# Richtungs- und Entfernungsabhängigkeit der Amplitudenmodulation (AM) bei Windenergieanlagen

Sergio Martinez<sup>1</sup>, Kai Pies<sup>2</sup>, Florian Fennel<sup>1</sup>, Anne-Kathrin Ferreira<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Schalltechnisches Ing.-Büro Pies GbR, kpies@schallschutz-pies.de

## Wirkung von AM auf den Menschen

Entsprechend dem allgemeinen Konsens stellt Amplitudenmodulation eine wesentliche Größe bei der Empfindung der Geräusche von Windenergieanlagen dar. In den vorangegangenen Untersuchungen [1] bis [7] wurde ein Verfahren zur Erfassung und Quantifizierung dieser Amplitudenmodulation (AM) entwickelt. Dabei spielen diverse akustische und nicht akustische Parameter eine Rolle. Aus akustischer Sicht sind dabei die Einflussgrößen Gesamtschallpegel (LAeq), die Amplitudenschwankungsbreite (p<sub>AM5</sub>), die mit der Amplitudenmodulation einhergeht und rein formal die Modulationsfrequenz (fm). In Untersuchung [6] und unter Zuhilfenahme Auswerteverfahrens nach [4] wurde eine Belästigungsfunktion entwickelt, mit der es möglich ist, die Ausprägung der Belästigung vorherzusagen. Die Funktion baut auf dem anlagenbezogenen Gesamtpegel  $L_{\text{Aeq}}$  am Immissionsort (verursacht durch Einzel-WEA oder einen Windpark) und der mittleren Breite der AM-Amplitudenbreite p<sub>AM5</sub> auf.

Diese Auswahl begründet sich zum einen darin, dass der Parameter  $L_{Aeq}$  den breitbandigen Effekt auch über 200 Hz abbildet, zum anderen damit, dass mit der Größe  $p_{AM5}$  die insbesondere bei modernen WEA vorhandenen AM-Frequenzen zwischen ca. 0,5 Hz und ca. 1 Hz berücksichtigt werden.

Die in [6] entwickelte logistische Belästigungsfunktion hat folgende Gestalt:

$$P(A\%; X) = \frac{a}{[1 + b \cdot e^{-c \cdot X}]}$$
 (1)

Dabei wird die Variable X wie folgt definiert:

$$X = f_1(L_{Aeq}) + f_2(p_{AM5})$$
 (2)

Für die Funktionen  $f_1(x)$  und  $f_2(x)$  gilt:

$$f_1(L_{Aeq}) = -2.5 + 0.09 \cdot L_{Aeq}$$
 (3)

$$f_2(p_{AM5}) = 0.25 \cdot p_{AM5}$$
 (4)

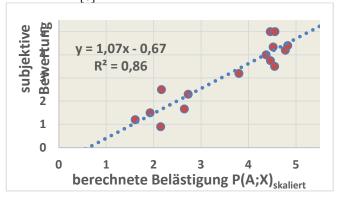
Die weiteren Konstanten werden wie folgt festgelegt:

$$a = 0.97$$
  $b = 0.466 \cdot 10^2$  und  $c = 2.63$ 

Die o.a. Funktion P(A%;X) lässt sich auf eine 5-stufige Skala übertragen. Im Rahmen von Hörversuchen an Probanden mit realen Geräuschbeispielen kann man die subjektive Belästigung der berechneten und skalierten Belästigung gegenüberstellen. Das Ergebnis zeigt die **Abbildung 1**.

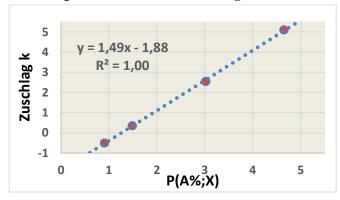
Eine Untersuchung von Geräuschen mit AM im Labor zeigt auch die Studie von P. Virjonen et al. [8]. Dabei konnten Geräusche mit AM (z.B. mit  $L_{Aeq}=35~dB(A)$ ) Geräuschen ohne AM im Pegelbereich von 29 dB(A) bis 49 dB(A) gegenübergestellt werden. Die sich einstellenden subjektiven Differenzen in der Empfindung können demnach einem "Zuschlag" k, der durch die AM verursacht wird, zugeordnet werden. Die Untersuchung wurde für Geräusche bei  $L_{Aeq}=$ 

35 dB(A) durchgeführt. Die AM erfolgte dabei synthetisch mit einer veränderlichen AM-Breite  $D_m$  (entspricht etwa  $p_{AM5}$  in [4]) in Stufen von 1dB, 2 dB, 4 dB, 8 dB und 14 dB mit diversen Modulationsfrequenzen  $f_m$  (0,25 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz und 16 Hz). Details können z.B. der Tabelle III in [8] entnommen werden.



