

Amplitudenmodulation (AM) bei Windenergieanlagen: Ausblick auf tieffrequente Geräuschanteile

Sergio Martinez ¹, Florian Fennel ¹, Kai Pies ²

¹ TÜV Rheinland Energy GmbH, Florian.Fennel@de.tuv.com, sergio.martinez@web.de

² Schalltechnisches Ing.-Büro Pies GbR, kpies@schallschutz-pies.de

Einleitung und Zielsetzung

Die Veröffentlichung [1] geht ausführlich auf die Charakteristik der Geräusche in Bezug auf die Amplitudenmodulation (AM) bei Windenergieanlagen (WEA) ein. In den aktuellen Untersuchungen zur AM werden systematisch Hochpassfilter bei 200 Hz (vgl. z.B. [2] und [3]) zur Analyse der AM verwendet. Damit sollen „entkoppelte“ niederfrequente Einflüsse bei der Erfassung der AM des Gesamtpegels vermieden werden. Diese Betrachtungsweise legt die Frage nahe, ob nicht bei niedrigeren Frequenzen als 200 Hz auch eine andere bzw. vergleichbare Art der AM auftreten kann, die sich immissionsseitig ebenfalls als belästigend erweisen kann.

O. Bunk und J. Hoffmeier [4] untersuchten 2007 tieffrequente Geräusche bei WEA. Sie geben an, dass „in den seltenen Fällen, in denen tieffrequente Geräusche auftraten und gemessen werden konnten, konstante Geräusche festgestellt wurden, die keine zeitliche Schwankung und keine Modulation aufwiesen.“ Die Auswertungen erfolgten entsprechend der DIN 45680 [5]. Die Autoren gehen in [4] u.a. auf die verschiedenen Ursachen der tieffrequenten Geräusche ein. Demnach ist nicht nur der „Außenpegel“ am entfernten Immissionsort tieffrequenter als in der unmittelbaren Nähe der WEA, sondern auch im „Inneren“ eines Gebäudes. Dies bedingt, dass Geräuschimmissionen im Sinne von DIN 45680[5] zu untersuchen sind.

Zu dieser Norm gibt es einer Entwurfsfassung [6] und einen ausführlichen Forschungsbericht [7]. Die Untersuchungen von Stephen E. Keith et. al [8] stellen darüber hinaus eine grundlegende Arbeit dar. Die Autoren haben eine Art „big-data“ Erhebung in Canada durchgeführt, um die Geräuschimmissionen vor 1238 Wohnungen in der Nachbarschaft von insgesamt 399 WEA mit elektrischen Nennleistungen von 660 kW bis 3 MW zu ermitteln. Der Zusammenhang zwischen dem C-bewerteten und dem A-bewerteten Gesamtpegel durch WEA „Außen“ schätzen sie wie folgt ab:

$$L_{Ceq} = 0,514 L_{Aeq} + 34,4 \text{ (s. Gl. (1) in [8])}$$

Aus dieser Gleichung folgt indirekt, dass für L_{Aeq} zwischen 30 dB(A) und 40 dB(A) die Differenz $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 15$ dB ist. Im Sinne von [6] und bei einer Beurteilung „ohne Schalldurchtritt“ (vgl. [7]) ist dies ein Hinweis auf beurteilungsrelevante tieffrequente Geräusche „Innen“.

Im Jahr 2011 untersuchten H. Møller und C. S. Pedersen [9] in ähnlicher Art die Geräuschemissionen von 48 WEA. Ein Schwerpunkt der Arbeit war die Ermittlung von Musterspektren. In Verbindung mit einer geeigneten Ausbreitungsrechnung können sie einerseits zu einer Abschätzung der Immissionspegel „Außen“ und andererseits - bei entsprechenden Annahmen zu den Räumlichkeiten und zur üblichen Bauqualität - zur Bestimmung der zugehörigen

beurteilungsfähigen Immissionspegel „Innen“ kommen. Die Autoren merken an, dass bei Außenpegeln bei 44 dB(A) das Risiko besteht, dass ein hoher Anteil an Belästigungen „Innen“ durch tieffrequente Geräusche entsteht. In diesem Zusammenhang wird die folgende Aussage getroffen: „problems are much reduced with an outdoor limit of 35dB(A)“. Auf die AM geht diese Studie so gut wie nicht ein.

