

Durch WEA verursachte Infraschall-Emissionen

Allgemeine Definition Schall/Ultraschall/Infraschall

Schallwellen im Frequenzbereich von 16 (bzw. 20) Hertz(Hz) bis 20.000 Hertz (= 20 kHz) nimmt der Mensch über das Innenohr als “Hören” wahr. Hören kann als differenzierte Wahrnehmung von Lautstärke und Tonhöhe beschrieben werden. Bei konstantem Schalldruck (Lautstärke, messbar in Dezibel, dB) ist das menschliche Ohr im mittleren Frequenzbereich (2.000-5.000 Hz) am empfindlichsten. Die Frequenzbereiche darüber und darunter werden nur noch eingeschränkt wahrgenommen.

Als Ultraschall wird der Frequenzbereich oberhalb von 20 kHz bezeichnet, den das menschliche Ohr nicht mehr als “Hören” wahrnimmt. Einige Tierarten, (z.B. Fledermäuse) können mit Hilfe von Ultraschall-Signalen kommunizieren oder Beute orten.

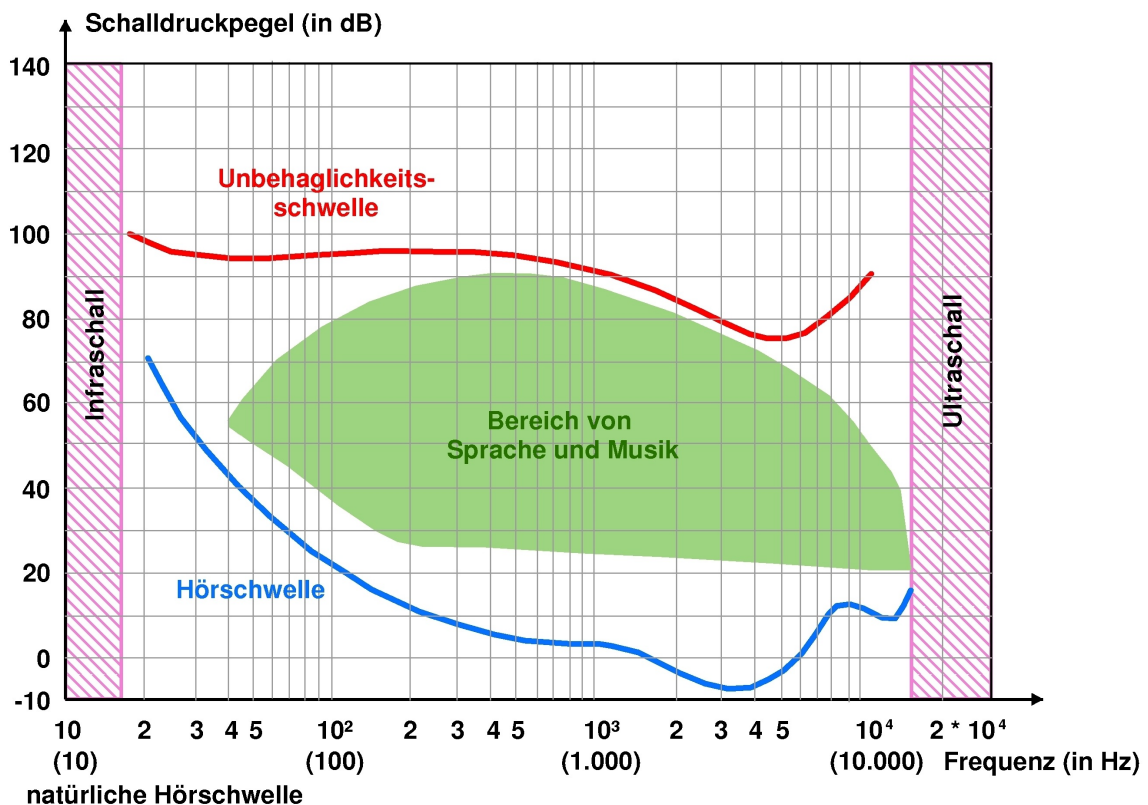


Abbildung 1: Hörbereich des Menschen (verändert, aus SCHOLZ 2003)

Quelle: SCHOLZ, S. (2003¹)

¹ SCHOLZ, S. (2003): Güte der visuellen und auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung in einer virtuellen Simulationsumgebung. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades im

Als Infraschall werden Schallwellen bezeichnet, die so tief sind, dass sie vom menschlichen Ohr ebenfalls nicht mehr gehört werden können. Diese Luftdruckschwankungen werden dann als Pulsationen und Vibrationen mit einem zusätzlichen Druckgefühl den Ohren wahrgenommen. Dieser Bereich von sehr tiefen Frequenzen (in dem die Wahrnehmungskomponente Tonhöhe nicht mehr existiert) umfasst den Bereich von 0,001 bis 20 Hz. Bis 60 Hz nimmt die Wahrnehmung von Tonhöhe und Lautstärke langsam zu, ab 60 Hz findet der Übergang zur normalen Geräuschwahrnehmung statt. Dieser Übergangsbereich vom „Fühlen“ (keine Wahrnehmung von Tonhöhe) zum „Hören“ (Wahrnehmung von Lautstärke und Tonhöhen) ist dabei fließend. Allgemein werden Frequenzen bis 100 Hz als tieffrequenter Schall bezeichnet. Obwohl die Empfindlichkeit des Ohres zu tiefen Frequenzen hin stark abnimmt, können Luftdruckschwankungen bis zu einer Frequenz von etwa 1 Hz wahrgenommen werden. Je tiefer die Frequenz wird, umso höher muss jedoch der Schalldruckpegel („Lautstärke“) werden, damit der Mensch eine Wahrnehmung erfährt (vgl. Abb. 1) So muss der Schalldruckpegel im Infraschallbereich bei 3 Hz bei 120 dB liegen, damit der Mensch etwas wahrnimmt. Im Vergleich dazu genügen bei 100 Hz 23 dB (vgl. Tabelle 1). Einige Tierarten (Elefanten, Tiger, Wale) können sich mit Hilfe von Infraschall verständigen.

Tabelle 1: Hörschwellenpegel im Infraschallbereich nach DIN 45680²

| Frequenz | 3 Hz | 8 Hz | 10 Hz | 12,5 Hz | 16 Hz | 20 Hz |
|-------------|--------|--------|-------|---------|-------|-------|
| Hörschwelle | 120 dB | 103 dB | 95 dB | 87 dB | 79 dB | 71 dB |

Die Wellenlänge von Infraschall liegt zwischen 17 (bei 20 Hz) und 170 m (bei 2 Hz). Aufgrund dieser großen Wellenlänge hat Infraschall andere Eigenschaften als Hörschall. So ist die Ausbreitungsdämpfung durch Luftabsorption äußerst gering, durch Hindernisse wie Schutzwälle kaum möglich und auch die Schalldämmung durch Bauteile beträgt nur wenige dB. Natürliche Strukturen, wie Geländeform oder Vegetation, stellen ebenfalls keine Hindernisse dar. Die Schallpegelabnahme erfolgt daher fast ohne Energieverlust nur nach geometrischen Gesetzen und beträgt 6 dB pro Entfernungsverdoppelung.³ Die weltweit vermutlich erste Registrierung von Infraschall im Jahr 1883 erfolgte beim Ausbruch des indonesischen Vulkans Krakatau. Die dabei erzeugten Schallsignale waren so stark, dass sie mehr als sieben Mal um die Erde liefen.⁴

In der Natur treten diese niederfrequenten Schwingungen besonders in Bereichen mit großen

Fachbereich Sicherheitstechnik. Bergischen Universität Wuppertal. S. 117.

² DIN 45680 (März 1997): Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft.

³ BORGMANN 1996, S. 2.