**Abbildung 1:** Gegenüberstellung der berechneten, skalierten Belästigung und der Mittelwerte der subjektiven Bewertung bei den Hörversuchen (vgl. [6]).

Um die Laborergebnisse nach [8] auf die von uns gewonnenen Erkenntnisse übertragen zu können, werden die Daten mit den AM-Breiten  $D_m=1\ dB,\ 2\ dB,\ 4\ dB$  und 8 dB herangezogen. Des Weiteren kann der Bereich der Modulationsfrequenzen für moderne WEA und Windparks auf  $0.5\ Hz \le f_m \le ca.\ 1\ Hz$  beschränkt werden. Hier werden Mittelwerte der Zuschläge k bezüglich des Parameter  $f_m$  zugrunde gelegt. Stellt man diese gemittelten Zuschläge k als Funktion der Belästigung P(A%;X) aus Gleichung (1) dar, so zeigt sich der Verlauf in  $Abbildung\ 2$ :



**Abbildung 2:** Vergleich Zuschlag k nach P.Virjonen et al. [8] mit der Belästigungsfunktion nach [6] (Gl. 1 - 4)

Das Ergebnis zeigt eine hohe Signifikanz, die den linearen Zusammenhang zwischen Zuschlag k und Belästigungsfunktion unterstreicht. Es zeigt sich, dass bei der Stufe 1 kein Zuschlag erforderlich ist. Bei der Stufe 2 ergibt sich ein Zuschlag von 1 dB. Bei der Stufe 3 beträgt der Zuschlag mindestens 2 dB. Bei den höheren Stufen ist ein Zuschlag von mind. 3 dB erkennbar.

## Schallausbreitung und AM von einzelnen WEA

Einen wesentlichen Einfluss auf die Schallausbreitung von WEA hat die Meteorologie. In [9] zeigt Heimann eine Möglichkeit zur Kopplung der meteorologischen Parameter mit der akustischen Modellierung. Dabei werden vertikale Wind- und Temperaturprofile für idealisierte "große" Entfernungen (large-scale-cases) und bis zu 500 m Höhe zugrunde gelegt. Dabei kann der Einfluss der WEA (als rotierendes, aber auch ortsfestes Windhindernis) auf die Profile ohne WEA mit einem sog. RANS - Modell (3-dim. compressive Revnolds-averaged-Navier-Stokes model) berücksichtigt werden. Das Rechengebiet umfasst den Bereich von 250 m vor bis 1250 m hinter sowie je 152,5 m seitlich der WEA und einer Höhe von 300 m. Die Schrittweite ist mit 5 m festgelegt. Als Schallquelle wird eine WEA mit 3 Rotorblättern (NH = 100 m und RD = 100 m) modelliert. Dabei werden insgesamt 24 Punktquellen in 5 m Abständen, von der Blattspitze beginnend, betrachtet.

Die Schallausbreitung einer WEA in der Atmosphäre erfolgt anhand eines 3-dimensionalen, strahlenbasierten Modell (Lagrange Schallteilchen-Modell). Für die Berechnung wird die Rotation der Rotorblätter für Schritte á 15 Grad festgelegt. Zusätzlich werden die Richtwirkung der Punktquellen, der Einfluss der Turbulenz durch Luftwirbel (u.a. von der Quelle selbst erzeugt), Luftabsorption in Abhängigkeit der Abstände zum (punktuellen) Immissionsort und die Bodenabsorption aufgrund der Bodenimpedanz für die die Terzbänder von 20 Hz bis 16 kHz berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Berechnungen von D. Heimann in [9] zeigen u.a. den A-bewerteten Gesamtpegel als Mittelwert für eine Umdrehung des Rotors an einem virtuellen Empfänger in 2,5 m Höhe über Boden. Die AM wird hier nur indirekt betrachtet, aber explizit quantifiziert. Bei stabilen Schichtungen ergeben sich AM-Breiten von ca. 4 dB in 400 m Abstand. In 1200 m Abstand und Mitwind ergeben sich höhere Werte. Die Untersuchungen zeigen, dass hohe Schallquellen eine andere Statistik bezüglich der AM haben können als bodennahe Schallquellen.

