

Tieffrequente Geräusche in der Windenergieanlagentechnik



Oliver Bunk, Rheine, und Jörn Hoffmeier, Berlin

Zusammenfassung Im Bereich der Erneuerbaren Energien findet die Windenergie in Deutschland mittlerweile große Verbreitung. Mit der fortschreitenden technologischen Entwicklung und der damit verbundenen zunehmenden Größe der Windenergieanlagen (WEA) wachsen auch die Kritikpunkte an der Technik. Einer davon ist die von WEA ausgehende Geräuschimmission. Neben dem eigentlich hörbaren Schall wird oftmals auch von Schall im nicht hörbaren Bereich, dem Infraschall, gesprochen. Schall im Frequenzbereich oberhalb des Infraschalls bis zu $f = 90$ Hz wird tieffrequenter Schall genannt. Im Zuge von mittlerweile mehreren durchgeführten Messungen bezüglich der Abstrahlung und Ausbreitung tieffrequenten Schalls bei Einzelanlagen oder Windparks (WP) und gemäß DIN 45680 kann u. E. gesagt werden, dass die bislang gemessenen WEA i. d. R. keine tieffrequenten Geräusche abstrahlten. Dabei wurden Anlagen mit einer Nennleistung in der Größenordnung von $P_{el} = 500$ kW bis 2 MW und mit Nabenhöhen von $h = 50$ bis 100 m untersucht. In den seltenen Fällen, in denen tieffrequente Geräusche auftraten und gemessen werden konnten, wurden konstante Geräusche festgestellt, die keine zeitliche Schwankungen und keine Modulation aufwiesen. Die tieffrequente Lärmwirkung von WEA konnten gemäß DIN 45680 sehr gut bewertet werden. Offene Fragen hinsichtlich einer endgültigen Handhabung und der Beurteilung bleiben allerdings noch bestehen.

Low-frequency noises in the technology of the wind energy plants

Summary Within the field of the renewable energies the wind energy finds meanwhile a large spreading in Germany. Accompanied with the progressive technological development and the associatively increasing size of the wind energy plants (WEA), the points of criticism at this technology are growing too. One of these points is the noise immission from the wind energy plants. Apart from the really audible sound a normally inaudible sound in the low-frequency range is often mentioned, called infrasound. Sound in a frequency range above infrasound up to $f = 90$ Hz is called low-frequency sound. Meanwhile after several accomplished measurements regarding the low-frequency sound radiation and propagation with single wind energy plants or wind farms and according to DIN 45680 it can be said, that the WEA, measured so far, didn't radiate low-frequency noise usually. Here plants with rated outputs in the order from $P_{el} = 500$ kW to 2.0 MW and with hub heights from $h = 50$ m to 100 m are investigated. In the rare cases, in which low-frequency noise occurred and could be measured, constant noise was found having no temporal fluctuations and no modulation. Therefore, it can be said, that the low-frequency noise effect of wind energy plants could be very well rated according to DIN 45680. Nevertheless regarding to a final handling and assessment open questions still exist.

Schallwellen werden durch das menschliche Ohr erst dann registriert und lösen dabei eine Schallempfindung im Bewusstsein aus, wenn die Schallfrequenz im Bereich $f = 16$ Hz bis 20 kHz und zudem der Effektivwert des Schallwechseldrucks frequenzabhängig mindestens über ca. $p_{eff} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa liegt.

Als Infraschall wird derjenige Schall bezeichnet, dessen Frequenz unterhalb von ca. 16 Hz liegt. Da das menschliche Ohr in diesen Bereichen keine ausgeprägte Hörempfindung mehr besitzt, ist Infraschall in den meisten Fällen nicht wahrnehmbar. Jedoch ist er entgegen der weit verbreiteten Meinung nicht grundsätzlich unhörbar. Besitzt der Infraschall sehr hohe Schalldrücke (ca. 130 dB), ist er wahrnehmbar. Im Wesentlichen werden die überschwelligen Immissionen als Pulsationen und Vibrationen (z. B. Körperschall) wahrgenommen. Dabei empfinden Personen einen Ohrendruck und klagen oft über Konzentrationsschwierigkeiten, Unsicherheits- und Angstgefühle. Parallel können als Effekte das Rütteln von Türen oder Gläserklirren (Sekundärschall), spürbare Vibrationen an Gebäudeteilen und Gegenständen auftreten. Oftmals können sich dabei die langwelligen Schallwellen als stehende Wellen in einem geschlossenen Raum ausbilden oder Gebäudeteile in Resonanz versetzen.

