

HNO

<https://doi.org/10.1007/s00106-022-01237-y>

Angenommen: 12. September 2022

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022

Wissenschaftliche Leitung

C.-J. Busch, Greifswald

M. Canis, München

T. Hoffmann, Ulm

J. Löhler, Bad Bramstedt

P. Mir-Salim, Berlin

S. Strieth, Bonn



CME

Zertifizierte Fortbildung

Infraschall – humanmedizinische Implikationen

J. M. Vahl¹ · J. V. A. Keppeler¹ · D. Krahe² · K. Bahrke-Rein³ · R. Reiter⁴ · T. K. Hoffmann¹ · E. Goldberg-Bockhorn¹

¹ Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde und Kopf-Hals-Chirurgie, Universitätsklinikum Ulm, Ulm, Deutschland

² Fakultät für Elektrotechnik, Informations- und Medientechnik, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

³ Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

⁴ Sektion Phoniatrie und Pädaudiologie, Universitätsklinikum Ulm, Ulm, Deutschland

Zusammenfassung

Infraschall beschreibt in der Umwelt allgegenwärtigen niederfrequenten Schall (≤ 20 Hz) mit einer großen Wellenlänge unterhalb der mittleren Hörschwelle, der dennoch je nach Schalldruckpegel und Frequenzspektrum gehört und taktil wahrgenommen werden kann. Infraschallemissionen kommen in der Natur meist nur im niederschweligen Bereich vor. Trotzdem können nach starker und chronischer Exposition gegenüber i. d. R. künstlich erzeugten Infraschallemissionen verschiedene, mitunter fraglich gesundheitskritische Effekte auf das Ohr und den Körper beobachtet werden. Die korrekte Messung und Bewertung von Infraschallquellen sind komplex und umstritten. Etablierte Richtlinien sind rar. Innovative Forschungsgebiete sind das Infraschallmonitoring zur Verlaufsbeurteilung von Naturereignissen und die Infraschallapplikation in der Medizin. Perspektivisch werden sich neue Erkenntnisse aus dieser Infraschallforschung und eine weitreichendere arbeitsmedizinische Einordnung erhofft.

Schlüsselwörter

Lärm · Hören · Arbeitsmedizin · Windkraft · Krebs

Online teilnehmen unter:
www.springermedizin.de/cme

Für diese Fortbildungseinheit werden 3 Punkte vergeben.

Kontakt

Springer Medizin Kundenservice

Tel. 0800 77 80 777

(kostenfrei in Deutschland)

E-Mail:

kundenservice@springermedizin.de

Informationen

zur Teilnahme und Zertifizierung finden

Sie im CME-Fragebogen am Ende des

Beitrags.



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Lernziele

Nach der Lektüre dieses Beitrags ...

- haben Sie gelernt, wie Infraschall physikalisch definiert, gemessen und bewertet wird,
- haben Sie einen Überblick über die Perzeption von Infraschall sowie über mögliche infraschallassoziierte Auswirkungen auf den Körper erhalten,
- sind Sie über praktische Anwendungsformen von Infraschall informiert,
- sind Ihnen arbeitsmedizinische Überlegungen zum Umgang mit Infraschall geläufiger geworden.

Infraschallentstehung und -messung

Infraschallentstehung. Für das Verständnis von Infraschall gilt es, sich zunächst mit einigen richtungsweisenden physikalischen Eigenschaften vertraut zu machen. Als Infraschall werden Schallwellen mit Frequenzen f von 20 Hz und tiefer verstanden, die unterhalb der mittleren bzw. – genauer gesagt – der medianen Hörschwelle liegen [1, 2]. Mit sinkender Frequenz steigt die Wellenlänge λ entsprechend der Gleichung $c = \lambda \cdot f$, wobei c der Schallgeschwindigkeit entspricht ($c = 343$ m/s im Medium Luft bei 20 °C). Die Wellenlänge bei 1 Hz entspricht somit exemplarisch 343 m. Schallwellen breiten sich in Gasen longitudinal und in anderen Aggregatzuständen auch transversal aus [3]. Von Infraschall abgegrenzt werden niederfrequente Geräusche („low-frequency noise“, LFN) mit 20–200 Hz, wobei das angegebene Intervall je nach Quelle variieren und sich z.T. auch mit dem Frequenzbereich von Infraschall überschneiden kann [4]. **Natürliche Quellen** (Abb. 1) von Infraschall sind Phänomene, die zu langsamen Oszillationen von Masse bzw. Luft führen, darunter fallen z. B. Erdbeben, Meteoriten, Meereswellen und Wind [1, 5]. Auch große Tiere wie Elefanten, Giraffen und Bartenwale produzieren und kommunizieren über Infraschallfrequenzen, z.T. über mehrere Kilometer hinweg [6, 7, 8]. **Künstliche Emissionsquellen** (Abb. 1) sind u. a. Sprengungen, industriell genutzte Maschinen, Generatoren, große Fahrzeuge, Ventilatoren, Windkraftanlagen oder auch sehr lange Orgelpfeifen [1, 4]. Infraschall tritt allerdings i. d. R. nicht allein, sondern im Kontext eines Klangbilds aus unterschiedlichen Frequenzen auf.

► Merke

Als Infraschall werden Schallwellen mit Frequenzen f von 20 Hz und tiefer verstanden, die unterhalb der medianen Hörschwelle liegen.

Infraschallmessung. Gemessen werden können die physikalischen Größen Frequenz f in Hz und der Schalldruckpegel L_p in dB von Infraschall mit speziell für den Tieftonbereich kalibrierten Mikrofonen, i. d. R. **Druckmikrofonen** oder aber auch mit **Mikrobaremometern**, welche ebenfalls sehr feine Druckunterschiede (in μbar) detektieren können [5, 9, 10, 11, 12]. Dabei ist es jedoch durchaus



Abb. 1 ▲ Darstellung möglicher Entstehungsorte von Infraschall

Infrasound – implications for human medicine

Infrasound describes ubiquitous, low-frequency sound (< 20 Hz) in the environment with a long wavelength below the median hearing threshold, which can nevertheless be heard and tactilely perceived, depending on the sound pressure level and frequency spectrum. In nature, infrasound emissions usually occur only in the low-threshold range. Nevertheless, after strong and chronic exposure to usually artificially generated infrasound emissions, various effects on the ear and the body, sometimes questionably critical to health, can be observed. Correct measurement and assessment of infrasound sources is complex and controversial. Established guidelines are scarce. Innovative research areas include infrasound monitoring for evaluation of natural events and infrasound applications in medicine. In the future, it is hoped that new insights will be gained from infrasound research and that a more extensive classification in occupational medicine will be possible.

Keywords

Noise · Hearing · Occupational medicine · Wind turbine · Cancer

eine Herausforderung, zwischen verschiedenen Infraschallquellen zu differenzieren und Störgeräusche wie z.B. Wind, der Pseudoschall am Mikrofon verursacht, bei der Messung zu meiden. Hierfür müssen Sensoren entsprechend aufwendig abgeschirmt werden [9, 11]. Im Weiteren können die gewonnenen Messergebnisse dann evaluiert werden.

Perzeption

Schall kann von Menschen auf unterschiedliche Weise wahrgenommen werden. Die akustische Wahrnehmung von Schall erfolgt nach Schallaufnahme, -weiterleitung und -umwandlung in neuronale Impulse im Ohr sowie Filterung und Prozessierung in Hörbahn und -rinde [13]. Die **vibrotaktile Perzeption** von Schall, insbesondere im Tieftonbereich, ist jedoch ebenfalls von Relevanz für das Erleben einer Geräuschkulisse [1].