In der Studie [10] stellen E. Barlas et al. auch ein Modell vor, bei dem die Schallquelle und das Ausbreitungsmedium gekoppelt sind. Die Studie bezieht sich auf eine WEA des Typs Nordtank 500/37, NH = 35 m, RD = 41m. Die aerodynamische Schallquelle umfasst dabei die Komponenten trailing edge noise und turbulent inflow noise. Das Ausbreitungsmodell basiert auf einer parabolischen Gleichung, wie sie im z.B. im Tool "WindSTAR-Pro" implementiert ist. De facto wird die Schallausbreitung innerhalb von 2-dimensionalen vertikalen Flächen des (Wind)-Flusses in diversen Richtungen bezüglich der Rotorebene berechnet. Zur Berücksichtigung der Bodenabsorption wird das Delany-Bazley-Modell zugrunde gelegt. Das Ergebnis der zeitlich hoch aufgelösten Berechnungen zeigt, dass ebenfalls, dass sich die AM mit dem Abstand sowohl für Mitwind als auch für Gegenwind erhöhen kann. Die Studie [10] liefert allerdings keine ausreichenden Aussagen in Querwindrichtung, d.h. für eine Schallausbreitung in der Ebene des Rotors. Die entsprechenden Ergebnisse von [10] für die Querwindrichtung sind überraschend. Sie stehen der Studie von S. Oerlemans [11] entgegen, die eine Richtungs- und Entfernungsabhängigkeit aufweist.

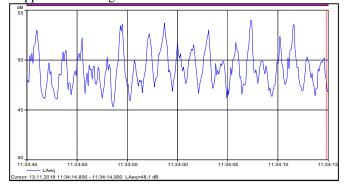
Demnach kann für Abstände in der Größenordnung von 10-mal Rotordurchmesser die Breite der AM in Querwindrichtung rechnerisch größer sein als in Mitwind- oder Gegenwindrichtung.

Ein Beispiel aus der Praxis zur Schallausbreitung bei Windparks kann u.a. der Arbeit von G.P. van den Berg [12] entnommen werden. Diese Arbeit zeigt Messergebnisse eines Windparks bei Rhede mit 12 WEA von Typ E-66,  $P_{el}$  = 1,8 MW, NH = 98 m und RD = 66 m. An einem Immissionsort in ca. 750 m Abstand von den nächsten zwei WEA wurden z.B. nachts AM mit  $f_{\rm m}$  =1 Hz und eine AMBreite von bis zu 4-5 dB(A) festgestellt.

#### AM einer einzelnen WEA im Nahbereich

Die nachfolgend in **Abbildung 3** dargestellten Messergebnisse beziehen sich auf eine Messung nach [7] an einer einzelnen WEA mit Nabenhöhe NH = 142,5 m, Rotordurchmesser RD = 113 m und elektrische Nennleistung  $P_{\rm el}$  = 3 MW. Der Messpunkt befand sich in 170 m Abstand vom Turm in 4 m Höhe über Boden. Das Messmikrofon wurde mit Sekundärwindschirm ausgestattet. Die Position des Messpunktes lag dabei ca. 90° seitlich der Anlage, etwas vor der Rotorfläche. Gemessen wurde u.a. der dargestellte Schalldruckpegelverlauf  $L_{\rm AF}(t)$  in einer Auflösung von 100 ms.

Aus dem Verlauf kann man die Rotordrehzahl von etwa 13,5 Umdrehungen pro Minute ablesen. Dies entspricht pro Umdrehung ca. 4,5 Sekunden. Innerhalb eines Zeitblocks von etwa 5 s werden also drei Pegelspitzen registriert. Man kann am Diagramm also die Spur eines jeden Rotorblattes verfolgen. Die Struktur des Verlaufes lässt auch deutlich die Dopplerverstärkung erkennen.



