

Infraschall von Windenergieanlagen

Infrasound from wind turbines

ZUSAMMENFASSUNG

Windenergieanlagen sind für eine nachhaltige Energieversorgung wichtig. Bei der Errichtung und dem Betrieb dieser Anlagen stehen die gesundheitlichen Auswirkungen von Infraschall häufig im Fokus öffentlicher Diskussionen. Geräuschemessungen und Lärmwirkungsstudien zeigen, dass die Infraschallpegel von Windenergieanlagen unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle liegen. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung gibt es keine Evidenz dafür, dass durch Infraschall von Windenergieanlagen gesundheitliche Beeinträchtigungen verursacht werden. Allerdings liegen bisher nur die Ergebnisse von Querschnittsstudien und experimentellen Untersuchungen vor. Es sollten daher epidemiologische Langzeitstudien in der Umgebung von Windenergieanlagen durchgeführt werden, um mögliche bislang nicht bekannte Langzeiteffekte zu identifizieren. Das Umweltbundesamt (UBA) beabsichtigt, im Jahr 2021 ein vorbereitendes Forschungsvorhaben für eine solche Untersuchung zu vergeben.

THOMAS MYCK,
JÖRDIS WOTHGE

ABSTRACT

Wind turbines are important for a sustainable energy supply. The health effects of infrasound are often the focus of public discussion during the construction and operation of these installations. Noise measurements and noise impact studies indicate that infrasound levels from wind turbines are well below the human perception threshold. According to the current state of research, there is no evidence that infrasound from wind turbines causes adverse health effects. However, so far only the results of cross-sectional studies and experimental investigations are available. Therefore, long-term epidemiological studies in the vicinity of wind turbines should be carried out to identify possible long-term effects not yet known. The German Environment Agency intends to award a preparatory research project for such an investigation in 2021.

EINLEITUNG

Die Windenergie ist für das Gelingen der Energiewende von zentraler Bedeutung. Windenergieanlagen sind ein Hauptelement einer nachhaltigen Energieversorgung und tragen zum Erreichen der Klimaschutzziele bei. Die Anzahl der Windenergieanlagen nimmt in Deutschland weiter zu, auch wenn die Ausbaurate in den letzten Jahren zurückgegangen ist. Mitte des Jahres 2020 waren in Deutschland

insgesamt 29.546 Windenergieanlagen an Land mit einer installierten Gesamtleistung von 54.418 Megawatt (MW) in Betrieb (Deutsche WindGuard 2020).

Bei der Errichtung und dem Betrieb von Windenergieanlagen wird in der Öffentlichkeit häufig über das Thema Infraschall kontrovers diskutiert. Infraschall sind Luftschallwellen im tieffrequenten Bereich von 1 bis 20 Hertz (Hz), der sowohl von technischen als auch natürlichen Geräuschquellen erzeugt



Quelle: usdfk /
pixabay.com.

werden kann (ISO 7196). Im natürlichen Umfeld können zum Beispiel der Wind oder die Meeresbrandung tieffrequente Geräusche – einschließlich Infraschall – verursachen. Auch Windenergieanlagen emittieren Infraschall, der durch einen periodischen Wecheldruck beim Drehen der Rotorblätter entsteht. Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere technische Infraschallquellen. Hierzu gehören beispielsweise Heizungs- und Klimaanlage sowie Pumpen. Aber auch der Straßen- und der Schienenverkehr emittieren Infraschall. Infraschall ist somit nahezu überall vorhanden.

INFRASCHALLIMMISSIONEN VON WINDENERGIEANLAGEN

Weltweit sind verschiedene Geräuschmessungen an Windenergieanlagen durchgeführt worden (Søndergaard 2015; Tonin 2017).

Beispielsweise erfolgten in den Jahren 2013 bis 2015 Messungen an Windenergieanlagen in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern (LUBW 2016). Diese Messungen wurden an sechs unterschiedlichen Windenergieanlagen in verschiedenen Distanzen vorgenommen, und zwar im Nahbereich von 150 bis 180 m, in einem Abstand von 300 m und in Entfernungen von 650 bis 700 m. Davon ist insbesondere der letztgenannte Entfernungsbereich interessant, weil in Deutschland dort häufig die Wohnbebauung im Umfeld von Windenergieanlagen beginnt. In Abhängigkeit von der Anlagenleistung und der Frequenz des Infraschallsignals betragen in dieser Entfernung die gemessenen Schalldruckpegel ungefähr 40 bis 60 dB(Z). Der Buchstabe „Z“ steht für „Zero“ und bedeutet, dass die frequenzabhängigen Schalldruckpegel nicht an die menschliche Hörempfindung angepasst, also „unbewertet“ sind. In Entfernungen über 700 m konnte das von den

Windenergieanlagen ausgehende Infrasschallsignal messtechnisch kaum noch vom Hintergrundgeräusch unterschieden werden. Die Ergebnisse dieser Messungen deuten darauf hin, dass ein Infrasschallereignis ab diesen Entfernungen kaum davon beeinflusst wird, ob eine Windenergieanlage in Betrieb ist oder nicht.