Akustische Infraschallperzeption und -hörschwelle. Die frequenzspezifische Hörschwelle variiert unter den Menschen in Abhängigkeit von deren Alter, genetischen und metabolischen Bedingungen sowie bisheriger Lärmexposition [1]. Die **äußeren Haarzellen** wirken aktiv als nichtlinearer Modulator der ankommenden Wanderwellen im Innenohr und können diese um bis zu 50 dB verstärken. Die sensorische Wahrnehmung der Höreindrücke und Umwandlung der mechanischen Wellen in elektrische Signale erfolgt allerdings vornehmlich durch die Reizung der **inneren Haarzellen** und die an diese angekoppelte Hörbahn [14]. Durch Infraschall werden intrazelluläre Potenziale in den äußeren Haarzellen bei Bewegung der Tektorialmembran bzw. bei Entstehung von Scherkraft zwischen dieser und der Basilmembran ausgelöst [15, 16]. Innere Haarzellen sind hingegen weniger sensibel gegenüber Infraschall. Die Potenziale der inneren Haarzellen, die entgegen den äußeren Haarzellen mit ihren Stereozilien nicht an der Tektorialmembran haften, nehmen mit sinkender Schallfrequenz deutlich ab. Dennoch können die inneren Haarzellen zu einem gewissen Grad auch indirekt durch extrazelluläre Potenziale der äußeren Haarzellen stimuliert werden [15]. So werden ab 10 Hz und tiefer die inneren Haarzellen vorrangig durch extrazel-

luläre Potenziale der äußeren Haarzellen stimuliert [15]. Während sich die Haarsinneszellen in der **Cochlea** also durch Infraschall stimulieren lassen, sind vestibuläre Haarzellen relativ unempfindlich gegenüber Infraschall [15]. Neben dem eigentlichen direkten Höreindruck kann bei tiefen Tönen oft eine **Drucksensation** am **Trommelfell** wahrgenommen werden [4]. Unterhalb von 10 Hz können sogar periodische Schalldruckschwankungen bemerkt werden [2]. Infraschall führt darüber hinaus wie höherfrequenter Schall zu einer Auslenkung des Trommelfells und der Ossikel. Trifft Infraschall als Teil eines Geräuschs auf das Trommelfell, so kann dies zu **Interferenzen** mit gleichzeitig ankommenden höheren Tönen und somit zu einer veränderten Wahrnehmung des Geräuschs führen [4].

Die untere Grenze für die Wahrnehmbarkeit von tiefen Frequenzen beim Menschen wird durchschnittlich bei 20 Hz angesetzt. Allerdings endet das Hörempfinden nicht bei jedem Individuum bei dieser Frequenz, sondern es existieren **deutliche Unterschiede** zwischen der **Tieftonsensitivität** verschiedener Menschen (Standardabweichung von 5 dB). Es gibt Personen, die sogar noch 2–4 Hz hören können [1, 4, 17]. Ein weiterer Faktor neben der Frequenz ist der Schalldruckpegel bzw. das individuelle Lautstärkeempfinden [18]. Um sehr tiefe Frequenzen zu hören, ist ein entsprechend hoher Schalldruckpegel erforderlich, denn zu tieferen Frequenzen hin steigt im Infraschallbereich die Hörschwelle mit 12–20 dB pro Oktave an [1]. Ergänzend kann die minimale akustische Wahrnehmbarkeit von Infraschall bzw. die absolute Hörschwelle für den Tieftonbereich mit der Methode des **minimalen Hördrucks** („minimal audible pressure“, MAP) nachvollzogen werden [4]. Dabei werden Reize über Kopfhörer dargeboten und der Schalldruck im Gehörgang der Versuchsperson mit einem Sondenmikrofon gemessen. Neben diesen Messmethoden wurde auch versucht, die Wahrnehmung von Infraschall in funktionellen Magnetresonanztomographie(MRT)-Untersuchungen nachzuweisen [18, 19]. Zwar konnte hierbei eine Aktivierung des auditorischen Kortex bei Beschallung mit niederfrequentem Schall magnetresonanztomographisch nachgewiesen werden, jedoch konnte nicht ausgeschlossen werden, dass die während der Emission des Prüftons generierten Oberwellen für die gemessenen Aktivierungen im auditorischen Kortex mitverantwortlich waren [19].

► Merke

Die frequenzspezifische Hörschwelle variiert unter den Menschen in Abhängigkeit vom Alter, genetischen und metabolischen Bedingungen sowie Lärmexposition.

Taktile Infraschallperzeption. Außerdem erfolgt die Wahrnehmung von Infraschall, wie erwähnt, auch über **taktile Sinnesrezeptoren**. Zu diesen gehören Pacini-, Ruffini- und Meissner-Körperchen. Pacini-Körperchen sind gegenüber niederfrequenten Vibrationen von 200–400 Hz am empfindlichsten [1, 20]. Ruffini- (≤ 40 Hz) und Meissner-Körperchen (≤ 80 Hz) partizipieren ebenfalls an der vibrotaktilen Perzeption und könnten bei der Wahrnehmung von Infraschall eine Rolle spielen [20, 21]. Es ist bekannt, dass hohe Schalldruckpegel von niederfrequentem Lärm überdies Körperschwingungen anregen. Die auffälligste Körperreaktion ist eine **Brustkorbbresonanzvibration** im Bereich von 50–80 Hz, die bei

höheren Pegeln von mindestens 20 dB über der Hörschwelle auftritt [1, 4]. Insgesamt ist im tiefen Frequenzbereich der Übergang von rein akustischer Wahrnehmung zu einer Verschmelzung mit taktiler Wahrnehmung fließend [2, 22]. Und auch andersherum ist es so, dass in **funktionellen MRT** kongenital ertaubter Probanden gezeigt werden konnte, dass niederfrequente vibrotaktile Reize zu einer Aktivierung im **auditorischen Kortex** führen [23]. Dennoch scheint die taktile Perzeption während eines Höreindrucks für die quantitativ messbare individuelle Hörleistung nicht relevant zu sein [4].

Aktive und passive Nutzungsmöglichkeiten

Infraschallmonitoring kann als wertvolles Instrument zur **Früherkennung** von **Naturkatastrophen** wie Murgängen, Schneelawinen, Erdbeben oder Vulkanausbrüchen eingesetzt werden. Anhand des Frequenzspektrums und der Intensität des Schalls können Rückschlüsse auf die weitere Entwicklung und den Ort des Geschehens gezogen werden [24, 25, 26, 27]. Auch im Privatbereich kann Infraschallmonitoring in **Alarmsystemen** zum Schutz vor Einbrechern eingesetzt werden [28]. Ebenso wird die Detektion von Infraschallsignalen militärisch genutzt. Aus über 500 km Entfernung können damit beispielsweise Hinweise auf die Testung von nuklearen Waffen gewonnen werden (**Abb. 2**; [29]). Der Bau dieser Infraschall-Überwachungsstationen, wie in **Abb. 2** dargestellt, ist Teil des globalen Alarmsystems der CTBTO (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization) zur Detektion von **nuklearen Explosionen**. Andererseits wurde, wenn auch nicht wirklich ernsthaft, die direkte Nutzung als Schallkanone für militärische Zwecke überdacht [30, 31]. Aktiv generiert werden kann Infraschall mit **speziellen Subwoofern** für **technische Forschungszwecke** (z. B. Simulations- und Kalibrierungsvorhaben) oder die Erzeugung gewünschter Geräuschkulissen (z. B. die naturgetreue Nachahmung der Niagara-Fälle oder die fragwürdige Untermalung von Aufführungen aus dem Horror-Genre) [30, 32, 33].

