

Infraschall aus Windenergieanlagen – ein verkanntes Gesundheitsrisiko

Mit dem drastischen Ausbau von Windstrom sind Infraschall-Pulse aus diesen Anlagen zu einem in vielen Regionen Deutschlands verbreiteten Gesundheitsproblem geworden. Die Druckwellen entstehen im Frequenzbereich unter 8 Hz, haben mehrere Kilometer Reichweite und sind kaum dämmbar. Infraschall umfasst den Frequenzbereich unterhalb von 16 Hz. Diese Schwingungen liegen außerhalb des bewussten Hörbereichs, werden aber durch bestimmte Haarzellen in der Hörschnecke und im Gleichgewichtsorgan mit hoher Empfindlichkeit wahrgenommen. Die aus dem Empfang von Infraschall resultierenden Signale gelangen unbewusst in distinkte Gehirnregionen und aktivieren dort Zentren der autonomen und emotionalen Kontrolle. Damit sind die seit Jahren bekannten Symptome von Anwohnern von Windenergieanlagen weitgehend erklärbar: Ausgehend von hochgradigem Schlafmangel entsteht ein Stress-Syndrom, welches Angstzustände, Tinnitus, Hypertonie und erhöhte Infarktneigung einschließt. Weitere Körperorgane sind auf Grund ihrer Eigenfrequenz gefährdet, mit Infraschall in Resonanz zu geraten. Dies gilt vermutlich auch für den kontraktilen Apparat der Herzmuskelzellen. Ein Schutz vor Schädigungen durch den von Windenergieanlagen ausgehenden Infraschall ist nur durch einen ausreichenden Abstand möglich. Der ärztlich geforderte Mindestabstand in 10facher Anlagenhöhe lässt eine deutliche Absenkung der Stress-Symptomatik erwarten. Die gegenwärtige Energiepolitik verharmlost das Gesundheitsrisiko und erlaubt zu geringe, aus medizinischer Sicht nicht verantwortbare Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Wohngebäuden. Die Weiterführung des Windenergie-Ausbaus erhält somit *de facto* Priorität vor den Erfordernissen des Gesundheitsschutzes. Angesichts der erwiesenen wirtschaftlichen und klimapolitischen Ineffizienz und des enormen Landschaftsverbrauchs ist die Einstellung des Windstrom-Ausbaus zu fordern, verbunden mit der Entwicklung alternativer Energie-Technologien mit geringerem Gesundheitsrisiko und höherer Effizienz.

Schwingungen des Luftdrucks in einem Frequenzbereich von etwa 16 Hz bis 16 000 Hz sind Hörschall, d.h. sie können vom Menschen gehört und damit zum Gegenstand seines Bewusstseins werden. Druckschwingungen im Frequenzbereich unterhalb des Hörschalls werden als Infraschall bezeichnet. Sie werden nicht bewusst wahrgenommen, haben aber erhebliche Wirkungen auf unser Gehirn und andere Organsysteme. Bestimmte Erscheinungsformen des Infraschalls wirken als Stressoren und lösen chronische Schädigungen aus. Ihre Diagnose und Vermeidung wird dadurch erschwert, dass Infraschall generell nicht gehört und deshalb zunächst nicht als Gefahr bewertet wird. Hinzu kommt, dass er weder durch Gebäudestrukturen noch übliche Schallschutzmaßnahmen dämmbar ist.

Natürliche und anthropogene Quellen von Infraschall

Infraschall entsteht überall dort, wo große Massen in Schwingung geraten. Dabei entstehen Druckwellen nicht nur in der Luft, sondern auch im Untergrund bzw. in Gewässern. Vulkanausbrüche, Erdbeben und Lawinen lösen Schwingungen der Erdkruste aus, die sich über weite Entfernungen ausbreiten [1, 2]. Darauf spezialisierte Messstationen dienen z.B. der Erdbebenwarnung und der Kontrolle von Kernwaffen-Tests. Verschiedene Tierarten kommunizieren über viele Kilometer mittels Infraschall-Signalen, beispielsweise Elefanten und Wale [3-5]. In der natürlichen Umwelt des Menschen gibt es mehrere Quellen von Infraschall, wie die Meeresbrandung oder den Wind in einer Gras- und Waldlandschaft. Diese Emissionen sind offenbar ungefährlich, solange sie als unstrukturiertes

Rauschen auftreten. Die technische Zivilisation hat zahlreiche weitere Infraschall-Generatoren geschaffen, etwa durch den Straßenverkehr, Flugzeugtriebwerke, vibrierende Industriemaschinen oder Haushaltstechnik etc. Deren Emission kann bei einem hohen Anteil von Pulsen (d. h. starke, regelmäßig wiederkehrende Auslenkungen aus der Hintergrund-Intensität) und längerer Einwirkung eine Gesundheitsgefahr begründen [6]. Ein Beispiel für Schädigungen durch hohe Intensitäten von Infraschall oder niederfrequentem Hörschall ist die vibroakustische Erkrankung. Sie wird u. a. durch vibrierende Flugzeugtriebwerke oder große Industrieanlagen ausgelöst und führt in chronischer Progression von Schlafmangel zu Depressionen, Herzinsuffizienz und hoher Infekthäufigkeit, nach jahrelanger Einwirkung auch zu Blutungen in Schleimhäuten des Atmungs- und Verdauungstrakts [7].

Infraschall aus Windenergie-Anlagen – ein neues Gesundheitsproblem

Eine Gefährdung durch Infraschall ist für viele Menschen erst durch den rasanten Ausbau von Windenergieanlagen im Rahmen der politischen Energiewende erlebbar geworden. Bisher erfährt sie noch nicht die gebührende Aufmerksamkeit. Diese Anlagen erzeugen Pulse des Luftdrucks durch die Kompression der Luft beim Passieren der Rotorflügel am Mast. Die resultierenden Schwingungen zeigen eine Basisfrequenz von etwa 1 Hz (bei einer Flügelpassage pro Sekunde) und zugehörige Oberschwingungen bis etwa 6 Hz (Abb. 1, 2). Sie breiten sich über mehrere Kilometer aus (Abb. 3) und durchdringen aufgrund ihrer großen Wellenlängen von bis über 300 m übliche Gebäude [8]. Oft sind Infraschall-Wirkungen in Wohnhäusern stärker als im Freien. Dafür gibt es mehrere Gründe: Wände und andere Gebäudestrukturen dämmen nur die hörbaren Komponenten, so dass der Infraschall einen größeren Anteil am Gesamtschall gewinnt. Bei großen Wandabständen können sich außerdem