GERÄUSCHBEURTEILUNG VON WINDENERGIE- ANLAGEN

Windenergieanlagen sind Anlagen im Sinne von § 3 Abs. 5 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG). Sind die Windenergieanlagen höher als 50 m, fallen sie unter die Nummer 1.6 des Anhangs zur 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung (4. BImSchV). Das bedeutet, dass für diese Anlagen eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung erforderlich ist. Die immissionsschutzrechtliche Zulässigkeit ist gegeben, wenn die Genehmigungsvoraussetzungen nach § 6 BImSchG erfüllt sind. Hierzu gehört insbesondere, dass durch die Errichtung oder den Betrieb der Anlage keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden. Die Beurteilung, ob schädliche Umweltauswirkungen in Form von erheblichen Belästigungen durch Geräuschemissionen zu erwarten sind, erfolgt auf der Grundlage der „Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm“ (TA Lärm 1998). In der TA Lärm ist das Beurteilungsverfahren für Anlagengeräusche detailliert beschrieben. Das Verfahren berücksichtigt wichtige Beurteilungsgrößen, wie Zeitpunkt, Dauer und Intensität der Geräusche, sowie besondere Geräuschmerkmale. Nach der TA Lärm ist der Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche sichergestellt, wenn die Gesamtbelastung am maßgeblichen Immissionsort die in dieser Vorschrift enthaltenen Immissionsrichtwerte nicht überschreitet. Diese Werte sind als Beurteilungspegel für den Tag und für die

Nacht ($L_{r, \text{Tag}}$ und $L_{r, \text{Nacht}}$) angegeben und hängen von der jeweiligen Gebietsnutzung ab, die in der Baunutzungsverordnung (BauNVO) festgelegt ist. Die Immissionsrichtwerte sind in TABELLE I zusammengestellt.

GEBIETSKATEGORIE	$L_{r, \text{Tag}}$	$L_{r, \text{Nacht}}$
Industriegebiete	70 dB(A)	70 dB(A)
Gewerbegebiete	65 dB(A)	50 dB(A)
Urbane Gebiete	63 dB(A)	45 dB(A)
Kern-, Dorf- und Mischgebiete	60 dB(A)	45 dB(A)
Allgemeine Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete	55 dB(A)	40 dB(A)
Reine Wohngebiete	50 dB(A)	35 dB(A)
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45 dB(A)	35 dB(A)
$L_{r, \text{Tag}}$: Beurteilungspegel für den Tag, $L_{r, \text{Nacht}}$: Beurteilungspegel für die Nacht		

Die Immissionsrichtwerte der TA Lärm dürfen beim Betrieb der Windenergieanlage mit Nennleistung und unter Berücksichtigung der Vorbelastung durch andere relevante Anlagen nicht überschritten werden. In der Regel ist der Nachtwert für die Genehmigung der Anlage entscheidend, weil dieser deutlich geringer ist als der Immissionsrichtwert für den Tag. Diese Lärmschutzanforderung kann häufig durch einen ausreichenden Abstand der Windenergieanlage zur Wohnbebauung umgesetzt werden. Falls dies nicht möglich ist, müssen zusätzliche Lärmschutzmaßnahmen ergriffen werden. Eine mögliche Minderungsmaßnahme ist eine Reduzierung der Drehzahl der Windenergieanlage während der Nachtzeit, wodurch sich jedoch die Anlagenleistung und damit der Energieertrag verringert (UBA 2019).