⁴ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Infraschall.
http://www.bgr.bund.de/cln_116/nn_322860/DE/Themen/Seismologie/Infraschall/infraschall__node.html?__nnn=true. Stand: 09.06.2010.

Massenbewegungen auf. Hierzu zählen Windströmungen, Stürme, Unwetter, Gewitter, aktive Vulkane, Eruptionen und Erdbeben. Weitere Auslöser sind die Plattentektonik und Meeresbrandung. Immer, wenn Wind an einem Hindernis vorbei strömt, entstehen Geräusche und es kann zur Entstehung von Infraschall kommen. Der Großteil des natürlich entstehenden Infraschalls liegt im Bereich kleiner als ein Hertz (Erdbeben, Ozeanwellen, große Wasserfälle, Stürme). Windereignisse oder natürliche Schwankungen des Luftdruckes liegen im Bereich 0,01 Hz.

Künstliche Infraschallquellen treten ebenfalls überall dort auf, wo große Massen in Bewegung sind. Verkehrsmittel (z.B. Flugzeuge, Bahn, Schiffe, Autos), chemische und nukleare Explosionen, maschinenbetriebene Nutzgeräte (Waschmaschinen, Pumpen, Heizungen usw.), Beschallungsanlagen und Bauwerke (Tunnel, Brücken, Hochhäuser) erzeugen tieffrequenten Schall. Allein das „Luft mit der Hand ins Gesicht wedeln“ lässt Infraschall tiefer Frequenzen entstehen.

Auch die am Mast vorbei streichenden Rotorblätter einer Windenergieanlage rufen Infraschall hervor.

Richtwerte & Messung von Infraschall

Der Umgang mit tieffrequenten Geräuschen ist in der TA Lärm⁵ (Kapitel 7.3 “Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche”) geregelt: “Diese Technische Anleitung dient dem Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche sowie der Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch Geräusche. Sie gilt für Anlagen, die als genehmigungsbedürftige oder nicht genehmigungsbedürftige Anlagen den Anforderungen des Zweiten Teils des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) unterliegen”.

Hinzu kommt die DIN 45680. Innerhalb dieser DIN werden tieffrequente Geräusche mit der mittleren Hörschwellenkurve verglichen. Je nach Tageszeit (tags oder nachts) und Frequenz des Geräusches sind entsprechende Überschreitungen dieser mittleren Hörschwelle akzeptabel (vgl. Beiblatt 1 der DIN 45680: 1197-03).

⁵ TA Lärm - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm. Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503).

Zur Ermittlung des Schalldruckpegels wird ein Schalldruckpegelmessgerät verwendet. Da das menschliche Ohr je nach Frequenz des Schalls unterschiedlich empfindlich ist, wird bei der Messung ein entsprechender Filter (A, B, C, D) verwendet. Dieser bestimmt, wie der Schalldruckpegelmessgerät Quelle: ROBINSON U. DAVIDSON (1967⁶)

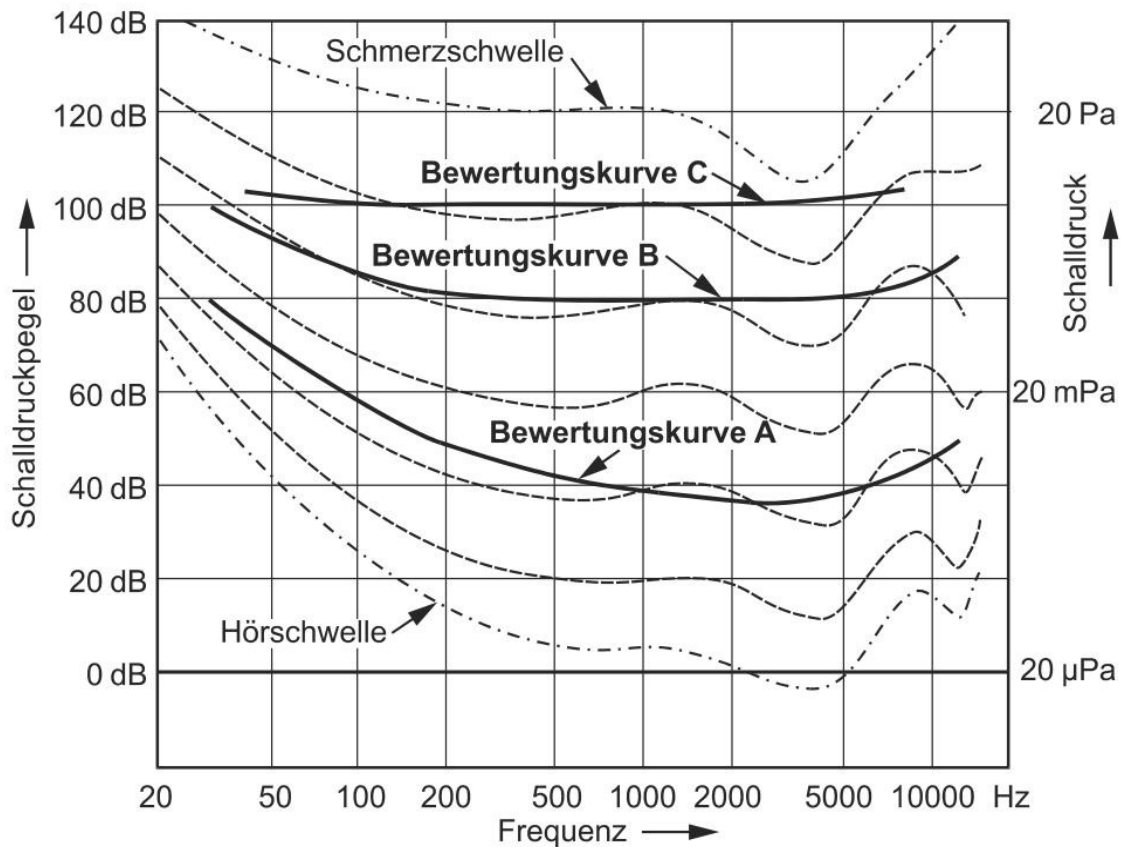


Abbildung 2: Kurven gleicher Lautstärke und Frequenzbewertungskurven A, B, C (nach ROBINSON U. DAVIDSON, 1967)

auf unterschiedliche Schallfrequenzen reagiert, d.h. es wird eine Korrektur der Schallintensität vorgenommen. Momentan wird für Schalldruckpegelmessungen nach entsprechenden nationalen und internationalen Normen und Richtlinien der sogenannte “A-Bewertungsfilter” verwendet.

Dieser berücksichtigt die Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs für eher schwache bis mittlere Schalldruckpegel. Nach DIN 45680 wird in Deutschland zusätzlich der “C-Bewertungsfilter” eingesetzt. Die C-Bewertungskurve entspricht den Isophonen für höhere

⁶ ROBINSON U. DAVIDSON (1967) Zit. in: REGIONALVERBAND SÜDLICHER OBERRHEIN (Hrsg.) (2010): Macht Schienenlärm krank? Studie des Universitätsklinikums Freiburg zur Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen bei Exposition gegenüber Schienenlärm unter besonderer Berücksichtigung der DB-Trasse Basel-Offenburg (und der Haltbarkeit des Schienenbonus). S. 241

Schallpegel (80-90 Phon). Mit dieser Bewertungskurve werden die niedrigen Frequenzen nicht so stark abgeschwächt, wie bei der A-Bewertungskurve, die den Isophonen für 20-30 Phon entspricht. Daher kann ein großer Unterschied zwischen A-bewertetem und C-bewertetem Pegel auf größere Anteile im tieffrequenten Bereich hinweisen.

Diese Kombination gilt aber allgemein auch als nicht optimal für die Erfassung von tieffrequentem Schall, da Signalbestandteile unterhalb von 50 Hz abgeschwächt werden und unterhalb von 10 Hz keine Erfassung stattfindet (BECKER U. SCHUST 1996⁷, BETKE U. REMMERS 1998⁸). Eine Verbesserung dieser Methode wird durch zusätzliche Nutzung der "G-Bewertung" (ISO 7196, 1995) oder des "Zwickerverfahren" (DIN 45631) erreicht.