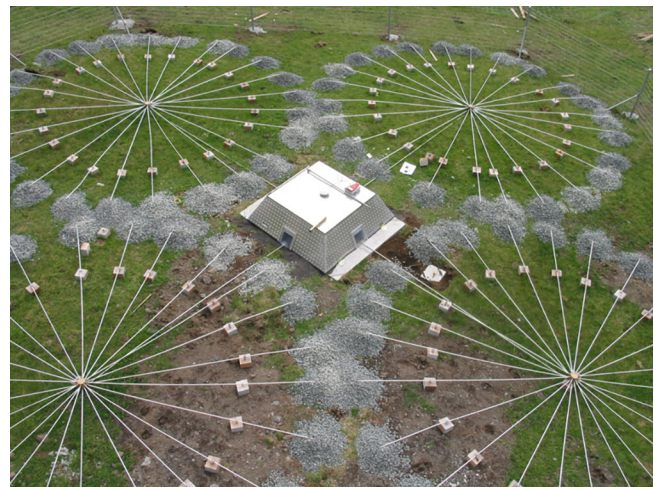


Abb. 2 ▲ Mit Mikrobarometern ausgerüstete Infraschallstation IS49, Tristan da Cunha, Vereinigtes Königreich [34]. Erläuterung s. Text. (Bilddarstellung mit freundlicher Genehmigung der/Courtesy of Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization [CTBTO] Preparatory Commission, www.ctbto.org)

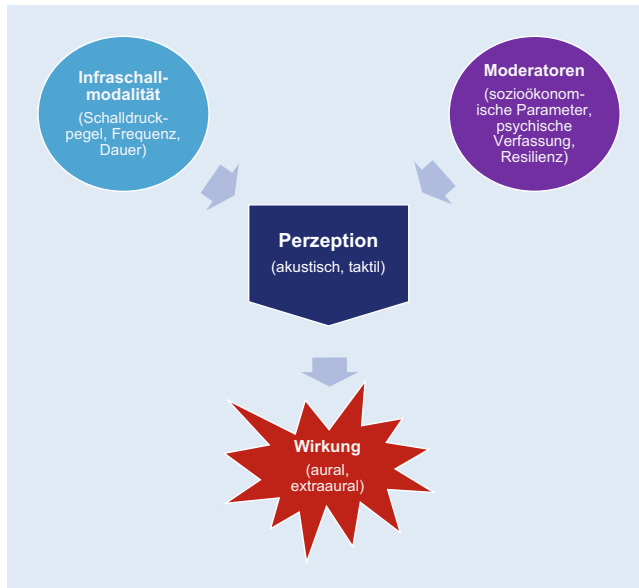


Abb. 3 ▲ Wahrnehmung und Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen

Auch in der Medizin gibt es für die therapeutische Anwendung von Infraschall erste nützliche Ansätze. So existieren in der Schlafmedizin **Pilotprojekte** zur Verbesserung der **Schlafqualität** durch Einsatz von infraschallmodulierten Niederfrequenztönen mit dem Ziel, die Tiefschlafphase zu verlängern. Dem Verfahren liegt die Hypothese zugrunde, dass durch binaurale Beschallung emittierte Infraschallwellen mit den im Elektroenzephalogramm (EEG) abgeleiteten Hirnströmen synchronisiert werden können und so Einfluss auf die Schlafphasen genommen werden kann [35, 36]. In der **Tumorforschung** zeigen sich in vitro außerdem erste Hinweise, dass eine Infraschallbehandlung von bestimmten soliden Tumoren die intrazelluläre Aufnahme von Chemotherapeutika begünstigt. Es wird angenommen, dass Infraschall mechanisch neben anderen zellmorphologischen Veränderungen die Membranstabilität der behandelten Tumorzellen beeinträchtigt und somit als **Chemosensitizer** wirken könnte [37].

Auswirkungen auf den menschlichen Körper

Aktuell gibt es nur wenige valide Daten zu Auswirkungen einer Infraschallexposition auf den Menschen (**Abb. 3**).

Auswirkungen auf das Gehör. Die grundsätzlichen Effekte von hohen Schalldruckpegeln auf das menschliche Gehör sind gut untersucht. Ab einer Exposition gegenüber mehr als 85 dB (A) am Arbeitsplatz kann bei regelmäßiger und mehrjähriger Einwirkung bereits eine berufsbedingte Lärmschwerhörigkeit auftreten [38]. Die **A-Bewertung** (A) entspricht hierbei einem Gewichtungungsverfahren von Messwerten in dB, das die Frequenzabhängigkeit der menschlichen Lautstärkeempfindung v.a. im **Hauptsprachbereich** bei moderater Lautstärke widerspiegelt [2]. Probanden mit normalem oder eingeschränktem Hörvermögen und regelrechtem Mittelohrbefund geben nach Beschallung mit **hohen Schalldruckpegeln** Ohrenscherzen an. Die Schmerzschwelle liegt dabei im

Infraschallbereich bei 2 Hz etwa bei 165 dB und beträgt bei 20 Hz etwa 145 dB [1]. Es wird vermutet, dass ab einem Pegel von 120 dB schon bei kurzzeitiger Exposition temporäre und permanente **Hörstörungen** auftreten können. Ab 140 dB können z. T. Tinnitus, Nyctagmus und/oder **Gleichgewichtsstörungen** beobachtet werden [39]. Eine Exposition gegenüber mindestens 140 dB (A) für weniger als 2 ms wird auch als Knalltrauma und über 2 ms als **Explosions-trauma** bezeichnet [38]. Neben akuten Innenohrschäden treten **Trommelfellperforationen** bei etwa 185–190 dB auf [1, 39]. Zu den strukturellen Schäden können auch metabolische Schädigungen (oxidativer Stress) im Mittel- und Innenohr kommen [38, 40]. Das Ausmaß bzw. die Häufigkeit der Schädigung ist bei kontinuierlichem Lärm höher und nimmt mit sinkendem Schalldruckpegel sowie bei höheren Frequenzen ab [2, 40, 41].

► Merke

Die Schmerzschwelle liegt im Infraschallbereich bei 2 Hz etwa bei 165 dB und beträgt bei 20 Hz etwa 145 dB.

Extraaurale Wirkung. Neben lärmbedingten Schädigungen am Innenohr sind nur wenige direkte Auswirkungen auf andere Organsysteme bekannt. Untersuchungen beschränken sich fast ausschließlich auf kleine Studienpopulationen. Ab 180 dB gibt es beispielsweise Berichte, dass in der Lunge Alveolen mit lebensbedrohlichen Folgen bersten [42]. Zum Teil werden Symptome wie **Lethargie**, Konzentrationsstörung, Unsicherheitsgefühl, Anspannung, **Stress**, Atemstörungen, Blutdruckanstieg und Missempfindungen durch Vibrationen beschrieben [2, 30, 41, 43]. Dieser Symptomkomplex wird von manchen Autoren als **vibroakustische Erkrankung** (VAD) bezeichnet [19, 44]. Dieses Syndrom soll v.a. in der Luftfahrt und Schwerindustrie gegenwärtig sein und sich neben den beschriebenen Beschwerden auch in strukturellen Aberrationen z.B. im Herz-Kreislauf- und Atmungssystem widerspiegeln [44].