Hinsichtlich der Beurteilung tieffrequenter Geräusche verweist die TA Lärm auf die DIN 45680 „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft“ und das zugehörige Beiblatt 1 (DIN 1997a und 1997b). Die DIN 45680 beschreibt ein Messverfahren im Frequenzbereich von 8 bis 100 Hz, das in Innenräumen durchgeführt wird. Das Verfahren umfasst

TABELLE I
Immissionsrichtwerte
gemäß TA Lärm.
Quelle: TA Lärm 1998.

somit auch Teile des Infraschallbereichs, und zwar von 8 bis 20 Hz. Ob die Messergebnisse auf eine erhebliche Belästigung durch tieffrequente Geräusche hinweisen, wird nach dem Verfahren des zugehörigen Beiblatts 1 beurteilt. Dies ist der Fall, wenn die im Beiblatt angegebenen Anhaltswerte für den Tag oder die Nacht überschritten werden. Das Deutsche Institut für Normung (DIN) hat im Jahr 2005 mit einer Überarbeitung der DIN 45680 begonnen. Im Rahmen dieser Aktivität wurden 2011 und 2013 Normen-Entwürfe vorgelegt, die aufgrund schwerwiegender Einsprüche nicht zur Verabschiedung einer neuen Fassung der DIN 45680 geführt haben. Am 22. Mai 2020 hat das DIN einen weiteren Norm-Entwurf zur Überarbeitung der DIN 45680 veröffentlicht (DIN 2020). Bis zum 22. September 2020 hatte die Öffentlichkeit die Möglichkeit, den Norm-Entwurf zu kommentieren sowie Änderungs- und Ergänzungsvorschläge zu unterbreiten. Nach Einschätzung des Umweltbundesamtes (UBA) wird durch den Norm-Entwurf das derzeitige Niveau zum Schutz vor tieffrequenten Geräuschemissionen erhöht. Zudem wurde der Infraschallbereich von bisher 8 Hz nach unten bis 1 Hz erweitert. Zum Norm-Entwurf sind zahlreiche Stellungnahmen beim DIN eingegangen, die derzeit ausgewertet werden.

Die vorstehend dargestellten Regelwerke werden durch die „Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windenergieanlagen“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz“ (LAI) ergänzt (LAI 2016). Die LAI-Hinweise wurden 2016 aktualisiert und enthalten seitdem ein weiterentwickeltes Verfahren zur Modellierung der Schallausbreitung bei Windenergieanlagen, das sogenannte Interimsverfahren. Dieses Verfahren berücksichtigt die zunehmende Höhe moderner Windenergieanlagen bei der Berechnung der Schallausbreitung und ist in einem Entwurf der VDI-Richtlinie 4101 Blatt 2 beschrieben (VDI 2020).

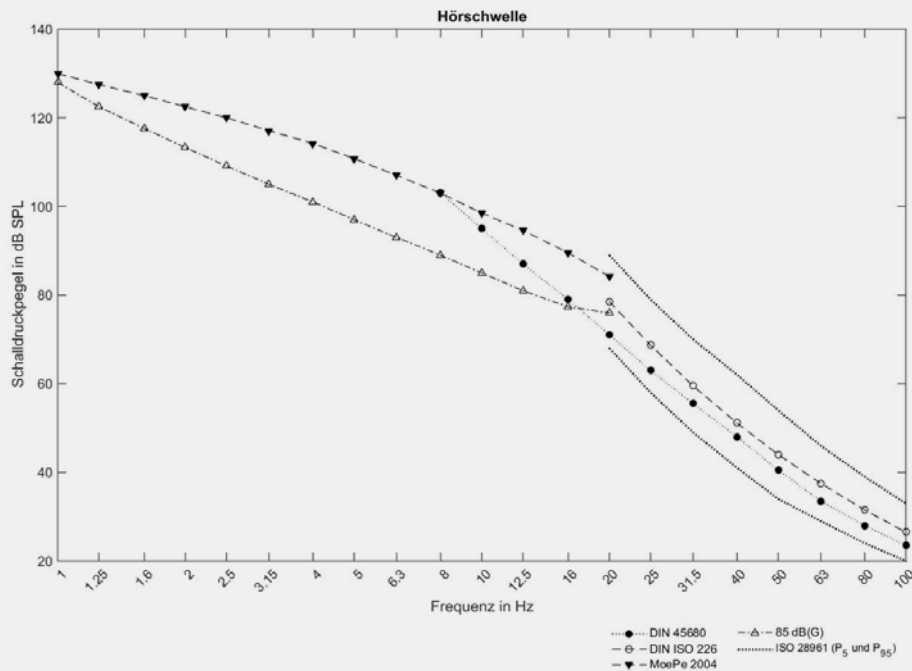
WAHRNEHMBARKEIT VON INFRASCHALL

Im Infraschallbereich ist die menschliche Hörempfindung eingeschränkt, weil die Tonhöhenwahrnehmung fehlt (RKI 2007). Infraschall mit hinreichendem Schalldruck kann jedoch über den gesamten Körper wahrgenommen werden. In der wissenschaftlichen Literatur sind verschiedene frequenzabhängige Wahrnehmungsschwellen angegeben (Schmidt 2015). In **ABBILDUNG 1** sind beispielsweise die Verläufe der Wahrnehmungsschwellen von Møller und Pedersen (2004) und verschiedener Regelwerke zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche dargestellt.