Von natürlichen Infraschallquellen gehen niederfrequente Wellen aus, wie sie bei Erdbeben, Vulkaneruptionen oder Meteoriteneinfall entstehen. Des Weiteren stellt der Fallwind in den Alpen, der sog. Föhn, ebenfalls eine starke Infraschallquelle im Bereich von 0,01 bis 0,1 Hz dar. Technische Quellen sind im Straßenverkehr, als Flugzeuge, in Diskotheken, in Heizungs- und Klimaanlageanlagen oder bei Produktionsmaschinen etc. zu finden.

Tieffrequente Geräusche definieren sich über den Frequenzbereich von ca. 10 bis 90 Hz. In diesem Bereich ist eine Hörempfindung vorhanden, wenn auch die Hörschwelle frequenzabhängig bei 95 dB ($f = 10$ Hz) bis 28 dB ($f = 80$ Hz) liegt (siehe **Bild 1**). Durch die physikalisch bedingte schwache Schalldämmung von Gebäuden bei tiefen Frequenzen einerseits und dem seltenen und damit ungewohnten Auftreten bei natürlichen Geräuschen andererseits geht von dem tieffrequenten Schall innerhalb von Gebäuden eine erhöhte Störwirkung aus. Zur Erfassung dieser Störwirkung wurde die DIN 45680 geschaffen [1]. Diese Norm befindet sich zurzeit in Überarbeitung, um neueste Erkenntnisse aus der Lärmforschung einfließen zu lassen.

In Bezug auf WEA werden die Auswirkungen auf den Menschen, insbesondere auf den Anwohner im Umfeld einer Anlage oder eines WP, kontrovers diskutiert.

Objektive Bewertung von tieffrequenten Geräuschen

Da WEA meist im Außenbereich errichtet werden, greift bei der Beurteilung der Lärmimmissionen der Anlagen in erster Linie die

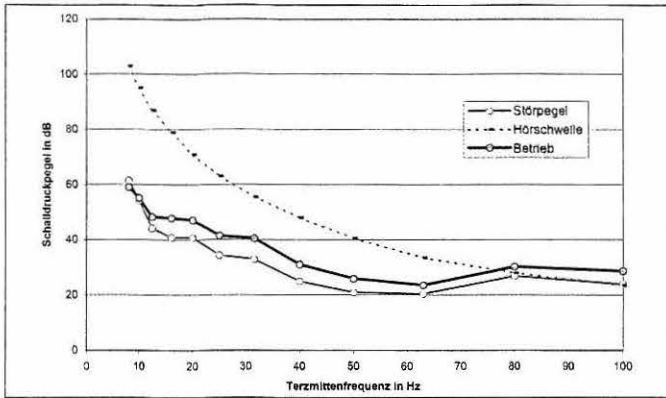


Bild 1 Terzanalyse nach DIN 45680, Anhaltswerte eingehalten (Windpark A).

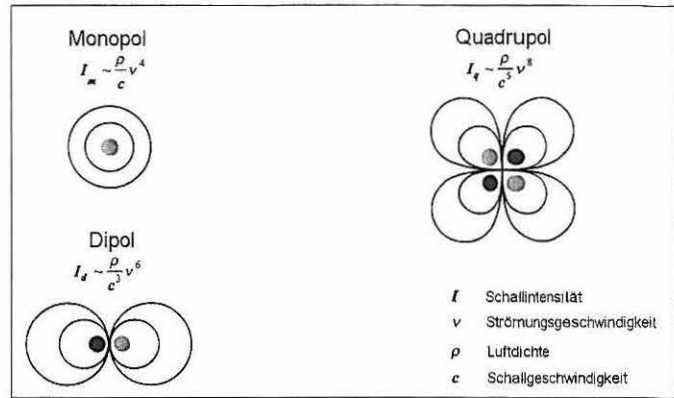


Bild 2 Schematische Darstellung der in der Aeroakustik relevanten Strahlertypen (rote und schwarze Markierungen zeigen 180° Phasenverschiebung an).

TA Lärm [2]. Darin ist ebenfalls eine Berücksichtigung der tieffrequenten Geräusche aufgeführt. Demnach ist zu prüfen, ob von Geräuschen, die vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich < 90 Hz besitzen, umweltschädliche Umwelteinwirkungen ausgehen. Dies ist ebenfalls nach den örtlichen Verhältnissen zu beurteilen. Es wird darauf hingewiesen, dass schädliche Umwelteinwirkungen insbesondere dann auftreten, wenn bei deutlich wahrnehmbaren tieffrequenten Geräuschen in schutzbedürftigen Räumen bei geschlossenen Fenstern die ermittelte Differenz $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ den Wert von 20 dB übersteigt. Sollte dies der Fall sein, so sind nach TA Lärm geeignete Minderungsmaßnahmen zu prüfen.