Infraschall durch WEA

Moderne WEA erzeugen in Abhängigkeit von Windstärke und Windrichtung Geräuschemissionen, die auch Schall im niederfrequenten Bereich beinhalten. Dafür verantwortlich sind besonders die am Ende der Rotorblätter entstehenden Wirbelablösungen sowie weitere Verwirbelungen, die durch Kanten, Spalten und Verstreibungen entstehen. Die von der Luft umströmten Rotorblätter erzeugen ähnliche Geräusche wie die Flügel eines Flugzeugs.

Untersuchungen haben ergeben, dass die erzeugten Infraschallanteile im Immissionsbereich deutlich unterhalb der Hörschwelle des Menschen (d.h. unterhalb der 20 Hz) liegen.

So stellte das Landesamt für Umweltschutz Bayern⁹ fest, dass „die im Infraschallbereich liegenden Schallimmissionen weit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle des Menschen liegen und daher zu keinen Belästigungen führen.“ Die Langzeit-Geräuschemissionsmessungen (inklusive Infraschall) fanden an einer 1-MW-Windenergieanlage statt (vgl. Tabelle 2). Die Messergebnisse beinhalten dabei aber nicht nur die gemessenen Infraschallpegel, die durch die betriebene Windenergieanlage entstanden sind, sondern auch den typischen Infraschall des Windes selber. Eine entsprechende Fremdgeräuschkorrektur der gemessenen Pegel, mit deren Hilfe der Infraschall, den die WEA verursacht, bestimmt werden kann, wurde nicht durchgeführt.

Tabelle 2: Infraschallpegel, ermittelt in 250 m Abstand von einer 1-MW-Windenergieanlage bei einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s im Vergleich

⁷ BECKER, P. U. M. SCHUST (1996): Gesundheitsgefährdung durch Infraschall - Bestandsaufnahme. Broschüre der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund. Zit. in: EMPFEHLUNGEN DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

⁸ BETKE, K. U. H. REMMERS (1998): Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hrsg.): Tagungsband der Deutschen Akustiktagung (DAGA) 1998. DEGA, Oldenburg. <http://www.itap.de/tieffrequent.pdf>

⁹ HAMMERL, C. U. J. FICHTNER (2000): „Langzeit-Geräuschemissionsmessung an der 1 MW-Windenergieanlage Norde N54 in Wiggensbach bei Kempten (Bayern)“. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Januar 2000.

zum Hörschwellenpegel (Quelle: HAMMERL U. FICHTNER 2000)

| Frequenz | 8 Hz | 10 Hz | 12.5 Hz | 16 Hz | 20 Hz |
|----------------------|--------|-------|---------|-------|-------|
| Infraschallpegel WEA | 72 dB | 71 dB | 69 dB | 68 dB | 65 dB |
| Hörschwelle Mensch* | 103 dB | 95 dB | 87 dB | 79 dB | 71 dB |

*Anmerkung: zum Vergleich Hörschwelle des Menschen nach DIN 45680

Im Ergebnis lagen alle gemessenen Schallimmissionen unterhalb der Hörschwelle des Menschen. Sie liegen aber auch unterhalb der typischerweise in z.B. Fahrzeugen oder Maschinenräumen auftretenden Schalldruckpegel von 100-120 dB¹⁰.

Diese Aussage übernahm auch das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2001)¹¹ und stellte fest, dass Frequenzen zwischen 8 und 20 Hz in einem Abstand von 250 m zu einer 1 MW-Windenergieanlage mit einem durchschnittlichen Infraschalldruckpegel von 68 dB gemessen wurden. Dieser Wert liegt weit unter der Wahrnehmungsschwelle des Menschen und wird als "völlig harmlos" eingeschätzt.

Eine ältere Messung befasste sich mit der Frage, welchen Anteil der Betrieb von WEA am gemessenen Gesamt-Infraschallpegel einnimmt.¹² Die folgende Abbildung 3 verdeutlicht die ermittelten Ergebnisse.

¹⁰ ISING, H., B. MARKERT, F. SHENODE, C. SCHWARZE, (1982): Infraschallwirkung auf den Menschen. Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes Berlin. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf.

¹¹ Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2001): Sachinformationen zu Geräuschemissionen und -immissionen von Windenergieanlagen.

¹² BETKE, K. U. H. REMMERS, (1998): Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall. Präsentiert auf der DAGA'98.

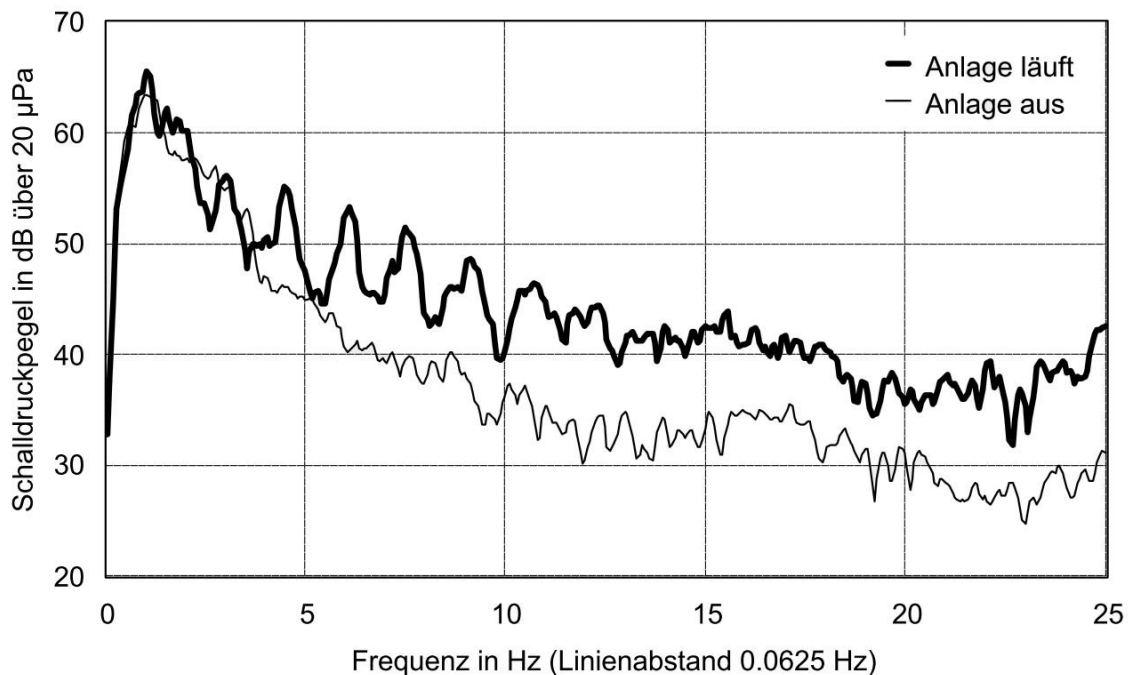


Abbildung 3: Schalldruckpegel einer WEA im Infraschallbereich in 200 m Entfernung bei Betrieb der Anlage (dicke Linie = Anlage läuft) und ohne Betrieb der Anlage (dünne Linie = Anlage aus). (Quelle: BETKE U. REMMERS 1998, Bild 2)

Die Untersuchung verdeutlicht, dass bei einem durchschnittlichen Schalldruckpegel von etwa 45 dB nur ungefähr 10 dB aus dem Betrieb der WEA resultieren und 35 dB allein durch den Wind selbst erzeugt werden. Die Autoren stellen jedoch heraus, dass Infraschall in dem Moment lästig wird, in dem er eine bestimmte Lautstärke übersteigt, also für Menschen wahrnehmbar wird. Diese Lautstärke wurde bei bisher durchgeführten Messungen an WEA noch nie festgestellt.