ABBILDUNG 1 veranschaulicht den generellen Zusammenhang zwischen tiefen Frequenzen und Schalldruckpegeln: Je tiefer die Frequenz ist, umso höher muss der Schalldruckpegel sein, um von Menschen wahrgenommen zu werden. Ein exemplarischer Vergleich der Wahrnehmungsschwelle mit Ergebnissen von Infraschallmessungen an Windenergieanlagen zeigt, dass die Messergebnisse wesentlich unter der Wahrnehmungsschwelle liegen (LUBW 2016). Dies verdeutlicht ein Beispiel: In einer Entfernung von 180 m von einer 3,2-MW-Windenergieanlage wurde bei einer Frequenz von 1 Hz ein Schalldruckpegel von 60 dB(Z) gemessen (LUBW 2016). Nach den Erkenntnissen von Møller und Pedersen (2004) liegt die Wahrnehmungsschwelle von Infraschallgeräuschen mit einer Frequenz von 1 Hz bei einem Schalldruckpegel von 130 dB(Z).

AUSWIRKUNGEN VON INFRASCHALL AUF DIE MENSCHLICHE GESUNDHEIT

Die gesundheitlichen Auswirkungen von Infraschall lassen sich grundsätzlich in aurale und extra-aurale Auswirkungen unterscheiden. Aurale Auswirkungen beziehen sich direkt auf das Hör-Organ, während extra-au-



rale Wirkungen den gesamten menschlichen Organismus betreffen.

In verschiedenen Studien zu auralen Wirkungen von Infraschall wurden Probandinnen und Probanden kurzzeitig hohen Infraschallpegeln über 120 dB(Z) ausgesetzt, die bei den Personen einen Druck in den Ohren hervorriefen (Krahé et al. 2014). Noch stärkere und längere Geräuscheinwirkungen können darüber hinaus das Gehör schädigen (Schmidt 2016). Aufgrund des wesentlich geringeren Schalldruckpegels des Infraschalls von Windenergieanlagen (LUBW 2016) ist eine aurale Beeinträchtigung durch den Infraschall nicht zu erwarten.

Wissenschaftliche Untersuchungen zu extra-auralen Wirkungen von Infraschallgeräuschen zeigen, dass Infraschall mit hinreichendem Schalldruck die Atemfrequenz verlangsamen, das Herz-Kreislaufsystem beeinflussen und das Gleichgewichtsorgan stören kann (UBA 2016; Krahé et al. 2014). Darüber hinaus wurden in Studien über tiefere Geräusche eine verminderte Kon-

zentrationfähigkeit, Leistungsminderungen und psychovegetative Störungen festgestellt (UBA 2016; Krahé et al. 2014 und 2020).

Von besonders hoher Relevanz für den Immissionsschutz sind die möglichen Auswirkungen von Infraschall um die Wahrnehmungsschwelle. Die Auswirkungen von Infraschall im Bereich der Wahrnehmungsschwelle wurden bereits in verschiedenen Studien untersucht (van Kamp, van den Berg 2020; Krahé et al. 2020; Majjala et al. 2020; Carlile et al. 2018; Weichenberger et al. 2017; Schmidt 2016). In den letzten Jahren wurde hierbei vermehrt auch der Einfluss von Infraschall auf die Gehirnaktivität erforscht (z.B. Jurardo, Marquardt 2020; Koch 2017). Die meisten Studien zeigen dabei, dass Infraschall und hörbare Geräusche in den gleichen Bereichen des Gehirns verarbeitet werden (van Kamp, van den Berg 2020). Bislang wurde nur in einer Studie bei einer Infraschallexposition knapp unterhalb der individuellen Hörschwelle eine unterschiedliche Informationsverarbeitung festgestellt;

ABBILDUNG 1
Verläufe verschiedener Wahrnehmungsschwellen. Die Werte nach Möller und Pedersen (2004) sind teilweise interpoliert. Quelle: Krahé et al. 2020.

und zwar im anterioren cingulären Cortex und in der Amygdala (Weichenberger et al. 2017). Hierbei handelt es sich um Bereiche im Gehirn, die zum Beispiel an der Steuerung autonomer Funktionen, wie Atmung und Blutdruck, Impulskontrolle, sowie an der emotionalen Bewertung von Reizen, wie zum Beispiel an der Angstreaktion, beteiligt sind.