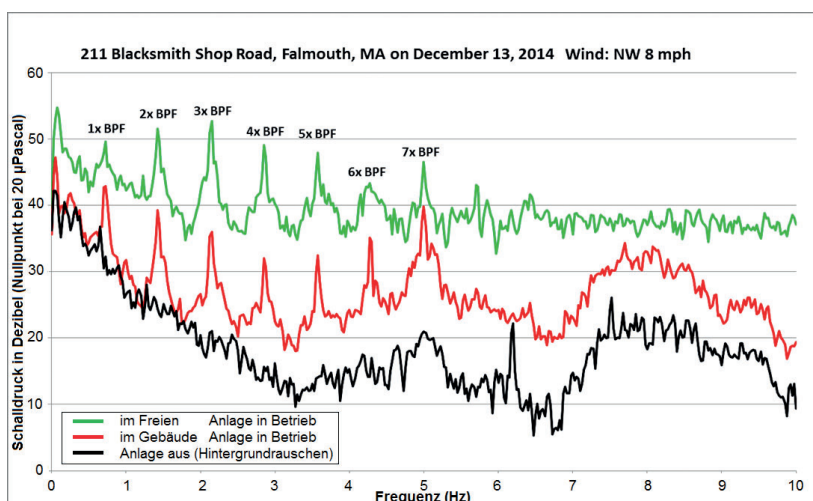


Abb. 1. Frequenz-Muster des Infraschalls aus zwei Windenergieanlagen (Entfernung 421 m und 792 m), gemessen mit Mikrobarometer. – **Grüne Linie.** Außerhalb des Gebäudes. Erkennbar sind die Grundfrequenz der Rotoren bei ca. 0,7 Hz und sechs Peaks der Oberschwingungen bis ca. 5 Hz. – **Rote Linie.** Im Haus wird der gleiche Kurvenverlauf gemessen, die genannten Infraschall-Peaks sind nicht gedämpft. – **Schwarze Linie.** Hintergrundrauschen bei ausgeschalteten Anlagen. Windanlagen: Fa. Vestas, 1,65 MW. BPF: blade pass frequency (Flügel-Passage am Mast pro Sekunde). Geändert aus [42]

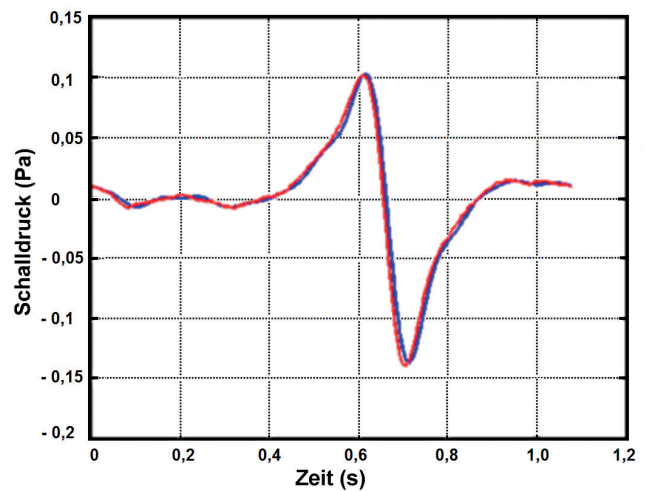


Abb. 2. Ein typischer Infraschall-Puls aus einer Windenergieanlage. Die von Windenergieanlagen ausgehenden Infraschall-Pulse schwanken in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Drehzahl des Rotors und werden von Hintergrundschall und Geräuschen im hörbaren Bereich überlagert. Um sie unabhängig von diesen Störquellen darzustellen, kann man entweder vom Frequenzmuster der Anlage ausgehen und den Infraschall-Puls aus den Oberschwingungen des Schall-Spektrums durch Fourier-Transformation extrahieren (blaue Linie, extrahiert aus dem Bereich bis 10 Hz) oder durch kohärente Überlagerung des Druckverlaufs einer großen Zahl von Umlauf-Perioden den gemeinsamen Anteil ermitteln (rote Linie, ermittelt aus ca. 4000 Passagen). Dargestellt ist der Schalldruck im Abstand von 420 m von einer Windenergieanlage von 1,5 MW Nominalleistung, aufgezeichnet mit einem Mikrofon. Grundfrequenz ca. 0,9 Hz. Die Übereinstimmung der Zeitkurven belegt die starke Periodizität des emittierten Infraschalls [43].

stehende Wellen ausbilden. Windanlagen emittieren auch über den Untergrund Vibrationen, die in mehreren Kilometern Entfernung Gebäude in Resonanz-Schwingung versetzen können. Dieser sogenannte Körperschall interferiert mit luftgeleitetem Infraschall und kann diesen dabei verstärken [9].

Durch empfindliche Messinstrumente, u. a. Mikrobarometer, ist ein korrekter Nachweis und die Quantifizierung von Infraschall und seines Pulscharakters möglich (Abb. 1, 2). Die räumliche Ausbreitung dieser Emission ist ebenfalls gut dokumentiert. Wissenschaftler der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, haben beispielsweise den Infraschall aus einer Windenergieanlage in 10 km Abstand sicher nachgewiesen. In etwa 2 km Abstand war ein Schalldruck von über 75 Dezibel feststellbar (Abb. 3) [8]. Dabei handelt es sich um charakteristische Werte in relativ flachem Gelände. Besonderheiten des Reliefs (z. B. Höhenzüge) und der Rauigkeit (Baumbestand) können die Reichweite von Infraschall-Pulsen in gewissen Grenzen vergrößern oder verringern.

Gesundheitliche Schäden von Anwohnern in der Nähe von Windenergieanlagen in verschiedenen Ländern haben vielfältige medizinische und naturwissenschaftliche Arbeiten ausgelöst. Sie umfassen Untersuchungen an potentiell

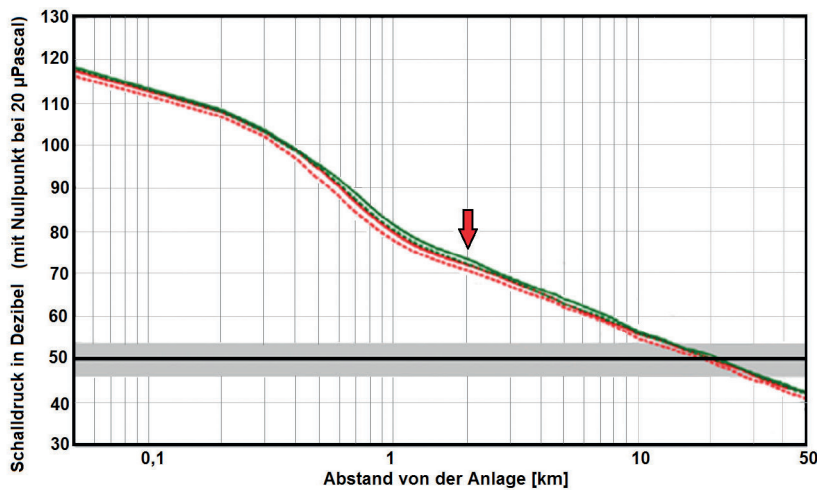


Abb. 3. Infraschall-Intensität in Abhängigkeit von der Entfernung zur Windenergieanlage. Die Intensität der zweiten Oberschwingung eines Infraschall-Peaks wurde jeweils bei einer Nominalleistung von 1,2 MW (rot, punktiert), 1,8 MW (rot, durchgehend), 2 MW (grün, punktiert) und 2,6 MW (grün, durchgehend) ermittelt. Es ist erkennbar, dass noch in 10 km Entfernung ein sicherer Nachweis erfolgte. In 2 km Entfernung (Pfeil) treten Schalldrucke nahe 75 Dezibel auf. Graues Band: Hintergrundrauschen bei 1 bis 3 Hz. Vereinfacht nach [8]