**Abbildung 3:** Einzelne WEA, Pegelzeitverlauf mit 100 ms Takt, Messzeitpunkt 4,SID-1, 1. Ausschnitt 30 s, L<sub>Aeq</sub> = 49,5 dB(A). Ausgeprägte AM.

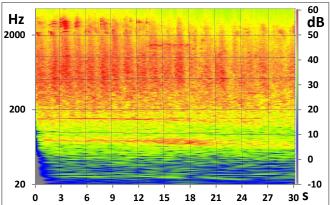
Wird die Messung nach Abbildung 3 als Sonogramm mit dem Analyseverfahren 1/48 Oktave ausgewertet, so erhält man die Darstellung nach **Abbildung 4**. Diese zeigt die charakteristische breitbandige AM. Im Bereich des drehzahlabhängigen Einzeltones bei ca. 80 Hz erkennt man auch die "Verschmierung" aufgrund des Dopplereffektes.

Im Nahbereich einer einzelnen WEA liegt demnach immer AM vor. Die Struktur der AM hängt u.a. auch von der Lage des Messpunktes (s. auch [11])

## AM bei Windparks in 600 – 1000 m Abstand

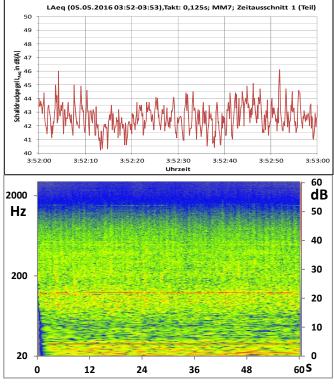
In der **Abbildung 5** wird ein Zeitausschnitt aus einer Nachtmessung exemplarisch dargestellt. Die Daten stammen aus einem Windpark, der in [4] untersucht wurde. Die maßgebenden Schallquellen sind 3 WEA der 3 MW Klasse

mit einem Abstand der nächsten WEA von 550 bis 610 m zum Immissionsort.



**Abbildung 4:** Sonogramm, Messzeitpunkt 4, SID-1, Ausschnittsdauer 30 s, 20 Hz bis 4,5 kHz,  $L_{Aeq} = 49,5$  dB(A). Takt: 10 Hz, Intervalldauer 100 ms.

Die Geräusche der WEA sind praktisch frei von Fremdgeräuschen. Die Feinstruktur der erfassten Messdaten erinnert an die Messdaten von G. P. van den Berg [12]. Die AM-Breite p<sub>AM5</sub> beträgt ca. 3 dB. Auffallend ist die Deutlichkeit mit der die Signatur einzelner Blätter über dem großen Abstand und bei einer durchaus turbulenten Atmosphäre übertragen wird. Offenkundig liegt ein Synchronisationseffekt mindestens zweier WEA vor, die zu den Pegelschwankungen im Bereich zwischen ca. 40,2 dB(A) bis 46 dB(A) führen.

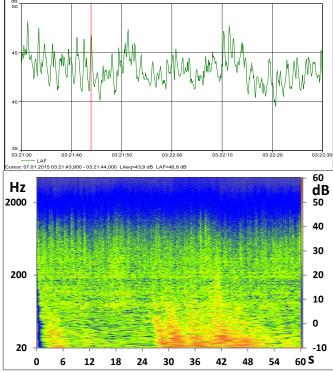


**Abbildung 5:** Windpark MM, ca. 600m, Pegelzeitverlauf in 125 ms Takt, Messzeitpunkt 3: 60 s,  $L_{Aeq} = 42.7$  dB(A). AM  $p_{AM5} = 2.9$  dB,  $f_m = 0.73-0.75$  Hz. Dazu Schmalband (1/48Oktave), 20 Hz bis 4 kHz, Ton bei ca. 125 Hz

In der **Abbildung 6** werden Daten aus einem weiteren Windpark mit 5 WEA in ca. 800 m Entfernung dargestellt. Bei den WEA handelt es sich um Anlagen der 2,5 MW-Klasse vergleichbar zu den WEA in Abbildung 5. Die