Auch in einer aktuellen Studie im Auftrag des UBA wurde der Zusammenhang zwischen einer kurzzeitigen Infraschallexposition unter und um die Wahrnehmungsschwelle und akuten körperlichen Reaktionen sowie dem Lästigkeitsempfinden untersucht. Im Rahmen einer experimentellen Laboruntersuchung wurden insgesamt 44 Versuchspersonen vier verschiedene Infraschallszenarien in randomisierter Reihenfolge für je 30 Minuten dargeboten. Zeitgleich wurden sowohl akute körperliche Reaktionen wie die Herzfrequenz, der Blutdruck, die Hirnrindenaktivität und die Gleichgewichtswahrnehmung mit validierten Messmethoden bestimmt als auch das Belästigungsempfinden durch die Infraschallgeräusche erfragt. Zu den Messmethoden gehörten unter anderem zwei Blutdruckmessungen pro Geräuscheszenario, ein Elektrokardiogramm (EKG), ein Elektroenzephalogramm (EEG), eine Nystagmusmessung mittels Frenzel-Brille sowie der Kopfpulstest. Dabei konnte keine statistisch signifikante Veränderung der körperlichen Parameter gezeigt werden, die auf den dargebotenen Infraschall zurückzuführen war. Die Lästigkeit der Geräusche wurde als „etwas“ bis „mittelmäßig“ eingestuft, wobei die Lärmbelästigung höher eingeschätzt wurde, je näher die Geräuschstimuli an die Wahrnehmungsschwelle sowie in den tieffrequenten Hörschallbereich rückten. Eine Vorbelastung mit tieffrequenten Geräuschen oder Infraschall im Wohnumfeld hatte darüber hinaus keinen Einfluss auf die körperlichen Reaktionen und das Lästigkeitsempfinden. Die dargebotenen Infraschallgeräusche lagen im Frequenzbereich von 3 bis 18 Hz mit Schalldruckpegeln zwischen 105 und 85 dB(Z). Die Geräusche bildeten somit ein Spektrum unterhalb, nah an der und knapp

oberhalb der derzeit definierten Wahrnehmungsschwelle ab. Eines der Geräusche war amplitudenmoduliert. Amplitudenmodulationen können zum Beispiel bei Geräuschen von Windenergieanlagen auftreten. Da in der Studie die Auswirkungen von Infraschallimmissionen um die menschliche Wahrnehmungsschwelle erforscht werden sollten, wurde das amplitudenmodulierte Geräusch mit einem deutlich höheren Schalldruckpegel dargeboten als im Umfeld einer Windenergieanlage zu erwarten wäre. Es ist daher davon auszugehen, dass bei einer Infraschallexposition mit niedrigeren Schalldruckpegeln auch geringere beziehungsweise zumindest keine größeren Wirkungseffekte festzustellen sind (Krahé et al. 2020).

Speziell mit den gesundheitlichen Effekten, die durch die Geräusche von Windenergieanlagen ausgelöst werden können, haben sich unter anderem van Kamp und van den Berg (2020; 2017) befasst. Zu dieser Thematik haben sie 2017 eine systematische Übersichtsarbeit publiziert, die im Jahr 2020 aktualisiert wurde (van Kamp, van den Berg 2020; 2017). Beide Übersichtsarbeiten berücksichtigen insgesamt 39 Studien und 12 Literaturanalysen zu den möglichen gesundheitlichen Auswirkungen sowie dem Lärmbelästigungsempfinden durch Hörschall, tieffrequente Geräusche und Infraschall von Windenergieanlagen. Die gesundheitlichen Auswirkungen von tieffrequenten Geräuschen – einschließlich Infraschall – werden hierbei gesondert betrachtet. Beruhend auf ihren Meta- und Literaturanalysen kommen van Kamp und van den Berg zu dem Schluss, dass nach derzeitigem Stand der Wissenschaft kein Nachweis für negative gesundheitliche Auswirkungen vorliegt, die durch Infraschall von Windenergieanlagen verursacht werden (2020; 2017). Sie halten darüber hinaus fest, dass der Dauerschallpegel sowie mögliche Amplitudenmodulation einen Einfluss auf ein erhöhtes Lärmbelästigungserleben durch Windenergieanlagen haben können, nicht aber der Infraschall (van Kamp, van den Berg 2020). Einschränkung ist zu erwähnen, dass diese Erkenntnisse bislang nur auf den Er-

gebnissen von Querschnittsstudien und experimentellen Untersuchungen beruhen.

