

# Modellierung der Amplitudenmodulation von WEA mit Hilfe eines Drei-Punktquellen-Modells in Anlehnung an IEEE 2400

Sergio Martinez <sup>1</sup>, Florian Fennel <sup>1</sup>, Kai Pies <sup>2</sup>

<sup>1</sup> TÜV Rheinland Energy GmbH, [Florian.Fennel@de.tuv.com](mailto:Florian.Fennel@de.tuv.com), [sergio.martinez@web.de](mailto:sergio.martinez@web.de)

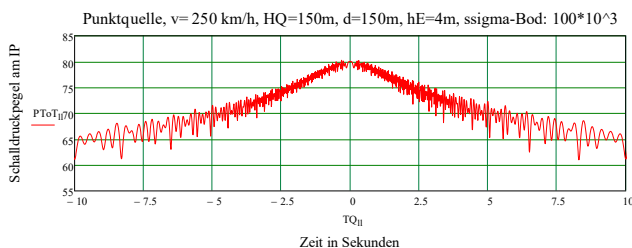
<sup>2</sup> Schalltechnisches Ing.-Büro Pies GbR, [kpies@schallschutz-pies.de](mailto:kpies@schallschutz-pies.de)

## Einleitung

Die Modellierung der Geräuschabstrahlung von Windenergieanlagen (WEA), einschl. des Effektes der Amplitudenmodulation (AM), ist im Detail komplex. In den Untersuchungen von Xue et al. [3] im Zusammenhang mit IEEE Std. 2400-2016 [1] wird darauf hingewiesen, dass die Modellierung nach DIN EN 61400-11 [2] als Punktquellenmodell kein Raum dafür bietet, AM zu beschreiben. Der Grund hierfür ist, dass AM eigentlich eine Folge der Drehbewegung der Rotorblätter ist. Wenn z.B. ein an sich stationäres System wie in Barlas et al. [7] zur Simulation von AM verwendet wird, dann erfolgen die Berechnungen auf der Basis einer Unterteilung der Rotorfläche in z.B. 24 Sektoren (6 azimuthal mal 4 radial). Die Rotationsbewegung selbst tritt dabei in den Hintergrund. Der Wind „strömt“ über die Rotorblätter. AM entsteht letztlich durch Bodenreflexion und Meteorologie. Vergleichbar dazu sind die Berechnungen im Zeitbereich von Lee et al. [6]. Diese verwenden bei ihrer Modellierung die Gleichungen nach Ffowcs Williams-Hawkins (FW-H), wie in [1] vorgeschlagen wird. Unterschiede liegen in der Art der Berechnung der einzelnen Terme. Nach IEEE Std. 2400-2016 [1] lässt sich jedes Rotorblatt als selbständige Quelle auffassen. Näherungsweise und für größere Abstände ist also eine Simulation mit drei Punktquellen, eine je Rotorblatt, vertretbar. Die einzelnen Schallquellen lassen sich dann so parametrieren, dass die maßgebenden Geräuschemissionsanteile jeweils berücksichtigt werden.

## Bewegte Schallquellen ohne Rotation

Bereits in den experimentellen Untersuchungen von Norum und Liu [8] konnte erkannt werden, dass die an einem Immissionsort über einer reflektierenden Ebene (endlicher Impedanz) erfassten Geräusche bei der Vorbeifahrt von einer Punkt-Schallquelle (Monopol) einen komplizierten, frequenzabhängigen Pegelzeitverlauf erzeugt.

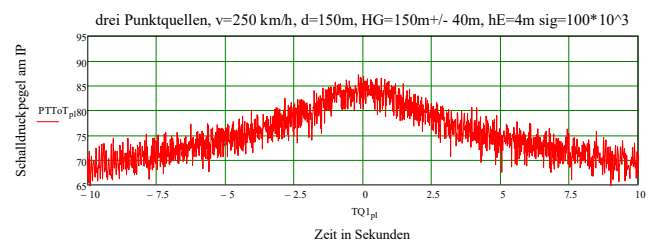


**Bild 1:** Pegelzeitverlauf einer schnellen Vorbeifahrt (Monopol, Gleichspektrum, ohne A-Bewertung, 50 Hz bis 10 kHz, ohne Dopplerkorrektur). ( $c_0 = 340$  m/s). Taktzeit 10 ms