Weitere Untersuchungen an einer 500 kW-Anlage¹³ und einer 1 MW-Anlage¹⁴ ergaben, dass der abgestrahlte Schallpegel im Infraschallbereich weit unter der Wahrnehmbarkeitsschwelle liegt und damit keine Gefahr von diesen Anlagen ausgeht. An einer 1,65 MW-Anlage¹⁵ (Typ Vestas V 66) ergaben Infraschallmessungen bei 10 Hz einen Schalldruckpegel von 58 dB in einer Entfernung von 100 m zur Anlage. Die Wahrnehmbarkeitsschwelle liegt bei dieser

¹³ BETKE, K., SCHULTZ-VON-GLAHN, M., GOOS, O. U. H. REMMERS (1996): Messung der Infraschallabstrahlung von Windenergieanlagen. Tagungsband der Deutschen Windenergiekonferenz 1996. DEWEK 96. S.207-210.

¹⁴ ITAP-Institut - Institut für technische und angewandte Physik GmbH. (2000): Messbericht: Messung der Infraschall-Abstrahlung einer WEA des Typs Vestas – 1,65 MW. Oldenburg. 26. Juni 2000.

¹⁵ ITAP-Institut - Institut für technische und angewandte Physik GmbH(2000): Messbericht der Messung der Infraschall-Abstrahlung einer WEA des Typs Vestas – 1,65 MW. Oldenburg. 26. Juni 2000.

Frequenz nach DIN 45680 etwa bei 95 dB und damit mehr als 30 dB oberhalb des gemessenen Schalldruckpegels der WEA.

CERANNA et al. (2006)¹⁶ schlussfolgern, aufgrund ihrer Ergebnisse in Verbindung mit Abbildung 4, dass keine Belästigung von Anwohnern durch Windkraftanlagen im Infraschallbereich bis etwa 20 Hz gegeben ist, da im Abstand von 1 km ein 5-MW-Windrad nur einen Schalldruckpegel von maximal 80 dB erzeugt. Lediglich bei Frequenzen oberhalb von 15 Hz und größeren Windparks wäre in dieser Entfernung eine Wahrnehmung möglich.

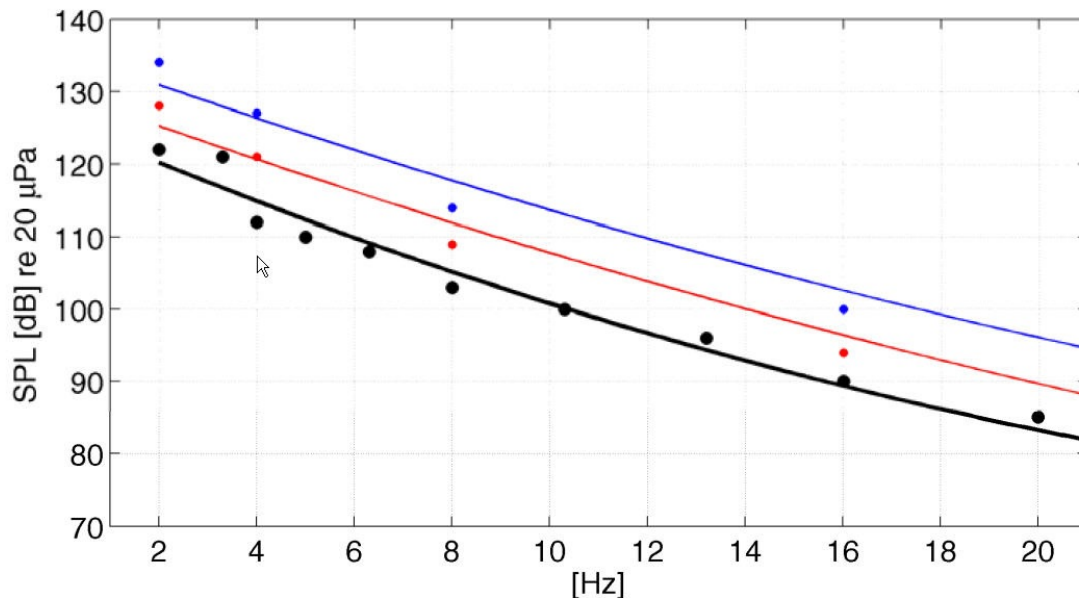


Abbildung 4: Verlauf des menschlichen Hörvermögens bei tiefen Frequenzen als Funktion des Schalldruckpegels (dB). Die schwarze Kurve zeigt die Wahrnehmungsgrenze von 0 phon, die rote und blaue Kurve entspricht 20 bzw. 40 phon (Quelle: CERANNA et al. 2006)

Eine von der acouplan GmbH (2007)¹⁷ durchgeführte Infraschall-Messung kommt zu dem Ergebnis, dass bei Windenergieanlagen in einem Abstand von ca. 550 bis 1.200 m Schalldruckpegel zwischen 54 bis 67 dB im Infraschallbereich zwischen 6 und 20 Hz vorhanden sind. Es wurde keine Fremdgeräuschmessung durchgeführt, d.h. die ermittelten Summenpegel sind durch Fremdgeräusche beeinflusst. Die Windstärke lag zwischen 4,2 und 9,4 m/s. Die ermittelten Schalldruckpegel lagen ebenfalls unterhalb der Hörschwelle des Menschen.

¹⁶ CERANNA, L., G. HARTMANN U. M. HENGER (2006): Der unhörbare Lärm von Windkraftanlagen – Infraschallmessungen an einem Windrad nördlich von Hannover. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

¹⁷ ACOUPLAN GMBH (Ingenieurbüro für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik) (2007): Schalltechnischer Bericht - Tieffrequente Schallimmissionen von Windenergieanlagen - 14641 Nauen / Ortsteil Markee. Bericht Nr. B1135_1. Im Auftrag der Bürgerinitiative GegenWind Nauner Platte e.V. Berlin. 11.05.2007.

| f [Hz] | L _{lin,eq,terz} [dB] | | | | | | | | | | | | | L _{lin,eq} [dB] | L _{A,eq} [dB(A)] |
|--------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------------|---------------------------|
| | 6.3 | 8 | 10 | 12.5 | 16 | 20 | 25 | 31.5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | | |
| MP 1 | 67.1 | 65.2 | 63.4 | 62.1 | 60.1 | 59.1 | 58.5 | 57.7 | 56.9 | 56.5 | 55.4 | 54.2 | 52.5 | 81.0 | 49.6 |
| MP 2 | 66.3 | 64.3 | 62.8 | 60.2 | 57.7 | 56.3 | 55.4 | 54.4 | 53.8 | 52.7 | 52.4 | 51.1 | 49.9 | 77.4 | 43.6 |
| MP 3 | 62.9 | 60.5 | 60.2 | 57.5 | 55.7 | 54.3 | 53.8 | 51.5 | 50.8 | 50.5 | 50.5 | 49.7 | 48.7 | 76.0 | 44.8 |

Abbildung 5: Ergebnisse der Schalldruckpegelmessungen in 550, 900 und 1.200 m Abstand (die ermittelten Summenpegel sind durch Fremdgeräusche beeinflusst.) (Quelle: acouplan GmbH 2007)

In der folgende Abbildung 6 sind einige Spektren tieffrequenter Schalle zusammen mit der Hörschwelle nach DIN 45680 dargestellt. Daraus wird nicht nur deutlich, dass im Infraschallbereich der Schalldruckpegel einer WEA (gemessen wiederum in 200 m Entfernung) unterhalb der Hörschwelle liegt, sondern auch, dass allgemein akzeptierte Alltagsgeräusche, wie das Innengeräusch in einem PKW, deutlich höhere Schalldruckpegel haben. In einem PKW bei 100 km/h ist der Infraschall so stark, dass er hörbar ist.

