# Windenergieanlagen: AM bei Messungen an Einzelanlagen und Windparks

Sergio Martinez[1], Florian Fennel[2]
[1] ehem. TÜV Rheinland, sergio.martinez@web.de
[2] TÜV Rheinland Energy GmbH, Florian.Fennel@de.tuv.com

## Amplitudenmodulation (AM) bei Windenergieanlagen (WEA)

WEA werden im Inland immer näher an Wohnbebauungen herangerückt. Das sind einerseits eine Folge der hohen Bevölkerungsdichte in einigen Gebieten, andererseits eine Folge aus der intensivierten Nutzung der ausgewiesenen Flächen. Außerdem sind WEA und Windparks gegenüber den „Anfängen“ dieser Technologie nunmehr Großenergieanlagen geworden. Sie bestehen also aus einer Vielzahl großer, geräuschintensiver, teilweise intermittierend abstrahlender Geräuschquellen im Freien. Aktuell ist die besondere Geräuschart der Windenergieanlagen (WEA), die unter der Bezeichnung „Amplitudenmodulation“ (AM) bekannt ist, ein wichtiges Diskussionsthema geworden. Bei „üblichen“ Geräuschimmissionsprognosen im Rahmen von Genehmigungsverfahren werden Geräuschimmissionen als Langzeitbeurteilungspegel, als zeitlich äquivalente mittlere Schalldruckpegel betrachtet. Basis der Prognosen sind die nach [1,2] erhobenen Emissionskennwerte der WEA, die keine Erkenntnisse zur beobachteten Amplitudenmodulation (AM) [3,4] liefern. In [5] wird diese Thematik bei Beurteilungsverfahren neuerdings berücksichtigt.

„AM“ bei WEA wird in der Literatur auch unter der Überschrift „Infraschall“ behandelt. Die Basisuntersuchungen zu [5] und anderer Autoren weisen die Einwirkungen dieser Eigenart der Geräusche eher der Kategorie „Impulshaltigkeit“ zu. Nach [3,4] werden zwei Arten von Amplitudenmodulation erwähnt. Einerseits eine sog. „NAM“ (normal amplitude modulation), die aus der bekannten Geräuschcharakteristik in der Nähe von WEA hervorgerufen wird. Gemäß der o.a. Literatur wird dieses “swish“ – Geräusch von der Rotorblatt-Hinterkante, mit eigener Richtwirkungscharakteristik und AM-Frequenz abhängig von der Rotorblatt-Passage-Frequenz (d.h. bei 3-blättrigen WEA also mit der 3-fachen Rotordrehzahl) abgestrahlt. Außerdem tritt „OAM“ (other amplitude modulation) auf. Dieser Effekt umfasst Befunde, bei denen im Nah- und Fernbereich von WEA ein Ausmaß an zeitlich auftretender AM-Amplitude festgestellt wird, der wesentlich größer als „NAM“ ist. Die o.a. Studien erklären dieses Phänomen als „transient blade stall“, also Geräusche aus Instabilitäten bei der Anströmung des Rotorblattes, die zu einem lokalen Strömungsabriss in Bereichen „über“ der Rotorfläche führen. Das ist auch im Fernbereich gut messbar.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden Ergebnisse aus eigenen Geräuschmessungen mit AM mitgeteilt. Es werden Zeitfenster mit charakteristischen Pegelzeitverläufen diskutiert, exemplarisch für „Langzeit“ Messungen.

Im zweiten Teil wird das Verfahren der Zeit-Frequenzanalyse herangezogen, das in der Literatur als Wavelet-Verfahren bekannt ist. Es zeigt sich, dass dieses Verfahren, in Kombination mit der üblichen FFT-Analyse - allerdings bei einer wesentlichen Erhöhung der üblichen Abtastraten bei Schallpegelmessungen an WEA - wertvolle Hinweise zur Kennzeichnung der AM gibt, die u. E. näher an den Messdaten liegen als die der Auswertungen nach [3,4] oder auch [6].

## AM im Nahbereich einer WEA

Die nachfolgend dargestellten Messergebnisse (Zeitfenster 2 Minuten Dauer) dienten als Background bei der Veröffentlichung [7]. Es handelt sich um Schallpegelmessungen an einer WEA im Freien mittels Grenzflächenmikrofon (Höhe h = 0m) und Sekundärwindschirm. Die untersuchte WEA hat eine Nabenhöhe von 100 m und einen Rotordurchmesser von 77 m. Im Bild 1 werden die simultan in rd. 8 Hz Takt gemessenen Schalldruckpegel $L_{eq}$ Linear (LIN) und mit A-Bewertung (Gesamt(A)) dargestellt. Die Rotordrehzahl ist während der Zeit nahezu konstant bei 18,2 $Umin^{-1}$ und schwankt während der letzten 30s etwas um 18 $Umin^{-1}$. Die Nennleistung der WEA beträgt 1,5 MW. Die WEA wird zunächst bei ca. 80% Nennlast betrieben, später sinkt die erzeugte Leistung auf 53 % und zum Schluss liegt sie bei ca. 70%.

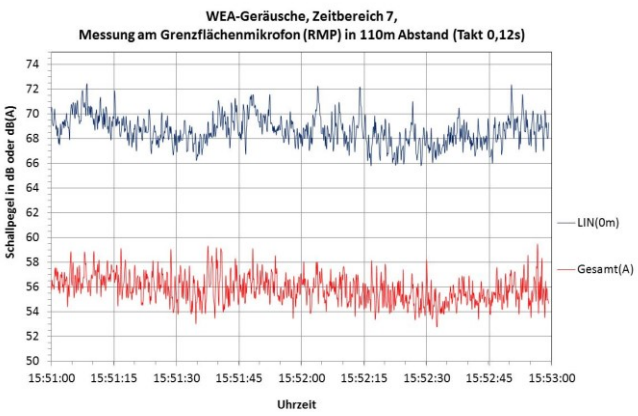


**Bild 1:** Schallpegelmessungen am Referenzmesspunkt [7] während 2 Minuten (ZB7). Die Pegelzeitverläufe zeigen AM. Der Korrelationskoeffizient von LIN(t) mit $L_{Aeq}$(t) (= Gesamt(A)) beträgt nur 0,37. Die Pegelschwankungen der AM (Gesamt(A))betragen bis zu etwa 5-6 dB.

Im Bild 2 wird eine FFT-Analyse des o.a. „Gesamt(A)“-Pegelzeitverlaufes während jeweils ca. 1 Minute dargestellt. Man erkennt die typischen Einzelfrequenzen, die wegen der AM auftreten und mit der Rotordrehzahl gekoppelt sind. Dieser Frequenzbereich wird von der geltenden, aktuellen Normung [1, 2] nicht betrachtet, auch nicht bei der Analyse der Tonhaltigkeit.

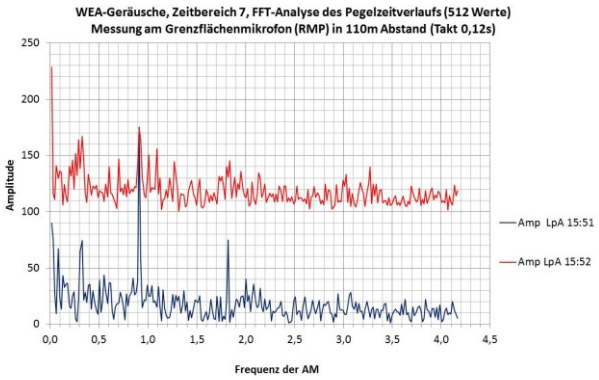


**Bild 2:** Betrag der FFT-Koeffizienten. Die Auswertung erfolgt direkt aus den Messdaten nach Bild 1 für den LAeq(t)(= Gesamt(A)), ohne Trendkorrektur. Die Amplituden-Werte für das Zeitfenster 15:52 sind um einen Betrag von 100 angehoben worden, um beiden Spektren getrennt darstellen zu können. Bei 15:51 ergibt sich die Hauptlinie bei 0,91 Hz, also bei einer Rotordrehzahl von 18,2 Umin-1 mit einer harmonischen bei 1,82 Hz. Um 15:52 liegt die Hauptlinie auch bei 0,91 Hz, aber es gibt anderen weiteren Linien, wegen der veränderlichen Rotordrehzahl.

