergibt sich ein Impuls- und damit ein Leistungsverlust. Ursache dieser Wirkung ist ein induzierter Widerstand infolge der Umströmung der Rotorblattspitzen von der Druckseite zur Saugseite. Dies erzeugt stromab der Rotorblattspitzen eine Wirbelschlepe, die dem Rotor einen Teil der eigentlich verfügbaren Energie, selbst bei Reibungsfreiheit, entzieht. Die Leistung P einer WEA beträgt

$$P = \frac{1}{2} \rho c_p v^3 A \quad (\text{Gl. 2})$$

mit der Luftdichte ρ , der Windgeschwindigkeit v in der ungestörten Zustromung, der vom Rotor überstrichenen Fläche A und dem Beiwert c_p zur Berücksichtigung von Verlusten der gesamten Übertragungskette. Neben aerodynamischen Verlusten, wie durch den oben erwähnten induzierten Widerstand, kommen mechanische und elektrische beispielsweise im Getriebe und dem Generator vor.

Mit dem Ziel, einen hohen Energieertrag zu erzielen [6], ergeben sich folgende Aufgaben: einen geeigneten Standort mit hoher und über das Jahr kontinuierlicher Windgeschwindigkeit zu finden, die überstrichene Fläche im Rahmen der technischen Möglichkeiten möglichst groß auszuführen, eine hohe Anzahl von WEA zu errichten und diese geräuscharm zu betreiben. Moderne leistungsstarke WEA mit mehreren Megawatt elektrischer Leistung emittieren zwar merklich weniger als ein Watt Leistung in Form von Schall [7] in die Umgebung, jedoch ist dieser im Umfeld deutlich wahrnehmbar.

Rotorblätter in der Strömung

Die Rotorblätter sind bei modernen WEA mit mehreren Megawatt Nennleistung die Hauptquelle der Schallemissionen. Das Rotorblatt bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit durch die Luft und ist vom Anströmwinkel so gestellt, dass es die Kraft des Windes wirkungsvoll nutzt. Von anderen Bauteilen im Bereich

des Getriebes und des Generators sind keine wesentlichen Beiträge zum Gesamtschallpegel zu erwarten, oder lassen sich durch konstruktive Maßnahmen, wie eine Einhausung, spürbar reduzieren. Bei den Rotorblättern ist eine Umhausung nicht möglich.

Mit dem Wissen über die Mechanismen der Schallentstehung lassen sich Ansätze zur Schallminderung finden. Die Strömungsbedingungen um das Profil des Rotorblattes ähneln der Umströmung von Helikopterrotorblättern, wie auch Tragflügelprofilen von Flugzeugen. Diese werden seit vielen Jahrzehnten umfassend erforscht. Das dazugehörige Wissen, die Erfahrungen und die Messmethoden stehen dem eher jungen Feld der Strömungsmechanik von Rotorblättern der WEA zur Verfügung.

Das natürliche Windfeld ist bei Windgeschwindigkeiten, die für eine WEA nutzbar sind, immer turbulent. Es befinden sich Wirbel in der Strömung. Die damit einhergehenden Geschwindigkeitsschwankungen führen zu Druckschwankungen. Die sich bewegenden Rotorblätter verstärken die Geschwindigkeits- und Druckschwankungen.

Das Rotorblatt dreht sich bei modernen WEA bei guten Windverhältnissen mit etwa 12 Umdrehungen in der Minute. Was aus der Ferne wie ein ruhig drehendes Windrad aussieht, hat bei einem Rotorradius von rund 70 Metern eine Geschwindigkeit von etwa 300 Stundenkilometern an der Rotorblattspitze. Es bildet sich eine dünne und turbulente Grenzschicht zwischen der Luft und dem Rotorblatt aus, in der die Reibung dominiert. In der dünnen Grenzschicht selbst haftet die Luft am Rotorblatt, während sich die Luft direkt außerhalb dieser Schicht, relativ zum Rotorblatt, mit mehreren hundert Stundenkilometern bewegt. Unter diesen Bedingungen ist die Strömung am Rotorblatt stark verwirbelt. Einher gehen damit Geschwindigkeits- und Druckschwankungen.

Wirbel finden sich auch bei der Umströmung von Brückenpfeilern und sind dort direkt zu beobachten. Stromab, im Nachlauf der Umströmung zeigen sich diese bei ruhiger Oberfläche als Senken. Die Rotationsgeschwindigkeit im Wirbel selbst nimmt zum Zentrum hin zunächst zu, bis die hohen relativen Geschwindigkeiten durch Reibungskräfte abgebremst werden. Mit den schnellen Bewegungen im Zentrum des Wirbels ist dort der Gewichtsdruck geringer (siehe Gleichung 1) und die Wasserhöhe fällt entsprechend ab.

Wird ein Wirbel durch ein Hindernis, beispielsweise einen anderen Wirbel, der sich mit einer anderen Geschwindigkeit oder in eine andere Richtung bewegt, abrupt abgebremst, erhöht sich auch umgehend an diesem Ort der Druck und es kommt gegebenenfalls zu einem Wirbelzerfall oder einer Wirbelvereinigung. Auf diese Weise erzeugte Druckschwankun-

gen sind der Schall, der sich in der Luft mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet.

Schall am Rotorblatt

Bei der Umströmung des Rotorblattes einer WEA werden die zahlreichen Wirbel unterschiedlichster Größe stromab transportiert [8]. Teilweise zerfallen sie wieder bereits am Rotorblatt selbst. Größere Wirbel werden weiter transportiert, lösen sich in der Strömung auf beziehungsweise treffen auf weitere WEA, Bewuchs und andere Objekte. Der Zerfall von Wirbeln löst Druckänderungen aus, welche sich als Schallwellen in die Umgebung ausbreiten. Ein bedeutender Teil der Geräusche von WEA wird durch die Bewegung der Rotorblätter bestimmt.

Hinterkantenschall

Die Strömung fließt über die Hinterkante des Rotorblattes ab. An dieser Kante ändert sich abrupt die Randbedingung: Anstelle der harten, undurchlässigen Wand tritt die umgebende Luft. Entlang des Weges um das Rotorblatt wachsen die Wirbel in der Rotorblatsumströmung an. Kommen sie in die Zone der Hinterkante, entsteht durch die abrupte Änderung vom harten Rotorblatt zur freien Strömung ein Bereich, in dem die Wirbel stark beeinflusst werden. Entsprechend dominant ist dieser Bereich für die Schallentstehung und ist Quelle für den sogenannten Hinterkantenschall [9].

Strömungsabriss

Das Rotorblatt wird schräg angeströmt, um dem Wind wirkungsvoll den Impuls zu entziehen. Auf der Druckseite trifft die Strömung direkt auf und die Stromlinien laufen eng an der Oberfläche. Anders verhält es sich auf der sogenannten Saugseite, die sich, mit Blick aus der Anströmung, auf der Rückseite des Rotorblatts befindet. Dort ist die Grenzschicht dicker und die Strömung löst sich leichter ab. Wenn der Anströmwinkel einen kritischen Wert überschreitet, kommt es zu einem Strömungsabriss. In diesem Fall bilden sich große Wirbel in kürzester Zeit am Rotorblatt, wobei die Strömung nicht mehr die Rückseite umfließt, sondern diese Wirbel. Die wirkenden Kräfte fluktuieren in diesem Falle stark und entsprechend hoch sind die damit verbundenen Schallpegel. Kommt es bei einem Flugzeug zu einem solchen Ereignis nimmt der Auftrieb mit zunehmendem Anstellwinkel zunächst weniger zu. Wird nicht gegengesteuert, kann ein Punkt erreicht werden, bei dem die notwendige Auftriebskraft verloren geht und die Maschine abstürzt. Eine WEA kann natürlich nicht abstürzen, jedoch wirken durch einen Strömungsabriss schlagartig andere Druckverteilungen [10] auf dem betroffenen Teil des Rotorblattes und

es breiten sich entsprechende Geräusche in der Atmosphäre aus.

Bei älteren WEA wurde der Strömungsabriss gezielt genutzt, um die dem Wind entnommene Leistung ab einer kritischen Windgeschwindigkeit zu begrenzen. Heute wird diese Leistungsregelung geräuschärmer durch verstellbare Rotorblätter erreicht.

Unruhe in der Anströmung

In der Umgebung von WEA befinden sich häufig Wälder, Gebäude und andere WEA. Durch diese beinhaltet die anströmende Luft Verwirbelungen, sogenannte Turbulenz. Trifft die verwirbelte Luft auf das Rotorblatt, zerfallen Wirbel und es kommt zu Druckschwankungen: Schall breitet sich aus.

Modulationen von WEA-Schall

Neben den genannten Schallentstehungsmechanismen an der Hinterkante, durch Strömungsabriss und Turbulenz in der Anströmung, gibt es weitere Charakteristika des Schalls von WEA. Dazu gehören Modulationen, die auf der Rotorblatffrequenz beruhen. Diese Frequenz ergibt sich aus der Drehzahl und der Anzahl der Rotorblätter. Durch das wiederkehrende Muster mit fester Frequenz ist der WEA-Schall als technisches Geräusch erkennbar und hebt sich von natürlichen Geräuschen ab.

Gerichteter Schall

Am Fuße einer WEA ist ein wiederkehrendes Geräusch hörbar, das lautmalerisch mit „Wusch – Wusch – Wusch – ...“ beschrieben werden kann. Mithilfe einer akustischen Kamera wurde diese Modulation im hörbaren Frequenzbereich vermessen und dem äußeren Bereich der Rotorblätter zugeordnet [11]. Ursache hierfür ist der Hinterkantenschall. Zeigt die Hinterkante von uns weg, strahlt der Schall der zerfallenden Wirbel aus diesem Bereich besonders zu uns. Mit dem visuellen Eindruck auf die WEA korreliert dies nicht ganz, da der Schall sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet und so eine Laufzeitverzögerung von einigen Sekunden vorliegen kann.

Ungleichförmige Anströmung

In Bodennähe wird der Wind durch Hindernisse verwirbelt und abgebremst. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Höhe über dem Grund zu. Durch über den Tagesgang unterschiedliche Temperaturschichtungen der Luft und die mittransportierten Turbulenzen kommt es zu weiteren Beeinflussungen des Geschwindigkeits- und des Turbulenzprofils. Das Rotorblatt überstreicht während der Umdrehung das Windprofil über den Bereich des Rotordurchmessers – vom Zenit zum unteren Durchgang – mit feststehendem Anströmwinkel. Da

der durch das Rotorblatt induzierte Schall vom Anströmwinkel abhängt, kommt es in der Folge zu Modulationen des Schalls über den Umfang, ebenfalls wird dadurch die Ausbreitung beeinflusst [12], [13].

Rotorblatt-Turm-Interaktion

Eine weitere wiederkehrende strömungsmechanische Modulation liegt durch die Interaktion der Rotorblätter mit dem Turm vor. Die heutigen geschlossenen Turmstrukturen sind für die Strömung ein undurchlässiges Hindernis, ähnlich einem Brückenpfeiler. Um den Turm bildet sich ein Druckprofil aus [14], [15]. Am Ort der Anströmung ist der Druck erhöht und zu den Flanken hin nimmt er ab. Auch die Rotorblätter sind von einem ähnlichen Druckprofil umgeben. Streicht nun ein Rotorblatt am Turm vorbei, wird durch die Schrägstellung die Strömung abgelenkt und die Druckfelder interagieren. Hierdurch entstehen Druckänderungen, welche in der Umgebung messtechnisch nachweisbar sind. Diese periodischen Druckimpulse sind in ihrer Dauer durch das Vorbeistreichen am Turm bestimmt, was bei etwa einer Zehntelsekunde liegt.