Im Gegensatz zur TA Lärm, nach der lediglich das Vorhandensein der tieffrequenten Geräusche zu überprüfen ist, soll die Norm DIN 45680 die bestehenden Mess- und Bewertungsverfahren ergänzen und die Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen ermöglichen. In einem ersten Schritt wird die Differenz aus $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ überprüft. Ist die Differenz größer als 20 dB, ist eine detaillierte frequenzabhängige Auswertung notwendig. Dazu werden die Terzpegel (Terzmittenfrequenz 10 bis 90 Hz) mit der Hörschwelle verglichen und bei Überschreitung derselben aufsummiert. Mit der Norm DIN 45680 wird dabei überprüft, ob ein tieffrequentes Geräusch deutlich hervortretende Einzeltöne oder nicht besitzt. Je nach Anwendungsfall sind die Ergebnisse mit den jeweiligen Anhaltswerten zu vergleichen. Sollten die Messergebnisse die Anhaltswerte überschreiten, liegen erhebliche Belästigungen vor. In die Beurteilung fließen dabei nicht nur die mittleren Schalldruckpegel, sondern auch die Spitzenpegel ein. In DIN 45680 existiert dabei noch der Hinweis, dass es sich mit dem Begriff „Anhaltswert“ nicht um einen gesicherten Grenzwert handelt, sondern um empfohlene Werte, die sich auf die bisherigen Erfahrungen bei der Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft gewerblicher Anlagen stützen.

Entstehungsmechanismen von tieffrequenten Geräuschen bei WEA

Die von WEA abgestrahlte Geräuschimmission setzt sich aus mehreren Quellen zusammen. So kann die Geräuschentstehung im Wesentlichen bei den Anlagen in zwei Bereiche, den aerodynamisch und den mechanisch erzeugten Geräuschen, unterteilt werden.

Die an den Rotorblättern vorbeistreichende Luft gilt zunächst als Verursacher für die aerodynamischen Geräusche. Dabei wandert die Luftströmung über das Blattprofil und erreicht die hauptsächlich lärmverursachenden Komponenten der Blatthinterkante und der Blattspitze. Es wird oftmals von einem Rauschen berichtet, das daraus resultiert, dass durch die turbulente Strömung sich keine

diskreten Frequenzen mehr feststellen lassen und die Geräusche der Rotorblätter somit breitbandig abgestrahlt werden. Maßgeblich hängt die Entstehung der aerodynamischen Rotorblattgeräusche von der Form des Rotorblatts und der Gestaltung der Hinterkante sowie der Rotorblattspitze ab. Verändert sich die Form des Rotorblatts während des Betriebs aus Gründen der Stabilität oder der Werkstofffestigkeit ist mit einem veränderten Schallverhalten zu rechnen.

Von Bedeutung ist aber auch die Blattspitzengeschwindigkeit, da diese sowohl für den Anstieg des induzierten Widerstands am Blattende als auch für die Zunahme der Schalleistung mit der fünften Potenz der Geschwindigkeit verantwortlich ist. Da es sich hier um eine fluktuierende Druckbeaufschlagung einer festen Oberfläche handelt, kann der akustische Effekt vereinfacht durch einen Dipolstrahler abgebildet werden (siehe **Bild 2**). Diese Art von Geräuschabstrahlung ist immer dann vorhanden, wenn eine freie oder abgelöste Strömung auf eine Oberfläche auftrifft. An Rotorblättern gilt dies z. B. für den Nachlauf nach dem Strömungsabriss auf der Blattfläche, wenn dieser wieder mit der Hinterkante in Berührung kommt.

Eine weitere Quelle wird von vielen im Abstand der Flügel zum Mast, also der Interaktion zwischen Turm und vorbeistreichendem Flügel, gesehen. Dabei wird angenommen, dass die Luftsäule zwischen Turm und Rotorblatt kurzzeitig komprimiert und wieder entspannt wird. Gesicherte Erkenntnisse mit messtechnischen Nachweisen zu diesem angenommenen Schallentstehungsmechanismus existieren nach unseren Erkenntnissen nicht.