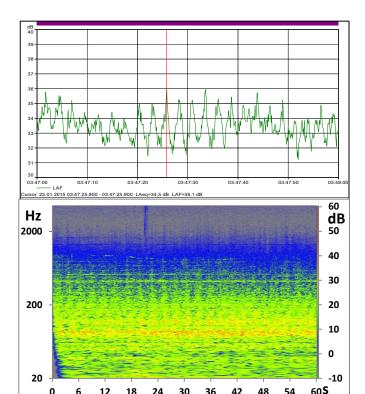
Messungen erfolgten nachts bei Mitwind. Dargestellt ist ein exemplarischer Ausschnitt mit einer Dauer von 1 Minute. Der Mittelwert beträgt  $L_{Aeq} = 43,5\,$  dB(A) bei einer AMBreite von  $p_{AM5} = 3,9\,$  dB. Man kann deutlich die Geräuschcharakteristik einzelner Blätter erkennen. Zudem ist ein Synchronisationseffekt (konstruktive Überlagerung, Windparkeffekt) von mindestens zwei dominierenden Anlagen erkennbar.

Gegenüber der Messung nach Abbildung 5 sind die Pegel in diesem Fall insgesamt um ca. 1 dB höher. Zudem ist die AM stärker ausgeprägt. Es ist zu vermuten, dass dies auf die Anzahl der Anlagen und den Anlagentyp zurückzuführen ist.



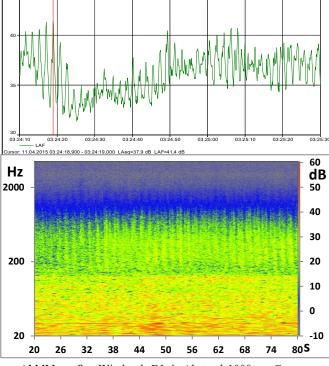
**Abbildung 6:** Windpark WP3, Abstand ca. 800 m, Mitwind, Pegelzeitverlauf in 100 ms Takt, Zeitabschnitt 2: 60 s,  $L_{Aeq} = 43.5$  dB(A). Ausgeprägte AM-Breite  $p_{AM5} = 3.9$  dB,  $f_{m} = 0.66-0.70$  Hz. Dazu Schmalbandspektrum (1/48Oktave), 20 Hz bis 4,5kHz mit deutlicher AM.

In der **Abbildung** 7 wird eine weitere Situation am gleichen Immissionsort (Abstand: 800 m) wie bei Abbildung 6 betrachtet. Meteorologisch liegt hier eine Schallausbreitung in Mitwind- / Querwindrichtung bei niedrigeren elektrischen Leistungen und Rotordrehzahlen der WEA vor. Im ausgewählten Zeitfenster sind die Schallpegel ca. 10 dB leiser als bei der in Abbildung 6 zugrundeliegenden Situation. Der Mittelungspegel beträgt  $L_{Aeq} = 33,6$  dB(A) mit einer AM-Breite  $p_{AM5} = 2,8$  dB. Die Rotordrehzahl beträgt ca. 8 U/min. In der Auswertung erreichen diese Geräuschimmissionen nicht die Stufe 2 der Belästigungsfunktion P(A%;X). Dennoch lassen sich trotz der großen Entfernung die Rotorbewegungen und andeutungsweise auch die Synchronisierung der maßgeblichen WEA im Pegelzeitverlauf erkennen. Der dazugehörige spektrale Pegelzeitverlauf ist im Bereich 100 Hz bis ca. 630 Hz relativ flach. Legt man die Erkenntnisse aus [7] zugrunde, kann dies auch auf die Messung in Querwindrichtung zurückgeführt werden. Abbildung 7 zeigt das zugehörige Schmalbandspektrum. In diesem Fall zeigt sich im Spektrum eine Linie bei ca. 80 Hz und eine weitere bei ca. 420 Hz.



**Abbildung 7:** Windpark B4-4, Abstand 800m, Mitwind / Querwind, Pegelzeitverlauf mit 100 ms Takt, Zeitabschnitt 2, Ausschnitt 60 s,  $L_{Aeq} = 33.6$  dB(A). Ausgeprägte AM-Breite  $p_{AM5} = 2.8$  dB,  $f_{im} = 0.37-0.4$  Hz

Insbesondere die Linie bei 80 Hz ist wegen des Doppler-Effektes leicht unscharf. Die breitbandige AM-spezifische Eigenschaft der AM ist deutlich erkennbar.