Wir haben diese Berechnungen nach Norum und Liu für eine Konfiguration untersucht, die in einigen Parametern den o.a. Ersatz-Punktquellen einer WEA ähnelt. (Ochmann [9]

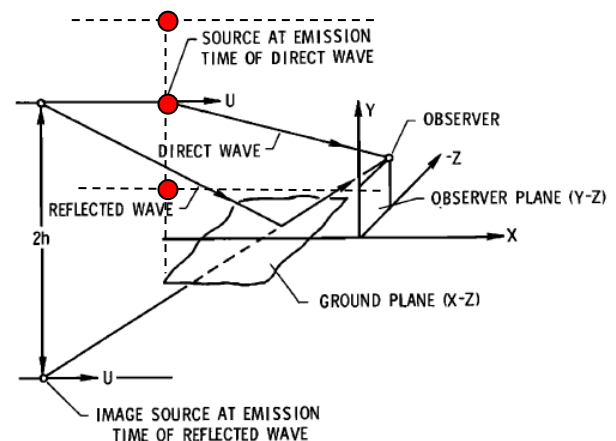
verallgemeinert und erweitert die Modellierung in [8]).

Im **Bild 1** wird das Ergebnis einer Berechnung wie bei [8] dargestellt, wobei in diesem Fall eine Punktquelle schnell ( $v = 250$  km/h), weit ( $d = 150$  m) und hoch ( $HQ = 150$  m) am Immissionspunkt IP ( $h_E = 4$  m) vorbeifährt. In [8] wird die Lorentz-Transformation angewandt, jedoch keine Dopplerkorrektur durchgeführt (darauf wird ergänzend auch in [9] hingewiesen). Der Bodeneinfluss wird nach Delany und Bazley (s. Gleichungen nach Wempe [10],  $\sigma = 100 \cdot 10^{-3}$ ) berücksichtigt. In einem weiteren Schritt wird in **Bild 2** der Pegelzeitverlauf bei der Vorbeifahrt von drei synchronisierten (Monopol) Punktquellen (Abstand voneinander Vertikal 40 m) unter den gleichen Bedingungen dargestellt. Alle Beiträge werden dabei kohärent überlagert.



**Bild 2:** Pegelzeitverlauf der schnellen Vorbeifahrt von drei kohärenten Quellen (Monopole, Gleichspektrum, ohne A-Bewertung, 50 Hz bis 10 kHz, ohne Dopplerkorrektur). ( $c_0 = 340$  m/s). Taktzeit 10 ms (vgl. dazu **Bild 3 a**).

Die Geometrie zu den Berechnungen in Bild 1 und Bild 2 ist schematisch in **Bild 3a** angedeutet.



**FIG. 2.** Source moving at constant velocity above a ground plane.

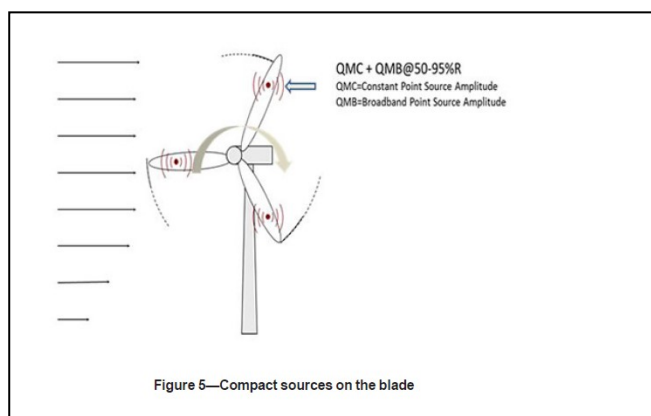
**Bild 3a:** Originalgeometrie aus [8], erweitert von 1 Quelle auf 3 Quellen (vertikal)

Die Berechnung mit hoher zeitlicher Auflösung (10 ms-Takt) im **Bild 2** zeigt Pegelschwankungen, die durch Interferenzen

bei der Überlagerung der diversen Anteile am Immissionspegel (direkte Wellen, am Boden reflektierten Wellen, außerdem Retardierungseffekten bei den Überlagerungen) entstehen. Eine gewisse Ähnlichkeit mit der AM der WEA ist erkennbar.