Die Intensität ist durch den kürzesten Abstand von Rotorblattspitze zur Turmwand charakterisiert. Die Druckschwankungen durch die Rotorblattbewegung vorbei am Turm sind mit der Grundfrequenz bei modernen WEA etwas unter einem Hertz. Durch die Interaktionsdauer von rund einer Zehntelsekunde

liegen höhere Harmonische bis etwa zehn Hertz vor. Der damit verbundene Schall wird als Infraschall bezeichnet, da seine Frequenz unterhalb des üblichen menschlichen Hörbereichs ist.

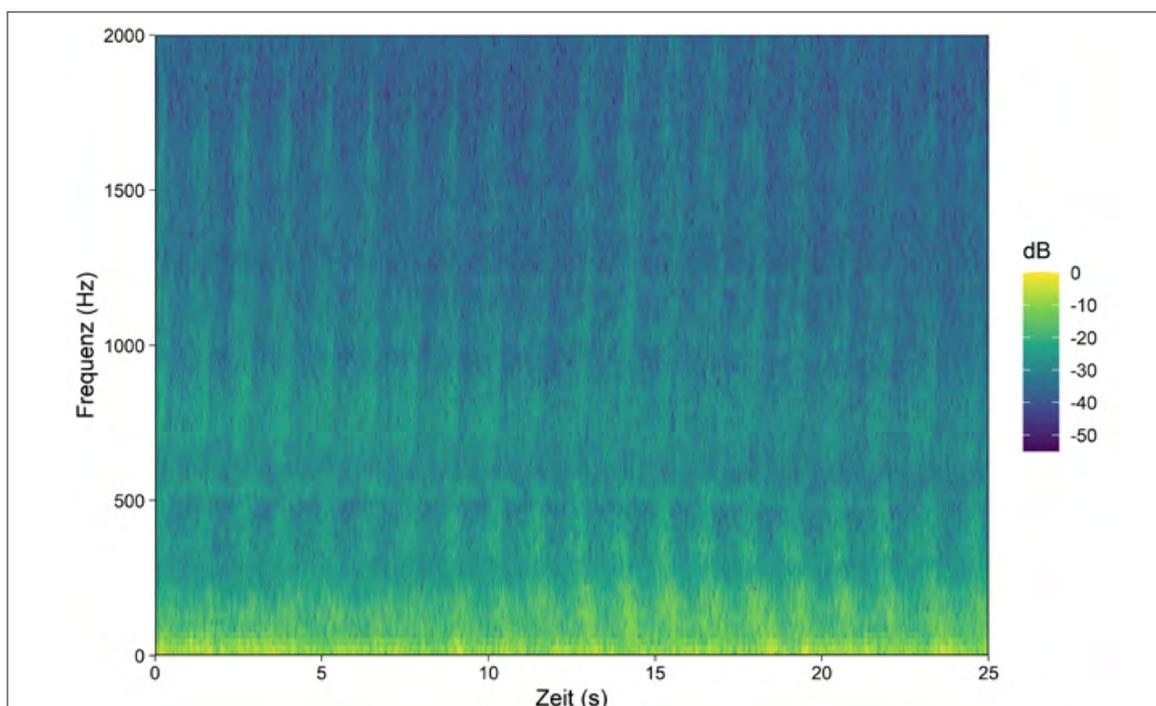
Beispiel für amplitudenmodulierten Schall einer WEA

Die unterschiedlichen Schallentstehungsmechanismen an WEA sorgen für ein rauschendes Schallsignal. Je nach Windbedingungen ist es in der weiteren Umgebung wahrnehmbar und in manchen Situationen unterliegt es zeitlichen Schwankungen. Diese Modulationen können unterschiedliche Ursachen haben, wodurch sich das entsprechende Schallsignal unterscheidet. Als Beispiel ist in Abbildung 3 das Spektrogramm einer akustischen Aufzeichnung von Bowdler [16] in der Nähe einer WEA dargestellt. Zunächst wurde ein periodisches Rauschen einer WEA aufgezeichnet. Nach der Hälfte schlägt dies um in ein dumpfes Schlagen. Durch die Audioaufnahmetechnik ist das mögliche Infraschallsignal nicht enthalten.

Schallreduzierungsmaßnahmen

Das Ziel, hohen Ertrag bei geringen Schallemissionen zu erzielen, ist eine herausfordernde Aufgabe. Die Schallentstehung ist ein unerwünschtes Nebenprodukt, was durch geeignete Maßnahmen geringgehalten wird. Zahlreiche technische Lösungen wurden in den letzten Jahren entwickelt. Schallmin-

Abb. 3: Spektrogramm eines an- und abschwelenden Schallsignals einer WEA von einer Audioaufnahme in der Nähe der Anlage [16]. Zwei unterschiedliche Modulationsarten sind erkennbar. In der ersten Hälfte ein periodisches Rauschen, in der zweiten ein dumpfes Schlagen mit Modulationen insbesondere unterhalb von etwa 300 Hz. Die periodischen Schwankungen mit etwa 0,8 Hz sind als vertikales Streifenmuster erkennbar.



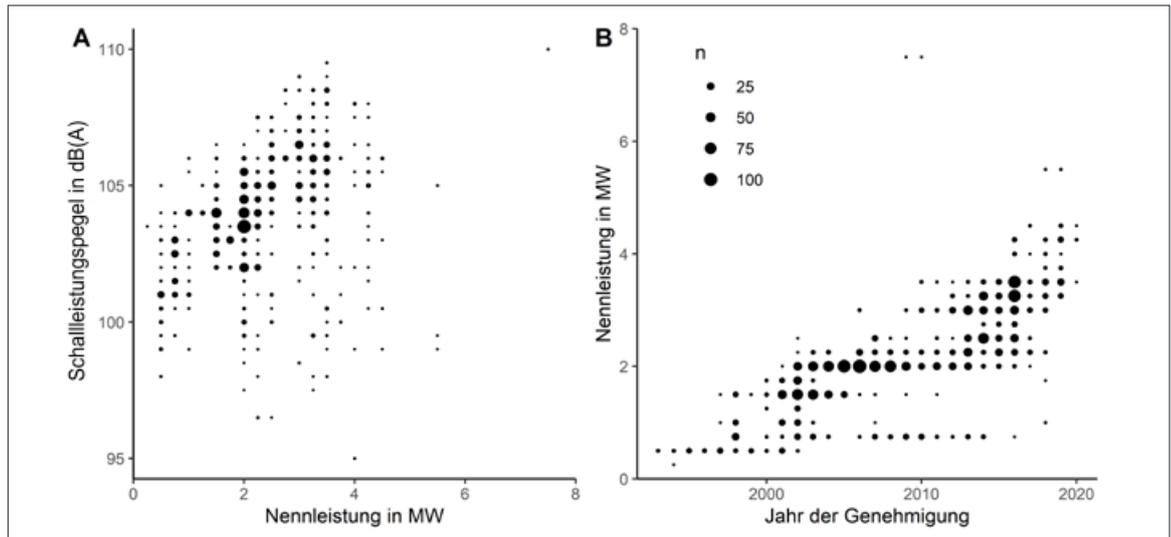


Abb. 4: (A) Genehmigte Schallleistungspegel von WEA in Brandenburg über elektrischer Nennleistung. Bis 3,5 MW Nennleistung nimmt der Schallleistungspegel zu, danach sind für die neueren und leistungsfähigeren WEA keine deutlichen Zunahmen im Schallleistungspegel zu verzeichnen. (B) Die installierte Nennleistung ist über die Jahre stetig angewachsen. Zwei Pilotanlagen mit an die 8 MW weichen von dem Trend ab. Die Punktgröße stellt jeweils die Anzahl der WEA, wie in der Legende von (B) angegeben, dar. Die Schallpegel sind auf halbe Dezibel und die Nennleistung auf viertel MW gerundet. Daten: Datenlizenz Deutschland – Landesamt für Umwelt Brandenburg – 2.0 [7].

derungsmaßnahmen setzen bei der Form und Ansteuerung sowie aktiven Bauteilen an.

Die technische Entwicklung der Schallminderungsmaßnahmen von WEA zeigt sich an deren zunehmender Nennleistung ohne deutliche Zunahme der Schallleistungspegel, welche wiederum ein akustisches Maß für die Quellstärke darstellen. Als Beispiel trägt Abbildung 4 die aktuell genehmigten Schallleistungspegel der WEA in Brandenburg bezüglich der installierten Nennleistung und dem Jahr der Genehmigung zusammen. Im Genehmigungsverfahren werden WEA als Punktquellen betrachtet und die Quellstärke mit dem Schallleistungspegel angegeben. Der entsprechende Schallpegel würde bei einer solchen gleichmäßig abstrahlenden idealisierten Punktquelle in einem Abstand von rund 28 cm vorliegen. Bei einer WEA ist der Quellbereich jedoch über die vom Rotor überstrichenen Fläche verteilt und lokal entsprechend geringer. Die Nennleistung des Generators ist die technische Obergrenze der elektrischen Leistung einer WEA. Bei modernen WEA wächst mit zunehmender Windgeschwindigkeit deswegen die Leistung ab etwa 10 m/s nicht mehr kubisch an (Gl. 2), sondern bleibt konstant.

Schalloptimierung steht nicht im Widerspruch zu mehr Ertrag: Eine dicke turbulente Grenzschicht und Ablösungen der Strömung sind Effekte, die nicht nur die Schallemissionen erhöhen, sondern sich auch nachteilig auf die aerodynamischen Eigenschaften des Rotorblattes auswirken. Primäre Aufgabe einer WEA ist es, dem Wind möglichst wirkungsvoll Energie zu entziehen und die Verluste, wie durch die

Turbulenz in der Strömung, dabei gering zu halten. Die Optimierung des Rotorblattes für hohe resultierende Kräfte geht somit in weiten Teilen mit dem Ziel einher, möglichst hohe resultierende Kräfte in Drehrichtung zu erzielen, welche den Generator der WEA antreiben.

Die geometrische Gestaltung der Rotorblattprofile erfolgt heutzutage mit Blick auf die gewünschten aerodynamischen wie akustischen Eigenschaften. Die Herausforderung ist die geeignete Form zu finden, welche unterschiedliche Anströmwinkel, Geschwindigkeiten und Oberflächeneigenschaften berücksichtigt [17], [18]. Letzteres verändert sich mit der Betriebszeit durch Ablagerungen auf den Rotorblättern. Kleinste Störungen der glatten Oberfläche können Verwirbelungen auslösen und somit den Umschlagpunkt zur turbulenten Strömung geometrisch zur Vorderkante hin verschieben und damit zum Ende die turbulente Grenzschicht dicker anwachsen lassen. Anreize für die Hersteller, die Optimierung der Rotorblattgeometrie voranzutreiben, sind gegeben, da sie sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirken und leise WEA ein wichtiges Verkaufsargument sind.