Im Bild 3 wird ein Spektrogramm (Terzbandbreite) der Messung nach Bild 1 dargestellt. Man erkennt daraus, dass die AM des $L_{Aeq}(t)$ – frequenzabhängig - breitbandig ist. Numerisch liegt außerdem eine hohe Korrelation zwischen dem $L_{Aeq}(t)$ und den Terzbandpegel im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 1 kHz vor.

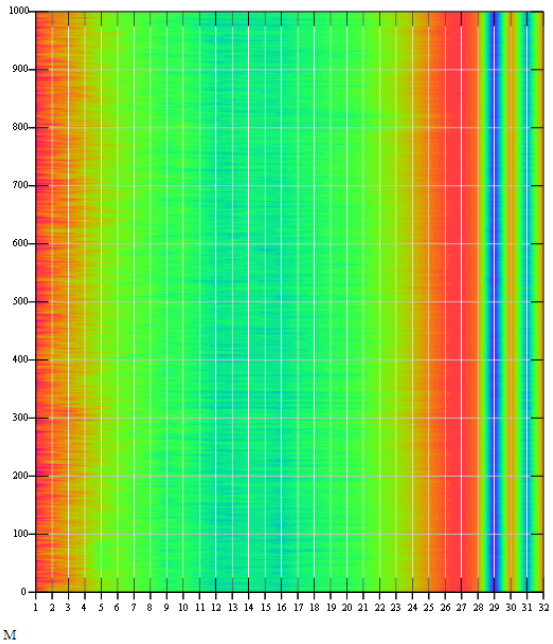

**Bild 3**: Spektrogramm Messungen [7]: Terzbandpegel, A-bewertet, Zeitbereich ZB 7, Dauer 2 Minuten, Taktzeit 0,12s, Frequenzen von 25 Hz bis 10 kHz; 1->25 Hz, 2-> 32,5 Hz, 5-> 63 Hz, 8->125 Hz, 11-> 250 Hz, 14-> 500 Hz, 17-> 1 kHz, 20-> 2 kHz usw. 29-> LIN(t), 31-> LAeq(t). Farbcodierung: Blau hohe Pegel, rot niedrigere Pegel. Man erkennt im Bereich von (11) 250 Hz- bis ca. (17) 1 kHz-Terzband AM mit relativ gleichmäßiger Frequenz. Bei (9) 160 Hz zeigt sich eine gewisse Tonhaltigkeit (mit AM) bei höherer Leistung. Sie weist auch AM auf.

Zum Schluss dieses Abschnittes wird der Pegelzeitverlauf des 160 Hz-Terzbandpegels zusammen mit dem Pegelzeitverlauf des (Gesamt-A) Pegels im Bild 4 dargestellt. Bei dieser Frequenz liegen Anzeichen für Tonhaltigkeit vor.

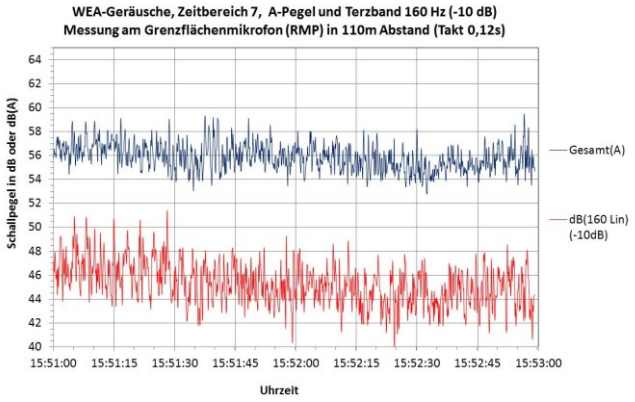


**Bild 4:** Terzbandpegel 160 Hz am Referenzmesspunkt (vgl. [7] und Bild 3). Der Korrelationskoeffizient von $L_{Aeq}(t)$(= Gesamt(A)) mit (Terzband-)Lin-160(t) beträgt nur r = 0,307. Erklärungsbedürftig bleibt, wie ein eigentlich vom Getriebe erzeugtes Geräusch über die Rotorblätter mit solcher AM abgestrahlt wird.