### Bewegte Schallquellen mit Rotation

Betrachtet man eine Windenergieanlage (WEA) unter dem o.a. Gesichtspunkt der bewegten Quellen und berücksichtigt man den 3-Quellen-Vorschlag nach IEEE Std. 2400-2016 [1], so kann die Bewegung dieser drei Punktquellen als eine Variante der Bewegung nach **Bild 3a** betrachtet werden. Die „Bahnen“ der Quellen sind nunmehr kreisförmige Linien innerhalb der Rotorfläche. Im Fall von IEEE Std. 2400-2016 [1] sind also drei Punktquellen zu betrachten, welche je in  $120^\circ$  Drehwinkel voneinander und in einem bestimmten, repräsentativen Abstand vom Rotormittelpunkt (Radius) angeordnet sind.



**Bild 3b:** Drei-Punkt-Quellenmodell nach IEE Std. 2400-2016 [1]

Ein Drei-Punktquellen-Modell lässt sich also des Weiteren in Anlehnung an IEEE Std. 2400-2016 [1] aufbauen. Ähnlich geht Falourd et al. [11] vor. Die Punktquellen lassen sich als Monopole modellieren, die Kugelwellen abstrahlen. Die Abstrahlung wird so gestaltet, dass daraus ein effektiver, empirisch bekannter, äquivalenter, frequenzabhängiger Schalleistungspegel ermittelt wird. Für die von uns angestrebte Untersuchung des Einflusses der Drehbewegung der Rotoren auf die AM reicht es nicht aus, den Schalleistungspegel der Ersatzschallquellen aus empirischen Daten einfach zu entnehmen. Die Parametrierung soll sinngemäß die bekannten Exponenten der Windgeschwindigkeit berücksichtigen, kombiniert aus der höhenabhängigen Anströmung der Rotorfläche und der Blattsegment-Geschwindigkeit. Das ist z.B. nach Moreau, Brooks und Doolan [4] eine Voraussetzung der Berechnungen nach der FW-H Theorie. Nach [4] ist auch eine Ergänzung für größere Entfernungen (far-field) und niedrigere Frequenzen erforderlich, die auf eine Erweiterung des Anströmungsmodells (Oberflächen-emissionen der Rotorblätter) hinausläuft. Dies ist in den Berechnungen von Lee et al. [6] erfolgt. Auch ist es sinnvoll mögliche tonale Emissionen der Hinterkanten zu betrachten.

Zusammengefasst basieren die nachfolgenden Berechnungen auf einem 3-Punkt-Quellen-Modell, im Prinzip ähnlich zu IEEE Std. 2400-2016 [1]. Jeder der drei Punktquellen wird in einem Abstand  $0,92 \cdot R$  des Rotor-mittelpunktes

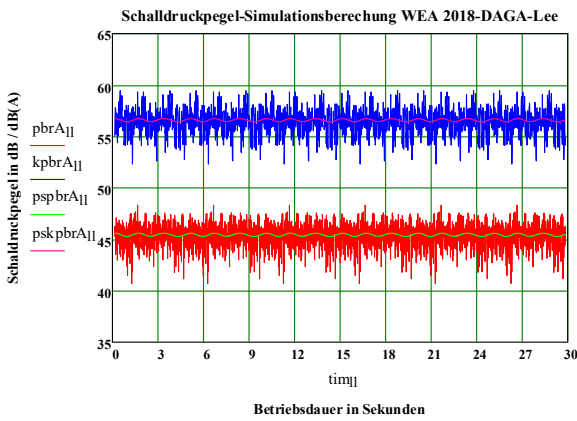
angeordnet. Jede Quelle wird virtuell in der Mitte eines Stabes (variabler) Länge „stbl“ positioniert (hier  $stbl = R/6$ ) und der Stab mit einer Dicke „dbl“ versehen, die zur Bestimmung des möglichen Hinterkanten-Tons dient. Sowohl für Basis-Emission wie für dem Hinterkanten-Ton werden relative empirische Spektren berücksichtigt, die letztlich als relative Amplituden-Faktoren dienen. Es werden Terzbänder von 32 Hz bis 5 kHz berechnet. Grundsätzlich geht man von der Emission resultierender Kugelwellen aus, die von diesen Punktquellen abgestrahlt werden. Außerdem ist eine Dipol - Richtwirkungsfunktion vorgesehen, die den Erfahrungen bei vielen Messungen an WEA entstammt und vektoriell ermittelt wird.

Die Position der Quellen wird rechnerisch in einem eigenen Rotor-Koordinatensystem definiert. Die Rotordrehzahl und der Takt der Berechnung sind vorgegeben. In unseren weiter unten aufgeführten Berechnungsbeispielen haben wir eine Taktzeit von 10 ms gewählt. Die Rotordrehzahl bei den Beispielen beträgt einheitlich  $u_R = 12 \text{ U min}^{-1}$ . Demnach dauert eine komplette Umdrehung des Rotors genau 5 Sekunden. Die Winkelauflösung bei der Berechnung beträgt also  $0,72 \text{ Grad/Takt}$  pro Position am Rotor, d.h. es werden je Umdrehung  $500 \cdot 3$  Positionen der Schallquellen berechnet. Damit entstehen drei Zeitreihen des Schalldruckes in 10 ms-Takten am Empfänger (Grenzflächenmikrofon). Die Gesamtzeit der Berechnung kann vorgegeben werden. Exemplarisch werden hier nur 30 Sekunden im konstanten WEA Betrieb dargestellt. Weitere Vorgabe ist die standardisierte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe ( $v(10m)$ ). Die (höhenabhängige) Windgeschwindigkeit bei der Anströmung des Rotors wird mit Hilfe des Windprofils nach [2] bestimmt ( $z_0 = 0,05 \text{ m}$ ). Die durch die Rotorbewegung entstehende tangentielle Quellengeschwindigkeit ergibt sich aus der Rotordrehzahl und der Lage (radial) der Quelle. Daraus folgt auch die Windgeschwindigkeitskomponente in der Rotationsebene. Es wird kein „angle of attac“ betrachtet. Die mittlere Lufttemperatur  $T(^{\circ}\text{C})$  wird vorgegeben, um dabei die Schallgeschwindigkeit  $c_0(T)$  zu bestimmen. Es wird aber kein Lufttemperaturgradient verwendet.

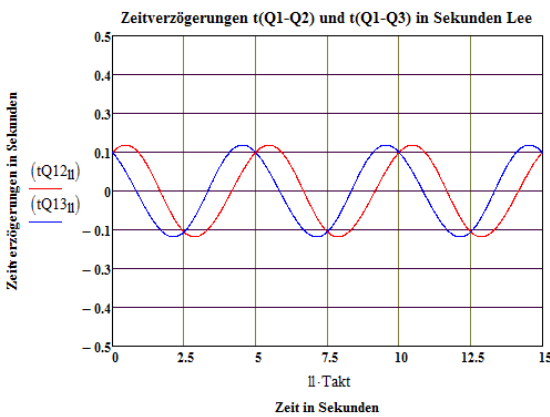
Der Rotor ist bezüglich der Umgebung so angeordnet, dass die positive y-Achse im Lee des Rotors liegt. Die Immissionsorte können in beliebigen Abständen zum Rotor positioniert werden. Es wird jedoch keine Bodenreflexion (Grenzflächenmikrofon) betrachtet. Das ist gerechtfertigt, weil AM auch bei Messungen mit Grenzflächenmikrofonen auftritt. Am Empfänger werden die Beiträge der drei Punktquellen einerseits inkohärent in Terzbandbreite (parallel auch mit der A-Bewertung) und andererseits zugleich kohärent überlagert. Dabei werden, im Sinne der Berechnungen nach Norum und Liu [8] die zwischen den Punktquellen nicht zu vernachlässigenden variablen Zeitdifferenzen berücksichtigt, die Retardierungseffekte verursachen. Eine Doppler-Korrektur ist implementiert.

In **Bild 4** und ff. werden Ergebnisse von Simulationen bei einer WEA mit folgenden Parametern vorgestellt: Nabenhöhe  $NH = 142,5 \text{ m}$ ; Durchmesser  $RD = 113 \text{ m}$ ; Rotordrehzahl, konstant,  $u_R = 12 \text{ Umin}^{-1}$ ;  $stbl = 11,3 \text{ m}$ ;  $dbl = 0,03 \text{ m}$ ;  $T = 10^{\circ}\text{C}$ ;  $v(10m) = 7 \text{ m/s}$ .