Der Hinterkantenschall, die Hauptquelle für die Schallemissionen, lässt sich durch einen allmählichen Übergang vom harten Rotorblatt zur freien Strömung weiter reduzieren [9]. Heutzutage werden hierfür Sägezahn hinterkanten angebracht. Mit dem Sägezahnprofil verringert sich allmählich die wirksame harte Fläche von der komplett geschlossenen Fläche hin zur freien Strömung, wodurch die wirksame Impedanz in diesem Bereich mit einem

allmählichen Übergang ausgestaltet ist. Darüber hinaus werden durch die rechenförmige Geometrie die Wirbel kleiner gehalten, der höher frequente Anteil im Spektrum stärker betont, was wiederum in der Atmosphäre wirksamer gedämpft wird. Es ist Stand der Technik, WEA mit diesen Profilen auszustatten, und damit ohne merkliche Leistungseinbußen für den Ertrag die Schallemissionen einer WEA um einige Dezibel zu reduzieren.

In der turbulenten Grenzschicht bilden sich die Verwirbelungen, welche für den dominanten Hinterkantschall verantwortlich sind. Ein weiterer Ansatz WEA leiser zu betreiben ist die Grenzschicht direkt zu beeinflussen. Eine Möglichkeit bietet die Absaugung der turbulenten Grenzschicht in das Rotorblatt hinein [19]. Dadurch wird die Grenzschicht dünner und das Geschwindigkeitsprofil stabiler. Es sind weniger Verwirbelungen in der Strömung, was zu geringeren Schallemissionen führt. Diese Technik ist soweit Gegenstand der Forschung. Ohne merkliche Ertragseinbußen sind einige Dezibel an Schallminderung möglich, erfordern jedoch den Einbau und Betrieb der Absaugeeinrichtung im Rotorblatt.

Darüber hinaus kann durch die Wahl des Anströmwinkels der Betrieb der WEA optimiert werden. Eine Möglichkeit ist es, mit einem flacheren Anströmwinkel die Schallentstehung zu reduzieren, indem das Rotorblatt weniger Widerstand bietet. Moderne WEA bieten hierfür sogenannte schallreduzierte Betriebsmodi, mit denen der Schallleistungspegel um mehrere Dezibel reduziert werden kann, der Ertrag jedoch entsprechend geringer ist.

Ausbreitung in die Umgebung

Die WEA werden mit Abstand zur Wohnbebauung errichtet. Für einen angemessenen Abstand sind unterschiedliche Kriterien wichtig. Allein aus der Gesamthöhe der WEA in Bezug auf den Menschen in seiner üblichen Wohnbebauung ist mit Blick auf die außergewöhnlich großen WEA ein Mindestabstand auf Grund der bedrängenden Wirkung angebracht. Dieser liegt derzeit in Deutschland bei der dreifachen Gesamthöhe.

Für die Beeinträchtigungen durch Immissionen ist, neben dem Schall, der periodische Schattenwurf eine relevante Größe. Fällt der regelmäßig wiederkehrende Schatten bei Sonnenschein beispielsweise ins Wohnzimmer, wird dies als störend empfunden. Damit diese Immissionen im Bereich der unerheblichen Belästigungen bleiben, sind Richtwerte einzuhalten. In Deutschland werden diese durch den Länderausschuss für Immissionsschutz vorgegeben. Geometrisch lassen sich die möglichen Ereignisse von periodischem Schattenwurf zuverlässig für das ganze Jahr berechnen. Die Einhaltung der Höchstwerte

wird durch programmierte Steuereinrichtungen sichergestellt. Während der periodische Schattenwurf noch in größerer Entfernung westlich und östlich der WEA vorliegen kann, kommt er im Süden der Anlage in Deutschland nicht vor, denn die Sonne steht bei uns nie im Norden. Im Norden selbst ist der betroffene Bereich durch die höherstehende Mittagssonne eher klein. Ein fester Mindestabstand von WEA zur Wohnbebauung aufgrund von periodischem Schattenwurf ist daher in diesem Fall nicht angebracht.

Die Schallausbreitung in der Luft hängt von der Schallgeschwindigkeit und der Bewegung des Mediums selbst, wie dessen dämpfenden Eigenschaften ab. Des Weiteren wird er durch den Boden, den Bewuchs und die Bebauung absorbiert wie auch reflektiert. Es nimmt der Schallpegel durch Ausbreitung in der Atmosphäre mit zunehmendem Abstand von der Quelle ab, darüber hinaus führt die Schallausbreitung in der Strömung zu lokalen Beeinflussungen, welche sich über lange Ausbreitungswege akkumulieren. Physikalisch ist dies mit der Ffowcs-Williams-Hawkings-Gleichung [20] beschrieben. Die für die Ausbreitung maßgebliche Schallgeschwindigkeit wird zum einen durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst, zum anderen durch die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit. In realen Situationen sind damit je nach Windbedingungen und Temperaturschichtungen der Atmosphäre unterschiedliche Schallpegel in der Umgebung zu erwarten [12]. Insbesondere stromab der WEA ist mit höheren Pegeln zu rechnen, jedoch kann es durch Temperaturschichtungen auch zu effektiven Verschattungen in ein paar Kilometern Abstand kommen, obwohl kein geometrisches Hindernis vorhanden ist.

Neben der Ausbreitung über die Luft findet eine Wellenausbreitung über den Boden statt. Der Rotor einer WEA dreht durch eine turbulente Anströmung und überstreicht dabei ein Windprofil. In der Folge ändern sich die Lasten an den Rotorblättern während der Drehung. Diese dynamischen Kräfte werden über das Fundament in den Boden eingeleitet und breiten sich dort aus. Mit empfindlichen Messgeräten lassen sich diese noch in größeren Entfernungen nachweisen, sind jedoch von geringerer Amplitude [21]. Die Ergebnisse einer Messung vor Ort von Vibrationen an Fenstern, Fußboden und Bett ließen sich allein mit einem Ausbreitungsweg von der WEA über die Luft erklären [22]. Die Messungen an Fußboden und Bett enthielten kein WEAtypisches Signal. Allerdings hängt im Einzelfall eine mögliche Ausbreitung über den Boden stark von der Bodenbeschaffenheit ab.

Neben der Verteilung der Schallleistung auf eine mit wachsendem Abstand zur WEA größeren Fläche nimmt der Pegel bei der Ausbreitung in realen Medi-

en durch Verluste ab. Bei der Schallausbreitung wird lokal die Luft komprimiert und entspannt sich anschließend. Bei der Druckzunahme wird nicht allein gegen das Kompressionsmodul gearbeitet, sondern auch gegen Reibungskräfte, wie sie beispielsweise durch die Volumenviskosität im Fluid vorliegen. Diese Verluste reduzieren über den Ausbreitungsweg den Schallpegel. Für die Ausbreitung von WEA-Schall in der Luft ist diese Dämpfung für Frequenzen oberhalb von einem Kilohertz in einem Abstand von einem Kilometer spürbar gedämpft und Schallanteile im Bereich von acht Kilohertz sind nicht mehr hörbar. Die frequenzabhängige Dämpfung wird in den derzeitigen Schallberechnungen für WEA in Deutschland berücksichtigt. Dies ist ein Anreiz für die WEA-Hersteller, dass der unvermeidbare Schall eher höherfrequente Anteile hat.

Nachdem die Wellen sich über Luft und Boden ausgebreitet haben, dringen sie über die Gebäudehülle ins Innere des Gebäudes ein. Zwar ist die Dämpfung durch die Wand für niedrigere Frequenzen geringer als für den üblichen Hörbereich [23], jedoch ist die Empfindlichkeit gegenüber diesen Schallanteilen auch geringer. Fällt aber die erregende Frequenz mit einer Eigenfrequenz des zu beurteilenden Raumes zusammen, kann es zu Verstärkungseffekten und unter Umständen eher zu einer Wahrnehmung kommen. Die Eigenfrequenzen sind abhängig von den möglichen Luftbewegungen in der Wohnung. Eine leicht geöffnete Tür zum Nachbarzimmer kann beispielsweise tiefe Frequenzen deutlich beeinflussen. Darüber hinaus können die Pegel stark von der Position im Raum abhängen. Stellen wir das Bett an einer anderen Stelle im Zimmer auf, kann dies ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Pegel der sehr tiefen Frequenzen haben.

WEA-Schall bei Anwohnern

Der Schall der WEA, der in erster Linie von den Rotorblättern stammt, kann bei den Anwohnern je nach Wind und Abstand als ein Geräusch hörbar sein, das oft im Pegel zeitlich schwankt. Die zahlreichen und zufälligen Wirbel unterschiedlichster Größe sorgen am Rotorblatt für ein breitbandiges Rauschen. Wie eingangs beschrieben, wird dies durch die Drehung der Rotorblätter und die Ausbreitung in der bewegten Luft moduliert.

Für die Beurteilung ist es vorteilhaft, eine repräsentative skalare Größe zu haben, um definiert prüfen zu können, ob ein damit festgelegter Richtwert eingehalten werden kann beziehungsweise wird. Kennen wir nur einen Wert, wie beispielsweise 45 dB(A), kann dies ein Einzelton, ein Rauschen, gesprochene Sprache und vieles mehr sein. Eine solche Einzelgröße kann durch Zuschläge zur Berücksichtigung

von besonderen Schallmerkmalen ergänzt werden und damit genauer eine Schallart beschreiben. Doch auch nach dieser Korrektur ist es weiterhin eine skalare Größe. Für die eindeutige Beurteilung kommt eine Zahl zum Zuge. Aus diesem singulären Wert lässt sich das ursprüngliche Zeitsignal nicht vollständig rekonstruieren. Um eine Vergleichbarkeit zu haben, können nicht alle Eigenschaften des einzelnen Schallereignisses berücksichtigt werden.

Für die rechtliche Beurteilung wird die spektrale A-Bewertung zur Wichtung unterschiedlicher Frequenzanteile verwendet. Diese Wichtung entspricht dem Lautstärkepegel von etwa 20 bis 40 phon. Grundlage für diese Kurve der Frequenzbewertung sind psychoakustische Untersuchungen mit Einzeltönen. Dem breitbandigen Rauschen, was typisch für die WEA ist, wird dabei nur bedingt Rechnung getragen. Jedoch ist es wichtig, für die Rechtsprechung einen einheitlichen und wohl definierten Vergleichsmaßstab zu haben. Für die A-Bewertung liegen zahlreiche Erfahrungen und Messungen aus unterschiedlichsten Bereichen vor. Für den Tieffrequenz- und Infraschallbereich ist diese Bewertung jedoch ungeeignet. Im Folgenden werden hierfür die Werte ohne Wichtung der Frequenz in dB(Z) angegeben.

Die Modulation des Rauschens lässt sich durch zeitlich aufgelöste Schallpegelauswertung ermitteln, in dem ein statistisches Maß für den zeitlich variierenden Pegel ausgewertet wird. Unterschiedliche Ansätze wurden hierfür entwickelt [24], [25]. In Deutschland werden derzeit zur Beurteilung nur Impuls- und Tonhaltigkeit berücksichtigt. Eine Modulation des Schalls findet in Deutschland bei der Beurteilung soweit noch keine Berücksichtigung, wird jedoch in der überarbeiteten DIN 45680:2020-06 zum Zuge kommen.