## AM in Fernbereich von WEA. Einflüsse eines Windparks

In diesem Abschnitt wird über eigene Messungen an einem Windpark hinsichtlich AM berichtet. Der Windpark bestand aus 6 WEA. Die WEA (1-3) haben eine Nennleistung elektrisch von je 3,3 MW und ein maßgebender Schallleistungspegel nach Herstellerangaben von $L_{WA}$ = 106,5 dB(A). Die 3 weiteren WEA (A-C) haben eine elektrische Nennleistung von je 2 MW und einen höchsten Schallleistungspegel nach Herstellerangaben $L_{WA}$ = 103,2 dB(A). Der Abstand des Immissionsortes zur nächstgelegene WEA 3 betrug 565 m. Der Abstand zu WEA 1betrug 635 m Entfernung. Von den weiteren WEA befindet sich am nächsten die WEA A in 600 m Entfernung.

Die Messungen erfolgten an einem Immissionspunkt (IP) in der Nähe eines Wohnhauses, mit Mikrofonhöhe 4 m über Boden und Sekundärwindschirm. Eine Reflexionskorrektur war nicht erforderlich. Der Schalldruckpegel wurde in 0,125 s - Takt erfasst. Simultan wurden der Gesamtpegel unbewertet LIN(t) und mit A-Bewertung $L_{Aeq}(t)$, sowie mittlere Terzband-Pegel im Bereich von 6 Hz bis 20 kHz erfasst. Beispielhaft wird über hier Messdaten innerhalb einer Stunde in der Zeit von 03:00 Uhr bis 04:00 Uhr berichtet. Die Wetterdaten während der Messungen betrugen: Lufttemperatur 0°C, trocken, ohne Eisbildung; Windgeschwindigkeit am Immissionsort in 8 m Höhe 5,6 km/h (Turbulenzfaktor ca. 30 %, bei schwachem Wind), Luftdruck 960 hPa; Luftfeuchte 93%. Die Windrichtung war meist SW, also „Gegenwind“.

Für diese Messung können folgende Stundenmittelwerte angeben werden $L_{Aeq,m}$ = 43,5 dB(A); $L_{ATM}$ = 45,9 dB(A); $K_I$ = 2,4 dB. Nachfolgend erfolgt die Analyse der AM von einem exemplarisch ausgewählten Zeitabschnitt von 2 Minuten Dauer mit der Bezeichnung WP-ZB1. In den

Bilder 5, 6 und 7 werden diese Messergebnisse in der Art wie im Abschnitt 2 erörtert.

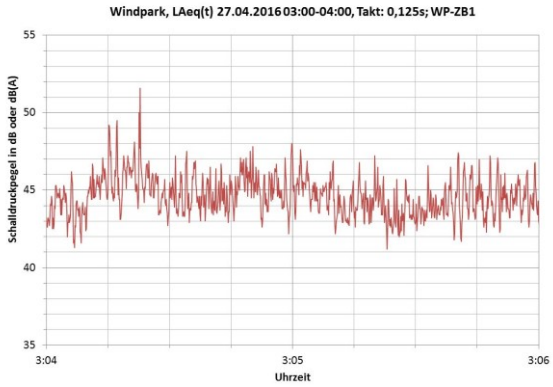


**Bild 5:** Windpark, Schallpegel am IP während 120s (WP-ZB1). Der Gesamtpegel in A-Bewertung $L_{Aeq}(t)$ zeigt deutliche periodische Amplitudenschwankungen (AM).Es ist auffallend, dass die Breite der AM unterschiedlich ausfällt. Es gibt auch etwas OAM.

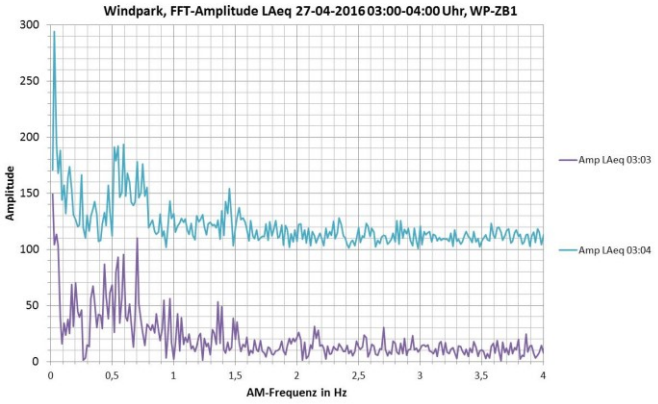


**Bild 6:** FFT-Analyse der Messdaten WP-ZB1 nach Bild 5. Minutenauswertung ohne Trend-Korrektur. Die Werte für das Zeitfenster 03:04 sind um einen Betrag von 100 angehoben worden, um die beiden FFT-Spektren besser darstellen zu können. Um 03:03 ergeben sich mehrere Linien. Einmal um 0,55-0,60 Hz, entsprechend Rotordrehzahlen von 11-12 Umin-1. Dazu die Linie um 0,7 Hz, die einer Rotordrehzahl von 14 Umin-1 entspricht. Das ist bei variablen Zuständen üblich.