Die mechanisch erzeugten Geräusche stammen im Wesentlichen von drehenden Bauteilen, wie Generator und Getriebe. Weitere Hilfsantriebe, wie z. B. die Azimutverstellung oder Lüfter spielen eher eine untergeordnete Rolle. Aufgrund der Drehbewegung der angesprochenen Komponenten kann es aufgrund der mit der Bewegung verbundenen Schwingungen, wie z. B. Zahneingriffsfrequenzen, Lagerschwingungen, Restunwuchten usw., zu auffälligen und störenden Einzeltönen kommen, wenn sich die WEA in bestimmten Drehzahlbereichen befindet. Je nach Aufbau der WEA und der eingesetzten Komponenten kann es zur vermehrten Abstrahlung von Körperschall kommen. Der Körperschall überträgt sich dann über den Maschinenträger auf den Turm und weiter ins Erdreich. Eine weitere Möglichkeit zur Fortpflanzung der Schallwellen ist der Sekundäreffekt der Luftschallabstrahlung der Bauteile.

Übertragungsmechanismen

Die tieffrequenten Geräuschanteile werden von einer WEA zum Immissionsort auf zwei Arten übertragen: zum einen durch reine

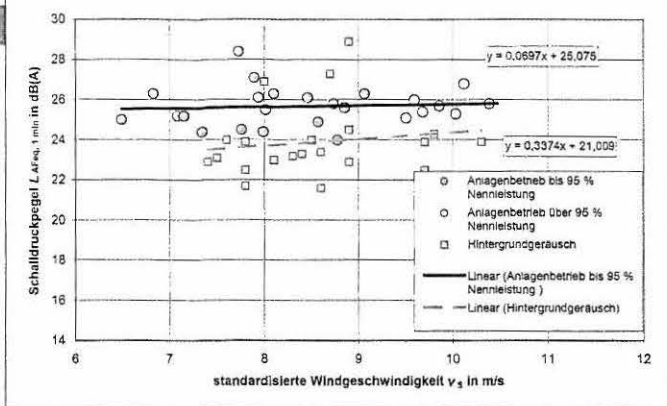


Bild 3 Schalldruckpegel mit der Frequenzbewertung A im Haus zur Beurteilung der Schallimmission über der standardisierten Windgeschwindigkeit.

Luftschallübertragung und zum anderen durch Körperschallübertragung und anschließender sekundärer Luftschallabstrahlung am Immissionsort.

Bei der Luftschallübertragung von tieffrequenten Geräuschen wirkt auf der Strecke zwischen Anlage und Immissionsort nur eine mit der Entfernung zunehmende Pegelminderung (geometrische Dämpfung). Pegelminderungen infolge von Abschattung treten selten auf. Zur Abschattung werden feste luftdichte Hindernisse benötigt, deren Abmessungen groß gegenüber der Wellenlänge sind. So beträgt beispielsweise bei $f = 10$ Hz die Wellenlänge $\lambda = 34$ m. Hierbei ist zu definieren, dass groß gegenüber der Wellenlänge ein Mehrfaches der Wellenlänge bedeutet. In der Praxis treten in ländlichen Gebieten solch enorme feste Hindernisse selten auf. Zumal sie, um auch bei der hochliegenden Quelle WEA zu wirken, sehr dicht am Immissionsort liegen müssen. Weitere Pegelminderungen durch Luftdämpfung sind physikalisch bedingt bei tiefen Frequenzen sehr gering und liegen in der Größenordnung von $\alpha = 0,2$ dB/km bzw. sogar darunter. Auch der Einfluss des Bodens ist bei hochliegenden Quellen naturgemäß geringer als bei Quellen nahe dem Boden. Beim Bodeneffekt muss auch die Wellenlänge mit berücksichtigt werden. So sind die Anteile der Bodendämpfung durch Absorption bzw. Streuung am Bewuchs bei unserem Beispiel mit einer Wellenlänge von $\lambda = 34$ m sehr gering. Auch die mit dem Bodeneffekt berücksichtigten Interferenzen zwischen direktem und reflektiertem Schall wirken aufgrund der großen Wellenlänge nur in größeren Immissionshöhen. Solche Immissionshöhen sind in der Praxis nicht typisch.

Der Nachweisort für tieffrequente Geräusche im Sinne von DIN 45680 liegt im Inneren von Gebäuden. Daher tritt eine Pegelminderung durch die Fassade, insbesondere durch die Fenster, auf. Diese Pegelminderung wird mit dem Schalldämmmaß beschrieben. Durch die Frequenzabhängigkeit des Schalldämmmaßes werden die tiefen Geräuschanteile nicht so stark gemindert wie mittlere oder hohe Frequenzen. Aufgrund der Grenz- bzw. Resonanzfrequenzen von ein- bzw. mehrschaligen Bauteilen in diesem Frequenzbereich kann die Schalldämmung der Außenbauteile bei tiefen Frequenzen sehr gering sein.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass tiefe Frequenzen gegenüber mittleren und hohen Frequenzen geringere Pegelminderungen bei der Luftschallübertragung aufweisen.