Durch die Interaktion von dem Rotorblatt mit dem Turm entstehen Drucksignale mit der Frequenz dieses Ereignisses und ganzzahligen Vielfachen davon. Diese Frequenzen liegen unterhalb des üblichen Hörbereichs und der Schall wird entsprechend als Infraschall bezeichnet. Messtechnisch lassen sich diese Signalanteile im Nahbereich der WEA relativ ungestört nachweisen und betragen bei der Frequenz von rund 1 Hz etwa 70 dB(Z) [26], [27]. In weiterer Entfernung heben sie sich nicht markant von den Umgebungsgeräuschen ab.

In den meisten Fällen stehen heute WEA in Gruppen zusammen. Den Anwohner erreicht in diesen Konstellationen eine Überlagerung von mehreren Geräuschen der einzelnen WEA, wobei jede für sich amplitudenmodelliert Schall abstrahlt, welcher auch noch in einigen Kilometern Entfernung nachgewiesen werden kann [28]. Bei einer unkorrelierten Drehung der Rotoren der einzelnen WEA und durch unterschiedliche Laufzeiten des Schalls in der Luft

ergeben sich im Spektrum durch die Überlagerung ein komplexes Schallsignal, welches sich von dem einer einzelnen WEA unterscheidet. Bei geringen Drehzahlunterschieden kann es zu Schwebungseffekten kommen [29].

Insgesamt wird der Schall von WEA in ihrer Umgebung in erster Linie als Rauschen wahrgenommen, das durch die Drehung der Rotorblätter und die Schwankungen des Windes Modulationen und Fluktuationen unterliegt. Es ist jedoch kein klassisch amplitudenmoduliertes Signal, da keine feste Trägerfrequenz vorliegt. Überlagert ist das Schallsignal mit einer Druckschwankung im Infraschallbereich.

Wahrnehmung von Schall

Auf Schall reagieren die Haarzellen im Innenohr des Menschen am empfindlichsten. Geringste Pegel werden registriert und Nervenimpulse an das Gehirn weitergeleitet. Der Schall einer WEA nimmt mit der Entfernung deutlich ab, jedoch auch noch im Abstand von mehr als einem Kilometer können wir ihn mit unserem Ohr wahrnehmen.

Das menschliche Hören ist für die gesprochene Sprache besonders gut entwickelt. Für das Sprachverständnis sind Modulationen im Bereich von einigen Zehntelsekunden zum Erkennen von Silben entscheidend. Dementsprechend empfindlich ist unser Gehör für Modulationen, insbesondere mit Frequenzen, deren zugehörige Perioden in diese Zeitskalen fallen [30]. Neben der Wahrnehmung von Modulation ist der Mensch auch gut im Identifizieren von Mustern. Beim Hören von einer Sekunde Rauschen in Dauerschleife, welches innerhalb des Abschnitts unkorreliert ist, fällt nach wenigen Sekunden das wiederkehrende Muster auf (Hörbeispiele: Rauschen ohne Wiederholung (A1) und mit Wiederholung jede Sekunde (A2)). Bei WEA wiederholt sich zwar nicht das Rauschen, jedoch erkennen wir das periodisch wiederkehrende Muster der rotierenden Rotorblätter. Für uns Menschen sind sogar die einzelnen Rotorblätter einer WEA allein akustisch unterscheidbar [31].

Das Schallsignal erreicht den Menschen über den äußeren Gehörgang, trifft am Ende auf das Trommelfell und setzt im Mittelohr die Knochen Hammer, Amboss und Steigbügel in Bewegung (siehe Abbildung 5). Letzterer überträgt die Bewegung auf das mit Flüssigkeiten gefüllte, schneckenförmige Innenohr, der Cochlea. Für die hörbaren Frequenzanteile breitet sich eine Wanderwelle in der Hörschnecke aus. In dieser befinden sich Kanäle, die durch die Basilarmembran voneinander getrennt sind, auf der wiederum das Corti'sche Organ mit den hochempfindlichen Haarzellen liegt. Hier findet die Umsetzung von Bewegung in elektrische Nervensig-

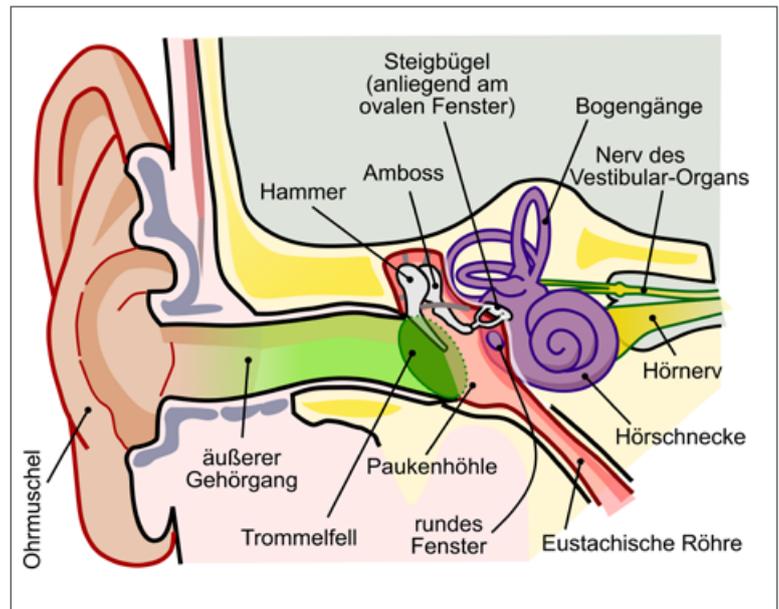


Abb. 5: Aufbau des Ohres mit Außenohr bis zum Trommelfell, dem Mittelohr mit Hammer, Amboss und Steigbügel und dem Innenohr mit Bogengängen und Hörschnecke (Cochlea). Lars Chittka, Axel Brockmann / CC-BY-2.5

nale statt. Mit der Wanderwelle bewegt sich die Basilarmembran: für hohe Töne allein am Anfang des Schneckenganges, für tiefe Töne zum Ende hin.

Die beiden Kanäle sind am Ende der Cochlea miteinander verbunden. Diese Verbindung wird Helicotrema genannt. Bei sehr tiefen Tönen treffen die Druckfelder, welche durch die Bewegung des Steigbügels in beiden Kanälen hervorgerufen werden, am Helicotrema aufeinander und heben sich teilweise auf [32], was eine reduzierte Auslenkung der Basilarmembran mit sich bringt. Dieser akustische Kurzschluss ist abhängig von den geometrischen Abmessungen der Cochlea und liegt für unterschiedliche Individuen bei leicht differierenden Frequenzen. Für verschiedene Tierarten sind die Unterschiede deutlicher. Bei Tönen am unteren Ende des Hörbereichs bewegt sich die Basilarmembran mit abnehmender Frequenz zunehmend gleichförmiger. Wir beginnen statt einem gleichförmigen Ton einzelne Druckpulse wahrzunehmen. Der Übergang ist allmählich, nicht abrupt bei einer bestimmten Frequenz. Er geht vom tonalen Hören, über die Wahrnehmung von Druckimpulsen und endet in einer verschwindenden Wahrnehmung. Mit der Wanderwelle, die je nach Frequenz unterschiedliche Haarzellen längs der Basilarmembran stimuliert, findet eine Art Frequenzanalyse statt, die sich jedoch von der mathematischen Fourier-Analyse deutlich unterscheidet. Während die Fourier-Analyse in ihrer kontinuierlichen Form über einen unendlich ausgedehnten Zeitraum erfolgt, was eine unendlich feine Frequenzauflösung ermöglicht, analysiert das Gehör in Zeitabschnitten, wodurch zum Beispiel der zeitliche Ablauf einer Tonfolge erkannt

wird. Die Begrenzung auf einen Zeitabschnitt bedingt eine endliche Frequenzauflösung, wobei aber Zeit- und Frequenzauflösung je nach Hörsituation in unterschiedlicher Beziehung stehen. Eine abschnittsweise Analyse liegt auch beispielsweise der Wavelet-Analyse oder der MP3-Komprimierung zugrunde. Ein weiteres Beispiel ist das Spektrogramm in Abbildung 3.

Neben der zwar endlichen, aber dennoch relativ hohen Auflösung der Frequenzen, zeichnet sich das Ohr durch eine sehr große Sensitivität aus. Bei einem Sinuston mit einem Pegel von 0 dB(A) und einer Frequenz von 1 Kilohertz bewegt sich die Luft mit einer Amplitude von rund 10 Pikometern, was ungefähr dem Durchmesser eines Wasserstoffatoms entspricht, vor und zurück. Diese minimalste Bewegung liegt im Bereich der Wahrnehmungsschwelle von unserem Ohr. Für die hohe Empfindlichkeit sind verstärkende Mechanismen verantwortlich. Die Umsetzung von Bewegung in ein elektrisches Signal findet auf der Haarzelle im Haarbündel statt, wo aktive Prozesse die Bewegung [33] verstärken. Die Zellwand selbst hat Eigenschaften wie ein Piezomaterial. Ändert sich das Potenzial in der Zelle, hat dies eine Änderung der Zelllänge zur Folge [34] und verstärkt die Wanderwelle.

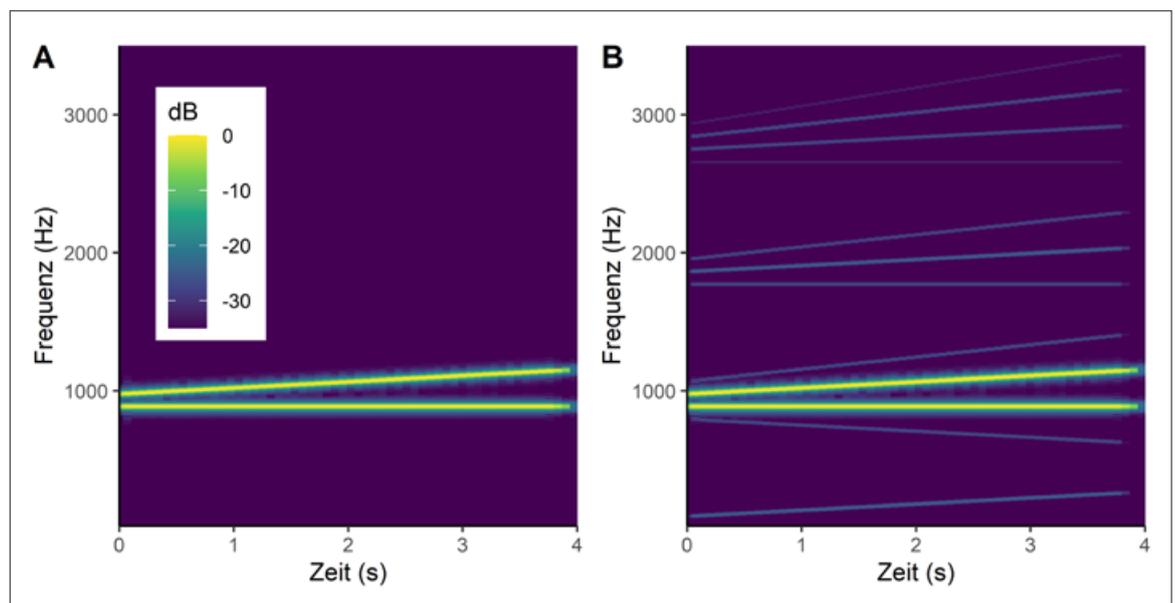
Das komplexe Zusammenspiel dieser Prozesse im Zellverbund des Corti'schen Organs zeigt sich an nichtlinearen Eigenschaften. So werden leise Töne mehr verstärkt als laute, es wird allein der Frequenzbereich mit dem Schallsignal angehoben und darüber hinaus entstehen in unserem Ohr Töne, die als otoakustische Emissionen im Gehörgang messbar

sind [35], [36]. Die nichtlinearen Eigenschaften des Ohres werden durch Verzerrungen, sogenannte Tartini-Töne, hörbar. Hören wir einen Ton mit konstanter Frequenz (f_1) und einen in der Frequenz etwas höher und leicht ansteigenden Ton (f_2), nehmen wir beispielsweise auch einen zusätzlich abfallenden Ton wahr (siehe Abbildung 6). Dieser sogenannte Kombinationston ergibt sich aus der doppelten Frequenz des konstanten minus der Frequenz des ansteigenden Tones ($2f_1 - f_2$).