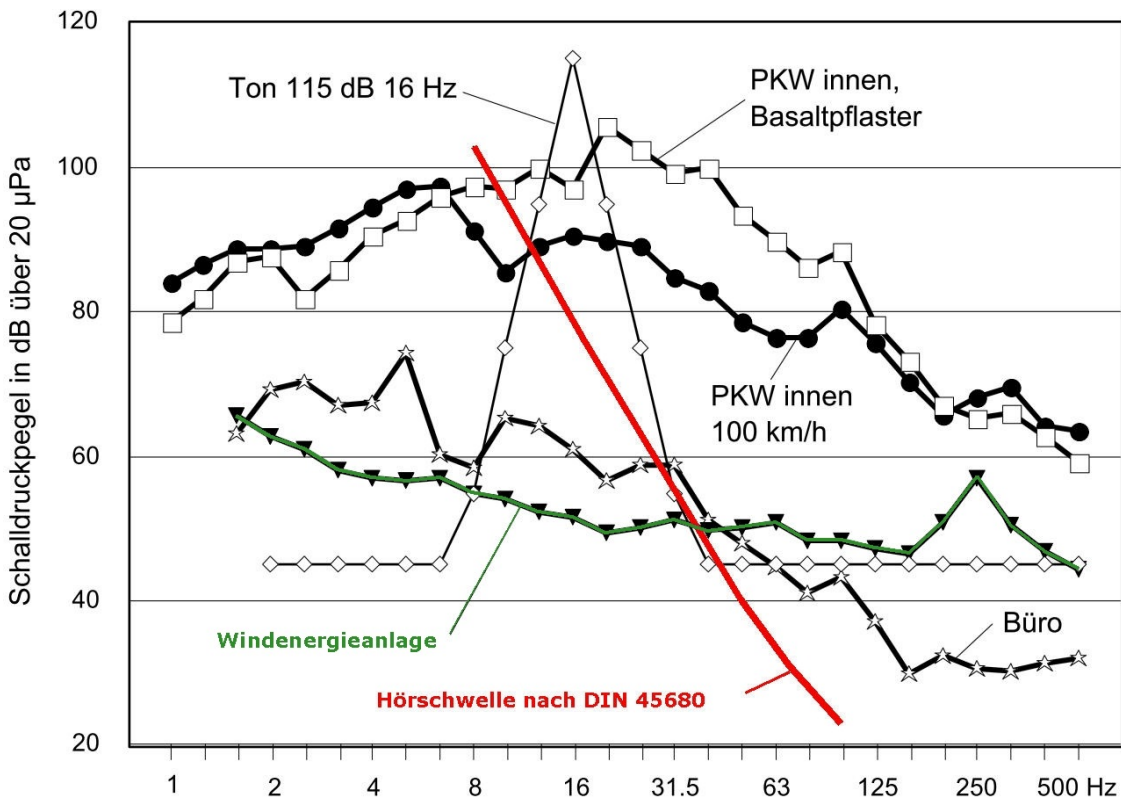


Abbildung 6: Spektren einiger tieffrequenter Geräusche im Verhältnis zur Hörbarkeitsschwelle des Menschen (Quelle: BETKE U. REMMERS 1998, Bild 3, verändert)

Alle derzeit vorliegenden Infrasschallmessungen zeigen übereinstimmend, dass der Infrasschall von WEA auch im Nahbereich der Anlagen (100-250 m Entfernung) deutlich unterhalb der menschlichen Hörschwelle und damit auch deutlich unterhalb einer denkbaren Wirkschwelle liegt.

Trotz dieser bisher vorliegenden Forschungsergebnisse gibt es Kritiker, die Infrasschall als eine mögliche Gefahr für Menschen betrachten.

Wirkung von Infrasschall auf den Menschen

Das menschliche Ohr wandelt die in der Luft vorhandenen Schallwellen in für den Menschen verständliche Signale, in "Geräusche", um. Diese Geräusche nimmt der Mensch aktiv als "Hören" wahr. Darüber hinaus wird das Trommelfell aber auch von Schallwellen in Schwingungen versetzt, die außerhalb dieses Hörbereichs liegen.

Da tieffrequenter Schall Bestandteil des täglichen Lebens ist, wird jeder Mensch permanent dieser Einwirkung ausgesetzt. Darum wird auch in Bezug auf zusätzliche Schallquellen die Besorgnis geäußert, dass zusätzlicher Infrasschall das Gehör sowie andere Organe direkt schädigen bzw. allgemeine Befindlichkeitsstörungen verursachen kann. So soll es sowohl zu physiologischen Veränderungen (Änderung der Hinströme, Vergrößerung der roten Blutkörperchen) als auch zu psychischen Reaktionen (Angst, Unsicherheit, Schlafstörungen) kommen können.

Bei der Betrachtung von Infrasschall wird deshalb auch zwischen auraler und extraauraler Wirkung auf den Menschen unterschieden. Aurale Wirkungen betreffen dabei direkt das Hörorgan (z.B. zeitweise Hörschwellenverschiebung), extraaurale Wirkungen sind indirekter Art, sie führen z.B. zu Stressreaktionen und Wahrnehmungsstörungen. In unterschiedlichen Versuchsanordnungen wurde die Wirkung von Infrasschall bzw. tieffrequentem Schall auf Tiere und Menschen untersucht.

Ältere Tierversuche (LIM et al. 1982¹⁸, KARPOVA et al. 1970¹⁹) deuten darauf hin, dass es zu direkten Schädigungen kommen kann. So werden die Infrasschallwellen auf das Trommelfell und Mittel-/Innenohr übertragen und führen dort zu Verletzungen. Eine grundsätzliche Übertragung solcher Tierversuche auf den Menschen ist aber aufgrund des voneinander abweichenden Hörverhaltens nicht möglich. Direkt am Menschen durchgeführte, ältere Experimente von TAENAKA (1989)²⁰, SLARVE (1975)²¹ und MOHR et al. (1965)²² ergaben keine Veränderung der Hörschwelle oder der vestibulären Funktionen. Berichtet wurde

¹⁸ LIM, D.J., D.E. DUNN, D.L. JOHNSON U. T.J. MOORE (1982): Trauma of the ear from infrasound. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

¹⁹ KARPOVA, N.I., S.V. ALEKSEEV, V.N. EROKHIN, E.N. KADYSKINA U. O.V. REUTOV (1970): Early response of the organism to low-frequency acoustical oscillations. Noise and vibration bulletin 11: 100-103. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²⁰ TAENAKA, K. (1989): nur Abstract: A study on the effect of infrasound (Japanisch). Nippon-Jibiinkoka-Gakkai-Kaiho 92(9): 1399-1415. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²¹ SLARVE, R.N. U. D.L. JOHNSON (1975): Human whole-body exposure to infrasound. Aviat-Space-Environ-Med 46 (4 Sec 1): 428-431. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²² MOHR, G.C., J.N. COLE, E. GUILD U. H.E. VON GIERKE (1965): Effects of low frequency and infrasonic noise on man. Aerospace medicine 36 (9): 817 - 824. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

hingegen von schmerzlosem Ohrendruck oder "Flattern" des Trommelfells. Eine weitere Untersuchung (JERGER 1966)²³ hatte, bis auf eine Ausnahme, bei Schallpegeln ab 137 bis 141 dB hingegen eine Hörschwellenabwanderung zum Ergebnis.