Während die Datenlage in Humanstudien jedoch sehr dünn ist, wurden in zahlreichen In-vitro- und Tierversuchen die Effekte von Infraschall auf verschiedene Organsysteme demonstriert. Diese sind natürlich nicht ohne Weiteres auf den Menschen zu übertragen. Wirft man einen kurzen Blick auf das Herz-Kreislauf-System, so wurde beispielsweise gezeigt, dass sich bei **Ratten** unter Infraschallexposition mit 130 dB bei 5 Hz die **Herzfrequenz** erhöhte. Das Myokard der Tiere wies darüber hinaus im Vergleich zu nicht-exponierten Tieren eine höhere Zahl apoptotischer Zellen auf [45, 46]. Außerdem wurde eine Zunahme **perivaskulärer Koronarsklerose** nach Exposition von Ratten gegenüber Infraschall mit einem Schalldruckpegel von 120 dB nachgewiesen [47]. Infraschallexposition kann weiteren Studien zufolge zur Destabilisierung von Zellwänden führen. So wurde beobachtet, dass niederfrequenter Schall die **Membranstabilität** von Erythrozyten gegenüber hyperosmolarer Natriumchloridlösung herabsetzt [48, 49]. In ähnlicher Weise wird die **Blut-Retina-Schranke** bei Ratten ab einem Schalldruckpegel von 130 dB bei 8 Hz destabilisiert [50]. Wie bei den erwähnten Untersuchungen an Rattenmyokard zeigten sich auch an neuronalen Strukturen **infraschallinduzierte Apoptose-** und **Inflamationsprozesse** [51, 52, 53, 54]. Hinsichtlich der Effekte von Infraschall auf das Reproduktionssystem werden Verände-

rungen in der **Testosteronbiosynthese** angenommen [55]. Auch morphologische und epigenetische Veränderungen des Genoms in Rattenhoden wurden beschrieben [56, 57]. Über andere negative Folgen wurde für das respiratorische System [58, 59], den Gastrointestinaltrakt [60] und das Harnsystem [61, 62] berichtet. Demgegenüber wurden nur vereinzelt auch positive Auswirkungen von Infraschall in Tierstudien nachgewiesen. Beispielsweise zeigten Frakturen im Rattenmodell eine **verbesserte Wundheilung** unter Infraschalleinfluss, und das bereits bei Schalldruckpegeln unter 90 dB [63].

Das pathogene Potenzial von Infraschall wird in Fachkreisen kontrovers diskutiert und nicht selten bestritten [22, 64]. Es scheint eine bedeutende Rolle zu spielen, mit welcher Haltung ein Betroffener der Infraschallexposition gegenübersteht bzw. welche Interessen (z. B. ökonomischer oder umweltpolitischer Natur) dieser vertritt und wie sich andere situative Parameter wie Psyche, Einkommen, Bildung, Wohnsituation und Resilienz zum Zeitpunkt der Infraschallbewertung verhalten [64, 65, 66]. Problematisch ist auch, dass aufgrund von noch erheblichem Forschungsbedarf viel Platz für Spekulation und eben daher auch für Friktionen bleibt [65]. Negative Assoziationen und Angst vor infraschallbedingten Nebenwirkungen scheinen so das Auftreten von Symptomen nach Infraschallexposition zu begünstigen („**Nocebo-Effekt**“) [30, 42, 64]. Es gilt zudem zu berücksichtigen, dass in Experimenten genutzte Infraschallpegel im normalen Alltag eines Menschen wohl eher nicht auftreten, was einen schädigenden Einfluss durch Schallquellen in der Umwelt unwahrscheinlicher macht [43, 67]. Dennoch gilt es, mögliche Auswirkungen weiter zu prüfen, um pathogene Effekte nicht fälschlicherweise als reine Erkrankung des psychosomatischen Formenkreises fehlzuinterpretieren [19].

► Merke

Während die Datenlage in Humanstudien sehr dünn ist, wurden in Tierversuchen die Effekte von Infraschall auf verschiedene Organsysteme demonstriert.

Arbeitsmedizinische Bewertung und assoziierte Richtlinien

Die Arbeitsmedizin befasst sich primär präventivmedizinisch mit den Wechselbeziehungen zwischen Arbeitswelt und Individuum. Für die Einordnung von Infraschallemissionen gilt es, verschiedene Prinzipien zu bedenken.

Bewertung von Infraschall. Um mögliche Auswirkungen von Infraschallemissionen auf Exponierte zu bewerten, müssen biophysikalische und auch **psychoakustische Einflussgrößen** (z. B. Rhythmus, begleitende Emotionen) berücksichtigt werden [13]. Das menschliche Gehör nimmt unterschiedliche Frequenzkomponenten mit gleichem Schalldruckpegel unterschiedlich laut wahr. Dieses Empfinden wird durch Verwendung von international genormten frequenzabhängigen Bewertungsmaßstäben für den Schalldruckpegel wiedergegeben. Bei der Lautstärkenbewertung von Infraschall wird entgegen der üblichen „A-Bewertung“ der Schalldruckpegel mit einer **Frequenzbewertung „C“** (für 10–80 Hz) oder „G“ (für <20 Hz) gewichtet, um damit so genau

wie möglich das psychoakustische menschliche Hörempfinden bei tiefen Frequenzen zu berücksichtigen [2, 9]. Die C-Frequenzbewertung entspricht hierbei der 100-dB-Kurve gleicher Lautheit, und die G-Frequenzbewertung soll die Wahrnehmung von luftgeleitetem Infraschall repräsentieren. Das letzte Wort für die am besten geeignete Frequenzbewertung von Infraschall scheint jedoch noch nicht gesprochen zu sein [2]. Die **frequenzspezifische Lautstärkewahrnehmung** kann auch durch den **Lautstärkepegel** (in der Einheit Phon, z. B. 1 phon) ausgedrückt werden. Dabei werden Messwerte (in dB) Kurven gleich empfundener Lautstärken zugeordnet (Isophone, **Abb. 4**). In der Einheit Phon wird also angegeben, welchen Schalldruckpegel ein Sinuston mit einer Frequenz von 1000 Hz besitzt, der gleich laut empfunden wird wie das analysierte Schallereignis (1 phon $\hat{=}$ 1 dB bei 1000 Hz). Die lineare Erhöhung des Lautstärkepegels in Phon korreliert allerdings nicht mit einem linearen Anstieg der Lautstärkenwahrnehmung (logarithmische Beziehung), sodass die **psychometrische Einheit Sone** für die sog. Lautheit etabliert wurde (1 sone $\hat{=}$ 40 phon bzw. 40 dB bei 1000 Hz). Die Erhöhung von 1 auf 2 sone spiegelt die Verdoppelung der Lautheit wider [13]. Relevant ist, dass im Tieftonbereich die wahrgenommene Lautheit bei gleichem Schalldruckpegelanstieg schneller zunimmt als im Hochtonbereich [4]. Das heißt, die Differenz zwischen Hör- und Schmerzschwelle ist im Tieftonbereich geringer [2]. Neben der Verwendung dieser Methoden, um die empfundene Lautstärke des Schalls abzubilden, existieren weitere für die Schallanalyse relevante Gegebenheiten. So gilt es, bei der Bewertung von Schalldruckpegeln **Maskierungseffekte** und frequenzspektrumspezifische Effekte zu berücksichtigen. Der Maskierungseffekt besagt, dass überlagerte Schallanteile nicht zum Höreindruck, jedoch zum Schalldruck beitragen [13]. Überdies muss das **Frequenzspektrum** beachtet werden, da ein Breitbandgeräusch lauter als ein schmalbandiges Geräusch mit gleichem Schalldruck empfunden wird [13]. Diese Unterschiede können durch die Auswertung von Frequenzgruppenpegeln (z. B. nach Zwicker) berücksichtigt werden [2, 9].