Als Hörbeispiele sind hierfür zunächst der konstante und der ansteigende Ton nacheinander hörbar (Hörbeispiel A3). In einer weiteren Variante werden sie gleichzeitig abgespielt (Hörbeispiel A4). Nichtlinearitäten im Wiedergabesystem können nicht ausgeschlossen werden, deshalb liegen die Hörbeispiele ebenso in einer Stereoversion vor, wobei die einzelnen Töne dem rechten und linken Kanal zugeordnet sind. Hören wir die einzelnen Töne f_1 und f_2 für sich ohne harmonische Verzerrungen und Kombinationstöne, aber zusammen mit, so entstehen diese im Innenohr. Wird das Signal durch eine schwache Nichtlinearität abhängig von der Amplitude modifiziert, entstehen Verzerrungen direkt im Signal (Hörbeispiel A5). Durch die nichtlinearen aktiven Prozesse unseres Innenohres können wir die beiden Beispiele nur schwer unterscheiden. Somit nehmen wir zwar leiseste Töne mit unserem Gehör wahr, jedoch bringt dies Nichtlinearitäten und entsprechend Verzerrungen mit sich.

Innerhalb des Corti'schen Organs befinden sich zwei Arten von Haarzellen. Die sogenannten äußeren Haarzellen, die für den aktiven Verstärkungs-

Abb. 6: (A) Spektrogramm von einem konstanten und einem ansteigenden Ton (Hörbeispiel A4). (B) Spektrogramm vom Signal wie in (A) jedoch mit einer geringen Nichtlinearität ist dieses modifiziert (Hörbeispiel A5). Unterschiedliche ganzzahlige Kombinationen der beiden Grundtöne sind sichtbar.



mechanismus verantwortlich sind, und die inneren Haarzellen, welche die verstärkten Bewegungen in Nervensignale umsetzen. Die Enden des Haarbündels der äußeren Haarzellen sind fest mit den umgebenden Zellen verbunden und werden entsprechend über die Relativbewegungen stimuliert. Dagegen beruht die Anregung der inneren Haarzellen teilweise auf einer Flüssigkeitskopplung, welche bei niedrigen Frequenzen weniger wirksam ist. Durch Infraschall kann sich somit der Arbeitspunkt des Verstärkermechanismus periodisch verschieben [37] und eine Modulation der Hörsensitivität verursachen. Es ist offen, welche Rolle dieser Prozess für WEA-Schall, der sich aus Hör- und Infraschall zusammensetzt, hat. In einer psychoakustischen Untersuchung zeigte sich, wie schwer es fällt, eine Amplitudenmodulation von einer Überlagerung mit einem Infraschallsignal zu unterscheiden [38].

Direkt an die Hörschnecke schließt das Gleichgewichtsorgan an. Ebenfalls dort befinden sich hochempfindliche Haarzellen, jedoch befinden sich diese nicht auf einer schwingenden Membran, sondern registrieren allein über Auslenkungen des Haarbündels kleinste Bewegungen des Kopfes. Stimulieren können durch Drehbewegung ausgelöste Flüssigkeitsbewegungen in den kreisförmigen Bogengängen, sowie bei Beschleunigung die Relativbewegung durch die dichteren Otolithen oberhalb der Haarbündel. Besonders empfindlich sind diese Zellen bei Frequenzen unterhalb des Hörbereichs. Basis für diese hohe Empfindlichkeit ist eine kohärente und gleichförmige Auslenkung des Haarbündels [39]. Auf einen Stimulus mit Infraschall mit Amplituden, die für WEA im Nahbereich typisch sind, wurden jedoch keine Reaktionen des Gleichgewichtsorgans nachgewiesen [40].

Am Ende der Wahrnehmungskette steht die Verarbeitung im Gehirn. Mithilfe von funktioneller Magnetresonanztomografie wurde nachgewiesen, dass im Bereich der Wahrnehmungsschwelle bei einem Stimulus mit einem sinusförmigen Ton von 12 Hz, was im Infraschallbereich liegt, die aktivierten Regionen weitgehend mit den Arealen des auditorischen Cortex übereinstimmen [41]. Deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen keine Daten vor. In den Studien wird meist mit definierten einzelnen Sinustönen gearbeitet, was nicht typisch für den Schall einer WEA ist. Die Präsenz von breitbandigem Rauschen im hörbaren Bereich, was eher den WEA-Schall abbildet, reduziert die Empfindlichkeit im Infraschallbereich. Die Wahrnehmungsschwelle bewegt sich durch zusätzlichen hörbaren Schall nach oben [42]. Diese Schwelle streut über die Probanden im Infraschallbereich stärker als im normalen Hörbereich und der Dynamikbereich zur Schmerzschwelle

wird mit abnehmender Frequenz immer geringer.

Allein bei dem seltenen Tullio-Phänomen ist eine empfindliche Stimulation der Bogengänge durch Schall bekannt, wodurch Schwindel ausgelöst werden kann [43–45]. Ursache hierfür ist eine Stelle am Bogengang zum Inneren des Schädels, bei welcher die knöcherne Schale keinen Widerstand mehr bietet und bei einer Druckanhebung die Wandung des Bogengangs nachgibt. Für spezielle Frequenzen kann sich eine stehende Welle ausbilden und die Haarzellen im Gleichgewichtsorgan stimulieren, allerdings sind die charakteristischen Frequenzen für den entsprechenden Stimulus im Bereich von einem Kilohertz, weit oberhalb der sonst typischen Frequenzen von etwa ein Hertz für dieses Organ. Möglicherweise ist das Tullio-Phänomen bei einigen Betroffenen für eine erhöhte Schallempfindlichkeit verantwortlich [46].

Zwar befinden sich in unserem Innenohr die für Schallsignale sensitivsten Zellen, jedoch reagieren auch andere Zellen in unserem Organismus auf äußere Kräfte. Insbesondere das ständig schlagende Herz ist empfindlich auf geringste Veränderungen und Störungen [47]. Gesunde Druckverhältnisse sind essenziell und liegen für den Blutdruck in der Größenordnung von zehn Kilopascal, bei einer charakteristischen Zeitskala unserer Herzmuskelaktivitäten von einigen Zehntelsekunden. Im Rahmen von Untersuchungen an Tieren wurden bei einer 40-tägigen Exposition bei 8 Hz mit Schallpegeln von 120 dB(Z) für drei Stunden täglich eine lokale Störung des Herzmuskelgewebes festgestellt [48]. Messungen an Proben des menschlichen Muskelgewebes zeigen eine Reduktion der Muskelaktivität bei Exposition mit vergleichbaren Schallpegeln von 110 und 120 dB(Z) für eine Stunde bei 16 Hz [49]. Inwiefern diese Untersuchungen, mit den zwischen Metallklammern eingespannten kleinen Gewebeproben, auf die Situation im menschlichen Organismus übertragbar sind, ist soweit nicht geklärt. In beiden Experimenten liegen die Schallpegel deutlich über den im Umfeld von WEA gemessenen.

Der WEA-Schall mit zeitlichen Schwankungen und der Überlagerung mit einem Infraschallsignal ist ein komplexes Signal, das mit dem Innenohr wahrgenommen wird und auf den Organismus wirkt. Für die Wahrnehmung von geringsten Schallpegeln sind vielfältige aktive Prozesse beteiligt, welche zu Nichtlinearitäten führen. Wenden wir eine nichtlineare Transformation auf ein Schallsignal an, so führt dies zur Veränderung im Frequenzspektrum.

Als Beispiel betrachten wir ein periodisch moduliertes stochastisches Rauschen. Das Rauschen wird im Abstand von 1,25 s im Pegel kurze Zeit angehoben (Hörbeispiel A7, siehe Abbildung 7). Das lineare Zeitsignal in den Frequenzbereich transformiert zeigt

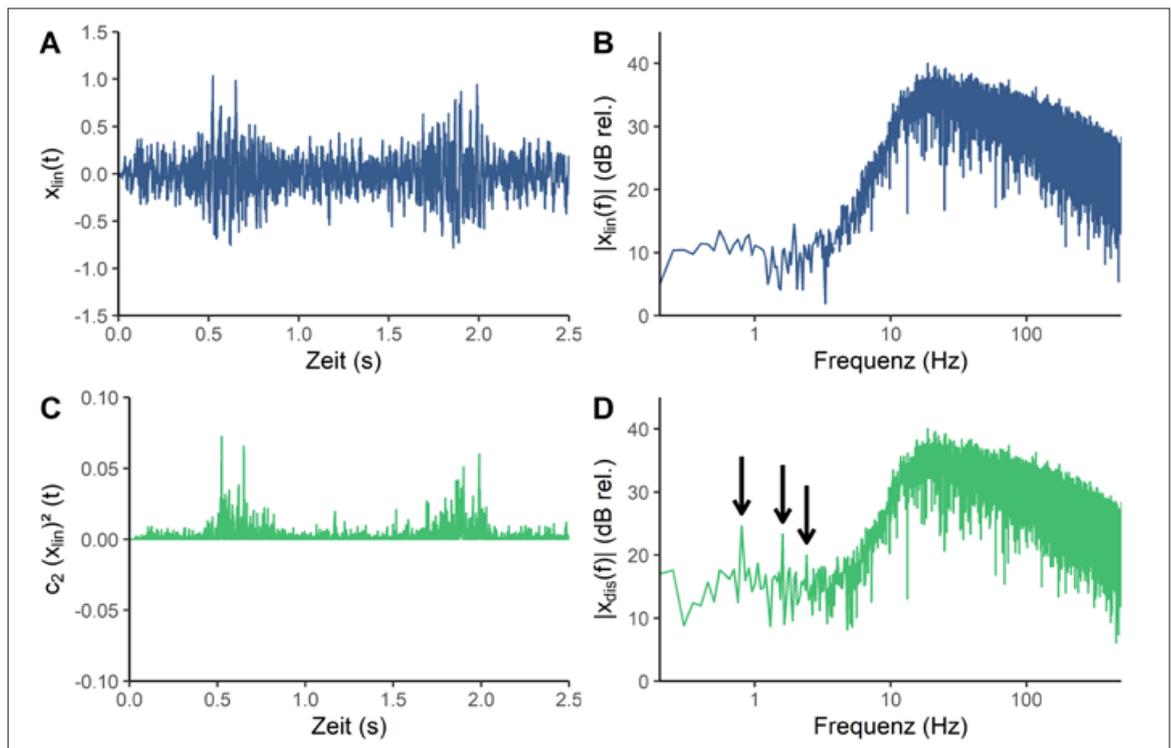


Abb. 7: Zeitreihen und Amplitudenspektren eines Zeitsignals mit Amplitudenmodulation und einer Grundfrequenz von 0,8 Hz. Während das lineare Signal (A, Hörbeispiel A7) unter 10 Hz keine relevanten Anteile (B) hat, findet sich im Signal mit Distorsionen ein quadratischer Anteil (C) mit einer deutlichen Anhebung von diesem Frequenzbereich (D, Hörbeispiel A8). Die entsprechenden Maxima liegen bei der Grundfrequenz und ganzzahligen Vielfachen (Pfeile).

keine nennenswerte Pegel unterhalb von 10 Hz. Anders verhält es sich bei der Modifikation mit geringen Nichtlinearitäten (Hörbeispiel A8). Für den quadratischen Anteil ist das Vorzeichen immer positiv. Zu den Zeiten, bei denen die Amplitude höher ist, ist ebenso der Mittelwert erhöht. Entsprechend enthält das Frequenzspektrum angehobene Pegel bei der Grundfrequenz von 0,8 Hz und den entsprechenden höheren Harmonischen.