Bei der Körperschallübertragung wird der Körperschall der Anlage auf das Erdreich übertragen, im Erdreich als Erschütterung zum Immissionsort weitergeleitet und am Immissionsort durch das Anregen der Umfassungsbauteile vornehmlich bei den Eigenfrequenzen als sekundärer Luftschall abgestrahlt. Nach unseren Erfahrungen spielt dieser Übertragungsweg aufgrund der geringen eingeleiteten Körperschallpegel und der großen Übertragungswege (Abstände > 300 m) bei Windenergieanlagen keine Rolle.

Da der Nachweisort für tieffrequente Geräusche innerhalb von

Räumen liegt, muss die Schallausbreitung im Raum noch berücksichtigt werden. Bei den großen Wellenlängen der tieffrequenten Geräusche kann es nur in sehr großen Räumen zur einer fortlaufenden Ausbreitung einer Welle in den Raum kommen. Bei üblichen Raumgrößen bewegt man sich im sog. modalen Schallfeld bzw. bei noch tieferen Frequenzen im Druckkammermodus. Ein modales Schallfeld setzt sich dabei aus stehenden Wellen zusammen. Diese stehenden Wellen sind stark von der Geometrie des Raums abhängig. Im Raum existieren verschiedene Schalldruckmaxima und -minima. Vor allem an den Begrenzungsflächen, besser noch in den Kanten und Ecken eines Raums, bilden sich tieffrequente Schalldruckmaxima. Im Druckkammermodus kann sich dabei keine stehende Welle im Raum ausbilden.

Messung von tieffrequenten Geräuschen bei WEA

Als akustische Kenngröße ist der Langzeitmittelungspegel nach TA Lärm bzw. DIN 45680 zu bestimmen. Bei Messungen an WEA sind einige Besonderheiten im Vergleich zu Schallpegelmessungen an anderen gewerblichen Anlagen zu beachten. Diese Besonderheiten beziehen sich insbesondere auf den vergleichsweise großen Aufwand zur Trennung von Anlagen- und Fremdgeräusch und auf die Abhängigkeit des Anlagengeräusches von der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe. Dadurch ist das Anlagengeräusch stochastischen Schwankungen unterworfen.

Zur messtechnischen Erfassung von tieffrequenten WEA-Geräuschen werden im Inneren des Gebäudes die Mittelungspegel L_{Aeq} , L_{Ceq} , die Taktmaximal-Mittelungspegel L_{AFreq} (Taktzeit: 5 s) und die Terzspektren ab der Terz mit einer Mittenfrequenz von 8 Hz mit einer Mittelungszeit von 1 min aufgezeichnet.

Schalldruckpegel werden bis zu einer standardisierten Windgeschwindigkeit von 10 m/s in 10 m Höhe bzw. maximal bis zu der Windgeschwindigkeit, die dem 95%-Wert der Nennleistung der WEA entspricht, aufgenommen.

Die standardisierte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe wird bei Anlagenbetrieb bis zu einer Windgeschwindigkeit, bei der die Anlage 95 % der Nennleistung abgibt, aus der abgegebenen elektrischen Wirkleistung bestimmt. Mithilfe der Leistungskennlinie der WEA erfolgt aus den aufgezeichneten Daten der elektrischen Wirkleistung, die bezüglich der Luftdichte noch korrigiert werden müssen, die Ermittlung der Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe. Diese Werte werden nun unter Annahme eines logarithmischen Windprofils mit der vor Ort vorhandenen Rauigkeitslänge (bei großen landwirtschaftlich genutzten Feldern mit geringem Bewuchs Rauigkeitslänge $z_0 = 0,05$ m) auf eine Referenzhöhe von 10 m umgerechnet.

Zur Ermittlung der standardisierten Windgeschwindigkeit $v_{s,Anemom.}$ bei Anlagenbetrieb und einer Windgeschwindigkeit, bei der die Anlage über 95 % der Nennleistung abgibt bzw. ohne Anlagenbetrieb (Hintergrundgeräuschmessung) werden die mit einem Anemometer in 10 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeiten $v_{Anem.}$ herangezogen und über einen Korrekturfaktor, der die systematischen Abweichung zwischen Anemometer- und der Windgeschwindigkeit aus der elektrischen Leistung berücksichtigt, korrigiert. Alle notwendigen Daten müssen synchron aufgezeichnet werden. Damit wird eine Grundvoraussetzung für eine eindeutige Zuordnung der Schalldruckpegel zur Windgeschwindigkeit und damit zum Betriebszustand der WEA geschaffen.

Zur Auswertung werden die A- und C-bewerteten Schalldruckpegel sowohl mit Anlagenbetrieb (Gesamtgeräusch) als auch ohne (Fremdgeräusch) über der standardisierten Windgeschwindigkeit in einem Diagramm dargestellt (siehe **Bilder 3** und **4**). Die Abhängigkeit des Schalldruckpegels von der Windgeschwindigkeit wird

mit der jeweiligen Regression beschrieben. Mithilfe der Regressionsgleichungen kann bei jeder ganzzahligen Windgeschwindigkeit ein mittlerer Schalldruckpegel angegeben werden. Mithilfe dieser Angaben kann, wenn möglich, die Fremdgeräuschkorrektur für die A- und C- bewerteten Pegel vorgenommen und die Differenzen aus $L_C - L_A$ für jede Windklasse gebildet werden. In der Regel sind diese Differenzen größer als 20 dB, d. h. für jede Windklasse muss nun eine Terzanalyse gemäß DIN 45680 erfolgen. Nach der Terzanalyse liegen Einzahlwerte vor, die mit den jeweiligen Anhaltswerten der Norm verglichen werden können.

Beispiele

Interessant wird die Thematik tieffrequenter Geräusche von WEA in besonderen Fällen. So wurde in einem Fall einer Messung in einem Raum, in dem sich Menschen i. d. R. dauerhaft aufhalten keine tieffrequenten Geräusche festgestellt. Lediglich in einer Raumecke konnten tieffrequente Geräusche nachgewiesen werden. Da sich in diesem Fall keine Person regelmäßig in der Raumecke aufhielt, wurde gutachterlicherseits empfohlen, diese tieffrequente Bewertung nicht zu berücksichtigen. Allerdings kann durch einfaches Umstellen der Möbel eine ganz andere Situation geschaffen werden. Wird z. B. eine Sitzgelegenheit in die besagte Ecke gestellt, so müssten die tieffrequenten Geräusche im Sinne der Norm DIN 45680 als unzulässig bewertet werden.

Ist eine tieffrequente Vorbelastung vorhanden, so darf durch die Zusatzbelastung der Windenergieanlage keine Verschlechterung der Geräuschsituation auftreten. In einem weiteren Fall einer schalltechnischen Messung wurden tieffrequente Geräusche ausgehend vom Betrieb der WEA festgestellt. Das Maximum des Schalldruckpegels lag in der Terz mit der Mittenfrequenz von $f = 40$ Hz. Das Fremdgeräusch war ebenfalls tieffrequent, allerdings bei einem Maximum des Schalldruckpegels in der Terz mit der Mittenfrequenz von 63 Hz. Offen ist die Bewertung in einem solchen Fall. Nach einem einfachen Ja-Nein-Kriterium (Anlagengeräusch ist tieffrequent oder nicht), wie in der bisherigen Fassung der Norm DIN 45680 angegeben, wäre der Betrieb der Anlagen zulässig, da bereits ohne Anlagen tieffrequente Geräusche vorliegen. Vom immis-sionsrechtlichen Standpunkt darf es bei schon überschrittenen

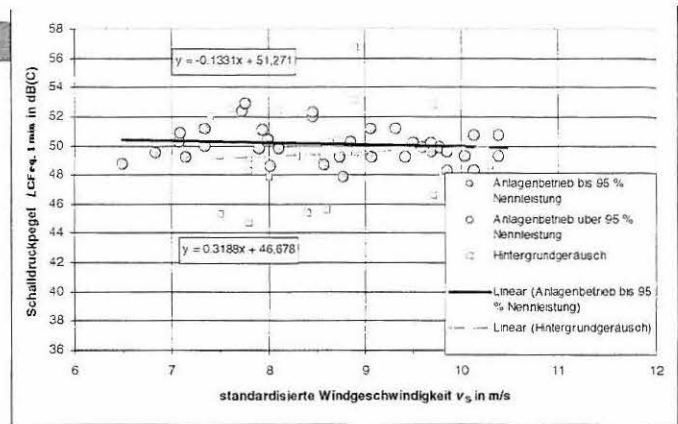


Bild 4 Schalldruckpegel mit der Frequenzbewertung C im Haus zur Beurteilung der Schallimmission über der standardisierten Windgeschwindigkeit.

Richtwerten durch den Betrieb von gewerblichen Anlagen zu keiner Verschlechterung der bisherigen Geräuschsituation kommen. Demnach wäre der Betrieb im beschriebenen Fall nicht zulässig.

Maßnahmen gegen tieffrequente Geräusche

Auf der Anlagenseite können maschinenakustische Geräusche beim heutigen Stand der Technik sehr weit gemindert werden. So können die mechanischen Komponenten, vor allem das Getriebe, schwingungsarm ausgelegt und durch eine hohe Qualitätssicherung bei der Produktion umgesetzt werden. Eine Übertragung der verbleibenden Restschwingungen des Maschinensatzes wird durch eine schwingungstechnische Entkopplung vom Maschinenträger bzw. vom Turm wirkungsvoll bedämpft.

Der nicht unerhebliche Luftschallanteil ausgehend vom Maschinensatz bzw. der Lüftungstechnik in der Gondel wird durch eine Auslegung der Gondel als akustisch wirksame Kapsel gemindert. Unter Beachtung ökonomischer Gesichtspunkte ist hier eine sinnvolle Auslegungen der Kapsel bei Berücksichtigung des Spektrums möglich. Zweischalige Aufbauten haben sich nicht durchgesetzt. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Massen liegt die Koppelresonanz der beiden Schalen - und damit eine geringe Schalldämmung - immer im relevanten Frequenzbereich.

Auf Immissionsseite kann der Eintrag von tieffrequenten Geräuschen in das Innere von Gebäuden wirkungsvoll durch die Erhö-

 <p>Geotextilien GmbH</p>		<h2 style="text-align: center;">Gabionen</h2> <p style="text-align: center;">mit doppelter Haltbarkeit</p>
	<ul style="list-style-type: none"> » Besserer Korrosionsschutz durch Spezialaluverzinkung » Sehr wirksamer Schall- und Emissionsschutz » Verwendung für Hangschutz, Böschungen, Dichtungs- und Erosionsschutz, Bahndämme, Landschaftsgestaltung, Stützwände, Sichtschutz » Schnelle, kostengünstige Variante für den Kommunalbau, Wohnungsbau, Straßenbau 	<p>Wir freuen uns auf Ihre Anfrage!</p> <p>Hoy Geokunststoffe GmbH Zum Wiesengrund 5 01723 Kesselsdorf (Gewerbegebiet)</p> <p>Telefon: 035204/ 701 10 Telefax: 035204/ 701 20</p> <p>E-Mail: wolfgang.schmauser@hoy-geotextilien.de Internet: www.hoy-geotextilien.de</p>
<p>Gabionen * Vliese * Geogitter * Dichtungs- und Bewehrungsmaterialien</p>		

Die Schalldämmung der Außenbauteile bei Frequenzen unter $f = 100$ Hz vermindert werden. Die Schalldämmung von Fassaden bei Massivhäusern wird i. d. R. von den Fenstern bestimmt. Fenster sind zweischalige Bauteile. Durch die Zweischaligkeit wird die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen durch den Einbruch der Schalldämmung und der damit verbundenen Koppelresonanz der beiden Schalen hervorgerufen. Sie wird durch die Masse der Scheiben und dem zwischen den Scheiben eingeschlossenen Luftvolumen als Feder bestimmt und liegt bei typischen Einfamilienhausfenstern bei ungefähr $f = 125$ Hz. Diese Resonanzfrequenz kann durch Erhöhung der Scheibenmasse (Glasdicke) und durch Vergrößerung des Scheibenzwischenraums zu geringeren Frequenzen hin verschoben werden. Hier ist allerdings eine sorgfältige Dimensionierung in Abhängigkeit vom anregenden Spektrum erforderlich. Fallen jedoch Anregung und Koppelresonanz zusammen, wird der Schall verstärkt ins Innere übertragen. Die Koppelresonanzfrequenz muss also deutlich tiefer als die Hauptanregung auf das anregende Spektrum abgestimmt werden.

Eine eher theoretische Möglichkeit der Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen ist die Verschiebung der Eigenfrequenzen der Bauteile. Bei fertigen Häusern sind solche massiven Eingriffe in die Bausubstanz unökonomisch. Lediglich bei Neubauten kann durch eine detaillierte bauakustische Dimensionierung der Außenbauteile eine ausreichende Schalldämmung auch bei tiefen Frequenzen sichergestellt werden.

Bei einigen Raumgeometrien, wie z. B. parallele nicht gegliederte Umfassungsbauteile, bei Primärabmessungen, die untereinander ganze Vielfache bilden, sind die Eigenmoden (stehende tieffrequente Wellen) des Raums besonders ausgeprägt. Hier kann es dadurch bereits bei geringem tieffrequenten Schalleintrag zu Belästigungen kommen. Ein sicheres Zeichen, dass stehende Wellen maßgeblich beteiligt sind, ist eine starke Ortsabhängigkeit des Schalldruckpegels. Bei tieffrequenten Geräuschen steigt der Schalldruckpegel zu den Raumkanten und -ecken hin an. Stimmen die anregende Frequenz mit der Eigenfrequenz des Raums überein, ist theoretisch ein Anstieg des Schalldruckpegels an den Wänden um 3 dB, in den Kanten um 6 dB und in den Ecken um 9 dB möglich. Durch Vermeidung bzw. Bedämpfung der ausgeprägten Eigenmoden können die tieffrequenten Schalldruckmaxima gemindert werden.

Damit die niedrigsten Eigenfrequenzen bei Rechteckräumen nicht aufeinanderfallen, ist es zweckmäßig, dass sich Höhe, Breite und Länge merklich voneinander unterscheiden (etwa 1: 1,3: 1,6). Der Unterschied soll aber andererseits auch nicht zu groß sein (längste Diagonale kleiner 1,9 mal dritte Wurzel aus dem Volumen V).

Werden parallele Wände vermieden, prägen sich auch die Eigenmoden nicht so stark aus. Durch den unterschiedlichen Wandabstand kommt es zur „Verschleifung“ der Mode. Auch ein Auffalten, Schrägstellen oder Gliedern der Wände wirkt ausgeprägten Moden entgegen.

Berücksichtigung von tieffrequenten Geräuschen bei Schallprognosen mit WEA

Schallimmissionsprognosen mit Windenergieanlagen, die im Verdacht stehen, tieffrequente Geräusche zu erzeugen, verursachen Unsicherheiten. Ausgangsbasis der Schallimmissionsprognose sind Emissionsmessungen im Nahbereich der Anlage. Bei der Vermessung des Schalleistungspegels von WEA wird das Verfahren zur Ermittlung von Tonzuschlägen nach IEC 61400-11 [4] auch im Frequenzbereich unter 90 Hz angewendet. Es können also Tonzuschläge für Geräusche unter $f = 90$ Hz vorhanden sein. Diese Angaben beziehen sich auf den Nahbereich und sind auf den Fernbe-

reich nicht unbedingt übertragbar. Die Immissionsorte befinden sich allerdings i. d. R. im Fernbereich. Für den Übergang vom Nahbereich zum Fernbereich (300 m) gibt es für die Umrechnung der Tonzuschläge entsprechende Konventionen. Bei Immissionsmessungen wird der Tonzuschlag objektiv nach DIN 45681 [3] ermittelt. Das dort verankerte Verfahren beginnt erst ab 90 Hz. Geräuschanteile unter 90 Hz werden mit Verweis auf die DIN 45680 ausdrücklich nicht berücksichtigt.

So kann geschlussfolgert werden, dass für tonale Komponenten unter 90 Hz für den Außenbereich im Fernfeld keine sichere Beurteilungsgrundlage vorhanden ist. Eine Beurteilungsgrundlage für diese Schallkomponenten liegt lediglich für das Innere von Gebäuden vor. Der Übergang vom Außenbereich zum Rauminneren sind im Rahmen einer Schallimmissionsprognose für Windenergieanlagen nicht zu vollziehen. Bei einer Schallimmissionsprognose für Windenergieanlagen wird nach dem alternativen Verfahren nach DIN 9613-2 [5] gerechnet. Es liegen somit keine Frequenzspektren am Immissionsort vor, sondern lediglich der A-bewertete Einzahlwert. Für den Übergang zum Innenbereich muss mit der frequenzabhängigen Schalldämmung gerechnet werden. Mess- oder Erfahrungswerte für die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen liegen aber kaum vor.

Fazit

In der Regel treten keine tieffrequenten Geräusche in der Nachbarschaft von WEA oder WP auf. Trotzdem sollten Beschwerden von benachbarten Anwohnern ernst genommen werden. Mithilfe eines messtechnischen Nachweises kann das Vorhandensein von tieffrequenten Geräuschen überprüft und beurteilt werden. Unsere messtechnische Praxis zeigt allerdings auch, dass tieffrequente Geräusche oftmals auf andere Quellen zurückzuführen sind.



Dipl.-Ing. **Oliver Bunk**, KÖTTER Consulting Engineers KG, Rheine, Dipl.-Ing. **Jörn Hoffmeier**, KÖTTER Beratende Ingenieure Berlin GmbH.

Literatur

- [1] DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Berlin: Beuth Verlag 1997.
- [2] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998. GMBI. Nr. 26 vom 28. August 1998, S. 503.
- [3] DIN 45681: Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen. Berlin: Beuth Verlag 2005.
- [4] DIN 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag 1997.
- [5] IEC 61400-11: Turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Dezember 2005.