**Abbildung 8:** Windpark B1-4, Abstand 1000 m, Gegenwind, Pegelzeitverlauf in 100 ms Takt, Zeitabschnitt 3, Ausschnitt 80 s,  $L_{Aeq} = 36,5$  dB(A). Ausgeprägte AMBreite:  $p_{AM5} = 5,3$  dB,  $f_{m} = 0,53-0,58$  Hz Schmalbandanalyse 20 Hz bis 4,5 kHz.

In Abbildung 8 werden nochmals Ergebnisse des Windparks aus den Abbildungen 6 und 7 dargestellt, jedoch in einer anderen geographischen Richtung mit 1000 m Abstand und Gegenwindbedingung. Anzumerken ist, dass der dargestellte Ausschnitt keine "Ausnahme" darstellt. Der Pegelzeitverlauf konnte über die gesamte Messnacht festgestellt werden. Im Mittel ergibt sich ein Mittelwert von  $L_{Aeq} = 36.5 \text{ dB(A)}$  und einer AM-Breite von  $p_{AM5} = 5.3 \text{ dB.}$ . Die Pegelschwankungen zeigen in 1000 m Abstand eine ausgeprägte AM, die deutlich ausgebildet ist. Nach Auswertungen gemäß Gl. (1) – (4) ergibt sich die "Belästigungsstufe" (skaliert) von 4. In der Abbildung 8 wird dazu ein Schmalbandspektrum dargestellt. Die breitbandige Eigenschaft und Struktur der AM ist deutlich erkennbar. Windböen am benachbarten Waldgebiet sind ursächlich für die vorliegenden tieffrequenten Geräuschanteile.

### **Ausblick**

Die Feinstruktur der Geräusche von WEA kann auch in großen Entfernungen von den Windparks nicht nur wahrgenommen, sondern auch messtechnisch nachgewiesen werden. Dies kann zu entsprechenden Belästigungen in sonst lärmberuhigten Wohngebieten und Siedlungen führen. Dabei werden die Pegelminderungen auf dem Ausbreitungsweg durch die AM teils kompensiert bzw. die Belästigung kann im ungünstigsten Fall erhöht werden. Das sollte bei den Planungen berücksichtigt werden.

#### Literatur

- Martinez S., Fennel F.; Windenergieanlagen: AM bei Messungen an Einzelanlagen und Windparks, DAGA 2017, Kiel, S. 1230-1233.
- [2] Martinez S., Fennel F., Pies, K.; Amplitudenmodulation (AM) bei Geräuschen von Windenergieanlagen, Messungen an Windparks, DAGA 2018 München, S. 1651-1654
- [3] Pies K., Daleiden P., Kemmer F., Martinez S., Pies D.; Amplitudenmodulation bei Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen, Beispiele und Einflussgrößen, DAGA 2018 München, S. 1647-1650
- [4] Martinez S., Fennel F., Pies K., Amplitudenmodulation als besondere Geräuschcharakteristik der Windenergieanlagen, Lärmbekämpfung 13(2018), Nr. 5, S. 171-182
- [6] Pies K., Martinez S., Pies D.; Wirkung der WEA-Geräusche auf den Menschen, DAGA 2019 Rostock, S. 724-727.
- [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] Virjonen P., Hongisto V., Radun J.; Annoyance penalty of periodically amplitude-modulated wide-band sound, J. Acoust. Soc. Am. 146(6), Dec. 2019, S. 4159-4170.
- [9] Heimann D., Modelling sound propagation from a wind turbine under various atmospheric conditions. Meteorol. Z. PrePub Article DOI 10.1127/metz/2018/910
- [10] Barlas E-, Zhu W.J., Shen W.Z., Dag K.O. und Moriarty P.; Investigation of amplitude modulated noise with a fully coupled noise source and propagation problem, WTN-Conference, Rotterdam, 02.05.2017 bis 05.05.2017
- [11] Oerlemans S., An explanation for enhanced amplitude modulation of wind turbine noise, NLR Studie NLR-CR-2011-071 in Auftrag von Renevable UK, 2011
- [12] van den Berg G.P. (2006), University of Groningen, The sound of high winds: The effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise.