Amplitudenmodulation im Nah- und Fernbereich von WEA - Dynamik der Schallabstrahlung von WEA -

Sergio Martinez[1], Kai Pies[2], Anne-Kathrin Ferreira[1]
[1] TÜV Rheinland Energy GmbH, Anne.Ferreira@de.tuv.com, sergio.martinez@web.de
[2] Schalltechnisches Ing.-Büro Pies GbR, kpies@schallschutz-pies.de

Einleitung

In der Veröffentlichung von van der Velden und Casalino [1] wird u.a. eine Simulation vom Windfluss an einer WEA (in Bewegung) berechnet und die daraus resultierende Geräuschemission von WEA ermittelt. Besonderes Augenmerk bei der Modellierung des Windflusses liegt dabei auf der Rotation der Blätter und es lässt sich erkennen, dass das akustische Feld mehr als nur die Schallabstrahlung aus einer stationären, um- und durchströmten „Scheibe“ ist (s. [11]). Damit eröffnet sich eine erweiterte Interpretation der Akustik der WEA, die in [2] angedeutet wird, wenn man die mögliche Interferenz der WEA untereinander bei der Schallausbreitung über größere Abstände betrachtet oder auch die starke Pegeldynamik im Nahbereich richtungsabhängig untersucht.

Im ersten Teil wird das Phänomen der Interferenz der Schallabstrahlung von Quellen (wie z.B. WEA in großen Entfernungen) mit einem einfachen Analogie-Modell (vgl. [2]) betrachtet. Im zweiten Teil wird der Modellierungsansatz für den Nahbereich der WEA angewandt, wobei entsprechende Modifikationen des Ansatzes vorgenommen werden. Ziel ist es, das Abstrahlungsverhalten der WEA, wie es sich in den Messungen zeigt, nachvollziehbar abbilden zu können.

Interferenzen und Windparkeffekt

Interferenzen von Schallwellen sind ein bekanntes physikalisches Phänomen. Die Anwendung des Ansatzes aus der Optik auf die Akustik bedeutet (s. [12]), dass die Kohärenzlänge (KL) der Abstrahlung eines Wellenzuges von einer Schallquelle wie folgt angegeben werden kann:

$$KL = c * \tau \qquad (1)$$

Dabei ist c die Schallgeschwindigkeit und τ ist die „Zeitdauer des Wellenzuges“. Bei der Betrachtung der AM-Signale - die sich auch „wellenartig“ ausbreiten – kann die Analogie zur Optik hergestellt werden, wenn man zugrunde legt, dass je Rotorumdrehung ein eigener Wellenzug entsteht.

Die in der Arbeit [1] dargestellten Überlegungen und Berechnungen legen diese Betrachtungsweise nahe. In der Praxis geht es hier um die Überlagerung von AM-Signalen mit AM-Frequenzen von 0,4 Hz bis 1,2 Hz, welche sich mit $c_0 \approx$ 335-340 m/s ausbreiten. Bei Rotordrehzahlen von U_R = 5 U·min^{-1} bis U_R = 24 U·min^{-1} ergibt sich die Gl. (2) wie folgt:

$$KL(U_R) = c_0 * 60/U_R \qquad (2)$$

KL ist hierbei die Kohärenzlänge des Signals. Je langsamer der Rotor sich dreht, umso „zeitlich / räumlich länger“ wird das Wellenpaket. Die Schallgeschwindigkeit c_0 wird vereinfacht mit der nachfolgenden Formel (Gl. (3)) berechnet:

$$c_0 = 20{,}5*(273{,}2+T^0(C))^{0,5} \qquad (3)$$

Beschränkt man sich auf einen bei Windparks üblichen Wertebereich mit WEA-Rotor-Drehzahlen von U_R = 8 – 14 U·min^{-1} und Lufttemperaturen von T = 5 - 35 °C, so ergeben sich Werte von KL ≈ 1400 m – 2600 m. Bei T = 10 °C beträgt KL = 1800 m – 2500 m. Die Wellenlänge des Schalls ist von der Schallgeschwindigkeit abhängig. Bei T = 10 °C und somit c_0 = 337,4 m/s (nach Gl. (2)) ergeben sich folgende „Wellenlängen“ und somit eine gewisse Anzahl von Wellenzügen im Wellenpaket (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Kohärenzlänge KL und Anzahl der Wellenzüge

