

Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land

Sebastian Schmitter, Alexander Alaimo Di Loro, Christoph Pörschmann, Johannes M. Arend, Stephan Großarth, Dirk Schreckenberger

„Wusch, Wusch, Wusch.“

Die Geräusche von Windenergieanlagen werden von Anwohnenden in der Regel als ein „Wuschen“ oder als ein an- und absteigendes Rauschen bezeichnet. Ursache dafür: Ähnlich wie Flugzeugtragflächen erzeugen die Rotorblätter der Anlagen Strömungsgeräusche die im „Takt“ der Rotation zu dieser speziellen Geräuscheigenschaft führen. Zur Untersuchung welchen Einfluss diese besondere Geräuschcharakteristik auf die Menschen im Umfeld von Windenergieanlagen hat, wurde seitens des Umweltbundesamtes ein Forschungsvorhaben in Auftrag gegeben. Das Forschungsvorhaben „Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land“ (Forschungszahl: 3717-43-110-0) umfasst die Durchführung von akustischen Messungen, Hörversuchen und Befragungen an insgesamt fünf Untersuchungsgebieten. Die über das gesamte Bundesgebiet verteilten Untersuchungsgebiete wurden so gewählt, dass ein breites Spektrum der in Deutschland üblichen Parkkonfigurationen abgedeckt wurde. Dies beinhaltet unterschiedlichste Topografien, Anlagentypen und Entfernungen zur nächsten Wohnbebauung. Die Anzahl der Windenergieanlagen variierte beispielsweise von nur einer Einzelanlage mit ca. 3 MW Leistung bis zu einem Park mit 21 Anlagen der 2–3 MW Klasse. Auf Basis der Messungen konnten zum einen die sogenannten amplitudenmodulierten Geräusche quantifiziert und zum anderen Hörversuche entwickelt werden, um deren Wirkungen näher zu untersuchen. In Kombination mit der Befragung einer großen Anzahl von Anwohnenden konnte die Geräuschwirkung der Windenergieanlagen detailliert analysiert werden.

Einleitung

Bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen (WEA) steht das Thema Lärm häufig im Fokus der Diskussion. Dabei werden vielfältige Fragen aufgeworfen, die sowohl die Lärmentstehung und -minderung als auch die Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit und Lebensqualität der Bevölkerung betreffen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land“ im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden über

Noise effects of the use of land-based wind energy

‘Whoosh, Whoosh, Whoosh.’

The people who live near wind turbines usually describe the noise they produce as a rising and falling ‘whoosh’ sound. The reason: As with aircraft wings, the air that flows over the rotor blades on wind turbines creates this characteristic noise to the ‘rhythm’ of the rotating blades. The German Federal Environment Agency commissioned a research project to investigate the impact of this specific type of noise on the people who live near wind turbines. The research project, ‘Noise effects of the use of land-based wind energy’ (Project Code Number: 3717-43-110-0), involves acoustic measurements, listening tests and surveys across a total of five study sites. The study sites, distributed across Germany, were chosen to cover a broad spectrum of the wind-farm configurations typically found in this country. The study examined a wide variety of topographies, turbine types and distances to the nearest residential areas. The number of wind turbines studied ranged from a single individual turbine with a capacity of approx. 3 MW to a farm of 21 turbines of the 2–3 MW class. With the measurements obtained, researchers were able to quantify what is known as ‘amplitude-modulated noise’, and listening tests were conducted to examine the effects of this noise in greater detail. These findings, combined with a survey of a large number of local residents, permitted detailed analysis of the impacts of wind turbine noise.

einen Zeitraum von drei Jahren die Geräuscheinwirkung durch Windenergieanlagen an unterschiedlichen Standorten in Deutschland untersucht. Dabei wurde der Fokus auf die besondere Geräuschcharakteristik von Windenergieanlagen, die sogenannten amplitudenmodulierten Geräusche, gelegt. Eine vielfach diskutierte These lautet, dass diese besondere Geräuschcharakteristik der Windenergieanlagen, die sich z. B. als „Wuschen“ beschreiben lassen, zu einer erhöhten Wahrnehmung und Belästigung bei den Anwohnenden führen. Zum Startzeitpunkt des

Forschungsvorhabens war noch nicht klar, ob und in welcher Häufigkeit Amplitudenmodulationen (AM) in Entfernungen größer 1.000 m überhaupt detektierbar sind.

Ziel der Studie war zu untersuchen in welchem Ausmaß Amplitudenmodulationen von Windenergieanlagen verursacht werden, ob diese im Immissionsbereich hör- und messbar sind und welchen Einfluss sie auf die Geräuschwahrnehmung von Anwohnenden haben. Die Studie wurde diesbezüglich in drei Bausteinen konzipiert:

- Baustein 1: Langzeitmessungen von Windenergieanlagengeräuschen
- Baustein 2: Befragung von Anwohnenden im Umfeld von Windenergieanlagen
- Baustein 3: Hörversuche zur Wirkung amplitudenmodulierter Geräusche

Im Baustein 1 wurden Messungen der Geräusche von Windenergieanlagen an fünf deutschlandweit verteilten Standorten vorgenommen. Durch Abgleich mit Daten zum Betrieb (Zeiten, Leistung), zur Art der Anlage, zur topographischen Situation und zu den meteorologischen Bedingungen sollten die Einflussfaktoren auf die Amplitudenmodulation eruiert werden. Als Kernergebnisse der Langzeitmessungen für die weiteren Bausteine wurden standortspezifisch

die Auftrittshäufigkeit und Modulationstiefe stabiler, periodischer Amplitudenmodulationen ermittelt. Gegenstand von Baustein 2 ist die Befragung von Anwohnenden an den gleichen fünf Standorten, an denen die Langzeitmessungen durchgeführt wurden. Ziel hierbei war es, den Grad der Belästigung der Anwohnenden durch Windenergieanlagen geräusche bezogen auf prognostizierte Beurteilungspegel zu ermitteln. Dabei galt es zu prüfen, inwieweit die standortspezifischen Kenngrößen der Amplitudenmodulation, die subjektive Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen und weitere Kontextfaktoren über den prognostizierten Beurteilungspegel hinaus die Lärmbelästigung beeinflussen. Die Befragungsstudie ist methodisch eine Querschnittsstudie, d. h. es wird zu einem Zeitpunkt befragt, die Befragungsangaben mit den akustischen Daten korreliert und die Assoziationen zwischen der Lärmbelästigung und potenziellen Einflussgrößen in statistischen Vorhersagemodellen (Regressionsanalysen) quantifiziert. Mithilfe der statistischen Analysen lassen sich dabei Zusammenhänge zwischen der Lärmbelästigung und den Einflussfaktoren untersuchen, eine eindeutige Ursache-Wirkungszuschreibung ist dabei streng genommen nicht möglich. So kann zwar in der Befragungsstudie der mögliche Zusammenhang



EINHALTUNG DER GRENZWERTE
FÜR FAHRZEUGGERÄUSCHE

Pass-by-Lösungen von HBK

Die Lösungen von Hottinger Brüel & Kjaer für simulierte und reale Vorbeifahrtgeräuschmessungen erleichtern den Umgang mit komplexen Regelungen und erfüllen erhöhte Anforderungen an die Produktivität:

- Datenzentrierte Pass-by-Lösung
- Nutzerfreundliche Software
- Qualitativ hochwertige Messgeräte
- Umfassende Service- und Supportangebote

hbkworld.com/pass-by-messung



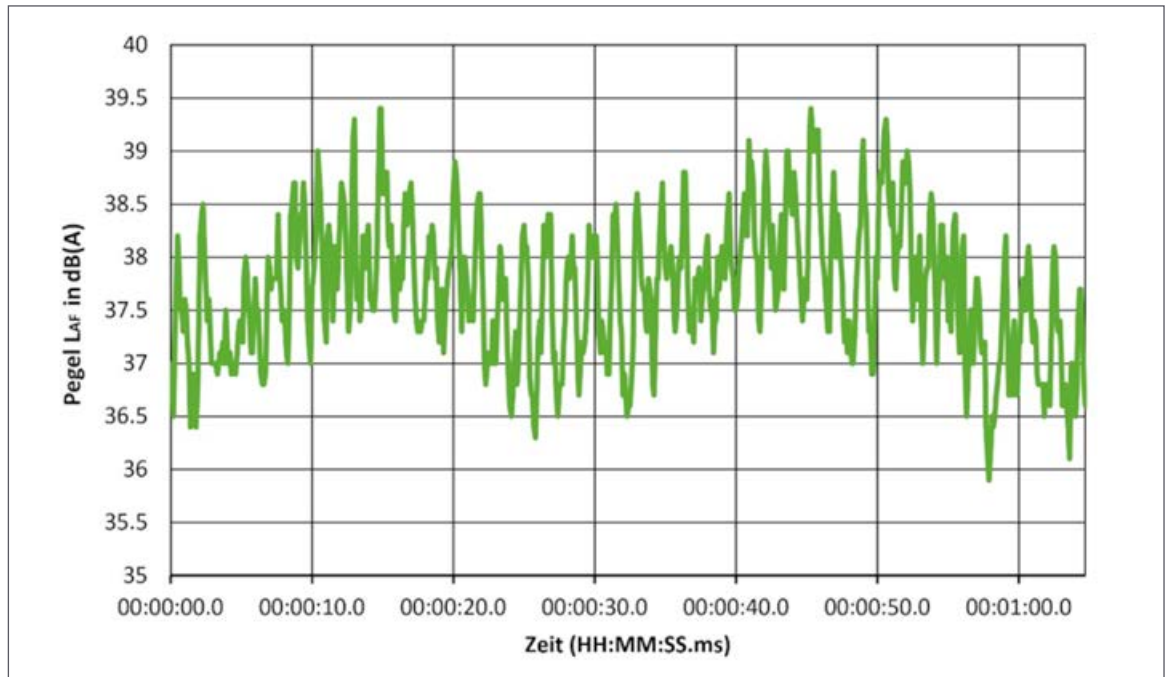


Abb. 1: Exemplarischer Pegelverlauf bei vorliegender Amplitudenmodulation

zwischen der Amplitudenmodulation bzw. ihrer subjektiven Wahrnehmung und der Belästigung durch Windenergieanlagen Geräusche in der anwohnenden Bevölkerung aufgezeigt werden, ob und in welchem Maße der akustische Effekt amplitudenmodulierter Geräusche ursächlich für die Lärmbelästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen ist, lässt sich nur durch eine systematische, experimentell angelegte Studie untersuchen.

Aus diesem Grund wurden als Baustein 3 unter kontrollierten bzw. standardisierten Bedingungen Hörversuche mit Anwohnenden von drei der fünf Standorte sowie einer Kontrollgruppe von nicht im Umfeld von Windenergieanlagen lebenden Personen durchgeführt. Dabei wurden den Untersuchungspersonen verschieden amplitudenmodulierte Geräusche dargeboten und die akuten Belästigungsreaktionen hierauf erfasst. Die kontrollierte Darbietung der Geräuschkonzepte erlaubt eine eindeutige Ursachenzuschreibung und -quantifizierung, d. h. Reaktionsunterschiede auf die Geräuschkonzepte lassen sich auf Unterschiede in den Geräuschkonzepte und auf den quantitativen Grad der in den Szenarien manipulierten Amplitudenmodulationen zurückführen.

Der im Rahmen des Forschungsprojekts entstandene Endbericht befindet sich derzeit in der Entwurfsphase.

Baustein 1: Langzeitmessungen von Windenergieanlagen

Mit Amplitudenmodulation ist die Eigenschaft des Geräusches der Windenergieanlagen gemeint, die meist als ein „Wuschen“ wahrgenommen wird. Hier-

bei handelt es sich um ein periodisches Ansteigen und Abfallen des Schalldruckpegels.

Geräusche von Windenergieanlagen unterliegen auch anderen zeitlich unregelmäßigen Schwankungen, die von Menschen wahrgenommen werden können. Diese können z. B. durch Ausbreitungsvorgänge, Wind oder Interferenzen erzeugt werden und sind teilweise in der Fachliteratur ebenfalls als amplitudenmodulierte Geräusche bezeichnet. Diese Schwankungen stehen aber meist nicht in direktem Zusammenhang mit der Rotationsfrequenz und werden von Anwohnenden nicht als „Wuschen“ beschrieben. Im Forschungsvorhaben wird der Begriff Amplitudenmodulation für Pegelschwankungen im Zusammenhang mit der Drehfrequenz verwendet, wie sie in Abbildung 1 als schnelles an- und abschwellen des Pegels im 1,2 s Takt zu sehen sind.

Es wurden an fünf Untersuchungsgebieten Langzeitschallmessungen im Immissionsbereich (> 800 m) und Emissionsbereich (< 300 m) durchgeführt. Auf der Basis der Langzeitschallmessungen wurden die geräuschspezifischen Einflüsse von Windenergieanlagen ausgewertet und untersucht. Im Rahmen der Messauswertungen wurde ein Algorithmus entwickelt, um Amplitudenmodulation im Messsignal automatisiert zu detektieren und zu quantifizieren.

Die Untersuchungsgebiete

Die fünf Messkampagnen wurden an Standorten verteilt über das gesamte Bundesgebiet von Deutschland durchgeführt. Ziel bei der Wahl der Untersuchungsgebiete war, die unterschiedlichen topografischen Verhältnisse in Deutschland abzudecken. Dies

wurde durch die Wahl der Untersuchungsgebiete (UG) in Nord-, Ost-, Süd- und Westdeutschland sowie in der Mitte von Deutschland erreicht (siehe Abbildung 2).

Generell befanden sich im näheren Umfeld der Messorte keine relevanten Geräuschquellen wie beispielsweise größere Industrieanlagen, größere gewerbliche Anlagen oder Autobahnen. Die Auswahl der Untersuchungsgebiete erfolgt des Weiteren unter der Vorgabe, möglichst unterschiedliche Parkkonstellationen zu untersuchen, um einen breiten Überblick der Geräuschsituation in Deutschland zu erhalten. Dabei variierten:

- Anzahl der Windenergieanlagen (1, 3, 6, 10 oder 21 WEA)
- Typ der Windenergieanlagen (4 Hersteller mit insgesamt 6 unterschiedlichen Modellen)
- Höhe der Windenergieanlagen (ca. 100 m – ca. 140 m Nabenhöhe)
- Leistung der Windenergieanlagen (2 – 3 MW)
- Rotordurchmesser (ca. 80 m bis ca. 135 m)
- Topografische Lage (flaches bis hügeliges Landschaftsbild)
- Messentfernung der Messungen im Immissionsbereich (ca. 800 m bis 1.500 m)
- Zeitraum der Messung (Frühling bis Winter)

Der Messaufbau

Der Messaufbau wurde in zwei Bereichen durchgeführt. Zum einen in dem Bereich der Immission direkt an einem möglichen Immissionsort und zum anderen in einem Bereich der Emission in unmittelbarer Umgebung einer Windenergieanlage (siehe Abbildung 3). In jedem der fünf Untersuchungsgebiete wurde die Langzeitmessung über sechs Wochen im Immissionsbereich und in drei Untersuchungsgebieten parallel über zwei Wochen im Emissionsbereich durch-

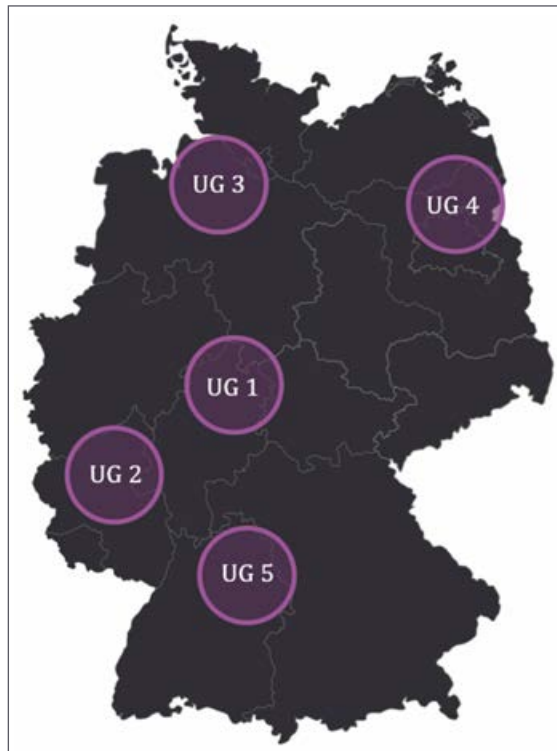
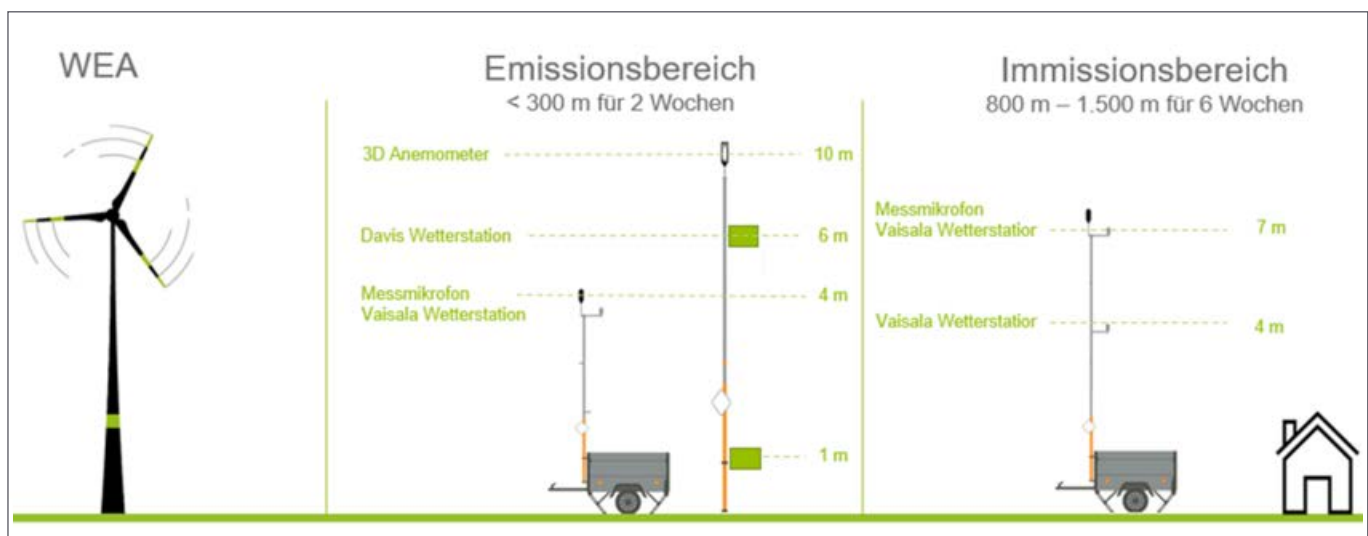


Abb. 2: Lage der Untersuchungsgebiete in Deutschland

geführt. Die Messungen erfolgten mit automatisch arbeitenden Messstationen. Im Emissionsbereich erfolgte neben der akustischen Messung auf 4 m Höhe die Aufzeichnung der meteorologischen Daten auf jeweils gleicher Höhe des Mikrofons, sowie zusätzlich in 10 m, 6 m und 1 m Höhe. Im Immissionsbereich wurden die Geräusche in einer Höhe von 7 m erfasst. Die meteorologischen Daten standen im Immissionsbereich in 7 m und in 4 m Höhe zur Verfügung. Die Erfassung der Anlagensignale erfolgte im Turmfuß der nächstgelegenen Windenergieanlage oder wurde als Datensatz über den Hersteller bereitgestellt. Die Erfassung der Messdaten erfolgte mit geeichten

Abb. 3: Schematische Darstellung des Messaufbaus



Messstationen mit Klasse 1 Mikrofonen. Zusätzlich wurde zur Reduktion der Windgeräusche am Außenmikrofon ein sekundärer Windschirm benutzt. Die Messstationen zeichneten kontinuierlich einen Pegelverlauf in einem Zeitraster von 0,1 Sekunden, schmalbandige Spektren mit einer Frequenzauflösung von 3 Hz, Roh-Audiodaten in einem Format mit 24 Bit / 48 kHz für spätere feinere Spektralauswertung und andere Analysen sowie Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Regen, relative Luftfeuchte, Luftdruck und Temperatur auf unterschiedlichen Messhöhen auf.

Das Auswerteverfahren

Als Grundlage für die Auswertung der Messdaten bezüglich des Auftretens von Amplitudenmodulation wird zunächst definiert: Die zu untersuchende Amplitudenmodulation von Windenergieanlagen steht im direkten Zusammenhang mit der Drehfrequenz der Anlage.

Für die Untersuchung der Amplitudenmodulation wurde im Rahmen der Studie ein Algorithmus entworfen, der anhand der aufgezeichneten Audiodaten für Abschnitte mit einer Länge von 10 Sekunden die Modulationstiefe ΔL_{AM} und die Frequenz der Modulation f_{AM} bestimmt. Vereinfacht zusammengefasst wird der Pegelverlauf auf seine spektrale Zusammensetzung hin im Bereich von 0,3 Hz bis 1,2 Hz untersucht, um die vorherrschende Frequenz f_{AM} der Modulation zu bestimmen. Dabei wird die von Windenergieanlagen aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit zu erwartende Periodizität berücksichtigt, um aus der Differenz der Minima und Maxima des

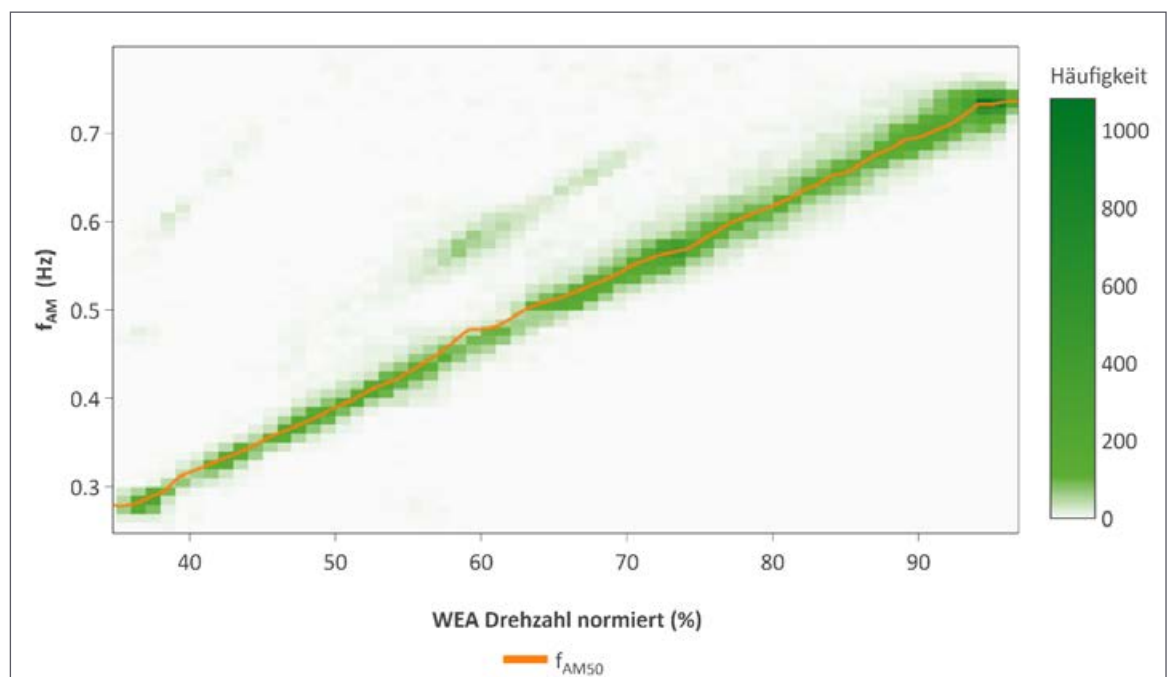
Pegelverlaufs das Maß der Modulationstiefe (ΔL_{AM}) zu bestimmen. Unabhängig von dem tatsächlichen Auftreten von periodisch amplitudenmodulierten Geräuschen werden so zunächst Datenscribe für f_{AM} und ΔL_{AM} erzeugt.

Für den Zeitraum mit erkannter AM kann die Auftrittshäufigkeit der erkannten Modulationsfrequenz und der Drehzahl der Windenergieanlage anhand eines 2D-Auftretsdichteplots dargestellt werden (siehe Abbildung 4). Diese Darstellung verdeutlicht exemplarisch, anhand der Daten der Messung im Emissionsbereich, die starke Korrelation der akustischen Modulationsfrequenz mit der Drehfrequenz der Windenergieanlage. Die blässere nahezu parallel verlaufende Linie im mittleren Drehfrequenzbereich kann durch die gleichzeitige Messung von AM anderer nicht geloggtter Anlagen mit höherer Drehzahl erklärt werden. Nicht von allen Anlagen eines Windparks wurden zum Zeitpunkt der Messungen die Drehzahlen erfasst.

Allgemeine Ergebnisse

Prinzipiell konnten für die fünf Untersuchungsgebiete zwischen 80 % und 95 % der Messzeit im Immissionsbereich in Hinblick auf die Amplitudenmodulation ausgewertet werden. Zeiträume, in denen die Anlagen aufgrund zu geringer Windgeschwindigkeiten nicht in Betrieb waren oder Zeiträume, in denen die meteorologischen Bedingungen keine Auswertung zuließen (z. B. Regen, Nebel usw.) traten entsprechend selten auf. Innerhalb der auswertbaren Bereiche konnten in der Regel zu 20 % bis 50 % der Zeit eine stabile periodische Amplitudenmodulation

Abb. 4: Emissionsseitige 2D-Auftretshäufigkeit (Modulationsfrequenz vs. Drehzahl)



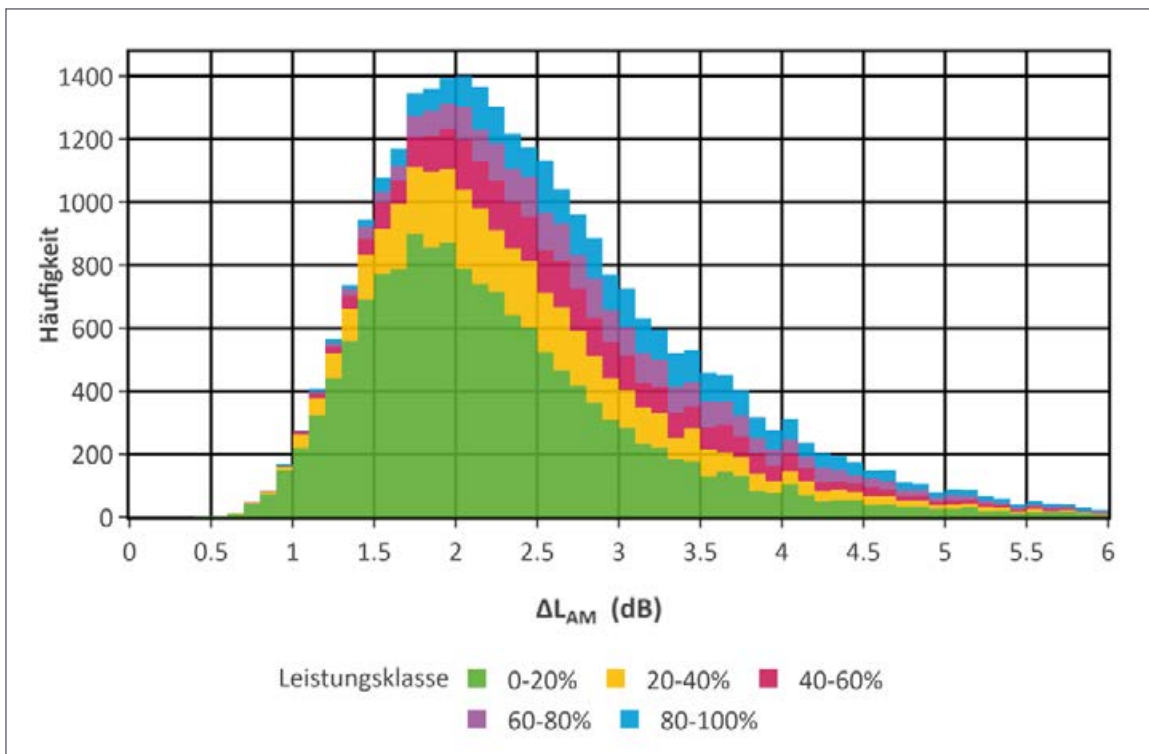


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung der Modulationstiefe ΔL_{AM} im UG 2 nach Anlagenleistung klassiert

festgestellt werden, die der Drehfrequenz der Windenergieanlagen zugeordnet werden kann. An zwei Standorten konnte nur zu 2 % bis 10 % der Zeit eine stabile periodische Amplitudenmodulation festgestellt werden, was zum einem dem sehr großen Messabstand von 1.500 m und zum anderen einer Vielzahl unterschiedlichster Anlagentypen mit unterschiedlichen Drehfrequenzen zuzuordnen ist.

Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass die Modulationstiefen für alle Standorte im Median über alle Leistungsbereiche der Anlagen bei ca. 1,5 dB bis 2,5 dB liegen (siehe exemplarisch für einen Standort, Abbildung 5).

Das 95 %-Perzentil der Häufigkeitsverteilungen der Modulationstiefen (ΔL_{AM95}) variiert in den Untersuchungsgebieten zwischen 0,6 dB und 1,3 dB, das 5 %-Perzentil der Modulationstiefen (ΔL_{AM5}) liegt zwischen 2,9 dB und 5,5 dB.

Ein Vergleich der verschiedenen Untersuchungsgebiete zeigt, dass in den Untersuchungsgebieten 1 und 2 mit Modulationstiefen im Median von mehr als 2 dB die größten Modulationstiefen auftraten. Bei diesen Standorten handelt es sich um Windparks mit wenigen Windenergieanlagen und relativ geringen Abständen zwischen den Windenergieanlagen und der Wohnbebauung bzw. der Messposition. Aufgrund der hohen Unterschiedlichkeit der Messkampagnen (Jahreszeit, Topographie, Parkkonstellation, Messentfernung) können aus den Beobachtungen in Bezug auf die Anlagenanzahl und die Messentfernung lediglich Tendenzen abgeleitet werden.

Abhängigkeit zwischen AM und den Betriebszuständen der WEA

In Tabelle 1 ist der jeweilige Median der Modulationstiefen klassiert nach normierter elektrischer Leistung pro Messort aufgeführt. 100 % entspricht hierbei der Nennleistung der jeweiligen Referenzwindenergieanlage. Für das Untersuchungsgebiet UG 5 sind die Häufigkeiten aufgrund fehlender Anlagensignale nach der immissionsseitig gemessenen Windgeschwindigkeit klassiert. 100 % entspricht hierbei 6 m/s auf Immissionshöhe.

Für die UG 1, UG 3, UG 4 und UG 5 ergibt sich mit zunehmender elektrischer Leistung bzw. zunehmender Windgeschwindigkeit ein konstanter bis schwach abnehmender Median der Modulationstiefe. Ein anderes Bild zeigt sich für das Untersuchungs-

Tab. 1: Klassierung der Modulationstiefe nach normierter elektrischer Leistung

Leistungs- bereich	Pegeldifferenz ΔL_{AM50} in dB							
	Immissionsbereich					Emissionsbereich		
	U1	U2	U3	U4	U5	U1	U3	U4
1–20 %	2,1	2,1	1,8	1,6	1,5	2,0	1,8	1,4
>20–40 %	2,0	2,5	1,2	1,5	1,6	2,2	2,2	1,6
>40–60 %	2,2	2,9	1,1	1,5	1,5	1,9	2,7	1,6
>60–80 %	2,2	3,0	1,2	1,5	1,3	1,9	2,9	1,6
>80–100 %	1,7	3,0	1,2	1,4	1,4	1,8	2,7	1,6

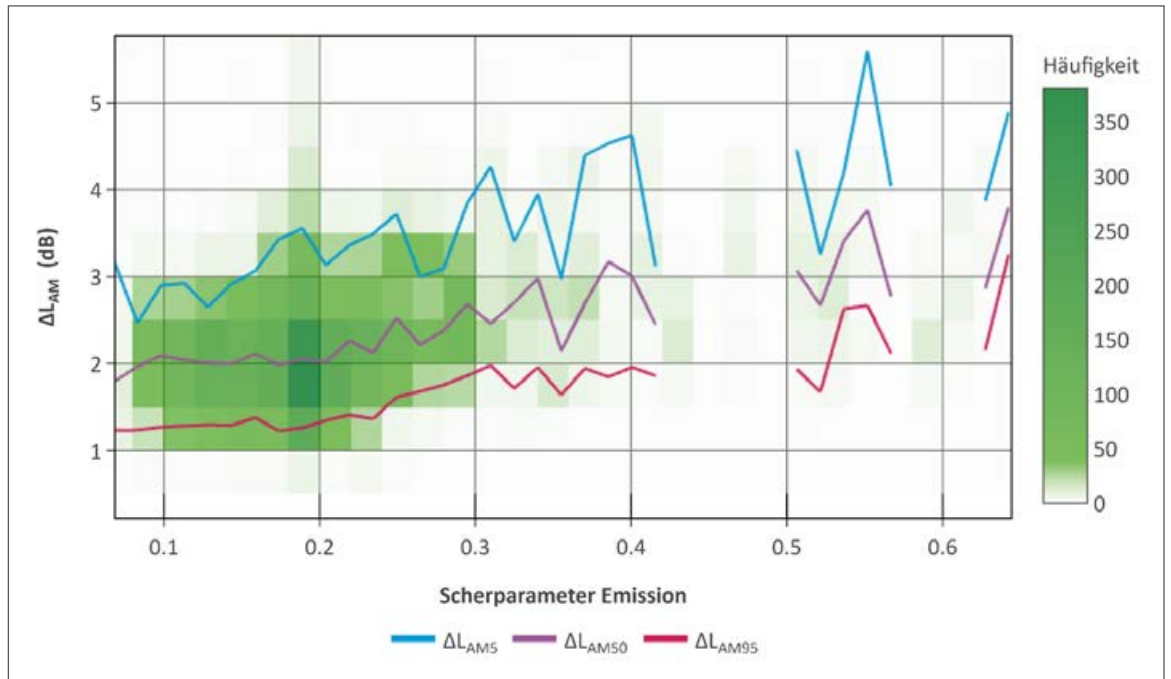


Abb. 6: Modulationstiefe gegen Scherparameter Emissionsbereich (UG 1)

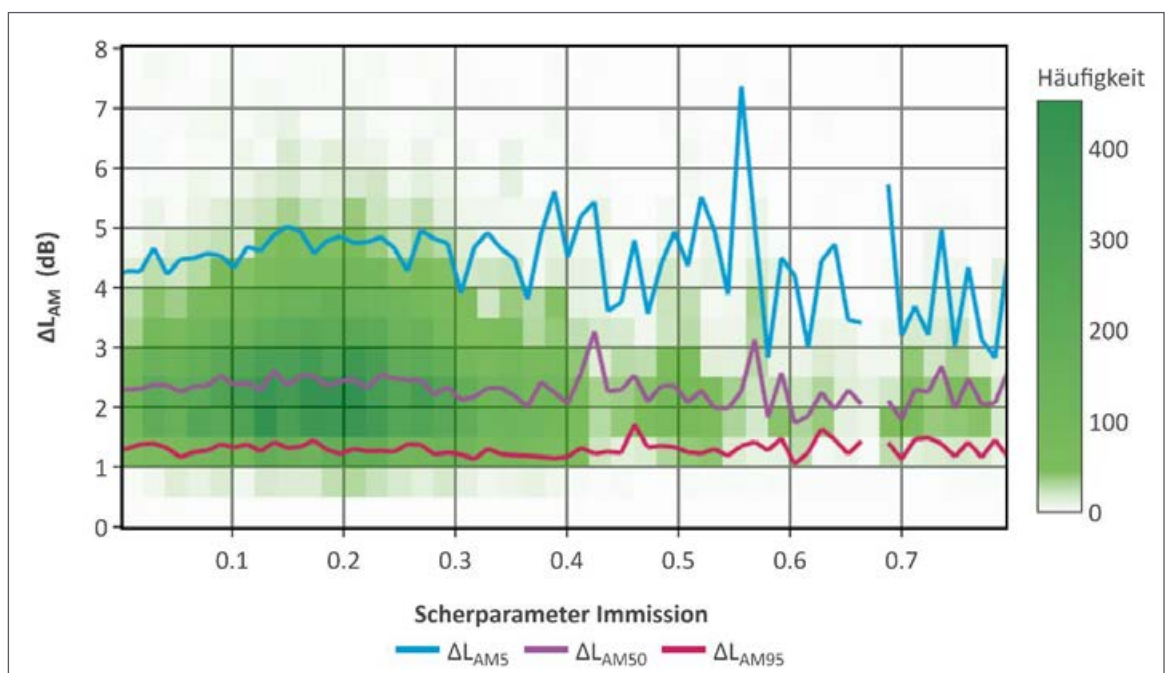
gebiet UG 2. Hier steigt die Modulationstiefe über den Median mit steigender Leistung an. Beim UG 2 handelt es sich um das Untersuchungsgebiet mit nur einer WEA.

Die Analysen der Messungen in den Emissionsbereichen der Windparks zeigen für UG 1 und UG 4 einen konstanten bzw. leicht abfallenden Median der Modulationstiefe bei zunehmender elektrischer Leistung. Im UG 3 zeigt sich mit zunehmender Leistung der Anlagen ein Anstieg im Median.

Die weitere Analyse der Messdaten nach Klassierung

auf Windrichtung und elektrischer Leistung der Anlagen zeigt, dass unter Querwind die Modulationstiefe im Immissionsbereich UG 2 um 1,2 dB über steigende Leistung leicht zunimmt. Unter Mitwind nimmt die Modulationstiefe nur um 0,6 dB zu. Dieser Trend lässt sich nur für das Untersuchungsgebiet mit der Einzelanlage aus den Daten erkennen. Bei den anderen Untersuchungsgebieten (UG 1 und UG 3 bis UG 5) lassen sich keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Leistung und Windrichtung sowie Modulationstiefe erkennen.

Abb. 7: Modulationstiefe gegen Scherparameter Immissionsbereich (UG2)



Windscherung als Quellmechanismus

Wie schnell und in welcher Form die Windgeschwindigkeit mit der Höhe der Atmosphäre steigt, kann deutlich variieren. Die Form des Windprofils wird mit einem Scherparameter beschrieben. Um den Einfluss der Windscherung als Quellmechanismus zu untersuchen, wurden aus den gemessenen meteorologischen Größen dynamisch für 10-Minuten-Abschnitte Scherparameter bestimmt und gegen die gemessene Modulationstiefe in Dichteverteilungen aufgetragen. Für die emissionsseitigen Messungen der AM konnte ein steigender Wert für die Modulationstiefe mit dem Anstieg des Scherparameters ermittelt werden. Exemplarisch ist der Verlauf in Abbildung 6 für die Messung im Emissionsbereich des UG 1 dargestellt. Immissionsseitig zeigt sich für alle Standorte in den Regressionsgeraden kein erkennbarer Anstieg. Exemplarisch ist der Verlauf in Abbildung 7 für den Immissionsort des UG 2 dargestellt.

Es ist also festzustellen, dass die gemessene AM am Immissionsort keinem Trend folgt und nicht durch die ermittelte Windscherung beeinflusst wird. Für den Emissionsbereich konnte ein Trend festgestellt werden, der einen leichten Anstieg der Modulationstiefe bei ansteigendem Scherparameter aufweist.

Baustein 2: Befragung von Anwohnerinnen und Anwohnern im Umfeld von Windenergieanlagen

Zielsetzung und Methodik

An den fünf Windenergieanlagenstandorten wurden im Umkreis von bis zu 3 km zu den Anlagen Befragungen unter den Anwohnenden durchgeführt. Ein wesentliches Ziel der Befragung war es, die Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen in der exponierten Bevölkerung zu erfassen und in Expositions-Wirkungsanalysen auf den prognostizierten Beurteilungspegel für einen 24 Stunden-Tag L_T zu beziehen. Dabei sollte über die Beziehung zwischen der Lärmbelästigung und dem Beurteilungspegel L_T hinaus der Einfluss der Amplitudenmodulation sowie weiterer Kontextfaktoren auf die Lärmbelästigung durch die Windenergieanlagen geräusche untersucht werden.

Hierzu wurden Schallimmissionsprognosen bezogen auf die Wohngebäude der Befragungspersonen vorgenommen. Die Berechnungen erfolgten gemäß der TA Lärm [1] nach der DIN ISO 9613-2 [2] in Form einer detaillierten Ausbreitungsrechnung unter Berücksichtigung des Interimsverfahrens für Windenergieanlagen (vgl. [3]; [4]). Für die Ausbreitungsberechnungen wurden die Oktavbandschallleistungsspektren des je-



WIE ERREICHT MAN EINE EFFEKTIVE KÖRPERSCHALLISOLIERUNG IN FITNESSSTUDIOS? GEMEINSAM.

Fitnessstudios sorgen in Quartieren und Geschäftshäusern für kurze Wege und moderne Freizeitinfrastruktur. Dabei können die schalltechnischen Anforderungen komplex und vielschichtig sein. Die **REGUPOL sonusfit Range** kombiniert die effektive Reduzierung des Körperschalls mit den notwendigen sportfunktionellen Eigenschaften eines **REGUPOL everroll** Sportbodens in allen Bereichen des Fitnessstudios.

Erfahren Sie mehr:



akustik@regupol.de
www.regupol.com

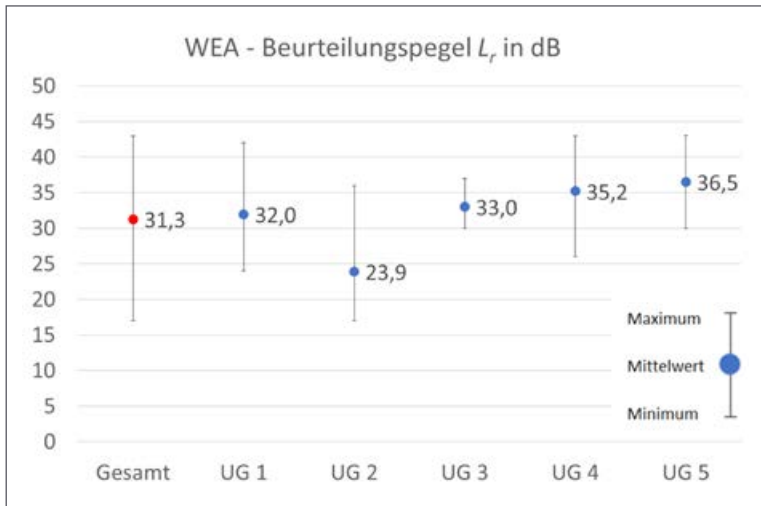


Abb. 8: 24-Stunden-Beurteilungspegel L_r der Geräuschmissionen von Windenergieanlagen in den Untersuchungsgebieten

weiligen Genehmigungsverfahren oder – bei Nicht-Verfügbarkeit – stattdessen Vermessungsberichte des jeweiligen Anlagentyps als Eingangsdaten verwendet. Für die Standorte wurde das Geländemodell digital nachgebildet, wobei Gebäude keine Berücksichtigung fanden. Die Berechnungen wurden mit dem Programm Soundplan (Version 8.2) durchgeführt.

Von den Befragungspersonen aus dem Wohnumfeld der Windenergieanlagen wurden insbesondere die folgenden Aspekte erhoben:

- Wohnsituation: Wohndauer, Wohnzufriedenheit, Haustyp, Etage, Eigentum/Miete;
- Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen insgesamt, drinnen und draußen, erhoben nach ISO/TS 15666 [5] auf einer fünfstufigen Verbalskala von 1 = überhaupt nicht bis 5 = äußerst gestört oder belästigt;
- Belästigung durch Straßenverkehrsgeräusche und sonstige Arten des Umgebungslärms erhoben auf der fünfstufigen Verbalskala nach ISO/TS 15666 [5];
- Störungen von Aktivitäten tagsüber (Kommunikation, Ruhe, Konzentration) und des Schlafs durch Geräusche von Windenergieanlagen orientiert an der fünfstufigen Belästigungsskala nach ISO/TS 15666;
- Wahrnehmung und Belästigung durch spezifische Merkmale der Geräusche von Windenergieanlagen, unter anderem Wuschen und (periodisches) Rauschen der Geräusche;
- Visuelle Aspekte der Windenergieanlagen wie Schattenwurf, Blinken des Hinderniskennzeichens, Drehbewegungen, Wirkung im Landschaftsbild;
- Einstellung zu den lokalen Windenergieanlagen;
- Beziehung zu Windenergieanlagen: Beschäftigungsverhältnis, finanzielle Beteiligung, Stromta-

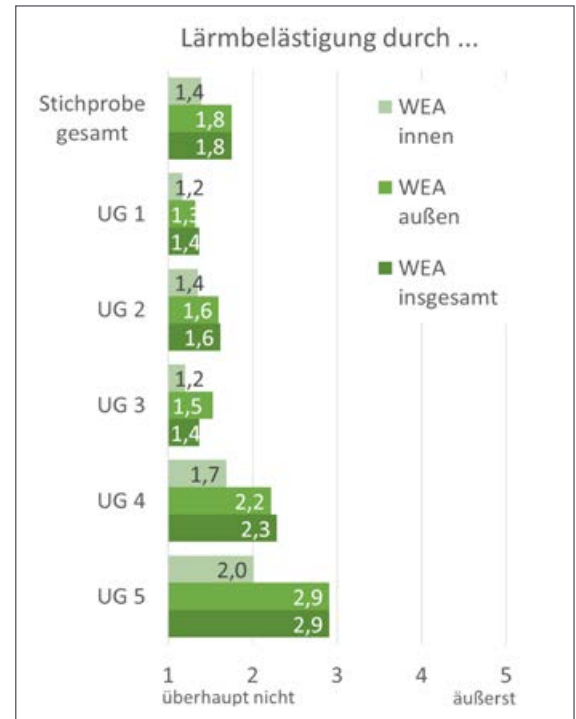


Abb. 9: Lärmbelästigung durch Geräuschmissionen von Windenergieanlagen in den Untersuchungsgebieten (Skala: 1 = „überhaupt nicht“ bis 5 = „äußerst“ gestört oder belästigt)

rif, Beteiligung in einer auf die Windenergieanlagen bezogene Bürgerinitiative;

- Personenbezogene Angaben: Individuelle Lärmempfindlichkeit, allgemeines psychisches Stresserleben in den letzten vier Wochen (Perceived Stress Scale, PSS-10 [6]), soziodemographische Angaben.

Die Befragungspersonen wurden per Zufall auf Basis von Einwohnermeldeamtsdaten ausgewählt und in einem Anschreiben über die Befragung informiert und um Teilnahme gebeten. Die Befragungen erfolgten telefonisch oder optional online. Sie fanden im Zeitraum von November 2019 bis Februar 2021 mit COVID-19-bedingter Unterbrechung zwischen April 2020 und Oktober 2020 statt – an jedem Standort nach Abschluss der Langzeitmessungen.

Insgesamt liegen aus dieser Befragungsstudie Befragungs- und Geräuschpegeldata von 463 Personen vor. Davon sind 52 % Frauen, 47 % Männer. Das Durchschnittsalter liegt bei 59 Jahren mit einer Spannweite von 19 bis 91 Jahren.

Ergebnisse der Befragungsstudie

Im Durchschnitt treten an den Wohnadressen der befragten Personen Geräuschmissionen von den Windenergieanlagen in Höhe von 31 dB im 24-Stunden-Beurteilungspegel L_r bei einer Spannweite von $16 \text{ dB} \leq L_r \leq 43 \text{ dB}$ auf. Die durchschnittlichen Beurteilungspegel unterscheiden sich dabei

zwischen den Untersuchungsstandorten ein wenig, wobei insbesondere am Standort UG 2 der durchschnittliche Pegel mit $L_r = 23,9$ dB niedriger ausfällt als an den übrigen Standorten mit durchschnittlich $32 \text{ dB} \leq L_r \leq 36,5 \text{ dB}$ (vgl. Abb. 8).

Die Lärmbelastigung durch die Geräusche der Windenergieanlagen folgt dem nur teilweise, wie Abbildung 9 zeigt. Zwar sind an den Standorten UG 4 und UG 5 sowohl die Lärmbelastigung durch Windenergieanlagen Geräusche (WEA-Lärmbelastigung) als auch der durchschnittliche Beurteilungspegel am höchsten, allerdings findet sich die niedrigste durchschnittliche WEA-Lärmbelastigung an den Standorten UG 1 und UG 3, aber nicht am Standort UG 2, dem Untersuchungsgebiet mit dem durchschnittlich niedrigsten Beurteilungspegel. Entsprechend weisen die statistischen Korrelationen zwischen den individuellen Beurteilungspegeln L_r und der WEA-Lärmbelastigung der Untersuchungspersonen mit $r = 0,263$ für die WEA-Lärmbelastigung insgesamt, $r = 0,219$ für die WEA-Lärmbelastigung innen und $r = 0,272$ für die WEA-Lärmbelastigung außen auf einen zwar statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,001$), allerdings in kleiner Effektstärke [6] hin. Der geringe statistische Zusammenhang zwischen der WEA-Lärmbelastigung und dem Beurteilungspegel L_r legt nahe, dass weitere akustische und/oder Kontextfaktoren die Lärmbelastigung beeinflussen. Die Belästigungsunterschiede bleiben zwischen den Untersuchungsstandorten auch bei Kontrolle des Beurteilungspegel statistisch signifikant, wie die Ergebnisse einer Kovarianzanalyse zur WEA-Lärmbelastigung insgesamt mit dem Beurteilungspegel als Kovariate und dem Standort als unabhängige Variable zeigen ($F_{\text{Standort}}(4,457) = 24,5$, $p < 0,001$). Post-hoc-Tests zur Analyse von Einzelunterschieden zwischen den Gebieten ergaben, dass der Grad der WEA-Lärmbelastigungsurteile in den Gebieten UG 1 und UG 3 statistisch signifikant niedriger ist als in den übrigen Gebieten, während sich die adjustierte WEA-Lärmbelastigung insgesamt in den Gebieten UG 2, 4 und 5 statistisch nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Tabelle 2 gibt Hinweis auf eine Korrespondenz in den Belästigungsunterschieden zwischen den Untersuchungsstandorten und der Auftrittshäufigkeit der erkannten periodischen Amplitudenmodulationen (AM), wobei die Belästigungswerte (Randmittelwerte) bereits nach Standortunterschieden im Beurteilungspegel adjustiert wurden: In den Untersuchungsgebieten, in denen die Auftrittshäufigkeit der periodischen AM niedriger ist (UG 1 und UG 3), ist auch die nach Beurteilungspegel adjustierte WEA-Lärmbelastigung niedriger.

Auch das Ausmaß, in dem die Befragungspersonen

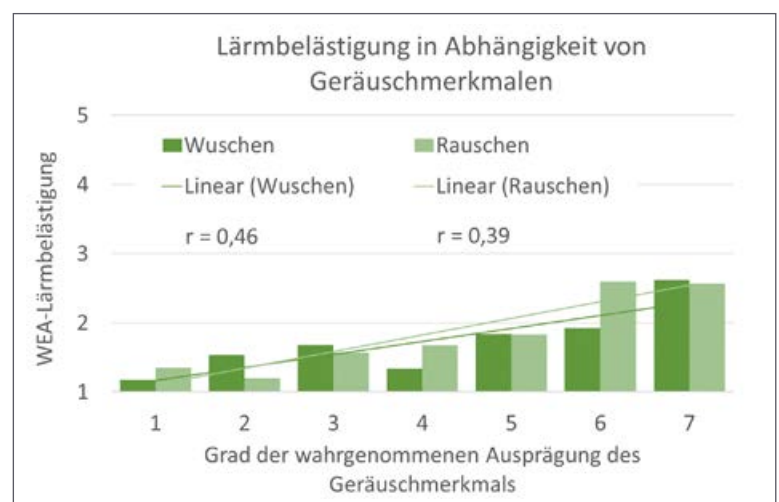
Tab. 2: Lärmbelastigung durch Geräusche von Windenergieanlagen und Auftrittshäufigkeit erkannter periodischer Amplitudenmodulationen (AM)

	WEA-Lärmbelastigung gesamt *	Auftrittshäufigkeit erkannter periodischer AM in %
UG 1	1,3	10,8
UG 2	2,1	47,4
UG 3	1,2	1,7
UG 4	2,1	42,0
UG 5	2,6	22,3

* Randmittelwert, d.h. adjustiert nach Beurteilungspegel L_r ; Belästigungsskala: 1 = „überhaupt nicht“ bis 5 = „äußerst“

die WEA-Geräusche als „Wuschen“ oder (periodisches) „Rauschen“ beschreiben, ist mit dem Grad der WEA-Lärmbelastigung assoziiert. Je stärker die Befragungspersonen die WEA-Geräusche als ein „Wuschen“ bzw. „Rauschen“ wahrnehmen, desto höher fällt der Grad der WEA-Belastigung insgesamt aus (siehe Abb. 10). Dabei ist davon auszugehen, dass diese Geräuschmerkmale Ausdruck der subjektiven Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen sind. Aber auch nicht-akustische Faktoren tragen neben dem Beurteilungspegel L_r zur WEA-Lärmbelastigung bei. Dazu zählen vor allem visuelle Aspekte der lokalen Windenergieanlagen, die als belästigend wahrgenommen werden wie Schattenwurf, blinkende Hinderniskennzeichen, die Drehbewegungen der Rotoren und der Anblick der Anlagen im Verhältnis zum Landschaftsbild. Ebenso sind Einstellungen zu den lokalen Windenergieanlagen mit der WEA-Lärmbelastigung assoziiert. Dazu zählen die Wahrnehmung, dass sie den Aufenthalt und die Erholung

Abb. 10: Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung der WEA-Geräusche als „Wuschen“ bzw. „Rauschen“ und der WEA-Lärmbelastigung insgesamt



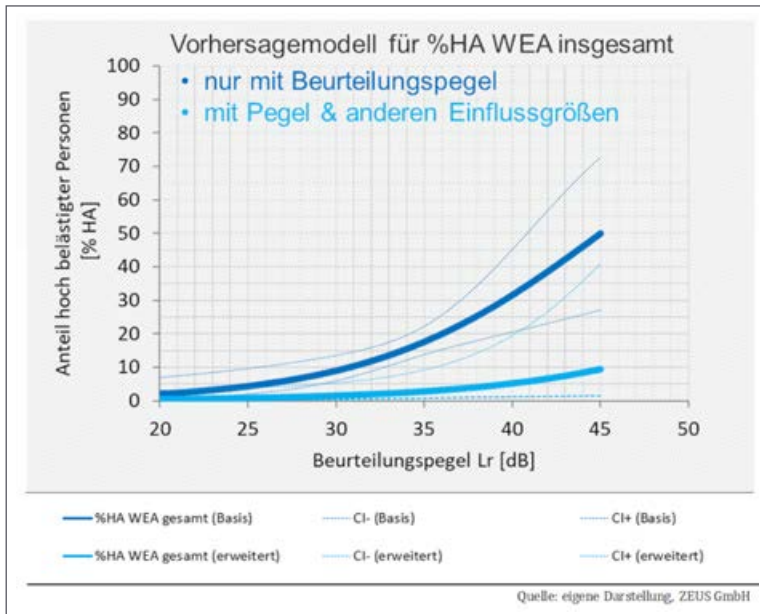


Abb. 11: Expositions-Wirkungsbeziehung zum Prozentanteil durch Windenergieanlagen insgesamt hoch lärmbelästigter Personen (% HA)

im Freien beeinträchtigen, negative ökonomische Konsequenzen für das Wohngebiet haben (u.a. Wertminderung von Grundstücken, Mangel an Weiterentwicklung der Region) und umgekehrt wahrgenommene positive Konsequenzen (neue Arbeitsplätze, sinkende Stromkosten). Je höher der Grad der Belästigung durch visuelle Aspekte der Windenergieanlagen ist, desto höher ist die Lärmbelästigung ($r = 0,74$; $p < 0,001$). Der Zusammenhang ist recht groß, weswegen einige Autoren auch vorschlagen, bereichsspezifische Belästigungen getrennt für Augen und Ohren zu einer aggregierten Belästigung durch Windenergieanlagen zusammenzufassen [7] [8]. Bei den Einstellungen zeigt sich, dass die WEA-Lärmbelästigung insgesamt umso höher ist, je mehr Aufenthalt und Erholung im Freien als beeinträchtigt wahrgenommen werden ($r = 0,68$; $p < 0,001$), negative Konsequenzen für das Wohngebiet befürchtet werden ($r = 0,44$; $p < 0,001$) und je weniger die positiven Konsequenzen für das Wohngebiet wahrgenommen werden ($r = -0,31$; $p < 0,001$).

Abbildung 11 zeigt die Expositions-Wirkungskurven für den Prozentanteil durch Windenergieanlagegeräusche insgesamt hoch lärmbelästigter Personen (% HAV; % highly annoyed, gemäß Definition nach ISO/TS 15666) bezogen auf den Beurteilungspegel L_r . Abgebildet sind zwei Kurven und deren obere und untere Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls (CI). Die obere, dunkelblaue Kurve in Abbildung 11 beruht auf einer einfachen logistischen Regression des % HA-Anteils auf den Beurteilungspegel L_r (Basismodell). Danach liegt etwa ein % HA-Anteil von 10 % bei $L_r = 31$ dB, ein % HA-Anteil von 25 % bei $L_r = 38$ dB und ein % HA-Anteil von 50 % bei $L_r = 45$ dB.

Die untere, hellblaue Kurve in Abbildung 11 basiert auf einer multiplen Regression des % HA-Anteils auf die Einflussgrößen Beurteilungspegel (L_r), Lärmempfindlichkeit, psychischer Stress, Einstellungen zu den lokalen Windenergieanlagen, visuelle Belästigung durch die Windenergieanlagen, wahrgenommene Geräuschmerkmale, darunter das Wuschen und (periodische) Rauschen (erweitertes Modell). Es zeigt sich, dass mit dem Einbezug der weiteren Einflussgrößen in das Vorhersagemodell die Expositions-Wirkungskurve zum % HA-Anteil niedriger ausfällt. Die hellblaue Kurve ist nicht so zu verstehen, dass mit Hinzunahme der weiteren Einflussfaktoren die Lärmbelästigung der betroffenen Anwohnerinnen und Anwohner absolut gesehen sinkt, sondern dass in dem Vorhersagemodell die weiteren Einflussfaktoren dem Beurteilungspegel einen Teil der Varianzaufklärung des % HA-Anteils nehmen, d. h. der Beurteilungspegel im Kontext der übrigen Faktoren an Bedeutung zur Vorhersage des % HA-Anteils verliert.

Ein wesentliches Ergebnis der Befragungsstudie im Hinblick auf die Rolle amplitudenmodulierter Geräusche von Windenergieanlagen ist, dass die WEA-Lärmbelästigung neben dem Beurteilungspegel L_r und weiteren nicht-akustischen Kontextfaktoren mit der Wahrnehmung des Geräuschmerkmals „Wuschen“ assoziiert ist und Belästigungsunterschiede zwischen den Standorten der Windenergieanlagen weitgehend mit Unterschieden in der Auftrittshäufigkeit periodischer Amplitudenmodulationen korrespondiert. Eine wie diese Befragung als Querschnittsstudie angelegte Untersuchung verweist auf Zusammenhänge, erlaubt aber im strengen Sinne keine Ursache-Wirkungs-Aussage im Hinblick auf den Belästigungseffekt von Amplitudenmodulationen. Aus diesem Grund wurde als dritter Baustein des gesamten Vorhabens ein Hörversuch unter kontrollierten Bedingungen zum Einfluss amplitudenmodulierter Geräusche von Windenergieanlagen auf die Kurzzeitbelästigung durchgeführt.

Baustein 3 Hörversuche zur Wirkung amplitudenmodulierter Geräusche

Im Rahmen der psychoakustischen Hörversuche wurde an 3 der 5 Untersuchungsgebieten der spezielle Einfluss von AM auf die Lästigkeit untersucht. Die Ergebnisse wurden um eine weitere Messreihe mit typischerweise nicht von den Lärmemissionen von WEAs betroffenen Probanden ergänzt. Ziel dieses Teils der Studie ist es, einen Bezug zwischen den Lästigkeitswirkungen verschiedener Immissionspegel und unterschiedlich starker AM von WEA herzustellen. Die Untersuchungen orientieren sich an vergleichbaren Studien [9]-[11] und berücksichtigen beim Design des Hörversuches und der Auswahl der Stimuli die dort gefundenen Ergebnisse.

Aufbau und Durchführung

Die verwendeten Stimuli wurden aus Aufnahmen im Regelbetrieb an zwei der fünf Untersuchungsgebiete erstellt, und es wurden manuell Abschnitte extrahiert, in denen die im Hörversuch verwendeten Nennwerte der AM von 2 dB, 4 dB, 6 dB und 8 dB möglichst genau erreicht wurden (max. Abweichung $\pm 0,4$ dB). Dabei wurde als Maß für die auftretenden AM der $L_{HP,05} - L_{HP,95}$ genutzt, also die Differenz zwischen den Perzentilwerten P 5 und P 95 des hochpassgefilterten Signals bei der Betrachtung einer einzelnen AM. Dieses Maß für die AM wurde in vergleichbarer Form auch in [9], [10] angewendet. Alle verwendeten Stimuli wiesen eine konstante für WEA typische Periodendauer auf, die bis auf einen Stimuli bei $1,2 \pm 0,1$ s lag. Wie im Detail in [12] beschrieben, wurden die extrahierten Abschnitte geeignet zu einer Gesamtlänge von jeweils 25 s aneinandergesetzt. In dem Hörversuch wurden die Stimuli über geschlossene Kopfhörer (AKG K 271) mit für WEA typischen Immissionspegeln von 32 dB(A), 35 dB(A), 38 dB(A) und 41 dB(A) dargeboten.

Drei der vier Hörversuchsserien wurden mit Probanden aus den entsprechenden Untersuchungsgebieten durchgeführt. Die Probanden waren im Rahmen der Befragungen (Abschnitt 2) auf die Hörversuche aufmerksam gemacht worden. Sie waren somit mit Lärmwirkungen von WEA vertraut oder zumindest über die Lärmproblematik informiert. Die Teilnahme an den Hörversuchen fand in einem öffentlichen Gebäude in dem jeweiligen Ort statt (Bürgerhaus oder Gemeindezentrum). Zusätzlich wurde eine vierte Hörversuchsreihe an der TH Köln als Kontrollversuch mit Studierenden oder wissenschaftlichem Personal durchgeführt, die zum großen Teil weder Betroffene von WEA-Lärm sind, noch über detaillierte Kenntnisse zu dieser Problematik verfügen. An den Hörversuchen nahmen insgesamt 79 Personen (50 männlich, 29 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 56 Jahren teil.

Die Durchführung der Hörversuche erfolgte in der Form von „Fokustests“, d. h. die Teilnehmer sollten bewusst auf die dargebotenen Stimuli hören und diese während oder direkt nach der Wiedergabe bewerten. Damit sich die Probanden vor dem Start des eigentlichen Experimentes an den Ablauf und an die Unterschiedlichkeit der dargebotenen Stimuli gewöhnen konnten, wurden zu Beginn fünf Stimuli präsentiert, die nicht in die Auswertung einbezogen wurden. Im weiteren Verlauf wurde jeder Stimulus von jedem Probanden genau einmal bewertet.

Die Bewertung der Lästigkeit wurde basierend auf der 11-Punkte-Skala der ISO/TS 15666 [5] bestimmt. Diese Skala umfasst 11 Werte von 0 – 10. Hierbei entspricht der Wert 0 „überhaupt nicht lästig“, der Wert

10 der maximalen Lästigkeit. Die Skala wurde bereits in [9] für die Lästigkeit von WEA evaluiert. Basierend auf der ISO/TS 15666 [5] bewerteten die Probanden die Lästigkeit, indem sie die folgende Frage beantworteten [in Deutsch, modifiziert aus ISO/TS 15666]: „Wenn Sie sich vorstellen, dass dies die Klangsituation in Ihrem Garten ist, welche Zahl von 0 bis 10 repräsentiert am besten, wie sehr Sie sich dadurch belästigt, gestört oder geärgert fühlen würden?“.

Ergebnisse

Da es für die weitere Auswertung nicht wesentlich war, inwieweit die Absolutwerte zwischen den Probanden z. B. aufgrund unterschiedlicher Skalenverankerung schwanken, wurden die Ergebnisse in einem ersten Schritt pro Proband normalisiert (mittelwertbefreit) und dadurch die Zwischen-Subjekt-Varianz stark reduziert. Die Varianzanalyse zeigte starke signifikante Haupteffekte für AM [$F(4,324) = 80,08$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,50$; $\epsilon = 0,37$] und Pegel [$F(3,243) = 181,11$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,69$; $\epsilon = 0,49$], sowie mit einer wesentlich geringeren Effektstärke auch für den Aufnahmeort [$F(1,81) = 7,53$; $p = 0,007$; $\eta_p^2 = 0,09$; $\epsilon = 1$]. Somit kann der größte Anteil der Unterschiede zwischen den Beurteilungen durch den Pegel des Signals und die Stärke der AM erklärt werden. Der Aufnahmeort hat allerdings auch einen schwachen, aber dennoch signifikanten Einfluss. Dies lässt sich durch unterschiedliche Charakteristika der Stimuli aufgrund variierender Anzahl und Typen von WEA und aufgrund unterschiedlicher Entfernungen zu den WEA an den verschiedenen Aufnahmeorten erklären. Weiterhin wurden die Mittelwerte und die Konfidenzintervalle der Beurteilungen untersucht. Abbildung 12 zeigt die normalisierten Lästigkeiten in Abhängigkeit von der AM und dem im Hörversuch dargebotenen Immissionspegeln. Da unsere Untersuchungen keine maßgeblichen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Kontrollgruppe an der TH Köln und den Ergebnissen an den Standorten der WEA zeigten und der Aufnahmeort nur mit einer geringen Effektstärke in die Beurteilungen eingeht, wurden in Abbildung 12 die Ergebnisse über alle Hörversuchs- und Aufnahmeorte gemittelt dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lästigkeit sowohl mit größer werdender AM als auch mit zunehmendem Immissionspegel ansteigt. Weiterhin lässt sich aus den Abbildungen der stärkste Anstieg der Lästigkeit zwischen 0 dB und 2 dB AM erkennen, d. h. dann, wenn die AM gerade wahrnehmbar wird. Die Ergebnisse der Hörversuche stimmen mit denen von Schäffer et al. [9] überein, die ebenfalls zeigten, dass sich durch die AM die Lästigkeit erhöhte. Weiterhin bestätigen die Hörversuchsergebnisse Resultate aus [11] (Abbildung 9.4, S. 201), in der

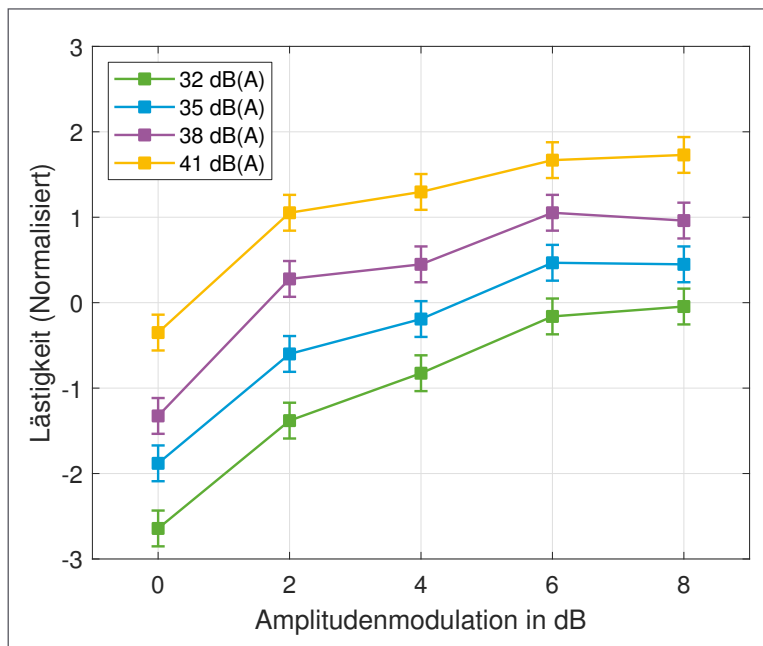


Abb. 12: Normalisierte Lästigkeitsurteile (y-Achse) in Abhängigkeit von der AM (x-Achse) und von dem dargebotenen Immissionspegel (siehe Legende). Dargestellt sind die über die Probanden gemittelten normalisierten Lästigkeitsbewertungen gemittelt über alle Hörversuchs- und alle Aufnahmeorte, sowie die 95 % Inner-Subjekt-Konfidenzintervalle des Haupteffekts für den Faktor AM.

ein stärkerer Anstieg der Lästigkeit für geringe AM festgestellt wurde. Es erscheint sinnvoll, im Falle von perceptiv wahrnehmbaren AM von einer erhöhten Lästigkeit von Windenergieanlagen auszugehen. Bei einer detaillierteren Betrachtung kann auch eine Berücksichtigung in Abhängigkeit von der Stärke der AM erfolgen. Allerdings müssen die hier gefundenen Ergebnisse insbesondere dahingehend weiter evaluiert werden, inwieweit die hier in Fokustests ermittelten Ergebnisse auf die Lästigkeit unter natürlichen Rahmenbedingungen übertragen werden können.

Diskussion

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land“ im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden zahlreiche Aspekte der Geräuschwirkungen der Nutzung von Windenergieanlagen an Land untersucht.

Windenergieanlagen verfügen über eine besondere Geräuschcharakteristik. Diese wurde von Befragten im Umfeld der untersuchten Gebiete insbesondere als „Rauschen“ (womit sie nicht nur kontinuierliches Rauschen, sondern auch „Rauschen in Intervallen“ meinen) oder „Wuschen“ beschrieben. In der akustischen Messtechnik werden diese sich periodisch wiederholenden Geräusche von Windenergieanlagen als Amplitudenmodulation (AM) bezeichnet. Durch die Langzeitschallmessungen konnten amplitudenmodulierte Geräusche an allen fünf Standorten

festgestellt werden. Der Median der Modulationstiefe betrug ca. 1,5 dB bis 2,5 dB (i. d. R. unabhängig von Leistung und Windrichtung). AM wurde sowohl bei geringen als auch bei hohen Immissionspegeln festgestellt. In den untersuchten Gebieten hatten insbesondere der Abstand zur Anlage und die Anzahl der Anlagen einen Einfluss auf die Häufigkeit der amplitudenmodulierten Geräusche und auf die Modulationstiefe. Je mehr Anlagen vorhanden sind, desto weniger ausgeprägt ist die AM. Je größer der Abstand, desto weniger stark ausgeprägt ist die AM. Auf Grund der Unterschiedlichkeiten der Untersuchungsgebiete kann diese Aussage nur bedingt auf andere Standorte übertragen werden.

In den Untersuchungsgebieten wurden Anwohner zur Belästigung durch Geräusche der Windenergieanlagen befragt. Sie waren einer berechneten Geräuschimmissionsbelastung mit einem adressgenau prognostizierten Beurteilungspegel L_r von im Mittel 31 dB in einem Pegelbereich von 16 dB bis 43 dB ausgesetzt. Anhand der Befragungsdaten und Beurteilungspegel wurde die Expositions-Wirkungsbeziehung zum Prozentanteil hoch belastiger Personen (% HA) mittels logistischer Regressionen berechnet. Die Analysen zeigen, dass mit zunehmendem Beurteilungspegel der % HA-Anteil ansteigt. Die lineare Korrelation zwischen Beurteilungspegel und Lärmbelästigung der Anwohner, d. h. der Grad, in dem Beurteilungspegel der WEA-Geräusche und Lärmbelästigungsurteil kovariieren, ist mit $r=0,26$ (für die WEA-Lärmbelästigung insgesamt) allerdings geringer als von anderen Quellen des Umgebungslärs, z. B. Straßenverkehr, bekannt ist (vgl. [13]).

Werden weitere Einflussgrößen der Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen in die Modellierung des % HA-Anteils hinzugefügt, reduziert sich der Erklärungsanteil des Beurteilungspegels.

Das heißt, dass weitere Kontextfaktoren für die Lärmbelästigung mindestens ebenso wesentlich sind wie der Beurteilungspegel. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen der internationalen Lärmwirkungsforschung [7], [8], [14], [15]. Um also in einem Wohngebiet rund um Windenergieanlagen die Belästigung durch WEA-Geräusche zu reduzieren, bedarf es eines holistischen Lärmmanagementansatzes, der die akustischen Aspekte ebenso wie die kontextuellen Einflüsse im Blick hat und Lösungsansätze in einem Gesamtansatz – im besten Fall unter Einbezug der Anwohnerschaft – verfolgt.

Aus der Befragungsstudie wird deutlich, dass AM eine wichtige Geräuscheigenschaft ist, die neben dem Beurteilungspegel mit der Lärmbelästigung von Anwohnern assoziiert ist. Dies zeigt sich in der subjektiven Wahrnehmung des besonders belästigenden Geräuschmerkmals („Wuschen“) als

auch der weitgehenden Korrespondenz von Lärmbelästigung und Auftrittshäufigkeit der erkannten periodischen Amplitudenmodulationen. Konnte die Befragungsstudie Zusammenhänge zwischen Amplitudenmodulation und Lärmbelästigung von Anwohnenden aufzeigen, so konnte im dritten Baustein des Forschungsvorhabens, den Hörversuchen, der Effekt der Amplitudenmodulation auf die Kurzzeitbelästigung auch in kausaler Hinsicht untersucht und quantifiziert werden.

Hierzu wurden im Rahmen der Hörversuche amplitudenmodulierte Geräusche aus den Messungen unter laborähnlichen Bedingungen dargeboten und bewertet. Die teilnehmenden Personen bewerteten die amplitudenmodulierten Geräusche als deutlich lästiger als nicht-amplitudenmodulierte Geräusche. Auffällig war, dass die Lästigkeit deutlich ansteigt, sobald die AM wahrnehmbar ist. Inwieweit sich die in den Hörversuchen unter Laborbedingungen ermittelte Lästigkeit mit einer Erhöhung des mittleren Schalldruckpegels abgleichen lässt, sollte in Folgeuntersuchungen noch weiter evaluiert werden. Zumindest aber korrespondieren die Ergebnisse der Hörversuche mit den Ergebnissen der Befragungsstudie. Danach haben eine AM kennzeichnende Geräuschmerkmale, wie das „Wuschen“ oder das (pulsierend gemeinte) „Rauschen“, einen deutlichen Effekt auf die Lärmbelästigung, und die Lärmbelästigungsunterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten korrespondieren mit der Auftrittshäufigkeit der erkannten periodischen AM.

Mehr noch als die Geräuschpegel und die Amplitudenmodulation scheinen die optische Wahrnehmung der Windenergieanlagen ebenso wie die von den Menschen wahrgenommenen bzw. erwarteten negativen Auswirkungen der lokalen Anlagen für die eigene Region auf das Lärmbelästigungsurteil einzuwirken. Windenergieanlagen-Geräusche stellen demnach, wie es Schick [16] allgemein zum Konzept der Belästigung formulierte, nicht die alleinige Ursache, sondern einen Anlass zur Belästigung dar. Die Lärmbelästigung speist sich dabei möglicherweise aus verschiedenen akustischen und visuellen Merkmalen von Windenergieanlagen ebenso wie aus dem Kontext der Planung, Implementierung und des Betriebs dieser Anlagen. Auch aus diesem Grund schlagen verschiedene Autoren wie Michaud et al. [7] und Hübner et al. [8] die Erfassung eines kombinierten Belästigungskonzepts vor. Dieses fasst die verschiedenen akustischen und visuellen Merkmale von Windenergieanlagen zusammen, die potenziell belästigen können.

Um zu verstehen, warum Geräuschpegel allein die Lärmbelästigungsurteile nicht erklären können, muss man sich die Definition der Lärmbelästigung vor Augen halten. Lärmbelästigung ist keine reine

Schallreaktion. Sie beinhaltet die (1) wiederholte Erfahrung von Störungen durch die Geräusche und der Aufnahme von Verhaltensweisen, diesen Störungen zu entgehen. Sie beinhaltet weiterhin (2) eine emotionale Reaktion auf die Geräusche und durch sie verursachten Störungen und (3) einen wahrgenommenen Verlust an Kontrolle über die Lärmsituation [13]. Ein wahrgenommener Kontrollverlust kann sich ergeben, wenn sich im Wohnumfeld Veränderungen ergeben, die u. a. eine Änderung der Geräuschsituation beinhalten können und auf die die Anwohnenden selbst keinen Einfluss wahrnehmen. Dabei ist es nicht relevant, ob man tatsächlich keine Einflussmöglichkeiten oder Bewältigungsmöglichkeiten bzw. keine Kontrolle hat, sondern, ob Anwohnende diese subjektiv wahrnehmen [17]. Der Grundstein für diese Wahrnehmungen wird bereits bei der Planung der Errichtung von Windenergieanlagen gelegt. Umso wichtiger ist es, bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Planungen den Effekt des breiteren Kontextes von Windenergieanlagen und ihren Geräuschen auf die Lärmbelästigung zu berücksichtigen. Um die Akzeptanz von Windenergieanlagen zu erhöhen und Anwohnenden das Erleben von Kontrolle über die eigene Wohnsituation zu ermöglichen, sollte aus Sicht der Befragten der Nutzen für die Anwohnenden herausgestellt werden. Sie sollten frühzeitig in die Planung der Errichtung von Anlagen einbezogen werden. Das bedeutet nicht, die Situation schön zu reden; auch mögliche negative Veränderungen sollten transparent gemacht werden. Generell zählt das Vertrauen in Verantwortliche zu den wichtigsten Faktoren der Lärmbelästigung. Das gilt für die Belästigung durch Windenergieanlagenlärm [8] als auch für andere Lärmquellen, z. B. Fluglärm [18]. Wird dieses Vertrauen durch keine oder unvollständige Informationsgabe verspielt, löst dies das Lärmbelästigungsproblem nicht. Besser noch als eine reine Gabe von Informationen ist es, Anwohnende in Entscheidungsprozesse rund um die Errichtung von Windenergieanlagen so gut es geht einzubeziehen, um ein Kontroll- und Bewältigungserleben zu ermöglichen.

Literatur

- [1] TA Lärm – Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) (GMBI Nr. 26/1998 S. 503), zuletzt geändert durch Bekanntmachung des BMUB vom 1. Juni 2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5) in Kraft getreten am 9. Juni 2017. 1998.
- [2] DIN ISO 9613-2 DIN ISO 9613-2: Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren, Beuth Verlag GmbH, Berlin. 1999.
- [3] LAI – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz: Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windkraftanlagen (WKA). Überarbeiteter Entwurf vom 17.03.2016 mit Änderungen PhysE vom 23.06.2016,

Sebastian Schmitter
deBAKOM GmbH,
Odenthal

Alexander Alaimo Di Loro
deBAKOM GmbH,
Odenthal

Christoph Pörschmann
TH Köln

Johannes M. Arend
TH Köln

Stephan Großarth
ZEUS GmbH,
Hagen

Dirk Schreckenberger
ZEUS GmbH,
Hagen

- Stand 30.06.2016. https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/20171201-top09_1_anlage_lai_hinweise_wka_stand_2016_06_30_veroeffentlicht_2_1512116255.pdf
- [4] DIN – Deutsches Institut für Normung: NA 001-02-03-19 UA „Schallausbreitung im Freien“. Dokumentation zur Schallausbreitung – Interimsverfahren für Windkraftanlagen, Fassung 2015-05.1. 2015. <https://www.din.de/resource/blob/187138/eb8abdf16f058490895cc3105f700533/interimsverfahren-data.pdf>
- [5] International Organization for Standardization: ISO/TS 15666 (ISO/TS 15666:2021-05). Acoustics – Assessment of Noise Annoyance by Means of Social and Socio-Acoustic Surveys. ISO TC 43/SC 1. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2021.
- [6] Cohen, S.; Williamson, G.M.: Perceived stress in a probability sample of the United States. In: S. Pacepan & S. Os-kamp (Eds.). The social psychology of Health. Newbury Park, CA: Sage. 1988.
- [7] Michaud, D. S. et al.: Derivation and application of composite annoyance reaction construct based on multiple wind turbine features. Canadian J Public Health, Vol. 109, p. 242–251, 2018.
- [8] Hübner, G. et al.: Monitoring annoyance and stress effects of wind turbines on nearby residents: A comparison of U.S. and European samples. Environ Int, Vol. 132, p. 105090, 2019.
- [9] Schäffer, B. et al.: Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: A laboratory study. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 139, No. 5, p. 2949, 2016.
- [10] Schäffer, B.; Pieren, R.; Schlittmeier, S. J.; Brink, M.; Heutschi, K.: Annoyance to wind turbine noise – influence of different acoustical characteristics. In: Proceedings of the Internoise, 2017.
- [11] von Hünerbein, S.; King, A.; Piper, B.; Cand, M.: Wind turbine amplitude modulation: research to improve understanding as to its cause & effect. 2013.
- [12] Pörschmann, C.; Großarth, S.; Arend, J. M.; Schmitter, S.; Schreckenberger, D.; Wunder, K.: Amplitude modulations increase annoyance due to wind turbine noise immission. Proc. Internoise, 2021. <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2589>
- [13] Guski, R. et al.: WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. Int J Env Res Public Health, Vol. 14, p. 1539, 2017.
- [14] Freiberg, A. et al.: Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. Environ Res, Vol. 169, p. 446–463, 2019.
- [15] van Kamp, I.; van den Berg, F.: Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound. Aus: Ac Soc, Vol. 46, p. 31–57, 2018.
- [16] Schick, A.: Das Konzept der Belästigung in der Lärmforschung. Pabst Science Publishers, Lengerich, 1997.
- [17] Glass, D. C.; Singer, J. E.: Urban stress. Experiments on noise and social stressors. Academic Press, New York, 1972.
- [18] Schreckenberger, D. et al.: Attitudes towards authorities and aircraft noise annoyance. Sensitivity analyses on the relationship between non-acoustical factors and annoyance. Proceedings of the 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem, June 18-22, 2017. Zurich, Switzerland, 2017. ■



Das Original.
Glatte, fugenlose Akustiklösungen.