Geschädigten, Befragungen unter Anwohnern und Studien mit Testpersonen. Mechanismen der Perzeption wurden auch aus experimentellen Arbeiten mit Versuchstieren und *in vitro*-Systemen abgeleitet. Zum besseren Verständnis dieser Befunde werden im Folgenden zunächst die Grundlagen der Wahrnehmung von Infraschall vorgestellt.

Der Hörprozess und die Angriffspunkte von Infraschall

Hörschall wird über das Trommelfell und die Gehörknöchelchen in die Hörschnecke (Cochlea) geleitet, das mit Lymphe gefüllte Hörorgan im Innenohr (Abb. 4). In der Cochlea entstehen daraus flüssigkeitsgeleitete Druckwellen. Die Cochlea wird in ganzer Länge vom Cortischen Organ durch-

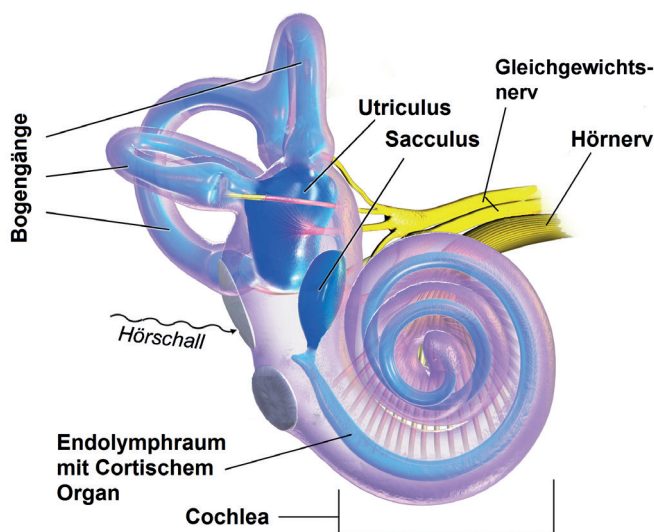


Abb. 4. Hör- und Gleichgewichtsorgane im Innenohr. Die zahlreichen Fasern des Hörnervs transportieren hörbare Informationen aus den inneren Haarzellen. Bogengänge, Sacculus und Utriculus sind Organe des Gleichgewichts- (Vestibular-) Systems und durch den Gleichgewichtsnerv mit dem Gehirn verbunden. Abb. geändert aus: [Medical gallery of Blausen Medical 2014 | CC BY-SA 3.0]

zogen, in dessen Haarzellen die Umwandlung von Schallschwingungen in Nervenimpulse stattfindet (Abb. 5). Die Haarzellen liegen auf der Basilarmembran, deren mechanische Spannung sich vom basalen Ende bis zur Cochlea-Spitze kontinuierlich verringert. Jede hörbare Frequenz versetzt einen spezifischen Ort auf dieser Membran in Resonanz, schnelle Schwingungen nahe an der Basis, langsame Schwingungen (niedrige Frequenzen) näher an der Spitze. Dabei erfahren die Mechanorezeptoren der inneren Haarzellen Potentialänderungen, die als elektrische Signale durch die afferenten Fasern des Hörnervs in das Gehirn geleitet und im auditiven Cortex verarbeitet werden.

Neben den inneren Haarzellen findet sich im Cortischen Organ eine dreimal größere Anzahl äußerer Haarzellen (Abb. 5). Diese tragen ebenfalls Mechanorezeptoren, die aber im Unterschied zu den inneren Haarzellen aus der Endolymph herausragen und mit der Tektorialmembran verbunden sind, welche das Cortische Organ abdeckt.

Dadurch entfällt die Dämpfung ihrer Bewegungen durch die Lympheflüssigkeit, so dass sie auch auf langwellige Drucksignale reagieren können. Bei Erregung kontrahieren sich die äußeren Haarzellen und verkleinern damit den Spalt zwischen der Basilarmembran und der Tektorialmembran. Dies verstärkt den Schalldruck und erhöht erheblich die Empfindlichkeit der Schallwahrnehmung, auch von gleichzeitig einwirkendem Hörschall [10].

Frequenzen des Infraschalls sind für eine Erregung der inneren Haarzellen zu „langsam“, wirken aber sehr deutlich auf die äußeren Haarzellen [11]. So erreicht der von Windenergieanlagen emittierte Infraschall nicht die Empfindlichkeitsschwelle der inneren Haarzellen, erregt aber die wesentlich empfindlicheren äußeren Haarzellen [12]. Dies erklärt, weshalb Infraschall den Hörvorgang zwar beeinflusst, selbst aber auf einem vom Hören unabhängigen Weg verarbeitet wird. Die durch Infraschall (wie auch durch niederfrequenten Hörschall) ausgelösten Schwingungen der äußeren Haarzellen sind messbar (otoacoustic emission) und dienen als nicht-invasive Diagnose für Erkrankungen des Innenohrs [13]. Innere und äußere Haarzellen unterscheiden sich auch bei der Weiterleitung der von ihnen detektierten Impulse ins Gehirn. Erstere sind mit Nervenfasern vom Typ I verbunden, während letztere von Typ II-Fasern innerviert werden. Diese Fasern erreichen auf dem Weg durch das Stammhirn auch solche Neuronen, die mit nicht-auditiven Zentren des Gehirns verbunden sind [14, 15].