Nr.	Frequenz in Hz	Wellenlänge m	KL = 1800 m	KL = 2200 m
			Anzahl Wellenzüge	Anzahl Wellenzüge
1	100	3,37	530	650
2	10	33,7	53	65
3	1	337	5,3	6,5
4	0,8	422	4,3	5,2
5	0,5	675	2,7	3,2

Man erkennt, dass sich die Phänomene der AM in einer anderen „Wellenskala“ als die üblichen akustischen Effekte ab 10 Hz und darüber abspielen. Überträgt man dies auf die Wellenpakte mehrerer WEA, so können diese als „interferenzfähig“ angesehen werden.

Im Beitrag [2] wird dargelegt, dass bei WEA in Windparks ein Windparkeffekt auftreten kann. Wendet man die zuvor beschrieben Analogie an, kann dies als „Interferenzeffekt“ angesehen werden. Auch in der Arbeit [3] wird diese Thematik ausgeführt. In den Abbildungen 1 und 2 werden Beispiele dieser Interferenzeffekte bei Windparks aufgezeigt. Die Daten stammen aus den eigenen Messungen (vgl. [4]-[6]).

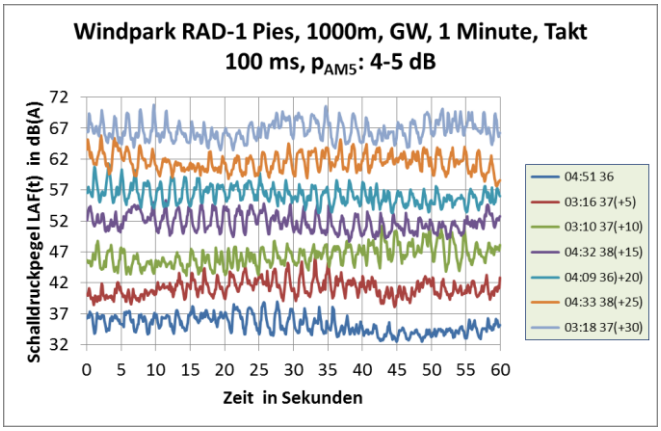

Abbildung 1: Zeitausschnitte mit einer Dauer von 1 Minute mit Amplitudenmodulation AM und Interferenzeffekten zwischen den verschiedenen WEA (vgl. [6]) Die Datensätze sind jeweils von unten nach oben um 5 dB angehoben. Die AM-Schwankungsbreite beträgt 3-4 dB.

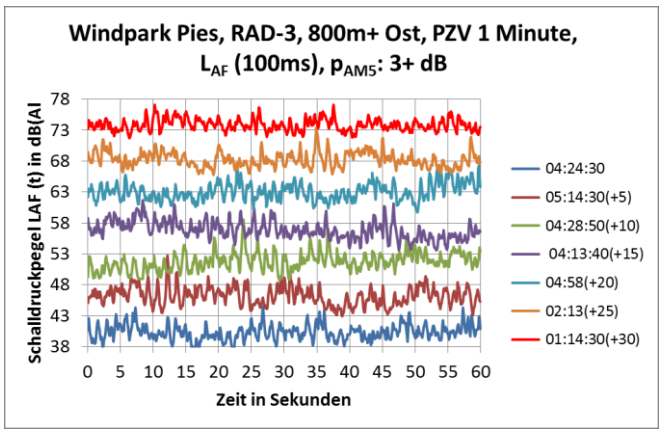

Abbildung 2: Vergleichbare Datensätze wie in Abbildung 1 an einem anderen Windpark. Die Datensätze sind jeweils von unten nach oben um 5 dB angehoben. Die AM Schwankungsbreite beträgt ca. 3 dB.

