

Amplitudenmodulierte Geräusche von Windenergieanlagen

Till Kühner

Dr. Kühner GmbH, 40764 Langenfeld, E-Mail: kuehner@umweltakustik.de

Einleitung

Die von Windenergieanlagen (WEA) verursachten Geräusche beinhalten oft Teile, die mit Begriffen wie Wuschen oder Stampfen beschrieben werden. Dabei ist meist auch optisch ein direkter Zusammenhang zwischen dem Rhythmus der Geräusche und der Bewegung der Rotorblätter der WEA feststellbar.

Das Auf- und Ab der Geräusche wird in der Regel als Amplitudenmodulation (AM) bezeichnet. Im Folgenden wird diskutiert, was Amplitudenmodulationen eigentlich sind, wie sie an WEA entstehen, und in wieweit die Bezeichnung Amplitudenmodulation angemessen ist.

Amplitudenmodulation – Der Begriff

Ausgangspunkt sei ein einfacher Sinuston

$$p(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

mit dem Schalldruck p , der Amplitude A_0 , der Frequenz f_0 und der Zeit t . Wird die konstante Amplitude A_0 durch eine zeitabhängige Funktion $A(t)$ ersetzt, kann diese als modulierte Amplitude bezeichnet werden.

In Abb. 1 ist als Beispiel das Signal mit

$$p(t) = A(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (2)$$

$$A(t) = (A_0 + A_1 \sin(2\pi f_1 t)) \quad (3)$$

und $f_1 \ll f_0$ dargestellt.

Genau in dieser Form wird der Begriff der Amplitudenmodulation in der Radiotechnik verwendet. Der unmodulierte Sinuston wird dort als Trägersignal bezeichnet, $A(t)$ ist die Modulation. Einziger kleiner Unterschied ist, dass in der Radiotechnik das Nutzsignal die Differenz $A(t) - A_0$ ist, während in der Akustik die Gesamtamplitude relevant ist.

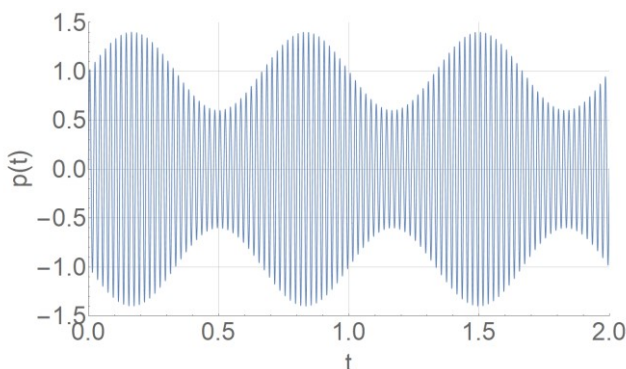


Abbildung 1: Amplitudenmodulierter Sinuston

Solange der Begriff entsprechend benutzt wird, besteht also keinerlei Konflikt zwischen Akustik und Radiotechnik bei der Verwendung der Bezeichnung Amplitudenmodulation.

Geräusche von Windenergieanlagen

Die Hauptquelle von Geräuschen von Windenergieanlagen (WEA) entstehen aerodynamisch an den Rotorblättern. Auf diese Geräusche beschränkt sich die folgende Diskussion.

Im Normalfall liegt die Strömung laminar an den Rotorblättern an. Das dabei entstehende Geräusch ist ein breitbandiges Rauschen mit einer ausgeprägten Richtwirkung. Hat man einen festen Immissionspunkt, dann ändert sich während der Bewegung die auf die Rotorblätter bezogene Abstrahlrichtung, und durch die ausgeprägte Richtcharakteristik die zum Immissionspunkt abgestrahlte Energie. Dadurch steigt und sinkt der Pegel im Takt der Auf- und Abbewegung der Windenergieanlage.

Das Signal kann entsprechend als Produkt aus einem breitbandigem Rauschen und einer modulierten Amplitude $A(t)$ dargestellt werden, wobei $A(t)$ eine Funktion des Abstrahlwinkels $\alpha(t)$ ist. Dabei ist das Gesamtsignal natürlich die Kombination aus den Signalen der drei Rotorblätter.

Da die Änderungen des Abstrahlwinkels $\alpha(t)$ mit dem Abstand von der WEA abnimmt, nehmen die dadurch entstehenden AM ebenfalls mit dem Abstand ab.

Eine mögliche Ursache für AM in größeren Abständen ist höhenabhängige Schallausbreitung [1,2]. Wenn die Dämpfung der Schallausbreitung höhenabhängig ist, kann das Signal am Immissionsort als amplitudenmoduliert aufgefasst werden, mit $A(t)$ als Funktion der Höhe der Quelle $h(t)$.

Eine weitere oft genannte mögliche Quelle für AM sind höhenabhängige Strömungsabriss [3]. Die Windgeschwindigkeit nimmt stark mit der Höhe zu, es könnte also im oberen Bereich der Bewegung der Rotorblätter durch die dort höhere Windgeschwindigkeit zu Strömungsabrisse kommen, während im unteren Bereich die Strömung noch linear anliegt.

Durch einen Strömungsabriss steigt der Pegel, und die Richtcharakteristik wird noch stärker ausgeprägt. Wenn dies höhenabhängig passiert, könnte es dadurch zu einem starken An- und Absteigen des Pegels kommen.

Allerdings verschiebt sich durch den Strömungsabriss das Spektrum zu tieferen Frequenzen. Das heißt, nicht nur die Amplitude verändert sich, das modulierte Signal selbst verändert sich. Eine Darstellung des Signals als amplitudenmoduliertes Rauschen ist damit nicht möglich.

Möchte man bei einer Nutzung des Begriffs der Amplitudenmodulation bleiben, die mit der Verwendung in

der Radiotechnik übereinstimmt, dann kann das Auf und Ab der Pegel durch Strömungsabriss deshalb streng genommen nicht als Amplitudenmodulation bezeichnet werden.

Signalformen

Die an WEA auftretenden AM sind deutlich ausgeprägter als die im Beispiel in Abb. 1 gezeigte Modulation mit einem Sinus.

Abb. 2 zeigt als Beispiel eine Funktion, die in dB einer Dreieckfunktion entspricht, bei der der Pegel in einem kleinen Zeitfenster auf einen Spitzenwert mit +10 dB über den Hintergrund geht. Moduliert man mit einer solchen Funktion beispielsweise ein auf 100-400 Hz bandbegrenzt Rauschen, dann erhält man Geräusche ähnlich dem, was man zum Teil von WEA hören kann.

Die tatsächlichen Modulationen können erheblich von diesem Beispiel abweichen, das Beispiel soll nur verdeutlichen, wie ausgeprägt die zu erwartenden Modulationen sind.

Spektr

Da sich ein amplitudenmoduliertes Geräusch aus dem Produkt zweier Funktionen im Zeit-Raum bildet, wird das Spektrum nicht etwa als Produkt aus den Spektren der beiden Funktionen gebildet, sondern aus der Faltung.

Die Fouriertransformierte des Produkts

$$f(t) = g(t) \cdot h(t) \tag{4}$$

ist die Faltung der Fouriertransformierten

$$\mathcal{F}(\omega) = (\mathcal{G} * \mathcal{H})(\omega) \tag{5}$$

mit der Faltung

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\omega) &\propto \int e^{-i\omega t} f(t) dt \\ &\propto \int \mathcal{G}(\omega - \omega_s) \mathcal{H}(\omega_s) d\omega_s \end{aligned} \tag{6}$$

Im Beispiel aus Gl. (3) und Abb. 1 heißt das, dass die Fouriertransformierte des Sinustons eine Linie bei f_0 hat.

Die Fouriertransformierte der modulierenden Funktion hat Linien bei $-f_1$ und f_1 durch den Sinusteil, und eine Linie bei 0 durch den Konstantanteil. Durch die Faltung entsteht im Spektrum eine Linie bei $f_0 - f_1$, eine Linie bei $f_0 + f_1$, und es bleibt die Linie bei f_0 . Die Linie im Spektrum des Sinustons wird durch die Linien im Spektrum der modulierenden Funktion verschoben, es entstehen Nebenlinien.

Durch eine Amplitudenmodulation entstehen jedenfalls keine Linien bei der Frequenz der Modulation. Durch Amplitudenmodulation würde eine WEA keine Linien im Spektrum erzeugen, die seiner Drehfrequenz entsprechen.

Hat man allerdings eine Modulation wie im Beispiel in Abb. 2, dann hat das Spektrum der Modulation nicht nur Linien in dem Bereich, der seiner Periodizität entspricht.

Abb. 3 zeigt das Spektrum zur in Abb. 2 gezeigten Modulation. Aufgrund der Periodizität mit 1,5 Sekunden, wird das Spektrum als diskrete Fourierreihe gebildet. Die erste Linie liegt mit 0 dB bei 0 Hz, und entspricht dem unmodulierten Fall. Alle höheren Beiträge sind deutlich kleiner, fallen aber sehr langsam ab.

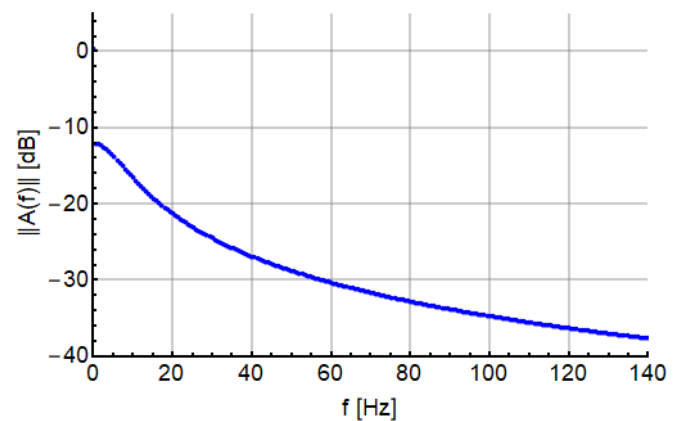


Abbildung 3: Spektrum der Modulationsfunktion in Abb. 2

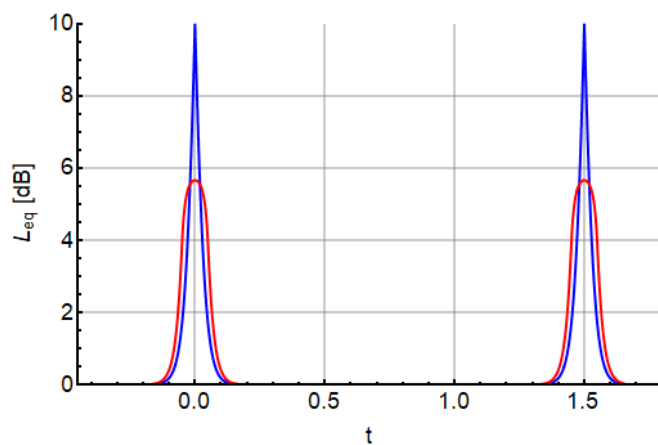


Abbildung 2: Modulation mit Dreiecksfunktion im dB-Raum (blau), und mit 100ms Integrationszeit als $L_{eq}(100ms)$ (rot)

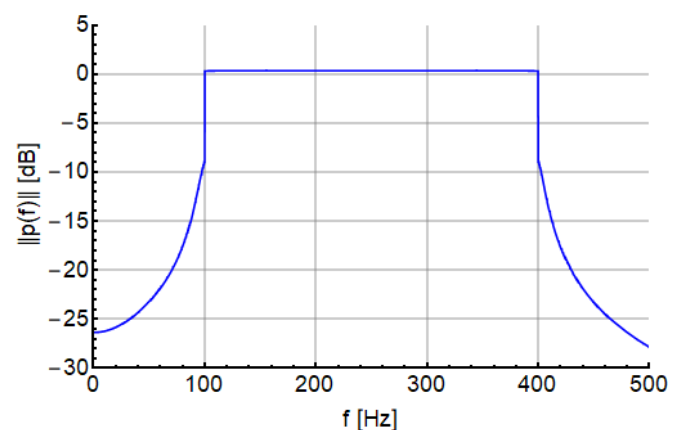


Abbildung 4: Spektrum der Modulationsfunktion in Abb. 2

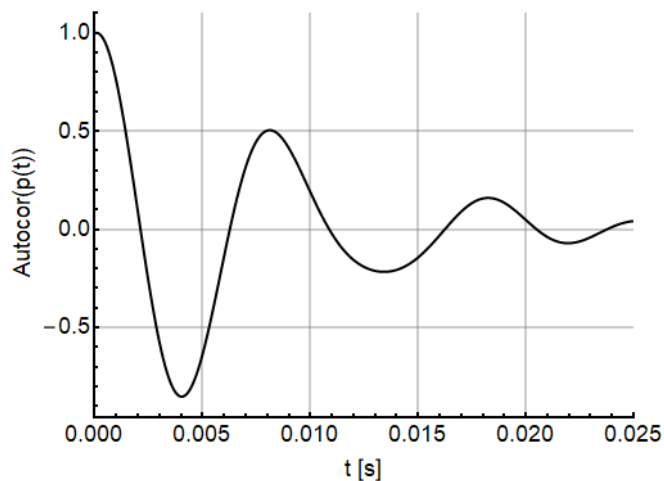


Abbildung 5: Autokorrelation des Schalldrucks im 125 Hz-Band

Das Spektrum der modulierten Funktion setzt sich zusammen aus der Summe des ursprünglichen Spektrums, jeweils verschoben um die Frequenz im Spektrum der modulierenden Funktion, und multipliziert mit der Amplitude der Linie. In Abb. 4 ist das so entstandene Spektrum für ein auf 100-400 Hz bandbegrenztetes weißes Rauschen dargestellt.

Das entstehende Spektrum hat auch Beiträge bei sehr tiefen Frequenzen. Diese sind jedoch immer kleiner als die Beiträge im Bereich des ursprünglichen Spektrums, weil die Fouriertransformierte der modulierenden Funktion immer mit zunehmenden Ordnungen sinken wird (wie in Abb. 3).

Messtechnische Erfassung

Handelt es sich bei einem Signal um die Modulation eines Rauschens, dann kann die Modulationsfunktion leider nicht mit den Mitteln der Radiotechnik erkannt werden, die nur mit einem Trägersignal als Sinusfunktion möglich sind.

Bei weißem Rauschen hat die Amplitude des Rauschens die Größenordnung der Standardabweichung. D.h. auch wenn das Signal mit einer Modulationsfunktion versehen ist, ist das Signal für jeden Zeitpunkt durch das Rauschen dominiert.

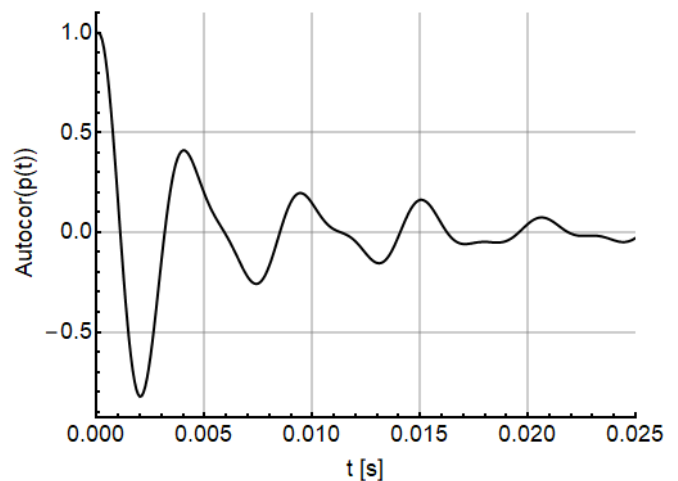


Abbildung 7: Autokorrelation des Schalldrucks im 250 Hz-Band

Ein offensichtlicher Weg um die Dominanz des Rauschens auf das Signal zu unterdrücken, ist die Mittelung über kleine Zeitfenster – üblicherweise als L_{eq} mit z.B. 100ms Breite.

In Abb. 2 ist eine Modulationsfunktion dargestellt, und zum Vergleich die Form, die durch Mittelung über jeweils 100ms entsteht. Leicht zu erkennen ist, dass die Spitze deutlich abgestumpft und verbreitert wird. Im Abb. 5 sind ΔL_{eq} (L_{eq} von denen der unmodulierte Pegel abgezogen wurde) mit unterschiedlichen Fensterbreiten für eine Messung von AM einer WEA in knapp 1000m Entfernung dargestellt. Je kürzer die Zeitfenster, um so ausgeprägter werden Spitzen im Signal – aber es bleibt unklar, wie viel davon aus Rauschen kommt, und wie viel aus der AM.

Der Versuch, die Statistik durch Mittelung zu verbessern ist auch dadurch behindert, dass es sich bei den Geräuschen von WEA nicht um gauss'sches weißes Rauschen handelt, sondern schon allein durch die Bandbegrenzung Autokorrelationslängen im Rauschen bei mindestens 10ms zu erwarten sind. (Abb. 5 und 6 zeigen die Autokorrelationsfunktion des Schalldrucks für das 125 Hz und das 250 Hz Band. Je tiefer die Frequenz, umso länger die Korrelationszeit.)

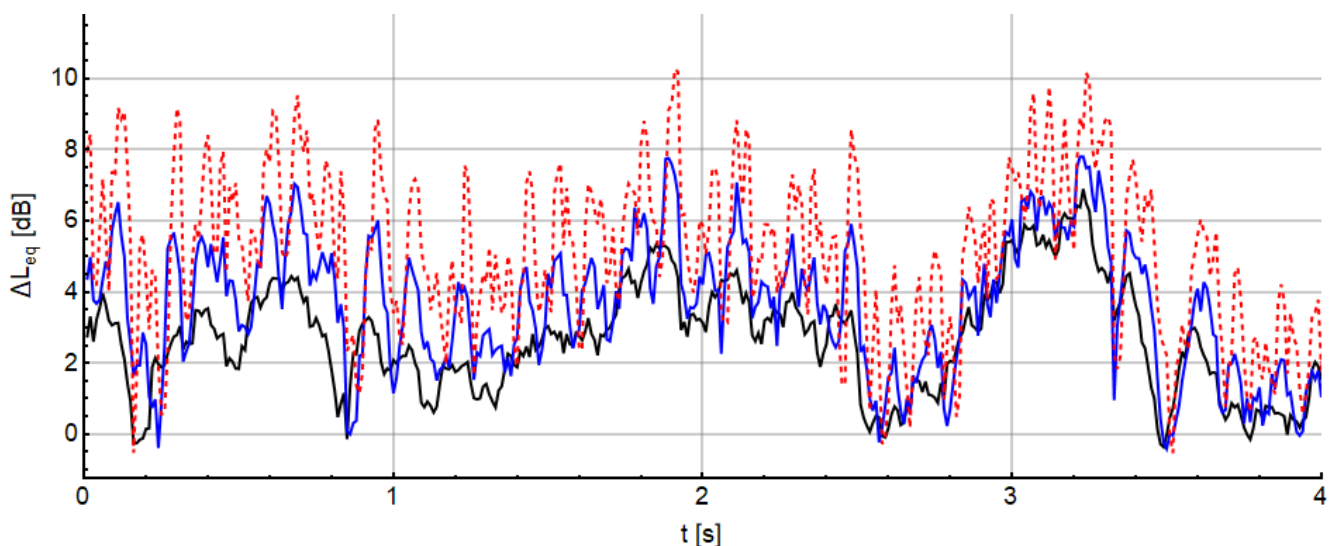


Abbildung 6: ΔL_{eq} mit unterschiedlichen Integrationszeiten. 100ms (schwarz), 50ms (blau), 25ms (rot)

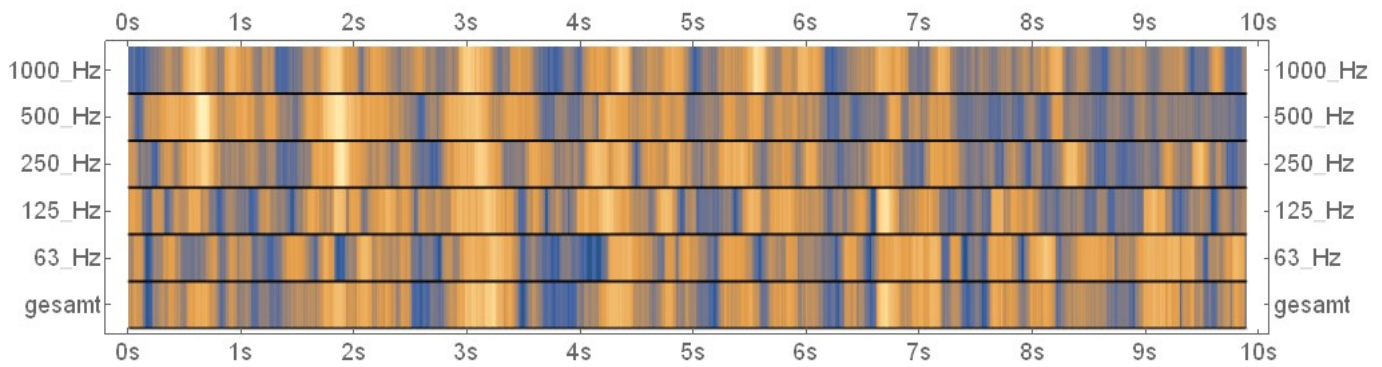


Abbildung 9: $L_{eq}(100ms)$ für Oktavbänder

D.h., das Schalldrucksignal innerhalb eines Zeitfensters von ca. 10ms ist nicht unabhängig, entsprechend ist nicht zu erwarten, dass durch Mittelung innerhalb 10ms ein Wert näher am Erwartungswert erreicht wird. (Entsprechend das schon bei 25ms sehr starke Rauschen im Signal in Abb. 7.)

Ein Weg zur Mittelung eines Signals, bei dem man Periodizität erwartet, ist die Autokorrelationsfunktion. In Abb. 8 ist die Autokorrelationsfunktion der $\Delta L_{eq}(100ms)$ aus Abb. 7 dargestellt. Die Umlaufzeiten der WEA sind direkt am Abstand zwischen den Maxima abzulesen. Nach 12 Sekunden ist die Korrelation noch deutlich erkennbar, aber es ist auch zu sehen, dass die Autokorrelation mit der Zeit sinkt. Das ist ein klarer Hinweis auf die Gefahr, die Messdaten einer Fourieranalyse zu unterziehen, bei der implizit eine unbegrenzte Erhaltung der Periodizität unterstellt ist.

Abgrenzung Amplitudenmodulationen

Die in Abb. 8 dargestellte Autokorrelationsfunktion legt nahe, dass es sich in diesem Beispiel um ein amplitudenmoduliertes Signal handelt. Im Prinzip müsste diese Modulation in allen Frequenzbereichen gleich aussehen. In Abb. 9 sind die L_{eq} für verschiedene Oktavbänder dargestellt. Auch wenn in dieser Darstellung durch fehlende Mittelung die Werte stark durch Rauschen beeinflusst sind, kann man vielleicht erkennen, dass die Signale in den verschiedenen Oktavbändern nicht ganz synchron laufen.

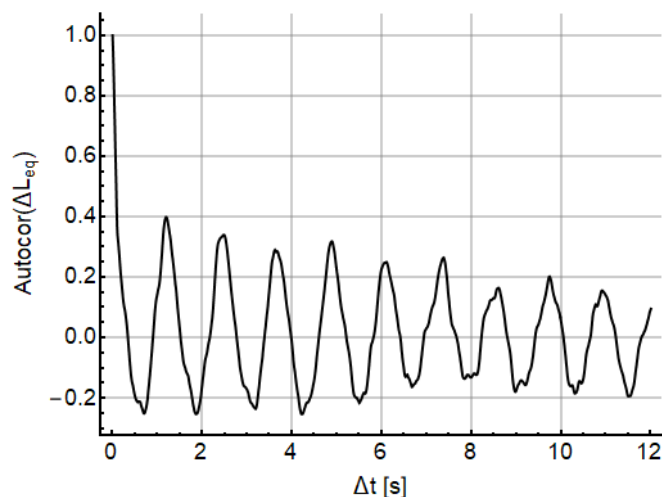


Abbildung 8: Autokorrelationsfunktion der ΔL_{eq}

Streng genommen ließe sich dieses Signal also nicht als zeitliche Modulation der Amplitude eines Rauschens konstruieren. Man könnte das Signal z.B. als Summe aus Modulationen von verschiedenen Rauschteilen interpretieren.

Fazit

Nicht bei jedem Signal, bei dem der Pegel rhythmisch steigt und fällt, handelt es sich notwendigerweise um eine Amplitudenmodulation.

Bei den Geräuschen von Windenergieanlagen kann man im Prinzip erwarten, dass es sich um Amplitudenmodulationen handelt, soweit die Pegelschwankungen durch die gerichtete Abstrahlung oder durch höhenabhängige Schallausbreitung entstehen.

Andere Effekte, die das Signal von WEA beeinflussen, können zu Pegelschwankungen führen, dabei aber auch das Signal über eine reine Modulation der Amplitude hinaus beeinflussen.

Wie streng man bei der Verwendung des Begriffs der Amplitudenmodulation vorgehen will, muss gerade bei WEA auch im Verhältnis zu den ohnehin schwierigen Messbedingungen gesehen werden.

Literatur

- [1] Heimann, Käsler, Gross: The wake of a wind turbine and its influence on sound. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 20, No. 4, 449-460 (August 2011)
- [2] Kühner, T.: Amplitude modulation of noise from wind turbines due to propagation through the atmosphere, inter.noise Hamburg 2016
- [3] Cand M., Bullmore A., Understanding amplitude modulation of noise from wind turbines: causes and mitigation, Acoustics in Practice, Issue 5, October 2015