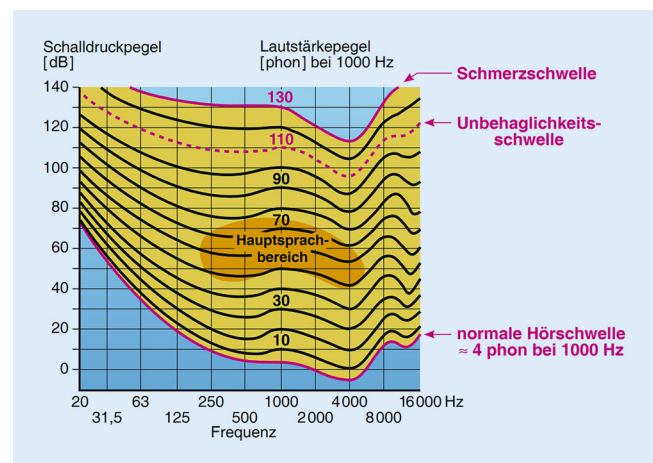


Abb. 4 ▲ Kurven gleicher Lautheit, sog. Isophone. (Aus: [68], mit freundl. Genehmigung)

► Merke

Die Differenz zwischen Hör- und Schmerzschwelle ist im Tieftonbereich geringer.

Richtlinien. Eine vernünftige Bewertung von Infraschallemissionen vorzunehmen, erscheint somit vielleicht bereits komplexer als vermutet. Dabei helfen sollen **Richtlinien** wie die „Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz“ (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm. Sechste Auflage, Kapitel 7.3 „Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche“) und bestimmte Normen, wie die DIN 45680:1997-03 (Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft) sowie das dazugehörige Beiblatt 1:1997-03 (Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen) [41, 69]. Auch existiert eine **Arbeitsschutzverordnung** (LärmVibrationsArbSchV, Stand 2007) und eine **Arbeitsstättenregelung** (ASR A 3.7, Stand 2021) zur Protektion von Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen in Deutschland [70, 71]. Jedoch sind diese Richtlinien bezogen auf die Bewertung sehr tiefer Frequenzen bzw. von Infraschall unterhalb der definierten Hörschwelle nur unzureichend ausgestaltet [72]. Zudem unterschätzen Schallpegelmessungen mit dem Bewertungsfilter A meist die Belastung bei tieffrequenten Geräuschen [2]. Genaue und einheitliche Richtlinien für unbedenkliche Infraschallemissionen in Deutschland oder auf internationaler Ebene gibt es nicht [73]. Daher kann im Folgenden nur eine Übersicht zu **Empfehlungen** einzelner Länder gegeben werden. In den Richtlinien der amerikanischen Konferenz der staatlichen Industriehygieniker (ACGIH) wurde 1998 ein Schalldruckpegel von **145 dB** (ungewichtet) für Infraschall als **Obergrenze** ohne Hinweise zur Expositionsdauer nahegelegt [43, 73]. In Polen und Dänemark dürfen Arbeiter in Unternehmen hingegen nur einem Schalldruckpegel von bis zu 90 dB (G) ausgesetzt sein [43, 74]. In Dänemark wird ferner vorgeschlagen, 85 dB (G) im Niederfrequenzbereich in Wohngebieten, Schulen und Büros nicht zu übersteigen [73, 74]. Eine polnische Arbeitsgruppe schlägt ihrerseits folgende Richtwerte als Obergrenze vor: 102 dB (G) für eine 8-stündige Belastung pro Tag für 5 Tage die Woche bzw. 86 dB (G) für Risikopersonen wie z. B. Jugendliche und Schwangere [43]. Die europäische Richtlinie 89/391/EWG sagt überdies aus, dass Schwangere keine Arbeiten verrichten sollten, die zu starker niederfrequenter Vibration führen können, da diese zu Frühgeburtslichkeit führen könnten [2]. Die empfohlenen Abstände von Wohngebieten zu Infraschallemissionen wie **Windenergieanlagen** werden je nach Bundesland mit 400–1000 m in Deutschland angegeben [75]. Klassische Turbinen mit frontalem, windwärts gerichtetem Rotor produzieren durchschnittlich 60–70 dB (G), wobei kurzzeitige Abweichungen selbstverständlich möglich sind [16]. Zu beachten ist, dass aufgrund der großen Infraschallwellenlänge herkömmliche Absorptions- oder Dämmungsmaßnahmen kaum Wirkung entfalten. So können sich die Wellen weitestgehend ungehindert ausbreiten [2]. Interessant sind diesbezüglich Ideen, durch aktive **elektroakustische Gegensteuerung** („active noise control“, ANC) auf der Basis von Interferenz industriellen Lärm einzudämmen [2, 76].

► Merke

Genaue und einheitliche Richtlinien für unbedenkliche Infraschallemissionen in Deutschland oder auf internationaler Ebene gibt es nicht.

Ausblick

Die korrekte Messung und Bewertung von Infraschallquellen gestaltet sich komplex und ist Inhalt umweltpolitischer und arbeitsmedizinischer Diskussionen. Etablierte Richtlinien sind aufgrund fehlender valider Daten aus größeren Studienpopulationen nicht nur in Deutschland Mangelware. Unabhängig davon entwickeln sich neue Forschungsgebiete, wie das Infraschallmonitoring zur Ableitung geophysikalischer Vorhersagen und Verlaufsbeurteilung von Naturereignissen und die Infraschallapplikation als Anwendungsfeld in der Medizin (Schlafmedizin, Onkologie). Perspektivisch werden neue Erkenntnisse aus eben dieser Infraschallforschung und eine weitreichendere arbeitsmedizinische Einordnung erhofft.

Fazit für die Praxis

- Infraschall beschreibt Schallwellen unterhalb von 20 Hz, die im Alltag und der Natur allgegenwärtig sind, wobei die Wahrnehmung auf unterschiedlichen sensorischen Ebenen stattfinden kann.
- Infraschallmonitoring und -nutzung bieten interessante Anwendungsmöglichkeiten in sicherheitsbezogenen und medizinischen Angelegenheiten.
- Entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft kann nicht ausgeschlossen werden, dass Infraschall bei hohen Schalldruckpegeln negative Effekte auf die Gesundheit des Menschen hat.
- Es sind weitere Studien zur Etablierung valider Richtwerte für die Infraschallexposition und ggf. Prüfung effektiver Schutzmaßnahmen erforderlich.
- Ökonomische und umweltpolitische Belange sollten bei der Einordnung des möglicherweise pathogenen und stark kontrovers diskutierten Potenzials von Infraschall keine Rolle spielen.

Korrespondenzadresse

Dr. J. M. Vahl

Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde und Kopf-Hals-Chirurgie,
Universitätsklinikum Ulm
Frauensteige 12, 89075 Ulm, Deutschland
Julius.Vahl@uniklinik-ulm.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. Gemäß den Richtlinien des Springer Medizin Verlags werden Autoren und Wissenschaftliche Leitung im Rahmen der Manuskripterstellung und Manuskriptfreigabe aufgefordert, eine vollständige Erklärung zu ihren finanziellen und nichtfinanziellen Interessen abzugeben.

Autoren. J. M. Vahl: A. Finanzielle Interessen: J. M. Vahl erhielt durch die Brigitte und Dr. Konstanze Wegener-Stiftung Drittmittel/finanzielle Unterstützung für die Forschung an Infraschall-induzierbarer Chemosensitivität in Kopf-Hals-Tumoren. – B. Nichtfinanzielle Interessen: HNO-Assistenzarzt, Uniklinik Ulm | Mitgliedschaft: Deutsche Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie e. V., Bonn.

J. V. A. Keppeler: A. Finanzielle Interessen: Forschungsförderung zur persönlichen Verfügung: Finanzielle Förderung durch Brigitte und Dr. Konstanze Wegener-Stiftung zur persönlichen Verfügung. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Student der Humanmedizin; Bundesministerium der Verteidigung.

D. Krahé: A. Finanzielle Interessen: (a) Finanzielle Vergütung vom Umweltbundesamt für die Beteiligung an der Untersuchung: Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall, 2014 | (b) Finanzielle Vergütung vom Umweltbundesamt für die Beteiligung an der Untersuchung: Lärmwirkungen von Infraschallmissionen, 2020. – Erstattung der Kosten für die Fahrt und eine Übernachtung: 14. Chemnitzer Fachseminar Schallmissionsschutz, 2019, Thema: Neufassung der DIN 45680 – Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft. – B. Nichtfinanzielle Interessen: pensionierter Hochschullehrer, Bergische Universität Wuppertal, Fakultät Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik, Leiter des Fachgebiets Nachrichtentechnik (Forschungsschwerpunkt Akustik) | Chefredakteur des *Akustik Journals* der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) | Mitgliedschaften: DEGA, VDE, VDI, IEEE, ASA | Finanzielle und nichtfinanzielle Interessen in den nächsten 12 Monaten: Beteiligung an einer vom Umweltbundesamt beauftragten Untersuchung „Wirkung von Infraschall – Voruntersuchung für eine umweltepidemiologische Langzeitstudie“.

K. Bahrke-Rein: A. Finanzielle Interessen: K. Bahrke-Rein gibt an, dass kein finanzieller Interessenkonflikt besteht. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt | Mitgliedschaft: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

R. Reiter: A. Finanzielle Interessen: R. Reiter gibt an, dass kein finanzieller Interessenkonflikt besteht. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Oberarzt der Sektion Phoniatrie und Pädaudiologie der Univ.-HNO-Klinik Ulm.

T. K. Hoffmann: A. Finanzielle Interessen: Advisory Board: MSD, Shire, BMS, Merck. – Bezahler Berater/interner Schulungsreferent/Gehaltsempfänger o. ä.: Herausgeber-tätigkeit Zeitschrift *best practice onkologie*. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Ärztlicher Direktor der Hals-Nasen-Ohrenklinik, Universitätsklinikum Ulm.

E. Goldberg-Bockhorn: A. Finanzielle Interessen: Forschungsförderung zur persönlichen Verfügung: Software-Produkte und Test-CI-Elektroden der Fa. MED-EL im Rahmen einer klinischen Studie (geplant). – B. Nichtfinanzielle Interessen: Angestellte Ärztin, Oberärztin, HNO-Uniklinik Ulm | Mitgliedschaft: Deutsche Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie e.V., Bonn.

Wissenschaftliche Leitung. Die vollständige Erklärung zum Interessenkonflikt der Wissenschaftlichen Leitung finden Sie am Kurs der zertifizierten Fortbildung auf www.springermedizin.de/cme.

Der Verlag erklärt, dass für die Publikation dieser CME-Fortbildung keine Sponsorengelder an den Verlag fließen.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Literatur

- Leventhall G (2007) What is infrasound? *Prog Biophys Mol Biol* 93:130–137
- Wahrnehmung V (2007) Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland?
- Steglich P, Heise K (2021) Schwingungen und Wellen. In: *Vorkurs Physik fürs MINT-Studium*. Springer, Berlin, Heidelberg, S 143–161
- Møller H, Pedersen CS (2004) Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health* 6:37–57
- Rusz J, Chum J, Baše J (2021) Locating thunder source using a large-aperture microphone array. *Front Earth Sci* 9:170
- Baotic A, Sicks F, Stoeger AS (2015) Nocturnal “humming” vocalizations: adding a piece to the puzzle of giraffe vocal communication. *BMC Res Notes* 8:1–11
- Garstang M (2004) Long-distance, low-frequency elephant communication. *J Comp Physiol A* 190:791–805
- Park T, Evans AR, Gallagher SJ et al (2017) Low-frequency hearing preceded the evolution of giant body size and filter feeding in baleen whales. *Proc R Soc B* 284:20162528
- Bctke K (1998) Messung und Bewertung von tieffrequenter Schall. *Fortschr Akust* 24:472–473
- Bernstein H (2019) Mikrofone. In: *Elektroakustik*. Springer, Wiesbaden, S 179–209
- D’amico S, Van Renterghem T, Botteldooren D (2021) Measuring infrasound outdoors with a focus on wind turbines: the benefits of a wind-shielding dome. *Appl Acoust* 178:108015
- Krishnamoorthy S, Bowman DC, Komjathy A et al (2020) Origin and mitigation of wind noise on balloon-borne infrasound microbarometers. *J Acoust Soc Am* 148:2361–2370
- Maschke C, Fastl H (2017) Schallwirkungen beim Menschen. In: *Schallwirkungen beim Menschen*. Springer, Berlin, Heidelberg, S 1–30
- Strenzke N, Pauli-Magnus D, Meyer A et al (2008) Update zur Physiologie und Pathophysiologie des Innenohrs. *HNO* 56:27–36
- Salt AN, Hullar TE (2010) Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hear Res* 268:12–21
- Salt AN, Kaltenbach JA (2011) Infrasound from wind turbines could affect humans. *Bull Sci Technol Soc* 31:296–302
- Joost H, Friedrich B, Verhey JL et al (2021) Is infrasound perceived by the auditory system through distortions? *Acta Acust* 5:4
- Bauer M, Sander-Thömmes T, Ihlenfeld A et al (2015) Investigation of perception at infrasound frequencies by functional magnetic resonance imaging (fMRI) and magnetoencephalography (MEG)
- Dommes EI (2010) Ist Infraschall hörbar?: eine fMRT-Studie zur Stimulierbarkeit des auditorischen Kortex durch Infraschall und niedrigfrequente Töne
- Cobo R, García-Piqueras J, Cobo J et al (2021) The human cutaneous sensory corpuscles: An update. *J Clin Med* 10:227
- Darian-Smith I, Brookhart JM, Mountcastle VB et al (1984) The nervous system: sensory processes. American Physiological Society, Bethesda
- Reiter R (2018) Aus der Gutachtenpraxis: Gehörsschäden durch Infraschall? *Laryngorhinootologie* 97:341–343
- Levänen S, Jousmäki V, Hari R (1998) Vibration-induced auditory-cortex activation in a congenitally deaf adult. *Curr Biol* 8:869–872
- Johnson JB, Watson LM, Palma JL et al (2018) Forecasting the eruption of an open-vent volcano using resonant infrasound tones. *Geophys Res Lett* 45:2213–2220
- Liu D, Wu Q, Dong H et al (2022) Construction and application of debris flow infrasound real-time monitoring and warning visualization platform. *Nat Hazards* 112(1):521–543
- Watson LM, Carpenter B, Thompson K et al (2021) Using local infrasound arrays to detect plunging snow avalanches along the Milford Road, New Zealand (Aotearoa). *Nat Hazards* 111(1):949–972
- Yang M, Wang T, Shi J (2021) Repeating infrasound from an earthquake doublet in Alaska. *Geophys Res Lett* 48:e2021GL094632
- Lewis S (2014) Cocoon is a smart home security device that uses infrasonic sound to detect intruder. In: *Security.world | News source for the physical security industry*
- Che I-Y, Kim K, Le Pichon A et al (2022) Illuminating the North Korean nuclear explosion test in 2017 using remote infrasound observations. *Geophys J Int* 228:308–315
- Mühlhans JH (2017) Low frequency and infrasound: A critical review of the myths, misbeliefs and their relevance to music perception research. *Music Sci* 21:267–286
- Sanyal S, Hernandez R, Fernandez F et al (2016) Metrology of Navy Directed Energy Weapons. In: *NCSL International Workshop & Symposium*
- Crawshaw AS (2014) Towards defining the potential of electroacoustic infrasonic music. In: *ICMC*
- Park J, Garcés M, Thigpen B (2009) The rotary subwoofer: A controllable infrasound source. *J Acoust Soc Am* 125:2006–2012
- CTBTO (2022) Infraschallstation IS49, Tristan da Cunha, Vereinigtes Königreich. <https://bit.ly/3BvvsPx>. Zugegriffen: 11.09.2022
- Abeln V, Kleinert J, Strüder HK et al (2014) Brainwave entrainment for better sleep and post-sleep state of young elite soccer players—A pilot study. *Eur J Sport Sci* 14:393–402
- Jirakittayakorn N, Wongsawat Y (2018) A novel insight of effects of a 3-Hz binaural beat on sleep stages during sleep. *Front Hum Neurosci*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00387>
- Vahl J, Von Witzleben A, Reiter R et al (2021) Infrasound a new weapon in cancer therapy? *Explore* 18(3):366–370
- Zahnert T (2011) The differential diagnosis of hearing loss. *Dtsch Arztl Int* 108:433
- Seidel H-J, Bauer B, Bittighofer PM et al (1997) Checkliste Arbeits- und Betriebsmedizin. Thieme, Stuttgart
- Lim DJ, Dunn DE, Johnson DL et al (1982) Trauma of the ear from infrasound. *Acta Otolaryngol* 94:213–231
- Siegmann S, Nigmann U (2007) Biologische Wirkungen von tieffrequenter Schall/Infraschall. *Fachztg Prakt Arbeitsmed* 1:20–22
- Moyano DB, González Lezcano RA (2020) Effects of infrasound on health: Looking for improvements in housing conditions. *Int J Occup Saf Ergon* 28(2):809–823

43. Pawlaczyk-Luszczynska M, Kaczmarska-Kozłowska A, Augustyńska D et al (2000) Proposal of new limit values for occupational exposure to infrasonic noise in Poland. *J Low Freq Noise Vib Act Control* 19:183–193
44. Alves-Pereira M, Branco NAC (2007) Vibroacoustic disease: biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling. *Prog Biophys Mol Biol* 93:256–279
45. Pei Z-H, Chen B-Y, Tie R et al (2011) Infrasound exposure induces apoptosis of rat cardiac myocytes by regulating the expression of apoptosis-related proteins. *Cardiovasc Toxicol* 11:341–346
46. Pei Z, Sang H, Li R et al (2007) Infrasound-induced hemodynamics, ultrastructure, and molecular changes in the rat myocardium. *Environ Toxicol* 22:169–175
47. Lousinha A, Oliveira MJR, Borrecho G et al (2018) Infrasound induces coronary perivascular fibrosis in rats. *Cardiovasc Pathol* 37:39–44
48. Sharipova S (2013) Osmotic resistance of blood erythrocytes at rats unover in vitro infrasonic waves action. *Int J Biol Chem* 5:18–23
49. Tuleukhanov S, Abdrassulova Z, Baibekov Y et al (2020) Reaction of erythrocyte membranes of animals on direct effects of infrasound. *E3S Web Conf* 159:8001
50. Qiu P, Zhang Z, Jiang Y et al (2002) Effect of infrasound on ultrastructure and permeability of rat's blood-retinal barrier. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi* 38:499–501
51. Liu Z, Gong L, Li X et al (2012) Infrasound increases intracellular calcium concentration and induces apoptosis in hippocampi of adult rats. *Mol Med Rep* 5:73–77
52. Shi M, Du F, Liu Y et al (2013) Glial cell-expressed mechanosensitive channel TRPV4 mediates infrasound-induced neuronal impairment. *Acta Neuropathol* 126:725–739
53. Yuan H, Long H, Liu J et al (2009) Effects of infrasound on hippocampus-dependent learning and memory in rats and some underlying mechanisms. *Environ Toxicol Pharmacol* 28:243–247
54. Zhang MY, Chen C, Xie XJ et al (2016) Damage to hippocampus of rats after being exposed to infrasound. *Biomed Environ Sci* 29:435–442
55. Zhuang Z, Pei Z, Chen J (2007) Infrasound-induced changes on sexual behavior in male rats and some underlying mechanisms. *Environ Toxicol Pharmacol* 23:111–114
56. Rui-Man L, Zhi-Qiang Z, Hai-Tao Y et al (2007) Impact of infrasound on methylation status of genome in testes of rats. *J Low Freq Noise Vib Act Control* 26:143–147
57. Wei Y-N, Liu J, Shu Q et al (2002) Effects of infrasound on ultrastructure of testis cell in mice. *Zhonghua Nan Ke Xue* 8:323–328
58. Branco N, Santos J, Monteiro E et al (2004) The lung parenchyma in low frequency noise exposed Wistar rats. *Rev Port Pneumol* 10:77–85
59. Wei L, Keyong J, Huanzhang L et al (2001) Changes of oxygenation and lung damage after different decibel of 8 Hz and 16 Hz infrasound operated on rats. *J Fourth Mil Med Univ* 22:1485–1489
60. Zhao JH, Wang JH, Luo JY et al (2018) Effects of infrasound on gastric motility, gastric morphology and expression of nitric oxide synthase in rat. *Biomed Environ Sci* 31:399–402
61. Fenghua H, Xiaofeng H, Jingzao C et al (2004) The ultrastructural changes of renal tissues following exposure to 90 dB or 130 dB infrasound of rats. *Chin J Phys Med* 26:143–146
62. Yaoming C, Lin Y, Shuangbin G et al (2003) Effects of infrasound on monoamine oxidase, GSH-Px, SOD and lipid peroxidation in rat kidneys. *J Fourth Mil Med Univ* 24:113–115
63. Long H, Zheng L, Gomes FC et al (2013) Study on osteogenesis promoted by low sound pressure level infrasound in vivo and some underlying mechanisms. *Environ Toxicol Pharmacol* 36:437–442
64. Koch S, Holzheu S, Hundhausen M (2022) Windenergieanlagen und Infraschall: Keine Evidenz für gesundheitliche Beeinträchtigungen – eine physikalische, medizinische und gesellschaftliche Einordnung. *Dtsch Med Wochenschr* 147:112–118
65. Gobert J (2016) Ausweitung der Kampfzone – Medien und Argumentation im Konflikt. In: *Widerstand gegen Großprojekte*. Springer, Wiesbaden, S 15–21
66. Kohlhuber M, Bolte G (2012) Einfluss von Umweltlärm auf Schlafqualität und Schlafstörungen und Auswirkungen auf die Gesundheit. *Somnologie* 16:10–16
67. Zagubień A, Wolniewicz K (2016) Everyday exposure to occupational/non-occupational infrasound noise in our life. *Arch Acoust* 41(4):659–668
68. Zenner HP (2006) Hören. In: Schmidt F, Schaible HG (Hrsg) *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer, Berlin, Heidelberg, S 287–311
69. TA Lärm (1998) Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) [Technical Instructions on Noise Abatement]
70. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Ausschuss für Arbeitsstätten (2021) Technische Regel für Arbeitsstätten (ASRA 3.7 Lärm)
71. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017) Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV))
72. Krahé D (2012) Deutung der Hörschwelle in Richtlinien zur Bewertung tieffrequenter Geräusche. In: *DAGA 2015—conference paper*
73. Lo Castro F, Iarossi S, Luca MD et al (2020) Health protection criteria for airborne infrasound exposure: an international comparison. In: *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, Cham, S 68–75
74. Jakobsen J (2001) Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration. *J Low Freq Noise Vib Act Control* 20:141–148
75. Tucci F (2022) Überblick zu den Abstandsempfehlungen zur Ausweisung von Windenergiegebieten in den Bundesländern. Fachagentur Windenergie an Land
76. Jiang J, Li Y (2018) Review of active noise control techniques with emphasis on sound quality enhancement. *Appl Acoust* 136:139–148



Infraschall – humanmedizinische Implikationen

Zu den Kursen dieser Zeitschrift: Scannen Sie den QR-Code oder gehen Sie auf www.springermedizin.de/kurse-hno-zeitschrift

? Welcher Frequenzbereich wird durch Infraschall beschrieben?

- ≤ 20 Hz
- 21–200 Hz
- 201–2000 Hz
- 2001–20.000 Hz
- > 20.000 Hz

? Welche Aussage zur Entstehung und Messung von Infraschall ist am ehesten korrekt?

- Infraschall kann mit Druckmikrofonen oder Mikrobarometern detektiert werden.
- Infraschall entsteht bei rasanten Oszillationen der Luft, wie z. B. beim Flügelschlag einer Biene.
- Infraschall wird i. d. R. mit dem Frequenzbewertungsfilter A versehen.
- Der Schalldruckpegel von Infraschall wird in der Einheit Sone angegeben.
- Rotary Woofer werden zur elektroakustischen Störschallbekämpfung eingesetzt.

? Was gilt am wahrscheinlichsten für die Wahrnehmung von Infraschall?

- Infraschall wird nicht gehört, sondern taktil wahrgenommen.
- Nur die durch Infraschall erzeugten otoakustischen Distorsionsprodukte sind hörbar.
- Nach Infraschallexposition zeigen Probanden magnetresonanztomographisch keine Aktivierung der Hörbahn.
- Die Infraschallsensitivität kann unter verschiedenen Menschen deutlich variieren.

- Die extraaurale Wahrnehmung von Infraschall tritt typischerweise vor dem Höreindruck auf.

? Welche Antwort zur potenziellen Einsetzbarkeit von Infraschalltechnologie ist am ehesten korrekt?

- Infraschallmonitoring kann vor Naturkatastrophen warnen.
- Infraschallmonitoring ersetzt bisherige Alarmanlagen in privaten Außenanlagen.
- Infraschallmonitoring hilft bei der Überwachung chemischer Waffentests.
- Infraschall wird erfolgreich in der Schlaf- und Tumormedizin eingesetzt.
- Infraschallmonitoring wird zur Größenbestimmung von Fledermauskolonien eingesetzt.

? Was trifft für die arbeitsmedizinische Sicht auf Infraschall am ehesten zu?

- Es liegen bereits gut belastbare Daten zu Grenzwerten unter Infraschallemission vor.
- Infraschall ist als sicher unbedenklich einzustufen.
- Die Richtlinien zum Umgang mit Infraschall variieren, 145 dB sollten als grober Anhaltspunkt nicht überschritten werden.
- Infraschallemission spielt in der Industrie keine Rolle.
- Menschen sind im Alltag selten Infraschall ausgesetzt.

? Eine 42-jährige Frau stellt sich in der arbeitsmedizinischen Sprechstunde vor. Sie habe in der Zeitung von berufsbedingten Infraschallemissionen gelesen und erkundigt sich nach betrieblichen Vorkehrungen. Welche der folgenden Aspekte wäre für eine eventuelle Abschirmung von Infraschall zu beachten?

- Es sollte auf einen Abstand von 10 m zur Emissionsquelle geachtet werden.
- Eine massive Hauswand bietet sicheren Schutz.
- Infraschall kann sich in Feststoffen auch transversal ausbreiten.
- Durch Infraschall werden bauliche Schutzmaßnahmen i. d. R. zerstört.
- Infraschall verläuft typischerweise unterhalb der Erdoberfläche.

? Über welche Symptome könnten Probanden nach Infraschallexposition am ehesten berichten?

- Exantheme, Juckreiz, Globusgefühl
- Lethargie, Konzentrationsstörung, Stress
- Gelenkschmerzen, Dysurie, Antriebslosigkeit
- Obstipation, Hämatochezie, Gewichtsverlust
- Vertigo, Übelkeit, Erbrechen

Informationen zur zertifizierten Fortbildung

Diese Fortbildung wurde von der Ärztekammer Nordrhein für das „Fortbildungszertifikat der Ärztekammer“ gemäß § 5 ihrer Fortbildungsordnung mit **3 Punkten** (Kategorie D) anerkannt und ist damit auch für andere Ärztekammern anerkennungsfähig.

Anerkennung in Österreich: Für das Diplom-Fortbildungs-Programm (DFP) werden die von deutschen Landesärztekammern anerkannten Fortbildungspunkte aufgrund der Gleichwertigkeit im gleichen Umfang als DFP-Punkte anerkannt (§ 14, Abschnitt 1, Verordnung über ärztliche Fortbildung, Österreichische Ärztekammer (ÖÄK) 2013).

Hinweise zur Teilnahme:

- Die Teilnahme an dem zertifizierten Kurs ist nur online auf www.springermedizin.de/cme möglich.
- Der Teilnahmezeitraum beträgt 12 Monate. Den Teilnahmeschluss finden Sie online beim Kurs.
- Die Fragen und ihre zugehörigen Antwortmöglichkeiten werden online in zufälliger Reihenfolge zusammengestellt.

- Pro Frage ist jeweils nur eine Antwort zutreffend.
- Für eine erfolgreiche Teilnahme müssen 70% der Fragen richtig beantwortet werden.
- Teilnehmen können Abonnenten dieser Fachzeitschrift und e.Med- und e.Dent-Abonnenten.

? Ein Firmenchef eines Windkraftfertigungsunternehmens äußert in der Arbeitsstättenbegehung, dass gleich mehrere Mitarbeiter über negative Folgen einer Infraschallexposition klagen. Die Beschwerden traten im zeitlichen Zusammenhang mit einer über die sozialen Medien verbreiteten Videodokumentation negativer Folgen von Windkraftwerken auf. Was gilt es bei der Einschätzung von Berichten über Symptome Infraschallexponierter am ehesten zu berücksichtigen?

- Die Exponierten könnten dem Nocebo-Effekt unterliegen.
- Interessenkonflikte seitens der Berichterstatte sind eher zu vernachlässigen.
- Ob die erzeugte Infraschallemission über die allgemeinen Umweltemissionen hinausgeht, spielt keine Rolle.
- Den Exponierten unbewusste Störgrößen sind bei der Begutachtung irrelevant.
- Glaubwürdig sind die Einschätzungen der Mitarbeiter nur, wenn diese kohärent zu eigenen Erfahrungen oder denen von Freunden sind.

? Welche Aussage zur Forschung um Infraschall ist am ehesten korrekt?

- Es existieren zahlreiche randomisierte prospektive humane Studien zur Wahrnehmung und Auswirkung von Infraschall.
- Im Tiermodell existieren einige Studien, die ein pathogenes Potenzial von hohen Infraschalldruckpegeln auf verschiedene Organsysteme vermuten lassen.
- Die Forschung zum Thema Infraschall ist umweltpolitisch unproblematisch.
- Die Forschung zum Thema Infraschall erscheint zweifelhaft, da etwas, das man nicht hört, auch keinen Effekt haben kann.
- Infraschall und Niederfrequenzgeräusche sind das Gleiche.

? Welcher Faktor führt am ehesten zu einem subjektiv hohen Lautheitsempfinden eines Geräuschs?

- Eine anatomische Malformation des Ohrs oder der Hörbahn
- Ein sehr kurz andauerndes Hörereignis
- Ein schmalbandiges Frequenzspektrum
- Eine hohe Resilienz
- Ein hoher Schalldruckpegel