Aus weiteren eigenen Messungen an einem Windpark (MM7) wurde ein repräsentativer Zeitausschnitt ausgewählt, der das Interferenzphänomen erläutern bzw. auch rechnerisch nachvollziehbar machen soll.
Hier sind drei WEA maßgeblich (vgl. [4]). Schalltechnisch sind folgende Parameter der WEA relevant: Nabenhöhe NH = 140 m, Rotordurchmesser R_D = 112 m, elektrische Nennleistung: P_{el} = 3,3 MW. Der zugehörige Schallleistungspegel bei Nennleistung beträgt auf Basis einer 3-fach-Vermessung L_{WA} = 104,7 dB(A). Die Abstände der Rotormittelpunkte der drei WEA zum Immissionsort betragen d_1 = 580 m, d_2 = 630 m und d_3 = 930 m. Die drei WEA sind aus der Sicht des Immissionsortes innerhalb eines Winkels von ca. ± 35° aufgestellt. Der ausgewählte Zeitausschnitt umfasst die Messdaten um 03:55:00 bis 03:56:04, aufgenommen mit einer Abtastfrequenz von 8 Hz (Taktzeit = 125 ms). In der nachfolgenden **Abbildung 3** ist der gemessene Pegelzeitverlauf (grün) wiedergegeben. Durch Anwendung der Wavelet-Transformation auf n = 512 Werte (vgl. [4], erhält man daraus ein rekonstruiertes Signal (violett), das sich aus der Überlagerung der Wavelet Ebenen ergibt. Hieraus lässt sich die trendkorrigierte Schwankung des Pegels (Hochpass) (braun) ermitteln, die zur Bestimmung der Breite der AM und der AM-Frequenz geeignet ist. Die Auswertung ergibt bezüglich AM einen Wert von p_{AM5} = 2,5 dB für diesen Zeitausschnitt.

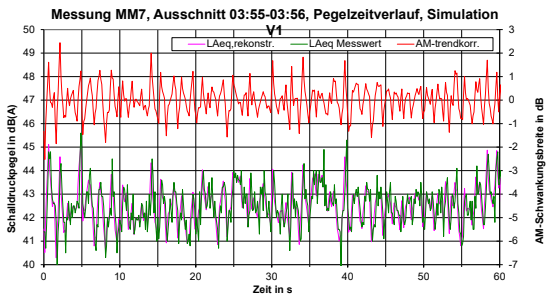

Abbildung 3: Messung MM7 (s. Text) , Zeitausschnitt. Messwerte (grün), Wavelet-Synthese (violett), trend-korrigierte Pegel mit AM (rot)

Sieht man den in Abbildung 3 dargestellten Pegelzeit-verlauf (rot) mit einem 8 Hz Takt als (periodische) Zeitfunktion an, so kann man anhand einer FFT-Transformation (N=512 Punkte) mit einer Auflösung von Δf = 0,0156 Hz (also effektive Auflösung der Änderungen der Rotordrehzahl um ΔU_R = 0,31 U/min) ein Spektrum zur Bestimmung der AM-Modulationsfrequenz berechnen. In diesem Fall beträgt die Hauptfrequenz f_0 = 0,75 Hz. Es gibt eine weitere „Nebenlinie“ mit f_1 = 0,625 Hz. Die Modulationsfrequenz f_0 entspricht einer Drehzahl von U_R = 15 U/min. Die Modulationsfrequenz f_1 entspricht U_R = 12,5 U/min.
In den Veröffentlichungen [2] und [6] wird ein einfaches Modell der Überlagerung mit Hilfe von Sinus-Funktionen vorgestellt, der qualitativ in der Lage ist, die diversen Erscheinungen von AM bei Windparks zu erläutern. In dieser Arbeit wird diese Technik ebenfalls angewandt und ad hoc ein System von drei interferierenden WEA erstellt. Basis des Modells ist die Abstrahlung durch den Rotor von einer Schallwelle, dessen Pegelzeitverlauf mit einer sinusförmigen Funktion angenähert wird. Die Basis-Gleichung für den Pegelzeitverlauf (PV) einer einzelnen WEA mit AM lautet demnach:

$$PV(t) = Lp + \frac{p_{AM5}}{2} * \sin(2 * \pi * \frac{UR}{20} * t + \varphi) \qquad (4)$$

Hierbei bedeuten die angegebenen Größen:

PV	Pegelzeitverlauf, z. B. als $L_{Aeq,125\ ms}$ (Takt 8 Hz) einer einzelne WEA, die AM erzeugt.
Lp	Trendkorrigierter Schalldruckpegel für eine einzelne WEA
p_{AM5}	Betrag der Schwankungsbreite der AM von einer einzelnen WEA
U_R	Rotordrehzahl der WEA. Da es sich um WEA mit drei Blätter handelt, ist die Basis AM-Frequenz der WEA nämlich UR/20
„t“	Zeitparameter. Wenn z.B. U_R=12 U/min ist, dann entspricht das für eine Rotorumdrehung 5 Sekunden. Demnach sind n = 5*8 = 40 Werte von PV(t) erforderlich, um eine Rotorumdrehung zu beschreiben
„φ“	(zeitliche) Phasenwinkel

In der **Abbildung 4** wird der auf der Basis der o.a. Methode die Überlagerung von drei WEA als Simulation (V1) dargestellt. Die Parameter hierzu sind der **Tabelle 2** zu entnehmen.

Tabelle 2: Parameter der Simulation (V1) des Windparks MM7

Nr	Parameter	WEA 1	WEA 2	WEA 3	WEA Gesamt (V1)	WEA Mess.
1	Abstand zum Rotor in m	582	623	927		
2	U_R in U·min^{-1}	15	15	12,5		
3	L_p in dB(A)	38,5	38	34		
4	p_{AM5} in dB	6,5	6,5	4,0		
5	φ	0	-2,36	-7,66		
6	PV Gesamt in dB(A)	39,1	38,6	34,2	42,6	42,6
7	p_{AM5} in dB Windpark				2,65	2,5
8	dL/dt_{90} in dB/s				± 7	± 7

Es zeigt sich, dass mit Hilfe dieser Simulations-Berechnung die Periodizität des Zeitverlaufs der Messung nachvollzogen wird und dass die Sinus-Approximation zielführend ist, aber nur als Näherung angesehen werden kann. Im Mittel stimmt die Auswertung mit der Messung relativ gut überein.

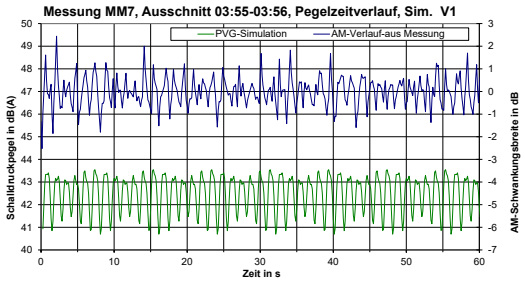

Abbildung 4: Windpark, Messung MM7. AM-Pegelzeitverlauf wie bei Abbildung 3, nach Anwendung der Wavelet-Transformation. Pegelzeitverlauf simuliert auf der Basis der von drei WEA nach Gl. (4).

Anhand dieses Verfahrens lässt sich exemplarisch eine Variante V2 berechnen. In der Variante V2 gelten die o.a. Werte nach Tabelle 2 für WEA 1 und WEA 3. Bei WEA 2 wird abweichend $U_R = 14{,}5$ U/min mit $p_{AM5} = 5$ dB und $\varphi_2 = -4{,}7$. Die Änderungen sind demnach nur geringfügig.

In der Simulation V2, dargestellt in **Abbildung 5**, ergibt sich ein Mittelungspegel von $L_{Aeq} = 42{,}5$ dB(A), $p_{AM5G} = 4{,}5$ dB und insgesamt dL/dt90 = ± 10 dB/s. Während sich im Mittel am Gesamtpegel kaum etwas ändert, ist der resultierende Pegelzeitverlauf anders als bei **Abbildung 4** und der Wert p_{AM5} im Windpark ist erheblich abweichend. Im Ergebnis erkennt man, dass eine deutliche Schwebung entstehen kann, auch wenn der Mittelungspegel annähernd konstant bleibt. Das ist bei Windparks unter günstigen Ausbreitungs-bedingungen und Interferenz durchaus realistisch.