JOHNSON (1982)²⁴ kommt zu der Schlussfolgerung, dass Infraschall unterhalb von 150 dB als unschädlich angesehen werden kann, wenn es sich nur um eine kurzzeitige Exposition von kontinuierlichen Infraschall oder um impulsartige Expositionen handelt. Bei einem dauerhaften Einfluss über 24 Stunden sollten 118 dB nicht überschritten werden. Die Checkliste Arbeits- und Betriebsmedizin (SEIDEL 1997)²⁵ spricht (ohne Unterscheidung der Expositionsdauer) ab einem Schalldruckpegel von 120 dB von dauerhaften Schwellenverschiebungen des Gehörs und zeitweisen Hörschwellenabwanderungen geringen Ausmaßes im Tieftonbereich. Bei einer weiteren Erhöhung um 20 dB treten extraaurale Wirkungen wie Tinnitus, Nystagmus (= unkontrollierte rhythmische Bewegungen von Organen, meist der Augen = "Augenzittern") und/oder Gleichgewichtsstörungen auf. Ab 160 dB kann das Trommelfell einreißen sowie das Mittel-/Innenohr geschädigt werden.

In Verbindung mit Infraschall werden extraaurale Wirkungen häufiger beschrieben als aurale.

So wiesen 85 % der Probanden bei EVANS (1972)²⁶ ab 120 dB und 60 s Einflussdauer einen Nystagmus auf. Des Weiteren wurde ein Schwingungsgefühl beschrieben. Mit ansteigendem Schalldruckpegel trat der Nystagmus auch früher auf.

SLARVE (1975)²⁷ beschrieb Stimmmodulationen, Thorax- und Abdomenvibrationen, aber keine signifikanten Veränderungen von Herz- und Atemfrequenz.

HARRIS (1978)²⁸ stellte bis 140 dB keine Gleichgewichtsstörungen und bis 155 dB keinen Nystagmus fest. EVANS wies in einem weiteren Experiment eine Steigerung der Reaktionszeit um 30-40 % unter Infraschallpegeln von 115-120 dB nach. Die beteiligten Personen beschrieben weiterhin Gefühle wie Lethargie oder Euphorie. Bei weiteren Versuchen von HARRIS konnte kein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit festgestellt werden, genauso wenig wie subjektiver Schwindel, Desorientiertheit oder Sehstörungen. Vibrationsgefühle, Druck auf den Ohren und Unkonzentriertheit traten bei 142 dB bei 15 % der Probanden auf.

Nach einer achtstündigen Beschallung mit Infraschall (110 dB bei 12,5 Hz) fühlten sich rund

²³ JERGER, J. B. ALFORD U. A. COATS (1966): Effects of very low frequency tones on auditory threshold. Journal of speech and hearing research 9: 150-160. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²⁴ JOHNSON, D.L. (1982): Hearing hazards associated with infrasound. In: HAVERNIK R.P., D. HENDERSON, U. R. SALVI, EDS. New perspectives on noise-induced hearing loss / ed. - New York: Raven press: 407-21. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²⁵ SEIDEL, H.-J. U. P.M. BITTINGHOFER (1997): Checkliste Arbeits- und Betriebsmedizin. Stuttgart, New York. Thieme: 306. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²⁶ EVANS, M.J. U. W. TEMPEST (1972): Some effects of infrasonic noise in transportation. Journal of sound and vibration 22 (1): 19-24. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²⁷ SLARVE, R.N. U. D.L. JOHNSON (1975): Human whole-body exposure to infrasound. Aviat-Space-Environ-Med 46 (4 Sec 1): 428-431. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

²⁸ HARRIS, C.S. U. D.L. JOHNSON (1978): Effects of infrasound of cognitive performance. Aviation, space and environmental medicine 49(4): 582-586. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

20 % der betroffenen Personen subjektiv völlig unbeeinflusst, die restlichen berichteten von verminderter Konzentrationsfähigkeit, stärkerer Müdigkeit am Ende der Sitzung, vermehrtem Gefühl der Anspannung, Druckgefühl in den Ohren sowie Missempfindungen durch „Vibration“ (ISING 1982a)²⁹.

Im Rahmen einer Studie des Bundesgesundheitsamtes (ISING 1982b)³⁰ wurden etwa 100 Personen in verschiedenen Versuchsanordnungen (von einigen Minuten bis zu acht Stunden mit Wiederholungen bis zu einer Woche) Infraschallquellen von bis zu 125 dB ausgesetzt und dann mit sozialwissenschaftlichen und biochemischen Methoden bezüglich ihrer Reaktionen untersucht. Trotz anderer Erwartungen „erwies sich der unhörbare Infraschall als völlig harmlos“, so die Autoren im Vorwort ihrer Studie. Es traten bei keinem der Probanden Gleichgewichtsstörungen, deutliche Übelkeitserscheinungen oder deutlich länger anhaltender Nystagmus auf. Bei zunehmender Expositionsdauer, d.h. bei längerer oder wiederholter Exposition verstärkten sich die beschriebenen Symptome nicht, es trat eher eine rasche Gewöhnung an die Situation ein. Die Autoren verglichen diese Symptome mit „einem ganz geringfügigen und rasch abklingenden Unwohlsein durch einen Anflug von Reisekrankheit“³¹. Bei z.B. in Maschinenräumen oder Transportmitteln maximal auftretenden Infraschallpegeln wurden keinerlei Gleichgewichtsstörungen, Übelkeit oder Nystagmus nachgewiesen. Hingegen wurde eine unspezifische Stressreaktion belegt, die mit steigendem Pegel und steigender Frequenz zunimmt. Hinzu kamen Effekte, die zu Ermüdungen und Atemfrequenzabnahme führten.

Nach DANIELSSON (1985)³² kann Infraschall zu einem signifikanten Blutdruckanstieg (diastolischen) und der Abnahme des systolischen Blutdrucks führen.

SCHUST (1997)³³ analysierte 98 Literaturquellen zum Thema Infraschall. Diese beinhalteten Studien (Tier- und Humanexperimente) zu auralen und extraauralen Wirkungen von Infraschall bei Kurzzeit- und Langzeitexpositionen. So wurde bei Laborversuchen am Menschen nachgewiesen, dass auch der Infraschall die vom hörbaren Schall bekannten Wirkungen auf den Menschen haben kann, wenn der Schalldruckpegel die Hörschwelle erreicht. So wirkt Infraschall ermüdend und konzentrationsmindernd und kann die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Hinzu können subjektive Beschwerdebilder wie Benommenheit und Schwingungsgefühl kommen.

Über Gehörschäden, die ausschließlich durch tieffrequenten Schall verursacht wurden,

²⁹ ISING, H. U. C. SCHWARZE (1982a): Infraschallwirkungen auf den Menschen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 29: 79-82. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

³⁰ ISING, H., B. MARKERT, F. SHENODE U. C. SCHWARZE (1982b): Infraschallwirkung auf den Menschen. Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes Berlin. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf.

³¹ ISING, H., B. MARKERT, F. SHENODE U. C. SCHWARZE (1982b): Infraschallwirkung auf den Menschen. S. 79

³² DANIELSSON, A. U. U. LANDSTRÖM (1985): Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. An experimental study. Acta Med Scand. 217(5): 531-535. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

³³ SCHUST, M. (1997): Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Infraschall. Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin.

existieren nach BABISCH (2002)³⁴ keine gesicherten Erkenntnisse. Wird der unbewertete Schalldruck jedoch bei 20 Hz und 120 dB und bei 1 Hz und 132 dB überschritten, sind Anhaltspunkte für direkte Schäden am Trommelfell und Mittelohr durch tieffrequenten Schall (einschließlich Infraschall) vorhanden. GIERKE U. NIXON (1976)³⁵ sehen bei 140 dB (30 Hz) bis 165 dB (2 Hz) die Schmerzschwellenwerte für tieffrequenten Schall. Langzeitexpositionen bei sehr hohem Schalldruckpegel können nach LEVENTHAL (2003)³⁶ zu Hörverlusten führen. Aber der augenscheinlichste Effekt von Infraschall scheint die Belästigungswirkung zu sein. So stellen PERSSON-WAYE U. RYLANDER (2001)³⁷ eine Häufung von typischen, durch tieffrequenten Schall hervorgerufenen Symptomen bei Personen fest, die sich in ihrer Wohnung durch tieffrequenten Lärm belästigt fühlten. Im Gegensatz dazu gab es keine signifikante Häufung von Symptomen bei Personen, die sich durch tieffrequenten Schall nicht belästigt fühlten bzw. nur Geräuschen mittlerer Frequenzen ausgesetzt waren, egal ob sie diese belästigten oder nicht. Weitere Untersuchungen (POULSEN 2003³⁸) vermuten eine mögliche Sensibilisierung von schon vorbelasteten Personen durch Schall tiefer Frequenzen. So reagieren diese Personen nach entsprechenden Vorbelastungen (wie Verkehrs-, Gewerbe- und Freizeitgeräuschen) empfindlicher auf ein Auftreten tieffrequenten Lärms als unbelastete Menschen. Wobei diese Menschen von vornherein schon lärmsensibler sein könnten. Möglicherweise spielt die individuelle Geräuschsensibilität eine Rolle bei der Bewertung von Schall-Einwirkungen.