In ihren Arbeiten [11] und [12] gehen K. Hansen et. al auf tieffrequente Geräusche „Außen“ und „Innen“ von Windparks in großen Entfernungen (z.B. 2 km) ein. In der aktuellen Literatur [13] aus 2018 versuchen P. Thorsson et al. aus einer Kombination von Messergebnissen eine Modellierung die Schallpegeldifferenzen „Außen“ vs. „Innen“ zu bestimmen. Ziel ist es, bei der Planung von Windparks bzw. einzelnen Anlagen eine Prognose des Innenpegels in Wohnräumen zu ermöglichen. Aus [13] geht hervor, dass ab 40 dB(A) das Risiko schädlicher Einwirkungen bereits ansteigt. Grund hierfür ist der Einfluss der tiefen Frequenzen. Methodisch gehen die Autoren dabei von einem Basis-Spektrum aus, das synthetisch mit Modulationseffekten kombiniert werden kann. Zusätzlich wird eine „normierte“ Schallpegeldifferenz „Außen-Innen“ benötigt. Die Zielsetzung der Autoren ist also durchaus vergleichbar mit denen der Untersuchung [7] bezüglich des „Schalldurchtritts“.

Ein Ergebnis aus [13] ist die Tabelle 2 ([13]), wonach der „Schalldurchtritt“ (WiTNES level difference data ΔL_p) frequenzabhängig im Terzbandbereich 20 Hz bis 800 Hz angegeben wird, so dass eine konservative Prognose von Rauminnenpegeln bei den üblichen Außenpegeln durch WEA und Windparks möglich wird. Die nachfolgende Tabelle 1 ist ein Auszug aus der o.a. Tabelle 2 aus [13] im Frequenzbereich von 20 Hz bis 160 Hz.

Tabelle 1: WiTNES level difference ΔL_p (Außenpegel Innenpegel) (vgl. „Schalldurchtritt“ nach [7]) für Räume in der Nachbarschaft von WEA bzw. Windparks.

Terzband-Frequenz in Hz	20	25	31,5	40	50
Differenz ΔL_p	3,0	3,0	3,2	4,1	4,7
Terzband-Frequenz in Hz	63	80	100	125	160
Differenz ΔL_p	5,6	6,7	8,0	9,4	11,2

Auf der Basis dieser Daten kann exemplarisch eine Beurteilung von WEA-Geräuschen für tiefe Frequenzen in Anlehnung an E DIN 45680 [6] durchgeführt werden.

In Rahmen dieser Arbeit werden die Untersuchungen zur AM aus [1] auf den Bereich tiefer Frequenzen erweitert. Im ersten Schritt werden AM-Analysen, die bisher nur für den Gesamtpegel in der A-Bewertung durchgeführt wurden,

analog auf die Zeitverläufe des unbewerteten Gesamtpegels und die Terzbandpegel angewandt. Das Ergebnis ist eine Auswertung der AM für einen Frequenzbereich zwischen etwa 8 Hz und 2 kHz, jeweils abhängig von den vorhandenen Datensätzen.

Exemplarisch werden Messungen an einer einzelnen WEA sowie Zeitausschnitte aus den Messungen nach Tabelle 2 in [1] herangezogen. Die Messdaten lassen sich hinsichtlich der Breite der AM in den o.a. Terzbänder nach dem Wavelet-Verfahren analysieren. In einem zweiten Schritt werden die gemessenen Terzbandspektren (lang-)zeitlich gemittelt (20 Minuten Mittelwerte) und mit Hilfe der o.a. WITNES - Korrektur nach Tabelle 1 in prognostizierte Rauminnenpegel für beurteilungsrelevante Wohnräume überführt. Anschließend erfolgt, im dritten Schritt, eine Analyse nach E DIN 45680 [6] auf Basis der im Beiblatt 1 angegebenen Anhaltswerte A_H für die Kenngröße der tiefen Frequenzen H (s. Tabelle 2 in Beiblatt 1 zu [6]).

Quantifizierung der AM für die Terzbandpegel

Um von ausgewählten Zeitausschnitten die Breite der Amplitudenmodulation in Terzbändern zu bestimmen, wurden Messdaten nach [1] anhand des Wavelet-Verfahrens neu ausgewertet. Dabei kann festgestellt werden, dass die Zeitreihen der Terzbandpegel untereinander nicht streng synchron sind und dass womöglich durch den Dopplereffekt und die fehlende Stationarität der Betriebszustände die „Schärfe“ der Frequenzen leidet.

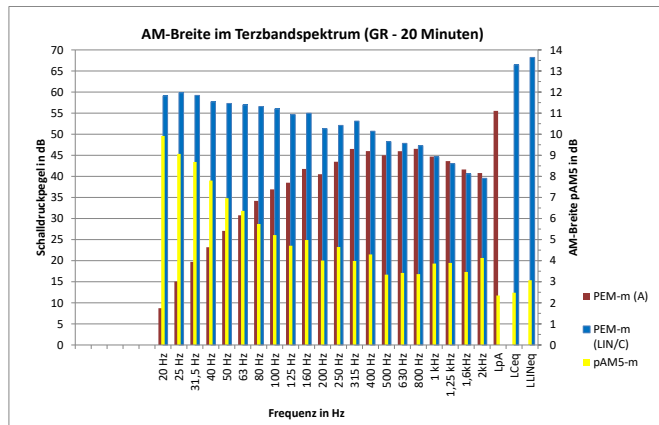


Bild 1: Ergebnisse der AM-Auswertung in Terzbändern. Einzel-WEA. Grenzflächenmikrofon am Referenzmesspunkt [10]. NH = 100 m, RD = 77 m. R1 ≈ 150m. Messungen in rd. 8 Hz Takt, „fast“. Schalldruckpegel Leq: Linear (LIN) und in A Bewertung, RDZ bis ca. 18,2 Umin-1. P_{el} der WEA 1,5 MW.

Die **Bilder 1, 2 und 3** zeigen die Ergebnisse der Analysen, wenn man das Wavelet-Verfahren nach [1] zur Bestimmung der Breite der Amplitudenmodulation in Form der Kenngröße p_{AMS5} auf die Pegelzeitverläufe der Terzbänder in den Zeitreihen der Terzbandpegel anwendet. Vorliegend gehen 10 Zeitausschnitte je Datensatz in die Auswertung mit ein. Insgesamt wurden ~ 800 Daten-Zeitausschnitte ausgewertet.

Die in **Bild 1, 2 und 3** dargestellten Ergebnisse stellen jeweils die Mittelwerte dar und lassen sich wie folgt interpretieren:

1. Die Breite der AM, ausgedrückt durch die Größe p_{AMS5-m} (Mittelwert der einzelnen p_{AMS5} -Werte) nimmt bei Windparks mit der Terzband-Frequenz ab. Es

lassen sich zwei Bereiche erkennen: Im Frequenzbereich über 125 Hz liegen die Mittelwerte p_{AMS5-m} zwischen 3 dB und 6 dB. Unter 125 Hz nimmt in allen Fällen der Wert vom p_{AMS5-m} zu und erreicht bei 20 Hz Werte von 10-13 dB, also ein Vielfaches im Vergleich zu den Werten im Bereich über 125 Hz.

2. Die Breite der AM ist beim Gesamtpegel (z.B. L_{pAeq} -Gesamt) insgesamt niedriger als die Breite in den Terzbändern. Dies entspricht den Erkenntnissen aus anderen Literaturquellen (vgl. [1]) und lässt darauf schließen, dass ein „Kompensations-Effekt“ vorliegen kann. Einen ähnlichen Effekt kennt man bei den Messunsicherheiten, wenn viele Quellen mit unterschiedlichen Messunsicherheiten zu einem Gesamtpegel überlagert werden. Die zeigt das Bild 2, bei dem eine Auswertung der Teilpegel bis 160 Hz eine höhere AM-Breite aufweist, als die Auswertung des Gesamtpegels.
3. Bei der Größenordnung der ermittelten AM-Breiten der der Terzbänder bei tiefen Frequenzen scheint es nicht ausgeschlossen, dass das mögliche Belästigungspotential von WEA Geräuschen bei tiefen Frequenzen innerhalb von Räumen verstärkt wird.

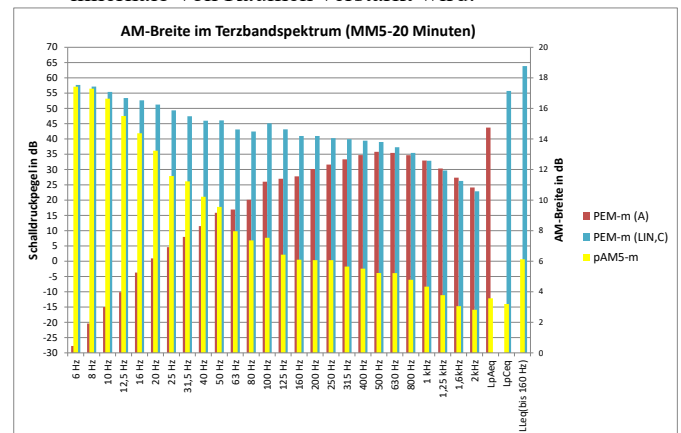


Bild 2: AM-Auswertung in Terzbändern. Windpark mit 6 WEA. Die WEA (1-3) haben P_{el} = je 3,3 MW und L_{WA} = 106,5 dB(A). Die WEA (A-C) haben P_{el} = je 2 MW und L_{WA} = 103,2 dB(A). Abstand des Immissionsortes zur nächsten 3 WEA rd. 600 m. Auswertedauer 20 Minuten (03.00 h-03.20 h), Gegenwind, Windstärke 4. Windpark MM5 (vgl. [1]). Messungen in 10Hz Takt, sonst wie **Bild 1**

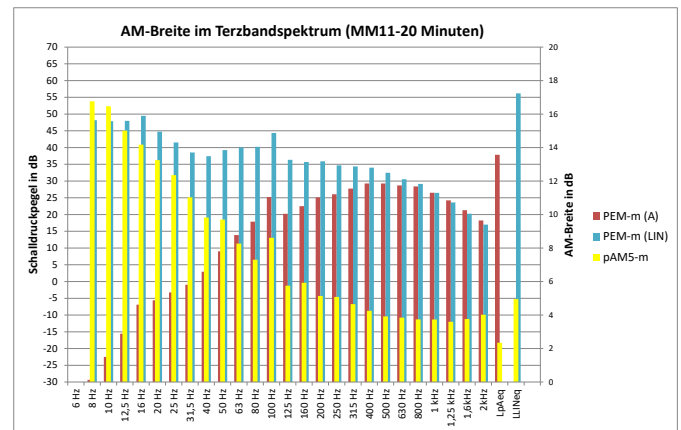


Bild 3: Ergebnisse der AM-Auswertung in Terzbändern-Windpark MM11 (wie MM5 in Bild 2), Auswertedauer 20 Minuten 02:00 h-02:20 h, Querwind, Windstärke 2-3. Messungen sonst wie **Bild 2**.

Auswertungen im tieffrequenten Bereich

Zum Einfluss der Amplitudenmodulation innerhalb von Räumen sind keine detaillierten Studien bekannt, auch wenn z.B. in [11]-[12] bei der Beurteilung zahlreicher Messreihen diese Thematik angesprochen wird. Eine Möglichkeit zur Ermittlung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen „Innen“ sind Messungen nach E DIN 45680 [6]. Hier werden für die Beurteilung keineswegs Grenzwerte vorgeschlagen, sondern Anhaltswerte (s. [6], Beiblatt 1) für „ständig einwirkende bzw. wiederholt auftretende Geräusche“ verwendet. Die Anhaltswerte „gelten in Aufenthaltsräumen, die Wohnzwecken dienen und in Räumen mit vergleichbarer Schutzwürdigkeit unabhängig von der Lage des Gebäudes“ [6]. Man unterscheidet den Anhaltswert A_0 für die maximale gewichtete Schwellenüberschreitung UD_{max} und den Anhaltswert A_H für die Kenngröße H bei den tiefen Frequenzen. Die jeweils größere Überschreitung ist dann für die Beurteilung maßgebend. In unserem Fall beschränken wir uns auf den Anhaltswert A_H . Dabei gelten folgende Anhaltswerte A_H nach Tabelle 2 im Beiblatt 1 zu [6] für die Kenngröße H bei tiefen Frequenzen:

Tabelle 2: Anhaltswerte für die Kenngröße H für tiefe Frequenzen [6].

Beurteilungszeitraum T_r	A_H
Tag	30
Ruhezeiten	25
Nacht	20

Häufig wirken mehrere WEA bzw. ganze Windparks auf einen einzelnen Immissionsort ein. Die Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach E DIN 45680 [6] lässt sich auch auf diese Immissionen anwenden. Alleine eine Beurteilung auf der Basis der Geräuschimmissionen einer einzelnen WEA, typisiert durch Messberichte nach [10], ist ggf. nicht ausreichend. In größerer Entfernung und bei vielen WEA sind erwartungsgemäß höhere Pegel als bei einer Einzelanlage zu erwarten. Im Sinne einer „Prognose“ werden nachfolgend die gemessenen Werte im Bereich von 8 Hz bis 125 Hz bei den Windparks aus der Arbeit [1], Tabelle 2 herangezogen. Hier liegen Messdaten in Abständen von rd. 600 m (Windpark MM), 800 m (Windpark PPIES-B4) und 1000 m (Windpark PPIES-B1) vor. Auf der Basis dieser Daten erfolgt eine Auswertung für je 20 Minuten-Zeitabschnitte mit Berechnung der mittleren Terzbandpegel für den Frequenzbereich 8 Hz bis 16 kHz. Entsprechend [6] wurden dann nur die Terzbänder zwischen 8 Hz und 125 Hz weiterverwendet. Sie stellen im Rahmen einer konservativen Betrachtung den Schallpegel „Außen“ vor den jeweiligen Immissionsorten als $L_{pTerz5,Außen}$ nach [6] dar. Eine Fremdgeräuschkorrektur ist im vorliegenden Fall nicht erforderlich, da die WEA-Geräusche durchgehend pegelbestimmend sind.

Auf die Messdaten wird anschließend in Anlehnung an die Studie von M. Schmidt et al. [7] die in **Tabelle 1** angegebene $WITNES$ level difference ΔL_p (Außenpegel – Innenpegel) nach [13] angewendet. Aus dieser Funktion für den „Schalldurchtritt von außen nach innen“ lassen sich Geräuschimmissionen innerhalb von Räumen in der Nachbarschaft von WEA abschätzen.

Hieraus ergibt sich zumindest für den Auswertungsbereich von 20 Hz bis 125 Hz die Eingabegröße L_{pTerz5} gemäß [6] wie folgt:

$$L_{pTerz5} = L_{pTerz5, Außen} - \Delta L_p$$

Mit diesen Ausgangsdaten L_{pTerz5} im Bereich von 20 Hz bis 125 Hz kann die Kenngröße für tiefe Frequenzen H nach [6] berechnet und das Ergebnis mit dem Anhaltswert A_H nach **Tabelle 2** verglichen werden. Die Auswertung zeigen die nachfolgenden **Tabellen 3, 4 und 5** für die dargestellten Beurteilungen nach E DIN 45680 [6]. Die dazugehörigen unbewerteten Teil-Terzbandspektren sind in **Bild 4, Bild 5 und Bild 6** dargestellt.

Tabelle 3: Terzbandpegel und Überschreitungen der Anhaltswerte A_H nach [6]. Windpark MM, Auswahl aus Windpark MM1-MM12 [1], verschiedene Nächte.

Windpark MM, L_{Aeq} 600 m												
Terz [Hz]	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10	MM11	MM12
8	39,5	66,7	50,1	60,0	57,2	57,0	50,6	50,2	46,7	57,6	48,7	43,0
10	37,5	65,7	48,6	57,8	55,4	55,9	50,3	50,2	45,9	55,7	48,2	42,6
12,5	39,4	63,6	47,7	55,5	53,1	54,3	49,8	51,4	45,6	53,6	48,2	44,4
16	37,1	60,9	47,6	53,5	52,8	51,4	48,9	50,2	44,6	52,6	49,7	45,0
20	34,6	58,6	45,2	51,9	51,4	50,7	48,3	46,6	44,1	48,9	44,9	44,0
25	32,8	55,7	44,2	49,9	49,6	47,4	47,1	43,3	40,8	46,0	41,7	39,2
31,5	32,1	53,2	41,8	47,8	47,7	44,4	44,6	40,6	37,9	43,6	38,9	38,2
40	30,0	50,8	41,0	46,3	46,2	41,0	39,1	39,0	37,3	40,1	37,6	35,1
50	30,1	49,7	43,0	46,0	46,2	41,6	36,9	40,4	36,7	39,5	39,4	37,5
63	29,1	47,3	39,0	43,7	43,4	43,7	38,8	41,6	37,4	39,2	38,5	34,6
80	30,2	46,2	42,2	42,8	42,8	44,9	41,2	41,6	40,5	40,9	39,4	41,8
100	31,2	45,3	44,3	44,8	44,4	44,9	42,5	43,5	39,9	43,8	44,6	42,9
125	28,2	45,8	37,7	43,0	43,2	45,7	44,6	40,5	34,5	40,5	36,5	34,5
160	27,0	42,7	37,8	41,2	41,2	42,1	40,2	39,3	34,6	38,2	35,8	34,0

Auswertung mit WITNES												
Tag	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ruhezeiten	6	2	3	3	4	2	2	0	1	1	0	0
Nacht	11	7	8	8	9	7	7	3	6	6	5	5
L_{Aeq}	31,9	46,1	44,0	44,2	43,7	44,3	42,8	40,9	35,8	40,6	37,9	36,8

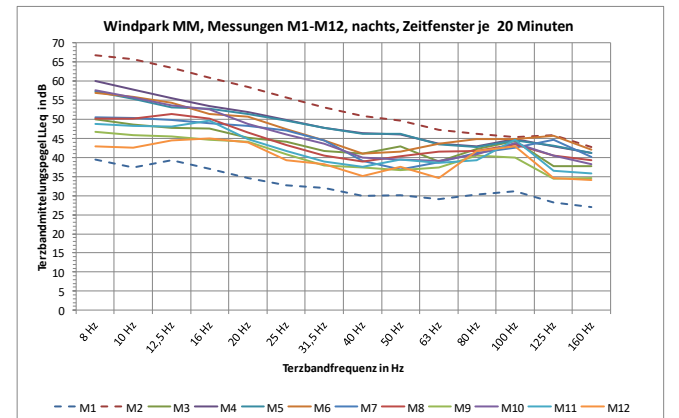


Bild 4: Terzbandspektren (Teil) Windpark MM (aus MM1 bis MM12), Auswertedauer 20 Minuten. Messwerte s. **Tabelle 3**.

Tabelle 4: Terzbandpegel und Überschreitungen der Anhaltswerte A_H nach [6]. Auswahl aus Windpark PPIES-B4-1 bis 6 [1]. Div. Stunden innerhalb einer Nacht

PPIES- B4-1bis 6- L_{Aeq} 800 m												
Terz [Hz]	B4-0	B4-1	B4-2	B4-3(1)	B4-3(2)	B4-4(1)	B4-4(2)	B4-5(1)	B4-5(2)	B4-5(3)	B4-6(1)	B4-6(2)
8												
10												
12,5	44,04	43,94	43,14	43,94	44,24	43,44	44,64	43,44	43,54	44,44	43,94	43,84
16	42,38	41,88	40,68	41,08	41,58	41,28	41,18	41,08	41,48	41,78	41,18	41,28
20	40,55	41,25	39,05	39,65	39,45	39,65	39,35	40,05	39,85	39,75	39,85	40,45
25	37,57	38,87	35,67	36,77	35,27	35,27	35,97	37,67	36,27	35,97	36,77	39,27
31,5	37,28	37,18	36,28	36,78	35,88	34,88	36,18	37,28	35,78	35,58	36,68	36,48
40	37,69	37,29	35,99	36,59	35,69	35,29	35,89	36,79	35,99	35,59	36,39	36,19
50	38,23	37,53	37,13	37,83	37,33	36,43	37,93	38,43	36,83	35,53	37,83	37,43
63	39,28	38,58	37,98	38,38	38,08	37,08	38,38	38,98	37,28	40,68	38,08	37,28
80	43,55	45,25	44,65	45,15	44,75	43,55	44,75	44,85	42,45	41,85	43,75	43,05
100	39,40	41,20	41,00	41,60	40,80	39,40	40,80	40,90	38,70	38,10	39,90	39,10
125	39,24	40,44	40,44	40,94	39,94	38,94	39,64	39,94	38,14	37,14	39,14	38,54
160	37,80	38,70	37,80	38,20	37,30	36,80	37,30	37,40	36,80	36,00	37,40	36,70

Auswertung mit WITNES												
Tag	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ruhezeiten	2	1	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Nacht	5	7	6	7	6	5	6	6	5	4	5	5
L_{Aeq}	34,5	34,7	33,9	34,7	34,4	33,4	35,4	34,2	33,7	33,4	35,7	33,8

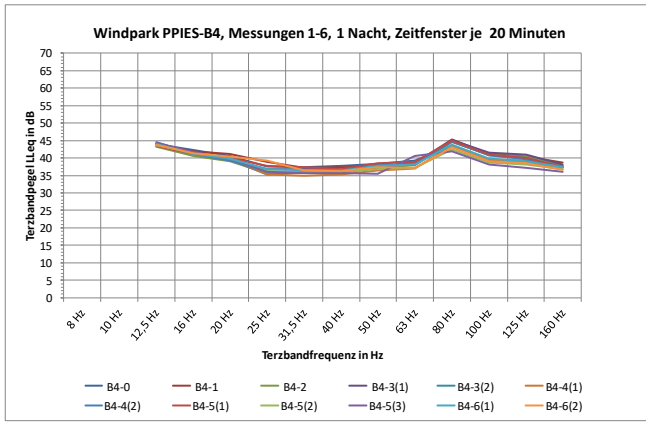


Bild 5: Terzbandspektren (Teil) Windpark PPIES-B4-1-6, Auswertedauer 20 Minuten . Messwerte s. **Tabelle 4.**

Tabelle 5: Terzbandpegel und Überschreitungen der Anhaltswerte A_H nach [6]. Auswahl aus Windpark PPIES-B1-1 bis 6 [1]. Div. Stunden innerhalb einer Nacht

PPIES- B1-1bis 6- LL _{eq} (1000m)											
Terz [Hz]	B1-0(1)	B1-0(2)	B1-1(1)	B1-1(2)	B1-2	B1-3	B1-4(1)	B1-4(2)	B1-5(1)	B1-5(2)	B1-6
8											
10											
12,5	46,74	46,44	45,24	43,94	45,24	48,44	55,24	53,64	47,84	47,84	45,74
16	44,48	44,68	43,48	42,38	43,48	45,78	51,38	49,88	45,28	45,38	43,78
20	46,25	46,45	42,55	41,25	41,75	46,15	49,95	48,75	46,05	44,85	43,25
25	44,27	44,57	43,17	40,57	39,07	44,87	48,57	47,67	45,07	44,67	43,67
31,5	44,18	44,98	43,78	41,08	37,18	43,18	47,08	46,38	45,18	45,78	44,58
40	41,89	42,09	40,69	37,39	34,29	41,29	44,69	43,99	42,79	42,59	41,19
50	41,53	41,43	40,73	38,33	34,93	40,53	43,63	43,03	41,83	41,63	41,23
63	42,08	41,88	40,58	37,98	34,58	40,58	43,08	42,88	41,68	41,78	41,38
80	39,35	39,35	39,35	38,45	35,15	37,95	40,75	40,45	38,95	39,35	40,05
100	38,80	39,30	41,60	40,80	39,50	38,40	40,70	40,70	39,60	40,40	41,70
125	39,24	40,14	38,94	35,64	36,64	39,14	40,04	38,94	39,44	38,34	38,14
160	34,30	34,80	33,90	29,50	29,30	29,70	34,20	33,20	33,10	33,00	33,20

Auswertung mit WITNES											
	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH	Ü. AH
Tag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ruhezeiten	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Nacht	4	4	5	3	2	3	6	5	4	4	5
L _{Aeq}	36,4	37,2	34,3	32,3	30,0	31,4	36,7	36,1	36,5	36,0	35,6