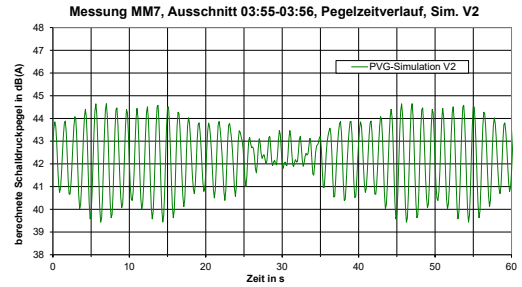

Abbildung 5: Windpark, Messung MM7. Pegelzeitverlauf (V2) simuliert auf der Basis der von drei WEA nach Gl. (4) gegebenen Werten (s. Tabelle 2).

AM bei einer Einzel-WEA

Nach eigenen Messungen an einer einzelnen WEA, über die ausführlich u.a. in der Arbeit [7] berichtet wird, lassen die Messergebnisse erkennen, dass Schallmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung – wie im vorigen Kapitel dargestellt – Auskunft darüber geben, wie das Schallfeld in der Nähe der WEA insgesamt entsteht. AM im Nahbereich der Anlagen stellt den Schlüssel zum Verständnis des Emissions-verhaltens dar.

Nachfolgend werden simultane Geräuschmessungen an zwei Messpunkten im Nahbereich (Entfernung d = 170 m) einer WEA mit einer elektrischen Nennleistung von $P_{el} = 3$ MW, einem Rotordurchmesser RD = 113 m und einer Nabenhöhe NH = 142,5 m betrachtet (vgl. dazu auch die weitere Angaben in [7]). Die WEA ist mit Getriebe ausgestattet. **Abbildung 6** zeigt den Messpunkt RMP im Lee der WEA mit Grenzflächenmikrofon auf einer schallharten Platte, vergleichbar der Messanordnung und Ausstattung, wie sie in DIN EN 61400-11 [8] vorgesehen ist. Der zweite simultan erfasste Messpunkt befindet sich seitlich der WEA (90°+, SID+), leicht vor dem Rotor in 4 m Höhe über Boden mit Sekundärwindschirm ausgestattet [7]. Die Rotordrehzahl beträgt ca. 14 U/min.

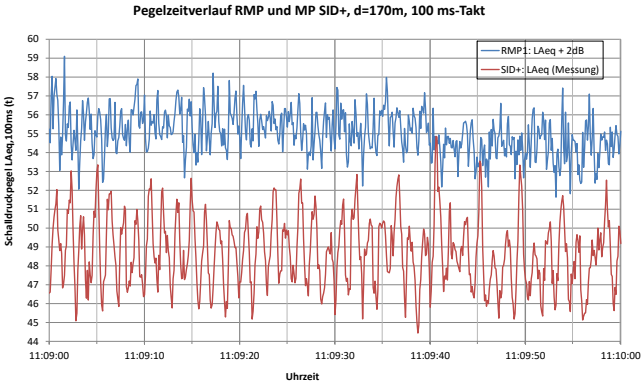

Abbildung 6: Einzelne WEA, Pegelzeitverläufe in 100 ms Takt, Messdauer 1 Minute, ausgeprägte AM. Messungen simultan am RMP und SID+.

Die Messungen zeigen, dass der Schalldruckpegel aufgrund der Drehbewegung der Blätter zeitlich relativ stark veränderlich ist. Die AM-Schwankungsbreite dieses, auf Grund der Drehung modulierten Signals (in diesem Fall der A-Gesamtpegel) ist richtungsabhängig, also seitlich am SID+ stärker als im Lee der WEA (RMP), auch wenn der mittlere Gesamtpegel $L_{Aeq,m}$ seitlich (SID+) effektiv rd. 1,1 dB niedriger ist (Anmerkung: Im Diagramm ist der Messwert am RMP um 2 dB zum besseren Vergleich der Pegelzeitverläufe erhöht worden)