Infraschall und Gleichgewichtssinn

Ein Wirkort von Infraschall ist auch der Vestibularapparat, das der Cochlea benachbarte Gleichgewichtsorgan. Die dortigen Otolithen-Organen Sacculus und Utriculus (Abb. 4) erkennen lineare Beschleunigungen einschließlich der Wirkungen der Schwerkraft, die Bogengänge dagegen Drehbeschleunigungen in allen Richtungen des Raumes. Die Signalwandlung geschieht auch dort in Haarzellen, jedoch mit Hilfe der Trägheit

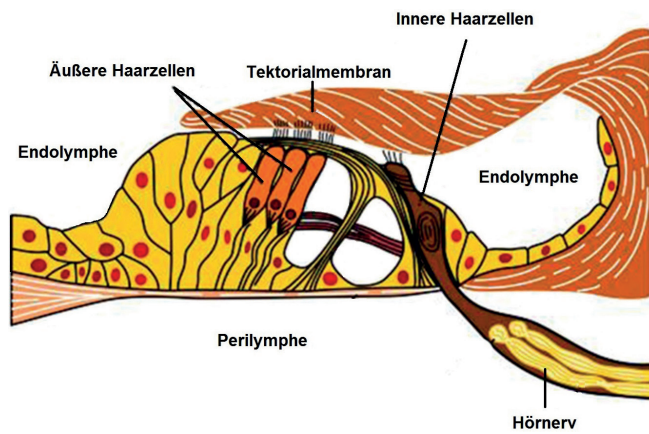


Abb. 5. Cortisches Organ mit inneren und äußeren Haarzellen. [Abb. Madhero88 www.doc check.com]

von CaCO_3 -Kristallen, den Otolithen. Diese Sensoren werden auch und mit hoher Empfindlichkeit durch Infraschall oder niederfrequenten Hörschall aktiviert. Dies wurde sowohl an Testpersonen [16] als auch bei Säugetieren wie der Maus [17] beobachtet. Das vestibuläre Organ registriert offenbar Vibrationen und langwellige Schallereignisse, die für die Erkennung in der Cochlea zu langsam sind. Damit hat Infraschall Zugang zu einem hoch konservierten Signalsystem der Wirbeltiere: Otolithen-Organ, die niederfrequente Druckwellen erkennen können, sind bereits bei Fischen angelegt, entstanden also noch vor der Ausbildung des Hörorgans Cochlea [18].

Bei der Wahrnehmung von Bewegungen und der Gleichgewichtskontrolle werden die aus dem Vestibularapparat kommenden Informationen im Großhirn mit Positionsmeldungen der Augen und von Dehnungsrezeptoren im Körper verglichen. Bei der Aktivierung des Vestibularapparats durch Infraschall fehlen diese Begleitinformationen (die Bewegung wird nur vorgetäuscht), was zu einem Wahrnehmungs-Konflikt führt. Dieser Konflikt ähnelt einer Kinetose, z. B. der Seekrankheit [19, 20]. Bei chronischer Einwirkung erklärt sich dadurch der von Anwohnern von Windenergieanlagen oft berichtete hochgradige Schlafmangel, ebenso weitere Symptome wie Schwindel, Tinnitus und Angstreaktionen.

Noch ungeklärt ist der Verdacht, dass Infraschall in der menschlichen Cochlea auch strukturelle Veränderungen oder Schäden bewirkt. Vermutet wird ein endolymphatischer Hydrops, d. h. ein Anstau von Endolymphe in der Cochlea, welcher in Kaninchen und anderen Säugern durch längere Einwirkung von niederfrequentem Hörschall ausgelöst wird [21]. Ähnliche Tests an Menschen können aus ethischen Gründen nur kurzzeitig erfolgen. Es gibt jedoch Hinweise dafür, dass der Morbus Menière – eine anfallsartige Störung von Cochlea und Gleichgewichtsorgan, die mit Drehschwindel, Hörminderung und Tinnitus einhergeht – einen endolymphatischen Hydrops einschließt [22, 23].

Infraschall-empfindliche Körperorgane

Außer dem Innenohr gibt es weitere Körperorgane, deren Eigenfrequenz im Bereich des von Windenergieanlagen ausgehenden Infraschalls liegt. Hierzu gehören insbesondere die

elastische Masse des Gehirns, aber auch Muskeln und lymphatische Organe. Dort besteht die Gefahr des Mitschwingens und damit der Überprägung durch die Frequenzen (Pulse) des Infraschalls [6]. In solchen Fällen sind Störungen der Funktion zu erwarten. Ein neueres Beispiel ist die Kontraktion von Muskelfasern aus Herzmuskelzellen, die auch an Gewebeprobe *in vitro* beobachtet und quantifiziert werden kann. Die Einwirkung von Infraschall auf diese Präparate führt zu einem messbaren Verlust an Kontraktionskraft [24].

Medizinische Befunde zur Schädigung durch Infraschall

Anwohner von Windenergieanlagen zeigen häufig charakteristische Gesundheitsschäden, die mit ausreichender Sicherheit auf die Emission von Infraschall aus Windenergieanlagen zurückgeführt werden können. Dazu existiert eine umfangreiche medizinische Literatur, aus der nur einige Beiträge und Übersichten genannt werden [25–30]. Die erhobenen Befunde lassen sich wie folgt gliedern:

- In einer ersten Phase, die sich über mehrere Tage bis wenige Wochen erstreckt, treten hochgradige Schlafstörungen, Tinnitus, verminderte Atemfrequenz, Angst- und Schwindelanfälle auf, begleitet von Änderungen der Gehirnströme im EEG. Klinische Befunde sprechen für eine Verbindung zwischen Gleichgewichtsproblemen und Angstzuständen.
- Bei längerdauernder Einwirkung entsteht im Gehirn eine permanente Alarmsituation, auf die z. B. der nächtliche Anstieg des Stresshormons Cortisol hinweist. Sie führt zu psychischer Labilität, verminderter Sauerstoffversorgung und Anpassungsfähigkeit des Herzens, Blutdruckanstieg und erhöhtem Risiko von Herzinfarkten.

Die meisten der berichteten Symptome sind als Folge- und Anpassungsreaktionen des Menschen an hochgradigen Schlafmangel bekannt. Aufgrund der aktuellen Datenlage gelten zwischen 15% und 30% der exponierten Personen als gefährdet, die vorgenannten Symptome zu entwickeln. Es ist noch unklar, ob bei längerer Einwirkung mit einem steigenden Anteil von Betroffenen zu rechnen ist. Zum Vergleich: Die Häufigkeit von Diabetes liegt bei ca. 10% und die von Demenzerkrankungen bei ca. 7% der deutschen Gesamtbevölkerung. Praxis-Ärzte gehen von einer Anzahl von Erkrankten im Bereich von einigen Tausend bis zu Hunderttausenden aus, bei noch hoher Dunkelziffer [31].

Studien mit Testpersonen haben wesentlich zum Verständnis der Perzeption von Infraschall im Gehirn beigetragen. In einer Untersuchung mittels funktioneller Kernspinnresonanztomographie (fNMR) wurden 14 Probanden mit Infraschall von 12 Hz beschallt und lokale Unterschiede der Gehirnaktivität durch bildgebende Kernspin-Resonanz aufgezeichnet (Abb. 6) [32]. Das Experiment wurde jeweils bei Intensitäten unterhalb und oberhalb der individuellen Hörschwelle durchgeführt. Im Ergebnis wurden drei Gehirnareale identifiziert, die durch Infraschall unterhalb der Hörschwelle, also ohne subjektive Schall-Wahrnehmung, aktiviert wurden. Die Aktivierung dieser Areale verschwand, sobald das Signal für die Testperson hörbar wurde. Übereinstimmend mit älteren Hinweisen zeigt dieser

Test: (i) Infraschall wird unterhalb der Hörschwelle, also im Unterbewusstsein, empfangen und (ii) die beteiligten Zentren werden deaktiviert, sobald das bewusste Hören einsetzt, d. h. das Hörzentrum im Großhirn (auditiver Cortex) aktiv ist.

Die Funktionen der drei Gehirnbereiche, die bei 12 Hz unbewusst aktiviert wurden, sind gut bekannt. Daraus ergeben sich naheliegende Bezüge zu den an Patienten (s. o.) erhobenen ärztlichen Befunden (*in kursiv*):

- a) ein Areal im rechten oberen Schläfenlappen, neben dem Hörzentrum (Abb. 6a). Von hier gehen modifizierende Einflüsse auf den Hörprozess aus. Sie sind z. B. mit der bekannten *Erhöhung der Geräuschempfindlichkeit durch Infraschall* vereinbar.
- b) das anteriore Cingulum (ACC) (Abb. 6b). Hier finden Reaktionen der Konfliktbewältigung und der autonomen Kontrolle statt, z. B. von Blutdruck und Herzfrequenz. Dies kann den von Anwohnern von Windenergieanlagen oder Patienten bekannten *Anstieg beider Stress-Indikatoren* erklären.
- c) die ~~linke~~ ^{rechte} Amygdala (Abb. 6c). Diese gilt als Sitz der „emotionalen Intelligenz“, dort werden u. a. Angst- und Fluchtreflexe koordiniert. *Angstzustände und deren Folgereaktionen* sind ein wesentlicher Teil der Gesundheitsprobleme von Infraschall-Geschädigten.

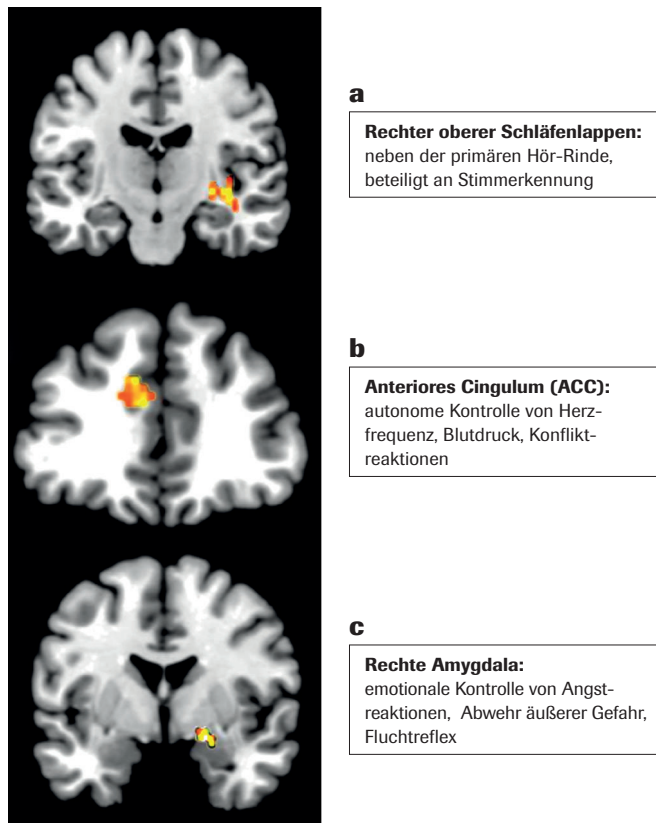


Abb. 6. Aktivierung distinkter Gehirnbereiche durch Infraschall [32]. Durch funktionelle Magnetresonanztomographie wurden im Gehirn von Testpersonen drei Regionen (a – c) gefunden, die nach Einwirkung von Infraschall (12 Hz, 200 Sekunden) unterhalb ihrer Hörschwelle eine Aktivierung zeigten. Diese sind gelb/orange dargestellt und rechts benannt. Die Aktivierung dieser Bereiche endet, wenn das Schallsignal für die Testperson hörbar wird. Vor dem Test wurde die individuelle Hörschwelle bestimmt. Vereinfacht aus [M. Weichenberger et al., PLoS ONE 12 (4): e0174420 | CC BY 4.0]

HÖRSCHWELLE

Im Frequenzbereich des Infraschalls bezeichnet „Hörschwelle“ einen Schalldruck, oberhalb dessen Geräuschwahrnehmungen ohne tonale Information entstehen. Diese Schwelle steigt mit sinkender Frequenz. Bei den Teilnehmern des 12 Hz-Tests (Abb. 6) liegt sie bei durchschnittlich 87 dB, im Bereich unter 8 Hz weit über 100 dB. Infraschall-Pulse aus dem Normalbetrieb von Windenergieanlagen liegen deutlich unterhalb dieser Schalldrucke, sind aber damit nicht ungefährlich.

Mindestabstände schützen vor Infraschall-ausgelösten Erkrankungen

Aufgrund der praktisch ungedämmten Ausbreitung von Infraschall und der vielgestaltigen Angriffspunkte am Menschen gibt es nur eine wirksame Schutz-Empfehlung für Anwohner: ausreichende Sicherheitsabstände. Das Abklingen von Infraschall-Wirkungen mit der Entfernung zu Windenergieanlagen wurde bei Anwohnern vielfach festgestellt. Eine statistisch gesicherte, negative Korrelation der Leitsymptome „Schlafstörung“ und „anfallsartiger Schwindel“ mit der Entfernung zu Windenergieanlagen findet sich bei Paller [33].

Ärzteverbände haben seit 2014 vorgeschlagen, die 10fache Anlagenhöhe (10 x H) als Mindestabstand zwischen Windenergieanlagen und Wohngebäuden festzulegen [34, 35]. Damit würde die in den letzten Jahren ständig steigende Anlagenhöhe auch zur Vergrößerung der Schutzabstände führen, bei den heute aufgestellten Anlagen wären dies etwa 2500 m. Nach den oben genannten Abschätzungen von Paller [33] kann bei einem 10 x H-Abstand das Symptom des schweren Schlafmangels auf ca. 30% über dem Normalwert begrenzt werden.

Die sogenannte 10 x H-Regel wird in Bayern als Planungsgrundlage anerkannt. In den anderen Bundesländern gibt es unterschiedliche und schwer nachvollziehbare Abstandsregelungen. Sie bewegen sich zwischen 700 bis 1000 m für Wohngebiete und 300 bis 400 m für Außenbereiche von Gemeinden. Diese Situation spiegelt die Tatsache wider, dass in dichtbesiedelten Gebieten vor allem Mittel- und Süddeutschlands Windanlagen ohne Rücksicht auf einen medizinisch akzeptablen Abstand zu Wohnhäusern errichtet werden. Zur Begründung stellen die Landesregierungen fest, bei größeren Abständen seien die Ausbauziele im Rahmen der Energiewende nicht erreichbar [36]. Eine solche Haltung ist politisch nur dann durchsetzbar, wenn die Gesundheitsgefahr durch Infraschall aus Windenergieanlagen ignoriert oder erheblich unterbewertet wird.

Das Gesundheitswesen reagiert nicht angemessen auf das Gefahrenpotential

Die aktuelle Situation des Gesundheitsschutzes in Bezug auf Infraschall gibt Anlass zur Sorge. Wie die hier zusammengestellten Daten zeigen, haben Mediziner, Pharmazeuten, Biologen und Akustiker (sofern sie von Windindustrie und Planungsbehörden unabhängig arbeiten) klare Belege für Gesundheitsstörungen durch Infraschall aus Windenergieanlagen und deren biologische und physikalische Ursachen erarbeitet. Zusammenfassend ergeben sich daraus die folgenden Kernaussagen:

1. Im Innenohr aktiviert Infraschall die äußeren Haarzellen und die Otolithen-Organen des Gleichgewichtssystems. Damit entsteht ein Erregungsmuster ähnlich einer Kinetose.
2. Infraschall wird unbewusst in distinkten Gehirnregionen empfangen, ohne Bezug zu einer Hör- oder Wahrnehmungsschwelle. Die an Testpersonen gefundenen Areale haben bekannte Funktionen bei der Modifikation von Schalleindrücken, vor allem in der autonomen und emotionalen Kontrolle des Gehirns.
3. Eine wachsende Zahl der Anwohner von Windenergieanlagen leidet unter hochgradigen Schlafstörungen und Angstreaktionen, die zu einem Dauerstress-Syndrom führen. Die meisten dieser Symptome sind mit der Erregung der im Test aufgefundenen Gehirnregionen erklärbar. Sie klingen mit der Entfernung von der Windanlage ab.
4. Die Reichweite des Infraschalls aus aktuellen Windanlagen beträgt mehrere Kilometer. In einer Entfernung von etwa 10facher Anlagenhöhe entstehen noch Schalldrucke von etwa 75 Dezibel.

Erwartungsgemäß haben die zugrunde liegenden wissenschaftlichen Arbeiten im Einzelnen meist eine begrenzte Aussagekraft und verlangen weitergehende Forschungsaktivitäten. Eine Meta-Analyse neuerer Ergebnisse, verbunden mit der Ableitung von Fragestellungen für die künftige Forschung, findet sich z. B. zusammengefasst in [37]. Bei der Aufklärung komplexer Risiken ist es jedoch unerlässlich, eine Gesamtschau der aktuell gesicherten Erkenntnisse vorzunehmen. Eine solche kritische Betrachtung lässt keinen Zweifel an einem erheblichen Gesundheitsrisiko durch Infraschall aus Windenergieanlagen. Dies ist auch der Standpunkt kompetenter deutscher Ärztevereinigungen, z. B. „Ärzteforum Emissionsschutz Bad Orb“ und „Ärzte für Immissionsschutz“ (AEFIS). Sie verbinden ihre Forderung nach Intensivierung der Forschungsarbeiten zu den Wirkungen und Pathomechanismen des Infraschalls aus Windenergieanlagen mit der Forderung nach ausreichenden Mindestabständen (s. o.) bzw. – nach dem Vorsorgeprinzip – einem Moratorium des Windenergieausbaus bis zum Nachweis seiner gesundheitlichen Unbedenklichkeit [31, 34, 35].

Regierungen und Planungsbehörden interpretieren den Mangel an Forschungsergebnissen, als gäbe es „keine gesicherten Hinweise“ auf gesundheitliche Schädigungen. Es wird auch auf den sogenannten Nocebo-Effekt verwiesen: Gesundheitsschäden von Anwohnern seien psychisch ausgelöst, auf Grund negativer Erwartungshaltung gegenüber den Windanlagen [38]. Negative Reaktionen von Anwohnern auf riesige Industrieanlagen in ihrer Heimatlandschaft mögen gesundheitliche Schäden verstärken, können jedoch nicht die oben genannten objektiven Angriffspunkte des Infraschalls aus diesen Anlagen außer Kraft setzen. Insgesamt führen die Verharmlosung des Gesundheitsrisikos und ein fahrlässiger Umgang mit der Datenlage zu typischen, unzureichend begründeten Aussagen und Festlegungen:

1. Die Tatsache, dass die von Windenergieanlagen emittierten Infraschall-Intensitäten deutlich unterhalb der Hör- und Wahrnehmungsschwelle des Menschen liegen, wird mit der unrichtigen Feststellung kombiniert, in diesem Bereich gäbe

es keine belegbaren Wirkungen des Infraschalls auf den Menschen [39]. Aus einer Publikation des Umweltbundesamtes über Infraschall aus Windenergieanlagen: „Entscheidend ist insbesondere, ob die Immission die Hör- beziehungsweise Wahrnehmungsschwelle erreicht“ [40]. Das Stereotyp: „was nicht hörbar ist, schadet nicht“ ist seit langem widerlegt. Die Hör- oder Wahrnehmungsschwelle ist zur Beurteilung von Infraschall ungeeignet, da dieser auf einem vom Hörschall verschiedenen Weg ins Gehirn gelangt (s. o.). Der Versuch, Infraschall aus Windenergieanlagen durch das Fehlen seiner direkten Wahrnehmung zu verharmlosen, ist auch deshalb irreführend, weil die negativen Wirkungen auf den Menschen oft erst nach Tagen oder Wochen auftreten und bereits Anpassungs- und Abwehrreaktionen des Körpers einschließen. Spätestens seit dem Nachweis der Aktivierung distinkter Gehirnregionen durch Infraschall unterhalb der Hörschwelle (s. o.) [32] sollten derartige Aussagen als obsolet gelten. Sie wurden jedoch bisher weder aktualisiert noch korrigiert.

2. Die Reichweite der Infraschall-Emission aus Windenergieanlagen wird drastisch unterbewertet, in der erkennbaren Absicht, politisch gewollte Mindestabstände zu rechtfertigen. Das Landesamt für Umweltschutz in Baden-Württemberg (LUBW) publiziert beispielsweise, in 700 m Abstand würden sich die Infraschall-Pegel an einer aktiven Anlage nicht nennenswert von einer abgeschalteten Anlage unterscheiden [39]. Diese Aussage steht in klarem Widerspruch zu den Ergebnissen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, die in etwa 2 km Entfernung von einer Windenergieanlage Infraschall-Emissionen von mindestens 75 Dezibel festgestellt hat (Abb. 3) [8]. Im hörbaren Bereich entspräche dies dem Lärm an einer gut befahrenen Autostraße. Ein detaillierter Vergleich zeigt erhebliche Unzulänglichkeiten in den Messungen der LUBW: Der gepulste Infraschall der rotierenden Anlage wird nicht klar vom Infraschall der Umgebung bzw. der ruhenden Anlage getrennt; in den meisten Messungen ist der gesundheitskritische Bereich unter 8 Hz ausgefiltert; Messungen in Gebäuden fehlen ganz (dort wirkt Infraschall aus Windenergieanlagen oft stärker als im Freien, s. o.) und die Ausbreitung des Infraschalls im Untergrund wird nicht sachgerecht gemessen. Ungeachtet dieser Unzulänglichkeiten dient die Publikation der LUBW als eine deutschlandweit verbreitete „Faktenbasis“ für Planungsbehörden und geht nachweislich in Gerichtsurteile ein.
3. Eine der Ursachen für derartige Fehleinschätzungen sind unzureichende gesetzliche Vorgaben. In Deutschland sind Schallmessungen im Bereich von < 8 Hz nicht vorgeschrieben, obwohl die mit der Analyse von Infraschall im Gelände verbundenen messtechnischen Probleme seit Jahren gelöst sind, wie z. B. die USA-Firma Noise Control und die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (vgl. Abb. 1 und 3) beweisen. Eine immissionsrechtliche Grundlage der Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen ist die „Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)“. Die aktuell gültige Version beschränkt ihren Gültigkeitsbereich von vornherein auf Frequenzen oberhalb von 8 Hz.

Das Zusammenwirken unzureichender Schutzvorschriften und die Ignoranz gegenüber politisch „unpassenden“ Befunden und Forschungsergebnissen führen dazu, dass Windenergieanlagen häufig in einer aus medizinischer Sicht nicht verantwortbaren Nähe zu menschlichen Siedlungen errichtet werden. Daraus ergeben sich Gefahren für die Lebensqualität und Gesundheit betroffener Bürger.

Fazit

Infraschall-Pulse aus großen Windenergieanlagen stellen ein erhebliches Gesundheitsrisiko dar. Durch den rasanten Ausbau der Windindustrie ist die Wirkung von Infraschall aus diesen Anlagen zum „größten unfreiwilligen Feldversuch an Millionen von Menschen zum Thema Krankheit durch Infraschall“ geworden (Dr. med. J. Mayer, in einer Verfassungsbeschwerde beim Bundesverfassungsgericht wegen Verletzung des Grundgesetz-Artikels 2, Absatz 2, des Rechts auf körperliche Unversehrtheit [41]). Nach dem Rechtsempfinden der Mehrheit wären Opfer zumutbar, wenn ihnen ein erheblicher Nutzen für Klimaschutz und Energieversorgung gegenüberstünde. Aber das ist in Zweifel zu ziehen:

1. *Windanlagen dienen kaum der CO₂-Einsparung und dem Klimaschutz.* Der Windstrom aus 30 500 Anlagen in Deutschland (davon ca. 1000 vor der Küste) hat 2018 etwa 4% der primären (meist fossilen) Energieträger ersetzt, konnte also den CO₂-Ausstoß bestenfalls um diesen Betrag reduzieren. Da der Anteil der Bundesrepublik an der weltweiten CO₂-Produktion nur ca. 2% beträgt (Spitzenreiter: China, USA, Indien), können deutsche Windanlagen nicht mehr als 0,08% des CO₂ der Atmosphäre ersetzen. Selbst diese winzige Einsparung wird durch den CO₂ Emissionshandel in andere EU-Staaten transferiert und dort freigesetzt. (Daten: AG Energiebilanzen, Entso-e). Die hohe Dominanz des Windstroms in der deutschen Energiewende erscheint deshalb kaum als ein nachahmenswertes Vorbild.
2. *Die wirtschaftliche Bilanz von Windstrom ist negativ.* Windstrom widerspiegelt die Schwankungen des Windaufkommens (2018: zwischen < 1% und 75% der installierten Leistung). Dies führt zu einer extrem volatilen Einspeisung in das Stromnetz. Um die Lücken auszugleichen, d. h. 50 Hz Wechselstrom verlässlich anzubieten, müssen „Schattenkraftwerke“ gleicher Leistung vorgehalten werden, im Wesentlichen mit fossilen Energieträgern. Eine Glättung des Windstroms durch Speicherung der Stromspitzen (Pumpspeicherwerke, Batterien etc.) ist keine wirtschaftlich darstellbare Option und würde Strom zu einem Luxusgut machen (vgl. NR 6/2018, S. 281).

Vor dem Hintergrund der sehr geringen wirtschaftlichen und klimapolitischen Effizienz des Windstroms erhalten die hier zusammengetragenen Indizien für das damit verbundene Gesundheitsrisiko ein besonderes Gewicht. Hinzu kommt die von vielen Bürgern als schmerzhaft empfundene Verschandelung ihrer Heimatlandschaft und die Gefährdung der Artenvielfalt durch die Wind-Industrieanlagen. Die aktuelle Lage erfordert ein entschlossenes Umsteuern und kann nicht durch

Verharmlosungen oder Mediationsversuche verbessert werden. Die Erfahrungen mit 30 500 Anlagen sprechen dafür, den weiteren Ausbau der Windenergie in Deutschland zu stoppen und vorhandene Anlagen, abhängig von ihrem lokalen Gefahrenpotential, zurückzubauen. Freigesetzte Mittel müssen für die Erforschung und Anwendung von Energie-Technologien mit geringerem Gesundheitsrisiko und höherer Verlässlichkeit eingesetzt werden. Dazu hat eine weltweite Debatte inzwischen aussichtsreiche Ansatzpunkte aufgezeigt: intelligente Verfahren zur Energieeinsparung, Umstellung weiterer „Reservekraftwerke“ von Kohle auf Erdgas, künstliche Photosynthese und verstärkte Entwicklung der Wasserstoff-Technologien, um nur einige zu nennen. Auf diesen Gebieten ist der Forschungsstandort Deutschland erheblich gefordert, nicht zuletzt auch im Interesse des Gesundheitsschutzes.