Durch die Nichtlinearitäten im Innenohr entstehen unterschiedliche Verzerrungen, wie durch einen quadratischen Term. Das ursprüngliche Signal wird mit solchen Verzerrungen überlagert. Damit ist die Möglichkeit gegeben, dass der nichtlineare Verstärkungsmechanismus in unserem Innenohr ebenso Infrasschallsignale entstehen lässt

Beurteilung von WEA-Schall

Unser umfassendes Wissen über die Wahrnehmungsvorgänge hilft uns mögliche Belästigungen einzuordnen. Nicht alles, was wahrnehmbar ist, ist auch belästigend, geschweige denn erheblich belästigend. Der Schallpegel und die Expositionsdauer sind wichtige Größen, die Einfluss auf den Grad der Belästigung sowie mögliche Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Begrenzungen von Immissionen haben wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeu-

tung und sind in Deutschland für Schall durch die TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) mit Richtwerten abgesteckt.

Die Richtwerte sind keine Naturkonstanten und werden durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse ständig geprüft. Mit den Leitlinien für Umgebungslärm für die europäische Region der WHO wurden 2018 die Richtwerte für WEA kritisch betrachtet. Als Kriterien werden mögliche Gesundheitsfolgen bei einer erhöhten Lärmbelastung angewandt. Berücksichtigt werden dabei koronare Herzerkrankungen, Bluthochdruck, starke Belästigung, starke Schlafstörung, dauerhafter Hörverlust und verzögerte Entwicklung von Lese- und Sprachverständnis. Nach aktueller Genehmigungspraxis werden die Richtwerte in Deutschland eingehalten [50] und es liegen damit keine kritisch erhöhten Risiken für die Gesundheit vor.

Die Richtwerteinhalten wird anhand von Beurteilungspegeln geprüft. Die vollständige Beschreibung der Schallausbreitung für reale Windverhältnisse ist äußerst komplex und aufwendig. Derartige Berechnungen sind nicht ohne Weiteres überprüfbar und so wird für Genehmigungsverfahren ein klassischer Ingenieursansatz gewählt: Erfassung der wesentlichen Effekte durch integrale Terme, Abgleich mit realen Messungen und Berücksichtigung von Unsicherheiten durch konservative Zuschläge. Dies gewährleis-

tet eine Überprüfbarkeit, unterliegt aber auch immer wieder Neuerungen durch Erkenntniszuwachs. So wurden in einer Studie die Abweichung von Prognose und gemessenen Pegeln ermittelt [51] und daraufhin für WEA das sogenannte Interimsverfahren für die Schallprognosen in Deutschland eingeführt. Durch die strengere Beurteilung liegen in heutigen Genehmigungsverfahren häufig deutliche Richtwertüberschreitungen durch Bestandsanlagen vor. Eine Möglichkeit neu geplante WEA auf Unerheblichkeit ihres Beitrages zu prüfen, bietet das Konzept der Einzelfallgerechtigkeit [52].

Zuschreibungen dem Schall

Die Richtwerte sind für den Nachtzeitraum für bewohnte Gebiete auf Werte zwischen 35 und 45 dB(A) festgelegt und befinden sich damit im hörbaren Bereich. Wie der einzelne Anwohner mit diesem Schallsignal und der möglichen Betroffenheit umgeht, liegt an subjektiven Ausprägungen in der Wahrnehmung und welche Bedeutung mit dem Gehörten verbunden wird. Jedoch wird mit einem statischen technischen Geräusch nicht ohne weiteres etwas Positives verbunden, wie in der Regel mit einem fröhlich plätschernden Bach.

Was einer Sache zugeschrieben wird, hier dem Schall von WEA, hängt von Erfahrungen, Vermutungen und äußeren Rahmenbedingungen ab. Im Rahmen von psychologischen Experimenten wurde nachgewiesen, dass der Mensch sich durch einen Film darin beeinflussen lassen kann, wie er den Schall von WEA beurteilen wird [53], [54]. In diesen Untersuchungen wurde einer Gruppe ein Film gezeigt, der vor den Gesundheitsgefahren durch Schall von WEA warnt, für die andere Gruppe war es ein Film, in dem entwarnt und ein positives Bild vermittelt wurde. Im Anschluss wurde eine Tonaufnahme von einer WEA abgespielt und die Probanden zu möglichen Beschwerden befragt. Teilnehmer der Studien, die eine negative Haltung gegenüber Schall von WEA haben, wiesen signifikant stärkere Beschwerden dem WEA-Schall zu. Mit dieser Beobachtung zeigt sich, wie entscheidend eine äußere Information sein kann. Bei der Auswertung von Beschwerden in Australien ergaben sich geografische Häufungen, die sich nicht mit der Schallexposition erklären ließen, jedoch durch Verbreitungswege von kritischen Hinweisen zum Infraschall von WEA [55]. Wie negative Moderatoren gibt es ebenso positive. Sind Anwohner am wirtschaftlichen Betrieb von WEA beteiligt, fühlen sie sich deutlich weniger durch WEA-Schall belästigt [56].

Infraschall

Ebenfalls wurde die Reaktion auf das Infraschallsignal der WEA untersucht. Hierzu wurde von Tonin

u.a. [53] ein synthetisches Signal einem Teil der Teilnehmer über Kopfhörer zusammen mit Hörschall einer WEA eingespielt. Mit einem Schallpegel von 91 dB(Z), einer Grundfrequenz von 0,8 Hz und 16 Harmonischen und einer Sägezahnform ist dies ein konservativer Ansatz für das Infraschallsignal [57]. Der Vergleich von WEA-Schall mit oder ohne Infraschallsignal ergab keine gesundheitlichen Auswirkungen auf den Probanden. In einem neueren Experiment [22] kam ein realitätsnäheres Schallsignal zum Einsatz, jedoch liegen noch keine belastbaren Aussagen vor.

Zur Einordnung der Amplituden von Infraschallsignalen hilft ein Vergleich mit Expositionen im Alltag. Beim Gehen bewegen wir unseren Kopf leicht auf und ab. Durch die Änderung der Höhe kommt der Gewichtsdruck in der Bernoulli-Gleichung (Gl. 1) zum Zuge, der dynamische Anteil ist bei der niedrigen Frequenz zu vernachlässigen. Bei einer Bewegungsamplitude von nur rund 1 cm folgt daraus ein Schalldruckpegel von etwa 73 dB(Z), was gemessene Werte am Ohr von Spaziergängern bestätigen [58]. Bei Wanderungen setzen wir unseren Körper diesen Infraschallpegeln über lange Zeiträume aus. Insbesondere bei Wassersportarten sind die Druckschwankungen durch die etwa tausendfache Dichte des Wassers deutlich höher. So entspricht eine sinusförmige Auf- und Abbewegung mit einer Amplitude von 1 cm im Wasser rund 131 dB(Z). Ein Infraschallpegel von etwa 70 dB(Z) entspricht einer Amplitude, die etwa drei Größenordnungen kleiner ist: einer Amplitude von einem Hunderstel Millimeter Wasserhöhenänderung. Ein solches Druckfeld lässt sich beispielsweise in einer Wasserschüssel mit rund 20 cm Durchmesser erzeugen, in dem ein Bleistift dauerhaft ins Wasser getaucht ist und jede Sekunde um rund 2 cm längs seiner Achse bewegt wird.

Dem Schallfeld einer WEA ausgesetzt zu sein, ist etwas anderes, als aufgrund von beispielsweise Sport Druckschwankungen zu erfahren. In diesem Kontext sind epidemiologische Studien ein wichtiges Werkzeug, um mögliche Auswirkungen auf die Gesundheit festzustellen. Bedeutend sind sie auch, da in diesen die übliche Expositionsdauer erfasst wird. Denn für die gesundheitliche Belastung spielen akkumulierende Effekte eine Rolle, was für die langfristige Wirkung entscheidend ist [59]. Eine kurzfristige Wahrnehmbarkeit liefert eine Orientierung, nicht jedoch den kritischen Schwellwert für gesundheitliche Auswirkungen.

Wirkung auf die Gesundheit

Seit vielen Jahren werden WEA im Umfeld von Wohnbebauung errichtet. In Dänemark wurden mit einem Abgleich einer Lärmkarte der WEA des

gesamten Landes mit Gesundheitsdaten der Bevölkerung mögliche Zusammenhänge bezüglich kritischer Erkrankungen anhand von verschriebenen Medikamenten geprüft [60–65]. Untersucht wurden Medikamente und Daten, die mit Krankheiten wie Bluthochdruck, Herzinfarkt, Schlaganfall, Diabetes und Geburtskomplikationen in Verbindung stehen. Bei älteren Menschen wurde ein Zusammenhang von hohen Außenpegeln durch WEA-Schall mit der Einnahme von Schlafmitteln und Antidepressiva beobachtet, was möglicherweise mit Schlafgesundheit und psychischer Gesundheit in Verbindung gebracht werden kann [62]. Bei den restlichen Daten ergaben sich keine Hinweise auf erhöhte Risiken. Eine Diagnose bezogene Analyse fand ebenfalls keine Indizien dafür, dass eine langfristige Exposition gegenüber WEA-Schall ein erhöhtes Risiko für Schlaganfall darstellt [66].

Neben den somatischen Betrachtungen sind Befragungen der Anwohnerschaft ein wichtiges Instrument, um einen Überblick zu bekommen und mögliche Vorzeichen und Risikofaktoren für gesundheitliche Faktoren zu identifizieren. So kann ein gestörter Nachtschlaf zu Folgeerkrankungen führen. Zahlreiche Studien wurden bereits durchgeführt und länderübergreifend ausgewertet, wie beispielsweise der Vergleich von Befragungen in den USA und Europa [1], [67]. Diese zeigen auf, wo Handlungsbedarf besteht. So ist der Schall von WEA weiterhin eine kritische, belästigende Größe, hängt jedoch nicht maßgeblich vom Abstand zur WEA ab. Dies deutet darauf hin, dass der Beurteilungspegel selbst nicht allein entscheidend für eine Lärmbelästigung ist.