Der gemessene Pegelzeitverlauf einer einzelnen WEA an einem nahe gelegenen Immissionsort konform zu [8] ergibt sich elementar aus der energetischen Überlagerung der Beiträge der drei einzelnen Rotorblätter. Jedes Einzelblatt des Rotors liefert also einen Beitrag, der zwangsläufig – z.B. bei einem quasistationären Betrieb der WEA - ebenfalls eine zeitlich periodische Funktion ist [10]. D.h. jedes Rotorblatt entwickelt einzeln einen eigenen periodischen Pegelzeitverlauf, der allerdings sekundär mit dem Beitrag des vorangehenden korreliert ist. In unserem Fall erfolgt die Überlagerung der Beiträge „energetisch“, so dass die Berechnung logarithmisch auszuführen ist. Das Ergebnis ist eine periodische Funktion mit einer eigenen Frequenz. In diesem Fall tritt also die eigentümliche AM-Frequenz der Überlagerung auf. Die Basisgleichung (4) kann auf dem Beitrag eines jeden Blattes angewandt werden. Die Basisfrequenz ist dann von $U_R/60$ anstelle von $U_R/20$ abhängig. Der Zeitabstand der Maxima und Minima ist weiterhin T/6. Somit kann der Pegelzeitverlauf aus der energetischen Überlagerung von drei Pegelzeitverläufen mit einer Phasenverschiebung von je 120° approximativ berechnet werden. In Abbildung 7 wird ein Ausschnitt von

10s Dauer aus der Messung SID+ nach Abbildung 6 im Detail dargestellt und die berechnete Simulation mit den gemessenen Beiträgen eines jeden Rotorblattes dargestellt.

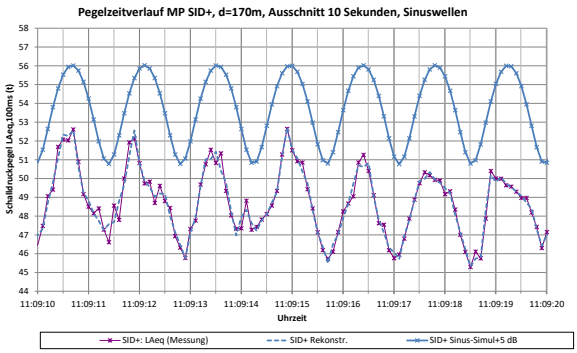

Abbildung 7: Einzelne WEA, Pegelzeitverläufe in 100 ms Takt, Ausschnitt aus Messung SID+, Approximation mit Wavelet-Analyse und Simulation mit drei Sinuswellen gleicher Amplitude und Frequenz.

Unter der Annahme, dass die Rotordrehzahl sich nicht wesentlich ändert, zeigt diese Näherung mit elementaren periodischen Funktionen eine gute Übereinstimmung. Bleibt die Rotordrehzahl konstant, so kann man eine Berechnung für die ganze Messdauer nach Abbildung 6 vornehmen. Das Ergebnis ist in der Abbildung 8 dargestellt.

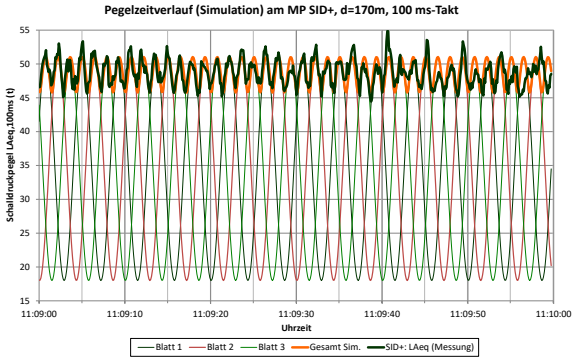

Abbildung 8: Einzelne WEA, Pegelzeitverlauf in 100 ms Takt, Ausschnitt aus Messung SID+, Simulation mit drei Sinuswellen gleicher Amplitude und Frequenz. Energetisch ergibt sich, dass die Modulationstiefe der Amplitude eines jeden Rotorblattes ein Vielfaches der resultierenden Modulationstiefe des Gesamtpegels. Dieses Ergebnis ist u.a. abhängig von der Lage und Richtung des Messpunktes bezüglich der Rotorblätter. Am Ende des Zeitausschnittes erkennt man leicht eine kleine Veränderung des Rotorbetriebes (Drehzahlabnahme), so dass die Simulation nicht zutreffend ist.