Bei einer weiteren Studie wurde nachgewiesen, dass Infraschallfrequenzen, die sich weit unter der Hörschwelle des Menschen befinden, trotzdem wahrgenommen werden (FELDMANN U. PITTEN 2004)³⁹. Auch MÖLLER U. LYDORF (2002)⁴⁰ zeigten bei der Auswertung von Bürgerbeschwerden, dass fast alle Personen Infraschall bzw. tieffrequenten Schall sensorisch wahrnahmen, einzelne diesen auch hören konnten.

³⁴ BABISCH, W. (2002): Physikalische Einflussfaktoren Teil 1: Lärm. In: BEYER, A. U. D. EIS (Hrsg.) (2002): Praktische Umweltmedizin, Band 2: Klinik, Methoden, Arbeitshilfen. Springer Verlag. Heidelberg. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

³⁵ VON GIERKE, H.E. U. C.W. NIXON (1976): Effects of intense infrasound on man. In: TEMPEST, W. (Hrsg.) (1976): Infrasound and low frequency vibration. Academic Press. London. S. 115-150. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

³⁶ LEVENTHAL, H.G. (2003): A review of published research on low frequency noise and its effects. Bericht für das Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). London. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

³⁷ PERSSON-WAYE, K. U. R. RYLANDER (2001): The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise. J Sound Vibr 240: 483-497. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

³⁸ POULSEN, T. (2003): Annoyance of low frequency noise (LFN) in the laboratory assessed by LFN-sufferers and non-sufferers. J Low Freq Noise Vibr Active Control 22(4): 191-201. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

³⁹ FELDMANN, J. U. F.A. PITTEN (2004): Effects of low frequency noise on man - a case study. Noise Health 7(25): 23-28. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

⁴⁰ MÖLLER, H. U. M. LYDOLF (2002): A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise. J Low Freq Noise 21(2): 53-63. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

Bei einer Einzeluntersuchung von WEILER (2005)⁴¹ wurden gesundheitliche Beeinträchtigungen einer einzelnen Probandin durch tieffrequenten Schall bei Frequenzen von 4, 8 und 31,5 Hz und Schalldruckpegeln unterhalb der menschlichen Hörschwelle nachgewiesen. Der Gutachter kam zu folgendem Ergebnis: "1. Die vorliegenden subliminalen (unterschwellig; Anm. d. Verf.) Schwingungseinwirkungen (Körperschall, Luftschall) verursachen im EEG deutliche Veränderungen. 2. Die nachgewiesenen Veränderungen im EEG weisen deutlich darauf hin, dass durch diese subliminalen Schwingungseinwirkungen eine Gefährdung der Gesundheit, eine Beeinträchtigung der Befindlichkeit sowie psychische als auch psychosomatische pathologische Auswirkungen verursacht werden. Damit konnte experimentell nachgewiesen werden, dass die vorliegenden (subliminalen) Schwingungsfrequenzen pathologische Auswirkungen auf die Personen haben, die sich im Feldbereich dieser Schwingungen befinden."

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde nur eine einzige Person dieser Testreihe ausgesetzt. Ob diese Ergebnisse auf eine mögliche Sensibilisierung einer schon vorbelasteten Person, wie sie oben beschrieben wurden, zurück zu führen sind oder die Ergebnisse auch auf andere Personen bzw. die Allgemeinheit übertragen werden können, ist nicht diskutiert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Wirkung von Infraschall auf den Menschen hinreichend untersucht ist. Differenzen in der Sachverhaltsbewertung fußen auf unbestätigte Besorgnisse und eine Einzelfalluntersuchung. Warum diese einzelne Untersuchung deutlich andere Ergebnisse zu zeigen scheint als die andere ausgewertete Studien, ist nicht schlüssig belegbar. Dennoch dürften einzelnen Menschen sensibler reagieren als andere. LEVENTHAL (2004)⁴² nimmt an, das rund 2,5 % einer Bevölkerung mindestens 12 dB empfindlicher wahrnehmen als der Durchschnitt. Nach heutigem Stand des Wissens (siehe auch SUVA (2009)⁴³), verursacht Infraschall im Frequenzbereich zwischen 2 und 20 Hz keine Gehörschädigung, wenn der Mittelungspegel - bezogen auf 8 Stunden pro Tag - unter 135 dB und der Maximalpegel unter 150 dB liegt. Störungen des Wohlbefindens können auftreten, wenn der Mittelungspegel 120 dB übersteigt. Diese Werte sollten vorsorglich um 12 dB reduziert werden, um auch die Belästigung oder Gefährdung sensibler Personen auszuschließen.

Derartig hohe Schalldruckpegel werden durch WEA bei weitem nicht erreicht. In den oben dargestellten Messungen in nur 100 bis 250 m Entfernung zur WEA wurden - bei einer extrem hohen Windgeschwindigkeit, durch die selbst ein hoher natürlicher Infraschall erzeugt wird - Werte im Bereich von insgesamt 70 dB bzw. bei normalen Windverhältnissen Werte um insgesamt 50 dB gemessen. Die gesellschaftlich akzeptieren Infraschallwerte anderer anthropogener Quellen liegen weitaus höher.

Dieser Wert reduziert sich pro Entfernungsverdoppelung noch einmal um 6 dB, so dass bei der in der TA Lärm vorgeschriebenen Mindestentfernung zu Wohngebieten von mindestens 500 m keine Belästigung, Beeinträchtigung oder Gefährdung von Personen zu befürchten ist.

⁴¹ WEILER, E. (2005): Auswirkungen einer subliminalen Beschallung mit einer Frequenz von 4 Hz, 8Hz und 31,5 Hz auf die elektroenzephalographische Aktivität eines weiblichen Probanden. NeuorNet - Institut für Hirnforschung & angewandte Technologie GmbH. St. Wendel. 28.10.2005.

⁴² LEVENTHAL, H.G. (2004): Low frequency noise and annoyance. Noise Health 6: 59-72. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)

⁴³ SUVA - SCHWEIZERISCHE UNFALLVERSICHERUNGSANSTALT (2009): Grenzwerte am Arbeitsplatz.

Literatur

- ACOUPLAN GMBH (Ingenieurbüro für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik) (2007): Schalltechnischer Bericht - Tieffrequente Schallimmissionen von Windenergieanlagen - 14641 Nauen / Ortsteil Markee. Bericht Nr. B1135_1. Im Auftrag der Bürgerinitiative GegenWind Nauner Platte e.V. Berlin. 11.05.2007.
- BABISCH, W. (2002): Physikalische Einflussfaktoren Teil 1: Lärm. In: BEYER, A. U. D. EIS (Hrsg.) (2002): Praktische Umweltmedizin, Band 2: Klinik, Methoden, Arbeitshilfen. Springer Verlag. Heidelberg. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)
- BECKER, P. U. M. SCHUST (1996): Gesundheitsgefährdung durch Infraschall - Bestandsaufnahme. Broschüre der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund. Zit. in: EMPFEHLUNGEN DES ROBERT KOCH-INSTITUTS
- BETKE, K. U. H. REMMERS (1998): Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall. Präsentiert auf der DAGA'98.
- BETKE, SCHULTZ-VON-GLAHN U. GOOS (1996): Messung der Infraschallabstrahlung von Windenergieanlagen. Tagungsband der Deutschen Windenergiekonferenz 1996. DEWEK 96. S
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR): Infraschall. http://www.bgr.bund.de/cln_116/nn_322860/DE/Themen/Seismologie/Infraschall/infraschall__node.html?__nnn=true. Stand: 09.06.2010.
- COLBY, W.D., DOBIE, R., G. LEVENTHALL, D.M. LIPSCOMB, R.J. MCCUNNEY, M.T. SEILO U. B. SONDERGAARD (2009): Wind Turbine Sound and Health Effects. An Expert Panel Review. Prepared for American Wind Energy Association and Canadian Wind Energy Association.
- CERANNA, L., G. HARTMANN U. M. HENGER (2006): Der unhörbare Lärm von Windkraftanlagen – Infraschallmessungen an einem Windrad nördlich von Hannover. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- DANIELSSON, A. U. U. LANDSTRÖM (1985): Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. An experimental study. Acta Med Scand. 217(5): 531-535. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- DIN 45680 (März 1997): Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft.
- EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007): Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland? Mitteilung der Kommission „Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin“. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 2007. 50:1582–1589 DOI 10.1007/s00103-007-0407-3 Online publiziert: 30. November 2007 © Springer Medizin Verlag 2007
- EVANS, M.J. U. W. TEMPEST (1972): Some effects of infrasonic noise in transportation. Journal of sound and vibration 22 (1): 19-24. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- FELDMANN, J. U. F.A. PITTEN (2004): Effects of low frequency noise on man - a case study. Noise Health 7(25): 23-28. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)
- GENUIT, K. (2007): Tiefe Frequenzen sind nicht gleich tiefe Frequenzen - Tieffrequente

Geräuchanteile und deren (Lärm-)Wirkungen. DAGA.

- HAMMERL, C. U. J. FICHTNER (2000): „Langzeit-Geräuschimmissionsmessung an der 1 MW-Windenergieanlage Norde N54 in Wiggensbach bei Kempten (Bayern)“. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Januar 2000.
- HARRIS, C.S. U. D.L. JOHNSON (1978): Effects of infrasound of cognitive performance. Aviation, space and environmental medicine 49(4): 582-586. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- HEALTH PROTECTION AGENCY (2010): Health Effects of Exposure to Ultrasound and Infrasound. Report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation. Documents of the Health Protection Agency. Radiation, Chemical and Environmental Hazards. 196 S.
- ISING H, U. C. SCHWARZE (1982a): Infraschallwirkungen auf den Menschen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 29: 79-82. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- ISING, H., B. MARKERT, F. SHENODE U. C. SCHWARZE (1982b): Infraschallwirkung auf den Menschen. Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes Berlin. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf
- ITAP-INSTITUT - INSTITUT FÜR TECHNISCHE UND ANGEWANDTE PHYSIK GMBH (2000): Messbericht der Messung der Infraschall-Abstrahlung einer WEA des Typs Vestas – 1,65 MW. Oldenburg. 26. Juni 2000.
- JERGER, J, B. ALFORD U. A. COATS (1966): Effects of very low frequency tones on auditory threshold. Journal of speech and hearing research 9: 150-160. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- JOHNSON, D.L. (1982): Hearing hazards associated with infrasound. In: HAVERNIK R.P., D. HENDERSON, U. R. SALVI, EDS. New perspectives on noise-induced hearing loss / ed. - New York: Raven press: 407-21. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- KARPOVA, N.I., S.V. ALEKSEEV, V.N. EROKHIN, E.N. KADYSKINA U. O.V. REUTOV (1970): Early response of the organism to low-frequency acoustical oscillations. Noise and vibration bulletin 11: 100-103. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (2001): Sachinformationen zu Geräuschemissionen und -immissionen von Windenergieanlagen.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (2002): Windenergieanlagen und Immissionsschutz. Materialien Nr. 63.
- LEVENTHAL, H.G. (2003): A review of published research on low frequency noise and its effects. Bericht für das Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). London.
- LEVENTHAL, H.G. (2004): Low frequency noise and annoyance. Noise Health 6: 59-72. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)
- LIM, D.J., D.E. DUNN, D.L. JOHNSON U. T.J. MOORE (1982): Trauma of the ear from infrasound. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- MOHR, G.C., J.N. COLE, E. GUILD U. H.E. VON GIERKE (1965): Effects of low frequency and infrasonic noise on man. Aerospace medicine 36 (9): 817 - 824. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)

- MÖLLER, H. U. M. LYDOLF (2002): A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise. *J Low Freq Noise* 21(2): 53-63. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)
- PERSSON-WAYE, K. U. R. RYLANDER (2001): The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise. *J Sound Vibr* 240: 483-497. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)
- POULSEN, T. (2003): Annoyance of low frequency noise (LFN) in the laboratory assessed by LFN-sufferers and non-sufferers. *J Low Freq Noise Vibr Active Control* 22(4): 191-201. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)
- REGIONALVERBAND SÜDLICHER OBERRHEIN (Hrsg.) (2010): Macht Schienenlärm krank ? Studie des Universitätsklinikums Freiburg zur Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen bei Exposition gegenüber Schienenlärm unter besonderer Berücksichtigung der DB-Trasse Basel-Offenburg (und der Haltbarkeit des Schienenbonus). S. 241
- SCHMIDT, T. (2005): Infraschallwirkung auf biologische Systeme. Projektarbeit Technische Universität Ilmenau Fakultät für Maschinenbau. S. 56
- SCHUST, M. (1997): Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Infraschall. Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin.
- SEIDEL, H-J U. P.M. BITTINGHOFER (1997): Checkliste Arbeits- und Betriebsmedizin. Stuttgart, New York. Thieme: 306. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- SIEGMANN, S. U. U. NIGMANN (2007): Biologische Wirkungen von tieffrequentem Schall/Infraschall. *Praktische Arbeitsmedizin* 2007, 9. S. 20-22
- SLARVE, R.N. U. D.L. JOHNSON (1975): Human whole-body exposure to infrasound. *Aviat-Space-Environ-Med* 46 (4 Sec 1): 428-431. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN (2007)
- SUVA - SCHWEIZERISCHE UNFALLVERSICHERUNGSANSTALT (2009): Grenzwerte am Arbeitsplatz.
- TA Lärm - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm. Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503).
- TAENAKA, K. (1989): nur Abstract: A study on the effect of infrasound (Japanisch). *Nippon-Jibiinkoka-Gakkai-Kaiho* 92(9): 1399-1415. Zit. in: SIEGMANN U. NIGMANN 2007
- VON GIERKE, H.E. U. C.W. NIXON (1976): Effects of intense infrasound on man. In: TEMPEST, W. (Hrsg) (1976): *Infrasound and low frequency vibration*. Academic Press. London. S. 115-150. Zit. in: EMPFEHLUNG DES ROBERT KOCH-INSTITUTS (2007)
- WEILER, E. (2005): Auswirkungen einer subliminalen Beschallung mit einer Frequenz von 4 Hz, 8Hz und 31,5 Hz auf die elektroenzephalographische Aktivität eines weiblichen Probanden. *NeuroNet - Institut für Hirnforschung & angewandte Technologie GmbH*. St. Wendel. 28.10.2005.
- Infrasound. Brief Review of Toxicological Literature. *Infrasound Toxicological Summary* November 2001.