Die Studienergebnisse von van Kamp und van den Berg (2020; 2017) stehen im Einklang mit einer aktuellen finnischen Laborstudie zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Infraschall durch Windenergieanlagen (Maijala et al. 2020). In der Laboruntersuchung wurde der Zusammenhang zwischen verschiedenen akuten körperlichen Reaktionen (Herzrate, Herzratenvariabilität, Hautleitfähigkeit) sowie dem unmittelbaren Lärmbelästigungsempfinden und verschiedenen Infraschallgeräuschen von Windenergieanlagen erforscht. Im Einklang mit den Forschungsergebnissen der Laborstudie von Krahé et al. (2020) zeigen auch die Ergebnisse der finnischen Laboruntersuchung keine statistisch signifikanten Veränderungen der akuten körperlichen Reaktionen, die auf die Exposition mit Infraschall von Windenergieanlagen zurückzuführen sind. Darüber hinaus wurde in der Studie kein statistisch signifikant erhöhtes Lärmbelästigungsempfinden durch Infraschall von Windenergieanlagen gefunden. Es wurde jedoch im Verlauf des Versuchs beobachtet, dass das selbstberichtete Stresslevel der Versuchsgruppe, die in ihrem Wohnumfeld vor der Untersuchung schon einmal körperliche Symptome durch Infraschall von Windenergieanlagen bei sich wahrgenommen hatte, signifikant gegenüber dem der Kontrollgruppe anstieg, die bisher keine körperlichen Symptome durch Infraschall von Windenergieanlagen bei sich festgestellt hatte.

Abschließend ist einschränkend festzuhalten, dass sowohl die finnische Laboruntersuchung (Maijala et al. 2020) als auch die Studie von Krahé et al. (2020) mit einer kleinen Anzahl an Probandinnen und Probanden und unter weitgehend kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt wurde. Eine Generalisierung der Ergebnisse hinsichtlich möglicher gesundheitlicher Effekte durch eine langjährige niedrigschwellige Infraschallbelastung im Wohnumfeld ist daher nicht zulässig. Hierfür ist zusätzlich eine Langzeituntersuchung im Kohorten-Design – also eine

Längsschnittstudie, bei der über längere Zeit in regelmäßigen Abständen dieselbe Personengruppe untersucht wird – erforderlich.

FORSCHUNGSKONZEPT DES UBA ZU INFRASCHALL

Das UBA hat schon frühzeitig ein Forschungskonzept zum Thema Infraschall entwickelt, das aus drei Hauptkomponenten besteht:

- 1 Zunächst wurde in einem Forschungsvorhaben der Stand des Wissens über die Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen systematisch ermittelt und bewertet (Krahé et al. 2014). In dem Vorhaben wurden rund 1.200 Publikationen zu den Themen Infraschall und tieffrequente Geräusche recherchiert und analysiert. Dabei wurde noch Forschungsbedarf bezüglich des Auftretens von Belästigungen und möglichen Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit durch tieffrequente Geräusche festgestellt.
- 2 In einer Nachfolgestudie wurde daher der Zusammenhang zwischen kurzzeitiger Infrascallexposition und akuten körperlichen Reaktionen sowie dem Lästigkeitsempfinden in einer Laborstudie untersucht (Krahé et al. 2020). Die Forschungsergebnisse deuten einerseits darauf hin, dass eine Infrascallexposition im Bereich der Wahrnehmungsschwelle nicht zu akuten physiologischen Reaktionen führt. Andererseits zeigen sie, dass das Lästigkeitserleben steigt je näher die Geräusche an die Grenze zum tieffrequenten Hörschallbereich rücken und je dichter sie an oder oberhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen.
- 3 Um mögliche bislang nicht bekannte Langzeiteffekte zu identifizieren, bedarf es noch einer epidemiologischen Langzeitstudie im Wohnumfeld. Das UBA beabsichtigt, im laufenden Jahr 2021 ein vorbereitendes Forschungsvorhaben für eine Langzeituntersuchung zu vergeben.