Was in den statistischen Datenauswertungen verloren geht, sind differenzierte Einzelbeobachtungen mit eigenen Beschreibungen der Betroffenen. In der Wildstedt-Studie [68] wurden solche Erhebungen durchgeführt. Betroffene hatten die Möglichkeit, gezielt akustische Aufzeichnungen von als belästigend empfundenen Schallereignissen vorzunehmen. Charakteristische Merkmale dieser Protokollierungen sind kurzzeitige Lautheitsschwankungen. Die Belästigung kann durch die damit verbundene Ablenkung und erhöhte Aufmerksamkeit erklärt werden. Die Schwankungen des Schallpegels von einigen Dezibel fanden im hörbaren Bereich statt und waren im konkreten Fall kein Infraschallsignal. Wichtig ist die Beobachtung, dass im Rahmen der Studie die Bürger vor Ort insbesondere auf sachlicher Ebene begleitet wurden und dadurch die Akzeptanz mit der Zeit zunahm. In anderen Fällen konnte für besonders Betroffene über Stressbewältigungstraining eine positive Unterstützung erfolgen [69].

Inwiefern eine Modulation im Moment als belästigend wahrgenommen wird, lässt sich psychoakus-

tisch durch den Vergleich mit konstanten Schallsignalen unterschiedlicher Lautheit ermitteln. Damit ergeben sich Zuschläge als Funktion der Amplitude und Frequenz der Modulation [70]. In der Genehmigungspraxis werden sie derzeit in Deutschland noch nicht angewendet.

Fazit

Der Schall von WEA entsteht maßgeblich an den Rotorblättern und breitet sich als breitbandiges Rauschen in die Umgebung aus. Unter bestimmten Windbedingungen kann es zu wahrnehmbaren zeitlichen Schwankungen kommen. Zusätzlich ist das Signal mit einem Infraschallsignal überlagert, welches nicht direkt wahrnehmbar ist. Die Anwohner hören dieses komplexe Schallsignal und ein Teil berichtet über Belästigungen. Besonders störend werden Modulationen wahrgenommen. Es liegen keine Hinweise vor, dass der Infraschallanteil durch WEA eine Gesundheitsgefahr für die Anwohnerschaft darstellt. Maßgeblich für die Wahrnehmung ist der hörbare Schall. Möglicherweise wird jedoch die Wahrnehmung von diesem Schall durch Infraschall moduliert. Für die technische Weiterentwicklung von WEA bleibt die Schallminderung weiterhin ein Thema. Ein guter Mittelweg zwischen hohem Ertrag und geringer Belästigung der Anwohner mag in Zukunft auch durch den Einsatz von Schallsensorik an WEA und aktiver Ansteuerung gefunden werden. Im Bereich der Genehmigungsprozesse ist die Herausforderung, den Schall von WEA zuverlässig zu prognostizieren und zu überwachen, insbesondere mit Blick auf die zeitlichen Schwankungen. Vor Ort ist die transparente, sachliche und faire Einbindung der Anwohner entscheidend.

Solange wir nicht nachts alle das Licht und die Gerätschaften ausschalten, sind wir auch nachts auf Strom angewiesen. So ist unsere Aufgabe einen Weg zu suchen, möglichst leise Windstrom zu produzieren; ohne die Anwohnerschaft erheblich zu belästigen oder gesundheitlich zu gefährden.

Danksagung

Für anregende Diskussionen und wertvolle Hinweise bedanke ich mich bei: Martin Dybek, Dr. Alice Freiberg, Dr. Christian Koch, Prof. Detlef Krahe, Jürgen Kurtz, Eik Leppin, Dr. Thorsten Lutz, Dr. Torsten Marquardt, Prof. Dominik Obrist, Dr. Johannes Pohl und Prof. Michael Sandner.

Hörbeispiele

Die im Text angesprochenen Hörbeispiele werden auf der DEGA-Website unter <https://www.dega-akustik.de/publikationen/akustik-journal/hoerbeispiele/> zur Verfügung gestellt.

Literatur

- [1] Hübner, G.; Pohl, J.; Hoen, B.; Firestone, J.; Rand, J.; Elliott, D.; Haac, R.: Monitoring annoyance and stress effects of wind turbines on nearby residents: A comparison of U.S. and European samples. *Environment International*, Bd. 132, S. 105.090, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105090>.
- [2] van Kamp, I.; van den Berg, F.: Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound. *Acoust Aust*, Bd. 46, Nr. 1, S. 31–57, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0115-6>.
- [3] Freiberg, A.; Scheffer, C.; Girbig, M.; Murta, V. C.; Seidler, A.: Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. *Environmental Research*, Bd. 169, S. 446–463, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.032>.
- [4] Hansen, C.; Hansen, K.: Recent Advances in Wind Turbine Noise Research. *Acoustics*, Bd. 2, Nr. 1, S. 171–206, März 2020. <https://doi.org/10.3390/acoustics2010013>.
- [5] White, F. M.: *Viscous fluid flow*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [6] Veers, P.; Dykes, K.; Lantz, E.; Barth, S.; Bottasso, C. L.; Carlson, O.; Clifton, A.; Green, J.; Green, P.; Holttinen, H.; Laird, D.; Lehtomäki, V.; Lundquist, J. K.; Manwell, J.; Marquis, M.; Meneveau, C.; Moriarty, P.; Munduate, X.; Muskulus, M.; Naughton, J.; Pao, L.; Paquette, J.; Peinke, J.; Robertson, A.; Sanz Rodrigo, J.; Sempreviva, A. M.; Smith, J. C.; Tuohy, A.; Wisser, R.: Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, Bd. 366, Nr. 6464, S. eaau2027, Okt. 2019. <https://doi.org/10.1126/science.aau2027>.
- [7] LfU Brandenburg: Windkraftanlagen des Landes Brandenburg. Datenlizenz Deutschland – Landesamt für Umwelt Brandenburg – 2.0, März 2020. Zugegriffen: Apr. 15, 2020. [online]. Verfügbar unter: <https://metaver.de/>.
- [8] Zhu, W. J.; Shen, W. Z.; Barlas, E.; Bertagnolio, F.; Sørensen, J. N.: Wind turbine noise generation and propagation modeling at DTU Wind Energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 88, S. 133–150, Mai 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.029>.
- [9] Wagner, S.; Bareiß, R.; Guidati, G.: *Wind turbine noise*. Berlin, Springer, 1996.
- [10] Benton, S. I.; Visbal, M. R.: The onset of dynamic stall at a high, transitional Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, Bd. 861, S. 860–885, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.939>.
- [11] Oerlemans, S.; Sijtsma, P.; Méndez López, B.: Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 299, Nr. 4, S. 869–883, Feb. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.07.032>.
- [12] Barlas, E.; Wu, K. L.; Zhu, W. J.; Porté-Agel, F.; Shen, W. Z.: Variability of wind turbine noise over a diurnal cycle. *Renewable Energy*, Bd. 126, S. 791–800, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.086>.
- [13] van den Berg, G. P.: The Beat is Getting Stronger: The Effect of Atmospheric Stability on Low Frequency Modulated Sound of Wind Turbines. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2005. <https://doi.org/10.1260/0263092054037702>.
- [14] Klein, L.; Gude, J.; Wenz, F.; Lutz, T.; Krämer, E.: Advanced computational fluid dynamics (CFD) – multi-body simulation (MBS) coupling to assess low-frequency emissions from wind turbines. *Wind Energ. Sci.*, Bd. 3, Nr. 2, S. 713–728, Okt. 2018. <https://doi.org/10.5194/wes-3-713-2018>.
- [15] Yauwenas, Y.; Zajamšek, B.; Reizes, J.; Timchenko, V.; Doolan, C. J.: Numerical simulation of blade-passage noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 142, Nr. 3, S. 1.575–1.586, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1121/1.5003651>.
- [16] Bowdler, D.: A sound file of swish and thump (MP3). Zugegriffen: Apr. 21, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dickbowdler.co.uk/content/publications/>.
- [17] Lutz, T.; Herrig, A.; Würz, W.; Kamruzzaman, M.; Krämer, E.: Design and Wind-Tunnel Verification of Low-Noise Airfoils for Wind Turbines. *AIAA Journal*, Bd. 45, Nr. 4, S. 779–785, Apr. 2007. <https://doi.org/10.2514/1.27658>.
- [18] Cheng, J.; Zhu, W.; Fischer, A.; García, N. R.; Madsen, J.; Chen, J.; Shen, W. Z.: Design and validation of the high performance and low noise CQU-DTU-LN1 airfoils. *Wind Energy*, Bd. 17, Nr. 12, S. 1.817–1.833, 2014. <https://doi.org/10.1002/we.1668>.
- [19] Lutz, T.; Arnold, B.; Wolf, A.; Krämer, E.: Numerical Studies on a Rotor with Distributed Suction for Noise Reduction. *J. Phys.: Conf. Ser.*, Bd. 524, S. 012122, Juni 2014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012122>.
- [20] Ffowcs Williams, J. E.; Hawkins, D. L.: Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Bd. 264, Nr. 1.151, S. 321–342, Mai 1969. <https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031>.