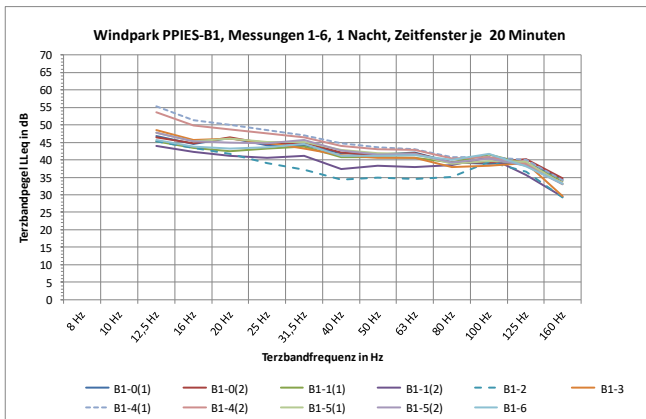


Bild 6: Terzbandspektren (Teil) Windpark PPIES-B1-1 bis 6, Auswertedauer 20 Minuten, Messwerte s. **Tabelle 5.**

Die Auswertungen zeigen folgende Ergebnisse:

- a) In vielen Fällen überschreitet die ermittelte Kenngröße H den jeweiligen Anhaltswert A_H für Ruhezeiten und insbesondere für die Nachtzeit.
- b) Die Aussage der Autoren in [13], dass es sinnvoll ist, bei Prognosen sich auf „Immissionszielpegel“ deutlich unter 40 dB(A) zu verständigen, ist vor diesem Hintergrund plausibel
- c) Es gibt eine interessante Abstufung mit dem Abstand der Immissionspunkte zum Windpark. Bei 600 m (Windpark

MM) treten erst bei $L_{Aeq} \approx 35$ dB(A) kleinere Überschreitungen von H_A auf. Bei 1000 m Abstand ergibt sich eine ähnliche Situation. In 800m Abstand kann das Auftreten von AM diesen Befund relativieren.

- d) Da die neuen WEA zu höheren Emissionen im niederfrequenten Bereich neigen (vgl. dazu die Vergleiche in [9]) ist die Durchführung der zuvor aufgeführten Abschätzung empfehlenswert.

Unsere Messungen basieren auf Fällen mit Beschwerde-Charakter. Die Analyse bestätigt, dass die Beurteilung nach TA Lärm allein auf der Grundlage des Vergleichs von „Einzahlwerten“ in dB(A) bei Windparks mit vielen Anlagen und/oder relativ geringen Abständen zu betroffenen Wohnbebauungen nicht ausreichend sein kann.

Literatur

- [1] Martinez S., Fennel F., Pies K., Amplitudenmodulation als besondere Geräuschcharakteristik der Windenergieanlagen, Lärmbekämpfung Bd. 13(2018), Nr. 5, S. 171-182
- [2] Renewable UK, Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to improve understanding as to its Cause and Effect, December 2013
- [3] IEEE Standard for Wind Turbine Aero Acoustic Noise Measurement Techniques, Std. 2400-2016
- [4] Bunk O., Hoffmeier J., Tieffrequente Geräusche in der Windenergieanlagentechnik, Lärmbekämpfung 2(2007), Nr. 3, S. 114-118
- [5] DIN 45680: Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, Berlin: Beuth Verlag 1997
- [6] E DIN 45680: Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, 2013-09 und Beiblatt 1: Hinweise zur Beurteilung-Technische Anlagen
- [7] Schmidt M. et al, Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680, Müller-BBM Abschlussbericht Nr. M111460/05 vom 31. März 2016
- [8] Keith S.E., et al., Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings, J. Acoust.Soc. Am. 139(3) March 2016 S. 1436-1442.
- [9] Møller H., Pedersen C. S., Low-frequency noise from large wind turbines, J. Acoust.Soc. Am. 129(6) June 2011 S. 3727-3744.
- [10] DIN EN 61400-11: Windenergieanlagen-Teil 11: Schallmessverfahren. Berlin: Beuth Verlag 2007.
- [11] Hansen K., et al., Analysis of unweighted low frequency noise and infrasound at a residence in the vicinity of a wind farm, Proceedings of Acoustics 2013, Victor Harborg, Australian Acoustical Society, S. 1-9, 17-20 Nov. 2013
- [12] Hansen K., et al., Comparison of the noise levels measured in the vicinity of a wind farm for shutdown and operational conditions, Inter-noise 2014 Melbourne, Australia
- [13] Thorsson P., et al., Low-frequency outdoor-indoor noise level difference for wind turbine assessment, J. Acoust. Soc. Am. 143(3) March 2018, S. EL206-EL211