Das Forschungskonzept des UBA zu den Lärmwirkungen von Infraschall leistet einen wichtigen Beitrag zur Vertiefung der wissenschaftlichen Erkenntnisse auf diesem Gebiet und unterstützt damit die laufenden internationalen Forschungsaktivitäten (Hansen, Hansen 2020).

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Beurteilung der gesundheitlichen Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen sind die Pegelhöhe und die Expositionsdauer wichtige Kenngrößen. Generell gilt: Je tiefer die Frequenz ist, umso höher muss der Schalldruckpegel sein, um von Menschen wahrgenommen zu werden. In zahlreichen Lärmwirkungsstudien wurden hohe Infraschallpegel verwendet, die von Windenergieanlagen nicht generiert werden. Diese Studien ergaben beispielsweise, dass eine hohe Infraschallexposition als Pulsation wahrgenommen wird und die Atemfrequenz sowie das Herz-Kreislauf-System beeinflussen kann. Für den Immissionsschutz ist insbesondere die Infraschallbelastung um die Wahrnehmungsschwelle von großem Interesse. Im Einklang mit der Entwicklung des Lärmbelästigungserlebens im Hörschallbereich weisen Laboruntersuchungen darauf hin, dass Infraschall auf und oberhalb der Wahrnehmungsgrenze erhöhte Belastungsreaktionen zur Folge haben kann.

Messungen von Infraschallpegeln an Windenergieanlagen und Untersuchungen zur Wahrnehmungsschwelle von Infraschallgeräuschen zeigen, dass diese in der Regel deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle des Menschen liegen. Des Weiteren gibt es nach dem derzeitigen Stand der nationalen und internationalen Forschung keine Evidenz dafür, dass durch Infraschall von Windenergieanlagen negative gesundheitliche Beeinträchtigungen verursacht werden. Allerdings liegen bisher nur die Ergebnisse von Querschnittstudien und experimentellen Untersuchungen sowie wissenschaftliche Erkenntnisse aus Übersichtsarbeiten vor. Es

sollte daher noch eine Langzeituntersuchung im Kohorten-Design in der Umgebung von Windenergieanlagen durchgeführt werden, um mögliche bislang nicht bekannte Langzeiteffekte zu identifizieren. Das UBA beabsichtigt im Jahr 2021 ein vorbereitendes Forschungsvorhaben für eine solche Untersuchung zu vergeben. ●

LITERATUR

BauNVO – Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung - BauNVO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786).

BlmSchG – Bundes-Immissionsschutzgesetz (Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BlmSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 1 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist.

4. BlmSchV – Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BlmSchV) vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440).

Carlile S, Davy JL, Hillman D et al. (2018): Review of the Possible Perceptual and Physiological Effects of Wind Turbine Noise. Trends in Hearing. 22: 1–10. DOI: 10.1177/2331216518789551.

Deutsche WindGuard (2020): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, Erstes Halbjahr 2020. 1. Halbjahr 2020 - Deutsche WindGuard GmbH (Zugriff am: 29.01.2021).

DIN – Deutsches Institut für Normung (2020): DIN 45680:2020-06 – Entwurf Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschemissionen. Beuth Verlag, Berlin.

DIN – Deutsches Institut für Normung (1997a): DIN 45680:1997 – Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft. Beuth Verlag, Berlin.

DIN – Deutsches Institut für Normung (1997b): DIN 45680 Beiblatt 1:1997 – Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft – Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen. Beuth Verlag, Berlin.

Hansen C, Hansen K (2020): Recent Advances in Wind Turbine Noise Research. Acoustics 2(1): 171–206. DOI:10.3390/acoustics2010013. <https://www.mdpi.com/2624-599X/2/1/13> (Zugriff am: 29.01.2021).

ISO – International Organization for Standardization (1995): ISO 7196:1995-03 – Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements. Beuth Verlag, Berlin.

Jurado C, Marquardt T (2020): Brain's Frequency Following Responses to Low-Frequency and Infrasound. *Archives of Acoustics* 45(2): 313–319.

Krahé D, Alaimo Di Loro A, Müller U et al. (2020): Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen. Forschungskennzahl 3714 51 100 0. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. UBA-Texte 163. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/laermwirkungen-von-infraschallimmissionen> (Zugriff am: 29.01.2021).