Literatur

- [1] P. Campus, D. R. Christie: Worldwide observations of infrasonic waves. In: A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (Hrsg.): *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Springer. Dordrecht, Heidelberg, London, New York 2010. – [2] J. B. Johnson et al., *Geophys. Res. Lett.* **31**: L14604 (2004). – [3] C. T. Herbst et al., *Science* **337**, 595 (2012). – [4] M. Garstang, *J. Comp. Physiol.* **190**, 791 (2004). – [5] D. K. Mellinger, C. W. Clark, *J. Acoust. Soc. Am.* **114**, 1008 (2003). – [6] Robert-Koch-Institut: *Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland?* Bundesgesundheitsbl. – Gesundheitsforsch. – Gesundheitsschutz **50**, 1582 (2007). – [7] M. Alves-Pereira, N. A. A. Castelo Branco, *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **93**, 256 (2007). – [8] Ch. Pilger, L. Ceranna, *J. Sound Vibr.* **88**, 188 (2017). – [9] B. Zajamšek et al., *J. Sound Vibration* **370**, 76 (2016). – [10] J. Ashmore, *Physiol. Rev.* **88**, 173 (2008). – [11] A. N. Salt, T. E. Hullar, *Hearing Res.* **268**: 12e21 (2010). – [12] A. N. Salt, J. A. Kaltenbach, *Bull. Science, Technol. Society* **31**, 296 (2011). – [13] J. Hensel et al., *Hearing Res.* **233**, 67 (2007). – [14] C. Weisz et al., *Nature* **461**, 1126 (2009). – [15] T. E. Benson, M. C. Brown, *J. Assoc. Res. Otolaryng.* **5**, 111 (2004). – [16] N. P. Mc Todd et al., *Neurosci. Lett.* **444**, 36 (2008). – [17] G. P. Jones et al., *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* **11**, 725 (2010). – [18] A. N. Popper, Z. Lu, *Fish Res.* **46**, 15 (2000). – [19] V. G. Macefield, D. K. Walton, *J. Vestib. Res. equilibrium orientation* **25**, 35 (2015). – [20] P. D. Schomer et al., *J. Acoust. Soc. Am.* **137**, 1356 (2015). – [21] A. N. Salt et al., *J. Acoust. Soc. Am.* **133**, 1561 (2013). – [22] R. Gürkov et al., *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* **271**, 2661 (2014). – [23] S. Naganawa, T. Nakashima, *Jpn. J. Radiol.* **32**, 191 (2014). – [24] C. F. Vahl et al., *Thorac. cardiovasc. Surg.* **66**, S1 (2018). – [25] S. Cooper: *The result of an acoustic testing program Cape Bridgewater Wind farm 44.5100. R7:MSC; 2014, Prepared for: Energy Pacific MELBOURNE.* <http://www.pacifichydro.com.au/files/2015/01/Cape-Bridgewater-Acoustic-Report.pdf> (2014). – [26] R. James, *Bull. Sci., Technol. Soc.* **32**, 108 (2012). – [27] I. Arra et al., *Cureus* **6**, e183 (2014). – [28] M. Basner et al., *Lancet* **383**, 1325 (2014). – [29] R. D. Jefferey et al., *Canadian J. Rural Med.* **19**, 473 (2014). – [30] J. L. Puch, R. R. James, *Hearing Health Matters*, 2016. <http://hearinghealthmatters.org/journalresearchposters/files/2016/09/16-10-21-Wind-Turbine-Noise-Post-Publication-Manuscript-HHTML-Punch-James.pdf> (2016). – [31] S. Kaula, T. C. Stiller, Dt. Schutzgemeinschaft Schall für Mensch und Tier, u. Ärzte für Emissionsschutz. *Offener Brief an politische Verantwortliche zu Auswirkungen von technischem Infraschall auf die Gesundheit.* <https://www.dsgs.info/INFO/Aktuelles/> – [32] M. Weichenberger et al., *PLoS ONE* **12**: e0174420 (2017). – [33] C. Paller: *Exploring the Association between Proximity to Industrial Wind Turbines and Self-Reported Health Outcomes in Ontario, Canada.* MSc Thesis Univ. Waterloo (2014). – [34] *Ärzteforum Emissionsschutz Bad Orb: Windenergie und Abstandsregelungen, Abstand von Windenergie – eine wissenschaftsbasierte Empfehlung, Bad Orb, 15.12.2014.* <http://www.gegenwind-bad-orb.de/windkraft-fakten/gesundheitsgefahren/infraschall/> (2014). – [35] AEFIS: *Ärzte für Immissionsschutz. Positionspapier zu Gesundheitsrisiken beim Ausbau der Erneuerbaren Energien.* Ärztekammer Niedersachsen, 24.2.2015. (Inklusive Brief an MP Seehofer) <https://aefis.de>

- jimdo.com/downloads/ (2015). – [36] H. Salecker, I. Lütkehus: Einfluss des Abstands zwischen Windenergieanlagen und Wohnbauflächen auf das Potenzial der Windenergie an Land. Sachverständigentitel des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Text 73/2014(2014). – [37] S. Carlile et al., Trends in Hearing **22**, 1 (2018) – [38] F. Crichton et al., Front. Public Health **2**, 220 (2014). – [39] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen. Februar 2016. www.lubw.baden-wuerttemberg.de (2016). – [40] D. Twardella: Bedeutung des Ausbaus der Windenergie für die menschliche Gesundheit. In: UMID Umwelt und Mensch – UBA Informationsdienst, 2013,14-18. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/360/ (2013). – [41] Dr. med. J. Mayer, in einer Verfassungsbeschwerde beim Bundesverfassungsgericht wegen Verletzung des Grundgesetz- Artikels 2, Absatz 2, des Rechts auf körperliche Unversehrtheit. Klageführer: Prof. Dr. Wendt, Prof. Dr. Elicker. <https://aefis.jimdo.com/2016/02/18/verfassungsbeschwerde/> – [42] Noise Control Engineering, LLC, Billerica, MA 01821, USA: Infrasound Measurements of Falmouth Wind Turbines Wind #1 and Wind #2. By M. Bahtiarian and A. Beaudry. Technical Memo 2015 - 004, 2015. – [43] J. Vanderkooy, R. Mann: Measuring Wind Turbine Coherent Infrasound. 6th International Conference on Wind Turbine Noise, Glasgow, April 2015. <https://www.windturbinenoise.eu/content/conferences/2-wind-turbine-noise-2015/>.
- Prof. em. Dr. **Werner Roos** (Jahrgang 1946) studierte Pharmazie in Jena. Nach Promotion und Habilitation in Halle war er dort Dozent für Pharmazeutische Biologie und erhielt 1987 eine Professur für Zellphysiologie am Biotechnikum der Martin-Luther-Universität Halle. Studienaufenthalte führten ihn nach Prag, Lafayette und Los Angeles. 1995 Professor für Zellphysiologie/Biotechnologie und Leiter der Abteilung Zellphysiologie/Biotechnologie am Institut für Pharmazeutische Biologie. Von 1999 bis zur Emeritierung 2011 war Werner Roos Direktor des Bereichs Pharmazeutische Biologie und Pharmakologie am Institut für Pharmazie der Universität Halle. Er leitete und koordinierte zahlreiche Forschungsvorhaben zur Zell- und Molekularbiologie von Arzneipflanzen.