- [21] Friedrich, T.; Zieger, T.; Forbriger, T.; Ritter, J. R. R.: Locating wind farms by seismic interferometry and migration. *J Seismol*, Bd. 22, Nr. 6, S. 1.469–1.483, Nov. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s10950-018-9779-0>.
- [22] Nguyen, D. P.; Hansen, K.; Zajamsek, B.; Micic, G.; Catcheside, P.: Wind farm infrasound detectability and its effects on the perception of wind farm noise amplitude modulation. in *Acoustics Victoria*, 2019.
- [23] Thorsson, P.; Persson Waye, K.; Smith, M.; Ögren, M.; Pedersen, E.; Forssén, J.: Low-frequency outdoor–indoor noise level difference for wind turbine assessment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 143, Nr. 3, S. EL206–EL211, März 2018.
<https://doi.org/10.1121/1.5027018>.
- [24] Dai, C. W.; Xue, Y.; Huang, Y.; Xue, S.: IEEE Standard for Wind Turbine Aero Acoustic Noise Measurement Techniques. *IEEE*, Mai 2016.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7502056>.
- [25] Bass, J.; Cand, M.; Coles, D.; Davis, R.; Irvine, G.; Leventhall, G.; Levet, T.; Miller, S.; Sexton, D.; Shelton, J.: Ioa Consultation Questionnaire On Methods For Rating Amplitude Modulation In Wind Turbine Noise. *Institute of acoustics*, 2015.
- [26] LUBW: Tieffrequente Geräusche inkl. Infra-schall von Windkraftanlagen und anderen Quellen. Dokument 84558, Feb. 2016.
- [27] Zajamšek, B.; Hansen, K. L.; Doolan, C. J.; Hansen, C. H.: Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 370, S. 176–190, Mai 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.02.001>.
- [28] Hansen, K. L.; Nguyen, P.; Zajamšek, B.; Catcheside, P.; Hansen, C. H.: Prevalence of wind farm amplitude modulation at long-range residential locations. *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 455, S. 136–149, Sep. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.05.008>.
- [29] Martinez, S. C.; Fennel, F.; Pies, K.: Amplitudenmodulation (AM) bei Geräuschen von Windenergieanlagen, Messungen an Windparks. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2018*, 44. Jahrestagung für Akustik, München, S. 1.651–1.654.
- [30] Fastl, H.; Zwicker, E.: *Psychoacoustics – Facts and Models*. Springer, 2007.
- [31] Thorsson, P.; Waye, K. P.; Ögren, M.; Smith, M.; Pedersen, E.; Forssén, J.: Creating sound immersion mimicking real-life characteristics from a single wind turbine. *Applied Acoustics*, Bd. 143, S. 66–73, Jan. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.015>.
- [32] Jurado, C.; Marquardt, T.: The effect of the helicotrema on low-frequency loudness perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 140, Nr. 5, S. 3.799–3.809, Nov. 2016.
<https://doi.org/10.1121/1.4967295>.
- [33] Martin, P.; Hudspeth, A. J.: Active hair-bundle movements can amplify a hair cell's response to oscillatory mechanical stimuli. *PNAS*, Bd. 96, Nr. 25, S. 14.306–14.311, Dez. 1999.
<https://doi.org/10.1073/pnas.96.25.14306>.
- [34] Ashmore, J. F.: A fast motile response in guinea-pig outer hair cells: the cellular basis of the cochlear amplifier. *The Journal of Physiology*, Bd. 388, Nr. 1, S. 323–347, Juli 1987.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1987.sp016617>.
- [35] Hudspeth, A. J.: Making an effort to listen: mechanical amplification in the ear. *Neuron*, Bd. 59, Nr. 4, S. 530–545, Aug. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.07.012>.
- [36] Uppenkamp, S.: *Physikalische Grundlagen der Entstehung und Registrierung von otoakustischen Emissionen*. *Z. Audiol.*, Bd. 38, Nr. 2, S. 59–62, 1999.
- [37] Salt, A. N.; Hullar, T. E.: Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research*, Bd. 268, Nr. 1, S. 12–21, Sep. 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.heares.2010.06.007>.
- [38] Marquardt, T.; Jurado, C.: Amplitude modulation may be confused with infrasound. *Acta Acustica united with Acustica*, Bd. 104, Nr. 5, S. 825–829, Sep. 2018.
<https://doi.org/10.3813/AAA.919232>.
- [39] Kozlov, A. S.; Baumgart, J.; Risler, T.; Versteegh, C. P. C.; Hudspeth, A. J.: Forces between clustered stereocilia minimize friction in the ear on a subnanometre scale. *Nature*, Bd. 474, Nr. 7.351, S. 376–379, Juni 2011.
<https://doi.org/10.1038/nature10073>.
- [40] Jurado, C.; Marquardt, T.: On the Effectiveness of airborne infrasound in eliciting vestibular-evoked myogenic responses. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Bd. 39, Nr. 1, S. 3–16, 2020.
<https://doi.org/10.1177/1461348419833868>.
- [41] Weichenberger, M.; Bauer, M.; Kühler, R.; Hensel, J.; Forlim, C. G.; Ihlenfeld, A.; Ittermann, B.; Gallinat, J.; Koch, C.; Kühn, S.: Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold – Evidence from fMRI. *PLoS ONE*, Bd. 12, Nr. 4, S. e0174420, Apr. 2017.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174420>.
- [42] Burke, E.; Hensel, J.; Fedtke, T.; Uppenkamp, S.; Koch, C.: Detection Thresholds for Combined

- Infrasound and Audio-Frequency Stimuli. *Acta Acustica united with Acustica*, Bd. 105, Nr. 6, S. 1.173–1.182, Nov. 2019.
<https://doi.org/10.3813/AAA.919394>.
- [43] Grieser, B. J.; Kleiser, L.; Obrist, D.: Identifying Mechanisms Behind the Tullio Phenomenon: a Computational Study Based on First Principles. *JARO*, Bd. 17, Nr. 2, S. 103–118, Apr. 2016.
<https://doi.org/10.1007/s10162-016-0553-0>.
- [44] Iversen, M. M.; Zhu, H.; Zhou, W.; Santana, C. C. D.; Carey, J. P.; Rabbitt, R. D.: Sound abnormally stimulates the vestibular system in canal dehiscence syndrome by generating pathological fluid-mechanical waves. *Sci Rep*, Bd. 8, Nr. 1, S. 1–12, Juli 2018.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-28592-7>.
- [45] Ward, B. K.; Carey, J. P.; Minor, L. B.: Superior Canal Dehiscence Syndrome: Lessons from the First 20 Years. *Front. Neurol.*, Bd. 8, S. 177, Apr. 2017.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00177>.
- [46] Harrison, R. V.: On the biological plausibility of Wind Turbine Syndrome. *International Journal of Environmental Health Research*, Bd. 25, Nr. 5, S. 463–468, Sep. 2015.
<https://doi.org/10.1080/09603123.2014.963034>.
- [47] Alberts, B.; Johnson, A.; Lewis, J.; Morgan, D.; Raff, M.; Roberts, K.; Walter, P.: *Molecular biology of the cell*. Garland Science, 2014.
- [48] Gordeladze, A.; Glinchikov, V.; Usenko, V.: Experimental myocardial ischemia caused by infrasound. *Gig Tr Prof Zabol*, Bd. 6, S. 30–33, 1986.
- [49] Chaban, R.; Ghazy, A.; Georgiade, E.; Stumpf, N.; Vahl, C.: Negative Effect of High-Level Infrasound on Human Myocardial Contractility: In-Vitro Controlled Experiment. *Noise and Health*, 2020. (Der Text ist noch nicht veröffentlicht.)
- [50] Piorr, D.: Windenergieanlagen und WHO-Umgebungsärm-Leitlinien. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2019*, 45. Jahrestagung für Akustik, Rosstock, S. 716–719.
- [51] Uppenkamp und Partner: Schalltechnischer Bericht der erweiterten Hauptuntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messergebnisse mit Ausbreitungsrechnungen nach DIN ISO 9613-2. Nov. 2014.
- [52] Baumgart, J.; Spielvogel, T.; Warmuth, S.: Einzelfallgerechtigkeit – ein Konzept für eine situationsbezogene Irrelevanzprüfung. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2020*, 46. Jahrestagung für Akustik, Hannover, S. 504–507.
- [53] Tonin, R.; Brett, J.; Colagiuri, B.: The effect of infrasound and negative expectations to adverse pathological symptoms from wind farms. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Bd. 35, Nr. 1, S. 77–90, März 2016.
<https://doi.org/10.1177/0263092316628257>.
- [54] Crichton, F.; Dodd, G.; Schmid, G.; Gamble, G.; Petrie, K. J.: Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines?. *Health Psychology*, Bd. 33, Nr. 4, S. 360, 2013.
<https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/a0031760>.
- [55] Chapman, S.; George, A. S.; Waller, K.; Cacic, V.: The Pattern of Complaints about Australian Wind Farms Does Not Match the Establishment and Distribution of Turbines: Support for the Psychogenic, ‘Communicated Disease’ Hypothesis. *PLOS ONE*, Bd. 8, Nr. 10, S. e76584, Okt. 2013.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076584>.
- [56] Pedersen, E.; van den Berg, F.; Bakker, R.; Bouma, J.: Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 126, Nr. 2, S. 634–643, Juli 2009.
<https://doi.org/10.1121/1.3160293>.
- [57] Cooper, S.: The use of Synthesised or Actual Wind Turbine Noise for Subjective Evaluation Purposes. in *ICA Aachen*, 2019.
- [58] Stead, M.; Cooper, J.; Evans, T.: Comparison of infrasound measured at people’s ears when walking to that measured near wind farms. *Acoustics Australia*, Bd. 42, Nr. 3, S. 197–203, Dez. 2014.
- [59] Kraak, W.; Ertel, H.; Fuder, G.; Kracht, L.: Risk of hearing damage caused by steady-state and impulsive noise. *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 36, Nr. 3, S. 347–359, Okt. 1974.
[https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(74\)80215-4](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(74)80215-4).
- [60] Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A. N.; Nordsborg, R. B.; Ketzler, M.; Brandt, J.; Sørensen, M.: Long-Term Exposure to Wind Turbine Noise and Risk for Myocardial Infarction and Stroke: A Nationwide Cohort Study. *Environmental Health Perspectives*, Bd. 127, Nr. 3, S. 037004, Dez. 2019.
<https://doi.org/10.1289/EHP3340>.
- [61] Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A. N.; Nordsborg, R. B.; Ketzler, M.; Brandt, J.; Sørensen, M.: Long-term exposure to wind turbine noise and redemption of anti-hypertensive medication: A nationwide cohort study. *Environment International*, Bd. 121, S. 207–215, Dez. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.054>.
- [62] Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.;

Hahmann, A. N.; Nordsborg, R. B.; Ketzler, M.; Brandt, J.; Sørensen, M.: Impact of Long-Term Exposure to Wind Turbine Noise on Redemption of Sleep Medication and Antidepressants: A Nationwide Cohort Study. *Environ Health Perspect*, Bd. 127, Nr. 3, S. 037005, März 2019. <https://doi.org/10.1289/EHP3909>.

[63] Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A. N.; Nordsborg, R. B.; Ketzler, M.; Brandt, J.; Sørensen, M.: Pregnancy exposure to wind turbine noise and adverse birth outcomes: a nationwide cohort study. *Environmental Research*, Bd. 167, S. 770–775, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.011>.

[64] Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A. N.; Nordsborg, R. B.; Ketzler, M.; Brandt, J.; Sørensen, M.: Long-term exposure to wind turbine noise at night and risk for diabetes: A nationwide cohort study. *Environmental Research*, Bd. 165, S. 40–45, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.03.040>.

[65] Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A. N.; Nordsborg, R. B.; Ketzler, M.; Brandt, J.; Sørensen, M.: Short-term nighttime wind turbine noise and cardiovascular events: A nationwide case-crossover study from Denmark. *Environment International*, Bd. 114, S. 160–166, Mai 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.030>.

[66] Bräuner, E., V.; Jørgensen, J., T.; Duun-Henriksen, A., K.; Backalarz, C.; Laursen, J., E.; Pedersen, T., H.; Simonsen, M., K.; Andersen, Z., J.: Association Between Long-Term Exposure to Wind Turbine Noise and the Risk of Stroke: Data From the Danish Nurse Cohort. *JAHA*, Bd. 8, Nr. 14, Juli, 2019. <https://doi.org/10.1161/JAHA.119.013157>.

[67] Haac, T. R.; Kaliski, K.; Landis, M.; Hoen, B.; Rand, J.; Firestone, J.; Elliott, D.; Hübner, G.; Pohl, J.: Wind turbine audibility and noise annoyance in a national U.S. survey: Individual perception and influencing factors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 146, Nr. 2, S. 1.124–1.141, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1121/1.5121309>.

[68] Pohl, J.; Gabriel, J.; Hübner, G.: Untersuchung der Beeinträchtigung von Anwohnern durch Geräuschemissionen von Windenergieanlagen und Ableitung übertragbarer Interventionsstrategien zur Verminderung dieser. 28754, Dez. 2014. Zugegriffen: Apr. 14, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://wcms.itz.uni-halle.de/download.php?down=36385&elem=2831653>.

[69] Leventhall, G.; Benton, S.; Robertson, D.: Coping Strategies for Low Frequency Noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Bd. 27, Nr. 1, S. 35–52, März 2008. <https://doi.org/10.1260/026309208784425460>.

[70] Virjonen, P.; Hongisto, V.; Radun, J.: Annoyance penalty of periodically amplitude-modulated wide-band sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 146, Nr. 6, S. 4.159–4.170, Dez. 2019. <https://doi.org/10.1121/1.5133478>. ■



Dr.-Ing. Johannes Baumgart
GICON®-Großmann
Ingenieur Consult
GmbH, Dresden