Krahé D, Schreckenber D, Möhler U et al. (2014): Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall: Entwicklung von Untersuchungsdesigns für die Ermittlung der Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen durch unterschiedliche Quellen. Forschungskennzahl 3711 54 19. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. UBA-Texte 40. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_40_2014_machbarkeitsstudie_zu_wirkungen_von_infraschall.pdf (Zugriff am: 29.01.2021).

Koch (2017): Hearing beyond the limit: Measurement, perception and impact of infrasound and ultrasonic noise. 12th ICBEN Congress on noise as a public health problem. <https://www.wind-watch.org/documents/12th-icben-congress-on-noise-as-a-public-health-problem/> (Zugriff am: 10.02.2021).

LAI – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (2016): Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windkraftanlagen (VKA). Überarbeiteter Entwurf vom 17.03.2016 mit Änderungen PhysE vom 23.06.2016, Stand 30.06.2016, https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/2017/1201-top09_1_anlage_lai_hinweise_wka-stand_2016_06_30_veroeffentlich_2_1512116255.pdf (Zugriff am: 29.01.2021).

LUBW – Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.) (2016): Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen. Bericht über Ergebnisse des Messprojektes 2013-2015. 3. Auflage Februar 2020, Stand 2016. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/84558> (Zugriff am: 29.01.2021).

Maijala P, Turunen A, Kurki I et al. (2020): Infrasound Does Not Explain Symptoms Related to Wind Turbines, Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2020:34. Prime Minister's Office. Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-907-3> (Zugriff am: 29.01.2021).

Møller H, Pedersen CS (2004): Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise and Health* 6: 37–57.

RKI – Robert Koch-Institut (2007): Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland? In: Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 50: 1582–1589. DOI: 10.1007/s00103-007-0407-3.

Schmidt M (2016): Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680: Abschlussbericht Nr. M111460/05. Müller-BBM im Auftrag des DIN. München. <https://www.din.de/resource/blob/186474/d594186130efc9d7ae9c1ba9e2968298/abschlussbericht-mueller-bbm-data.pdf> (Zugriff am: 29.01.2021).

Schmidt M (2015): Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für die DIN 45680: Abschlussbericht Nr. M111460/04. Müller-BBM im Auftrag des DIN. München. Microsoft Word - M111460_04_Ber_2D_Endfassung.doc (din.de) (Zugriff am: 29.01.2021).

Søndergaard B (2015): Low Frequency Noise from Wind Turbines: Do the Danish Regulations Have Any Impact? An Analysis of Noise Measurements. *International Journal of Aeroacoustics* 14(5-6): 909–915. DOI: 10.1260/1475-472X.14.5-6.909 (Zugriff am: 29.01.2021).

TA Lärm (1998) – Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm, vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503), zuletzt geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 1. Juni 2017 (BANZ AT 08.06.2017 B5).

Tonin, RA (2018): Review of Wind Turbine-Generated Infrasound: Source, Measurement and Effect on Health. *Acoustics Australia* 46: 69–86. DOI: 10.1007/s40857-017-0098-3.

van Kamp I, van den Berg F (2017): Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound. *Acoustics Australia* 46: 31–57. DOI: 10.1007/s40857-017-0115-6.

van Kamp I, van den Berg GP (2020): Health effects related to wind turbine sound: an update. National Institute for Public Health and the Environment, RIVM. DOI: 10.21945/RIVM-2020-0150.

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2019): Hintergrund – Technische Maßnahmen zur Minderung akzeptanzhemmender Faktoren der Windenergienutzung an Land. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technische-massnahmen-zur-minderung> (Zugriff am: 29.01.2021).

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2016): Position – Mögliche gesundheitliche Effekte von Windenergieanlagen. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/moegliche-gesundheitliche-effekte-von> (Zugriff am: 29.01.2021).

VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2020): VDI 4101
Blatt 2:2020-04 – Entwurf Schallausbreitung im Freien
unter Berücksichtigung meteorologischer und topogra-
phischer Bedingungen - Blatt 2: Windkraftanlagen. Beuth
Verlag, Berlin.

Weichenberger M, Bauer M, Kühler R et al. (2017):
Altered cortical and subcortical connectivity due to
infrasound administered near the hearing threshold -
Evidence from fMRI. PLOS ONE 12(4): e0174420. DOI:
10.1371/journal.pone.0174420.

KONTAKT

Thomas Myck
Umweltbundesamt
Fachgebiet I 2.4 Lärminderung bei Anlagen und
Produkten, Lärmwirkungen
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau
E-Mail: thomas.myck[at]uba.de

[UBA]