Die numerische Lösung des Gleichungssystems ergibt $p_{AM5} = 32$ dB und $L_p = 36{,}3$ dB je Rotorblatt. D.h. die Schwankungsbreite (Modulationstiefe) des einzelnen Rotorblattes bei dieser Position während der Messung beläuft sich auf 32 dB. Im Modell nach S. Oerlemanns [10] wird für einen Messpunkt - bei h=0m (an Boden), d=58m horizontal zu einer WEA mit RD=58m, NH= 53,5m, U=25 U/min und im Winkel vorn um 45°- eine Schwankungsbreite des Beitrages eines einzelnen Rotorblattes infolge konvektive Verstärkung (Doppler Effekt) und Richtwirkung von 15 dB theoretisch berechnet. Die Berechnung in seitlicher Richtung mit einer Schwankungsbreite von 32 dB ist nicht unplausibel.

Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die Messungen zum Windparkeffekt und zur AM einer einzelnen WEA gut abgebildet werden können. Auf dieser Basis können auch Ursachen zur Schallentstehung von WEA als bewegte Schallquelle untersucht werden. Auch hier spielt die Richtungsabhängigkeit der Emissionen eine Rolle. Die dargestellten Ergebnisse sind Ausdruck einer quantitativen „globalen“ Beschreibung des Emissionsverhaltens des Windrades im Nahbereich, basierend auf der gesamten akustischen Signatur der einzelnen Rotorblätter. „Qualität“ dürfte in diesem Fall „gleiches Verhalten“ je Blatt ergeben. Diese Emissionen werden im Windpark hinausgetragen und erfahren eine gewisse Wechselwirkung mit den Beiträgen anderer WEA. Durch die Bewegung der Quellen entsteht eine Pegeldynamik, die bei den vorwiegend geringen Rotordrehzahlen nicht in einem undeutlichen Rauschen übergeht, sondern auffällig die Bewegung ständig erkennen lässt. In künftiger Arbeit wird die Zusammensetzung des „globalen“ Signals näher untersucht, um diese Modellierung physikalisch besser erklären zu können.

Literatur

[1] van der Velden, W,; Casalino, D. „Towards digital wind turbine noise certification“, INCE Europe, WTN Lisbon, 12.6.-14.6.2019

[2] Martinez, S.; Pies, K.; Fennel, F.; Ferreira, A.-K.; Amplitudenmodulation(AM) bei Windenergieanlagen, Wirkung auf den Menschen, Richtungs- und Entfernungs-abhängigkeit, Lärmbekämpfung 16(2021), Nr.1, S. 9-16

[3] van den Berg, G.P., The sound of high winds: The effect of atmospheric stability on wind turbine an microphone noise” (2006), Thesis, University of Groningen,

[4] Martinez, S.; Fennel, F.; Pies, K.; Amplitudenmodulation als besondere Geräuschcharakteristik der Windenergieanlagen, Lärmbekämpfung 13(2018), Nr. 5, S. 171-182.

[5] Martinez, S., Fennel, F.; Windenergieanlagen: AM bei Messungen an Einzelanlagen und Windparks, Fortschritte der Akustik, DAGA 2017, Kiel, S. 1230-1233

[6] Pies, K., Daleiden, P., Kemmer, F., Martinez, S., Pies D.; Amplitudenmodulation bei Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen, Beispiele und Einflussgrößen, Fortschritte der Akustik, DAGA 2018 München, S. 1647-1650

[7] Pies K., Martinez S., Pies D., Fennel F., Ferreira A., Maleklo A., Amplitudenmodulation – Wirkung auf den Menschen, Richtcharakteristik und Dopplereffekt, Lärmbekämpfung 14(2019), Nr. 5, S. 159-173.

[8] DIN EN 61400-11 (VDE 0127-11): 2013-09 Wind-energieanlagen – Teil 11 : Schallmessverfahren (IEC 61400-11:2002); Deutsche Fassung EN61400-11:2013 (Edition 3) und Vorversionen der DIN EN 61400 (2007-03 oder 2003-11)

[9] Martinez, S., Fennel, F.; Quellen-, Fremd- und Gesamt-geräusche: Statistik und Verteilungen, Lärmbekämpfung Bd.8 (2013) Nr.6, S. 247-263

[10] Oerlemanns,S. Detection of aeroacoustics sound sources on aircraft and wind turbines, Diss. Univ. Twente-Enschede, 2009

[11] Sanderse, B.; Aerodynamics of wind turbine wakes, Lit. review, ECN-E09-16

[12] https://www.tu-chemnitz.de/physic/PHFK/LEHRE/.SCRIPT/script1/37.pdf