Aus den Bildern 5, 6 und 7 folgt:

- Wenn Geräuschimmissionsmessungen an Windparks mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt werden, so enthalten die Messdaten Informationen, die Rückschlüsse auf dem Betriebszustand der WEA erlauben.
- Bei Windparks überlagern sich die Beiträge der diversen WEA. Wenn bei einem Windpark eine oder wenige WEA dominierend sind, so bestimmt die AM dieser WEA die resultierende Amplitudenmodulation.
- Es sind Anzeichen für NAM als auch für OAM erkennbar.
- Die AM ist – wie bei einer Einzelanlage - Folge eines breitbandigen Effektes im Frequenzbereich 200 Hz bis ca. 1 kHz. Der Terzbandpegel bei 100 Hz in diesem Windpark, mit Anzeichen von Tonhaltigkeit, zeigt auch AM.

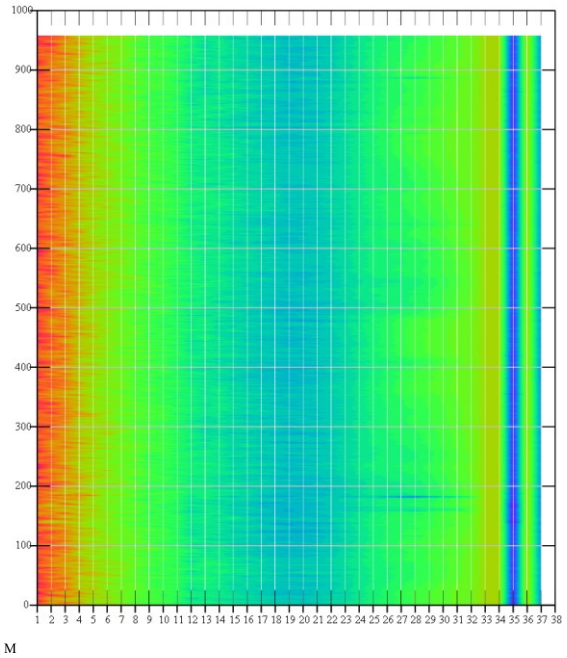


**Bild 7:** Windpark, Zeitfenster WP- ZB1 Spektrogramm am IP während 2 Minuten, Zeittakt 125 ms, A-bew. Terzbandspektren. Beschriftung: 1-> 8Hz; 4 -> 16 Hz; 7-> 32 Hz; 10-> 63,5 Hz; 13-> 125 Hz; 16-> 250 Hz, 19-> 500 Hz; 22 -> 1 kHz; 25-> 2 kHz; 28-> 4 kHz; 31-> 8 kHz; 35 -> LIN(t); 37-> $L_{Aeq}(t)$. Farbcodierung: Blau hohe Pegel, rot niedrigere Pegel. Die frequenzabhängige Darstellung entspricht in der Tendenz dem Pegelzeitverlauf nach Bild 5. Man erkennt im Bereich von 200 Hz (15) bis ca. 1 kHz (22) eine deutliche Terzband-AM mit variabler AM-Frequenz. Bei 100 Hz (12) erkennt man auch Anzeichen von AM und Tonhaltigkeit zu Beginn und am Ende des Zeitbereiches.

## AM von WEA: Zeit-Frequenz-Analyse (Wavelet-Verfahren)

Ein anderes Analyse-Verfahren kann in diesem Fall verwendet werden. Es handelt sich um eine Methode der Zeit-Frequenz-Analyse, die als Wavelet-Transformation bekannt ist. Mit dieser Methode wird z.B. eine Näherung des A-bewerteten Pegelzeitverlaufes während ein zeitlich begrenztes Fenster von ca. 2 Minuten Dauer (Takt 0,12 ms bzw. 0,125 ms), also mit N = 1024 Punkte unter Verwendung von sog. Daubechies Wavelets mit 4-Koeffizienten Filter durchgeführt. Nach diesem Verfahren ergeben sich 9-Ebenen von Approximationsfunktionen bzw. zeitabhängigen Koeffizienten des Original-Zeitsignals. Im Fall der Messung nach Bild 1 beträgt der Pearson Korrelationskoeffizient zwischen Rekonstruktion und Ursignal r = 0,897. Im Bild 8 werden exemplarisch die Rekonstruktionen aus den höheren Ebenen C7 bis C9 sowie C6 bis C9 verglichen. Die resultierenden (auch detrended) Amplituden-Anteile der Originalfunktion nach Bild 1 lassen sich somit aus den Ebenen C6 bis C9 bestimmen.

Ein Maß für die AM ist dann z.B. mit 95 % Wahrscheinlichkeit die Differenz der Perzentile L97,5 – L2,5 der Verteilung der zeitlich schwankenden Werten. Ein weiteres Maß ist z.B. mit 99 % Wahrscheinlichkeit die Differenz der Perzentile L99,5 – L0,5 usw.

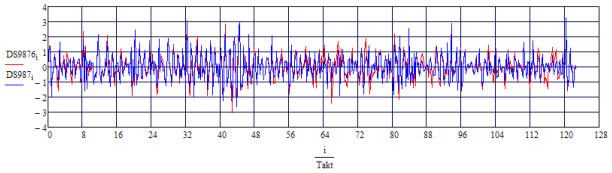


**Bild 8**: Beiträge der Ebenen C<7> bis C<9> (blau, DS987) sowie der Ebenen C<6> bis C<9> (rot, DS9876) zum Pegelzeitverlauf (s. Bild 1). Die statistische Analyse (DS987)ergibt demnach eine Amplitude der AM mit 95%-Wahrscheinlichkeit bis zu 3 dB, mit 99% Wahrscheinlichkeit bis 4,5 dB.

Im Bild 9 werden die FFT-Powerspectren der rekonstruierten einzelnen Ebenen dargestellt. Sie liefern ein differenziertes Bild der Beiträge zur AM, die mit dem Betriebszustand der WEA verglichen werden können sowie ergänzend ein direktes Maß für die Bestimmung der Amplitude der AM. Die Aussage-möglichkeiten dieses Verfahrens sind u.E. vorteilhafter als die Anwendung von reinen FFT-Analysen [3, 4, 6]. Das ist auch nachvollziehbar nah an die Messdaten.

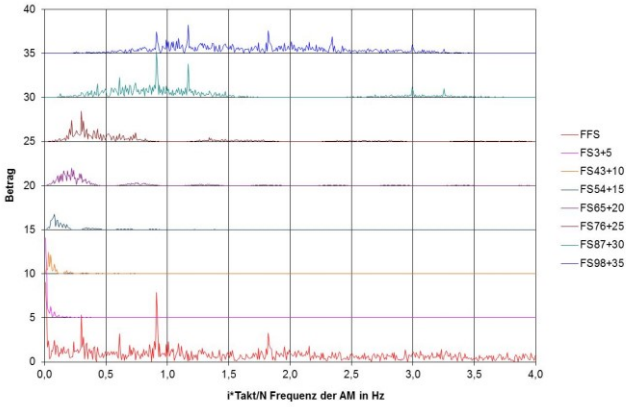


**Bild 9**: Einzelanlage, ZB7, FFT-Analyse der Ebenen der Wavelet-Analyse. Die Kurve FFS entspricht Bild 2 für das gesamte Zeitfenster. Aus dem Bild 9 folgt, dass die Ebenen C<9> (FDS98) und C<8> (FDS87) (s. Bild 8) in dieser Analyse die Rotorblattfrequenz (3*Rotordrehzahl) deutlich erkennen lassen, einschl. weiteren Harmonischen.

In gleicher Weise kann die Messung WP-ZB1gemäß Bild 5 (Windpark, ZB1) ausgewertet werden. Nach der Rekonstruktion beträgt der Pearson Korrelationskoeffizient r = 0,941.

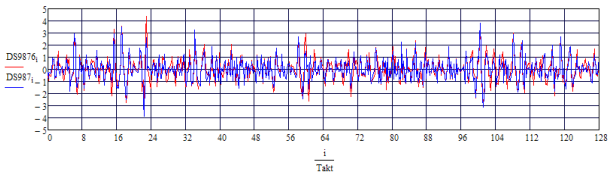


**Bild 10**: WP-ZB1, Beiträge der Ebenen C<7> bis C<9> (blau, DS987) im Vergleich zu den Beiträgen der Ebenen C<6> bis C<9> (rot, DS9876) zum Pegelzeitverlauf nach Bild 5. Die statistische Analyse von DS9876 ergibt eine Amplitude der AM mit 95%-Wahrscheinlichkeit bis zu 3,7 dB, mit 99% Wahrscheinlichkeit bis 5,6 dB**.**

Im Bild 10 werden die Rekonstruktionen aus den höheren Ebenen C7 bis C9 sowie C6 bis C9 dargestellt. Die resultierenden (detrended) Amplituden-Anteile der Originalfunktion nach Bild 5 - somit die Amplitude der AM - lassen sich statistisch bestimmen (s. Bildunterschrift Bild 10).

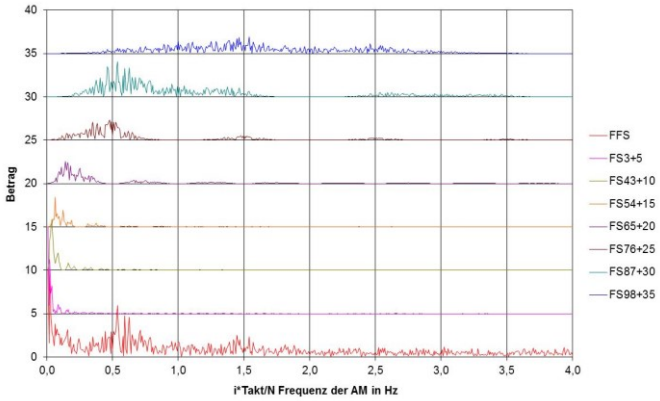


**Bild 11:** FFT-Analyse der Ebenen der Wavelet-Analyse. Windpark, ZB1. Die Kurve FFS entspricht Bild 6 für die gesamte Dauer des Zeitabschnittes. Aus diesem Bild erkennt man, dass die Ebene C<9> (FDS98) keine ausgeprägte AM-Frequenz zeigt. Die Ebenen C<8> (FDS87) und C<7>(FDS76) lassen in dieser Analyse variable Rotorblattfrequenzen (3*Rotordrehzahl) deutlich erkennen, einschl. weitere Harmonischen. Dabei ist also ein Windparkeffekt sichtbar.

Bild 11 entspricht Bild 9 für die Messung am Windpark.

Eine normativ einheitliche Kennzeichnung von AM ist nötig und ist u.E. mit diesem Verfahren praxisnah möglich wenn ein entsprechendes Auswerte-Programm vorliegt. Allerdings müssten Nahbereich und Fernbereich [3,4] abgedeckt werden.

## Literatur

[1] DIN EN 61400-11: Windenergieanlagen-Teil 11: Schallmessverfahren. Berlin: Beuth Verlag 2007.

[2] Technische Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 1: Bestimmung der Schallemissions-werte, Revision 18. Hrsg: Fördergesellschaft Windenergie e.V. Berlin 2008

[3] Renevable UK, Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to improve understanding as to its Cause and Effect, December 2013

[4] Cand, M., Bullmore, A., Understanding amplitude modulation of noise from wind turbines: causes and mitigation, Acoustics in Practice, Issue 5, October 2015, S. 45-52.

[5] Eggenschwiler, K., Heutschi, K., Schäffer, B., Pieren,R. Bögli, H. und Bärtlocher, M., Wirkung und Beurteilung des Lärms von Windenergieanlagen, Aktuelle Beiträge aus der Schweiz, Lärmbekämpfung 11(2016) Nr.5, S. 159-167.

[6] Pohl, J., Gabriel, J., Hübner, G.; Geräuschwirkungen von Windenergieanlagen auf Anwohner – eine interdisziplinäre Analyse, Lärmbekämpfung 10(2015) Nr. 3 S.133 - 141.

[7] Zheng Hu, Martinez S., Kurtz, W. Messverfahren zur Bestimmung der Geräuschemission von Windenergieanlagen, Lärmbekämpfung 5 (2010), S. 130-138.