Der Empfänger befindet sich zunächst in 200 m Abstand, im Lee der WEA, vergleichbar dem Referenzmesspunkt nach DIN EN 61400-11 [2].



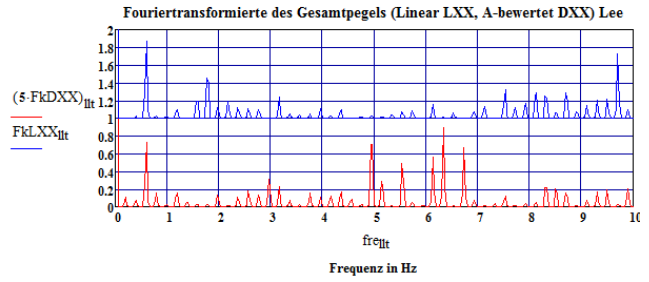
**Bild 4:** Simulationsberechnung mit dem Drei-Quellen-Modell. Rot (pbrA) stellt den Gesamt-Schalldruckpegel in dB(A) - kohärent berechnet - dar. Grün (psprbA) ist der A-Gesamtpegel skalar (inkohärent) ausgewertet. Dargestellt ist auch der lineare Pegelzeitverlauf (kpbrA, pskpbrA) in beiden Auswerteformaten. Der Immissionspunkt befindet sich im Lee der WEA (s. Text).



**Bild 5:** Zeitverzögerungen zwischen den direkten Strecken von den Punktquellen zum Immissionsort. Im Bild 5 werden 3 Umdrehungen von je 5 Sekunden Dauer dargestellt. Zur Deutung dieses Bildes sei auf den Text verwiesen.

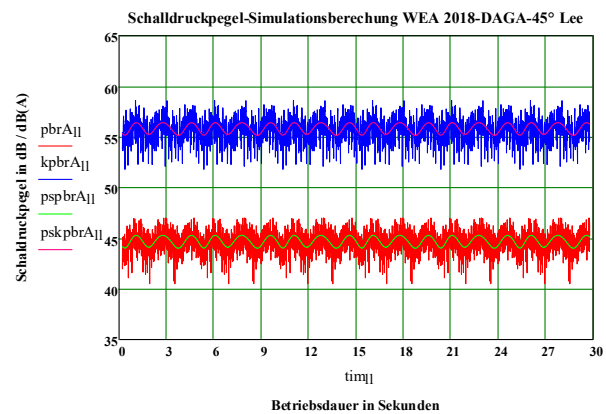
Der Pegelzeitverlauf nach **Bild 4** zeigt eine gewisse Schwankungsbreite, die sich periodisch wiederholt. In dieser Art ist das Ergebnis, trotz aller Einfachheit des Modells nah an den Messdaten an einem typischen RMP nach DIN EN 61400-11 [2], wenn Messungen in hoher zeitliche Auflösung durchgeführt werden. Nach **Bild 5** ergibt sich, dass zwischen den Ausbreitungswegen von den Punktquellen zum Immissionsort paarweise Zeitverzögerungen auftreten. Sie ergeben sich zwangsläufig aus den Abständen je Position zum Immissionsort. Sie ändern periodisch ihr Vorzeichen, d.h. der Wert der Zeitverzögerung pendelt ständig zwischen zwei Extremwerten. Folgende Interpretation ist denkbar: Bei einem positiven Vorzeichen können durch Erhöhung der Zeitverzögerung (und Doppler-Effekte) möglicherweise Verstärkungen auftreten. Nach Durchgang durch das Maximum ändern sich Verzögerung und Verstärkung. Bei der nächsten halben Umdrehung kehren sich die Verhältnisse so um, dass keine ungünstigen Auswirkungen, also Verstärkungen auftreten können. Das Spiel tritt dreifach auf, je eine Blattkombination, während einer Umdrehung. So entsteht AM. Die Stationarität dieses Zustandes ist allerdings in der Praxis von vielen Faktoren abhängig. In **Bild 6** ist außerdem eine Fourier-Analyse des Pegelzeitverlaufes nach

**Bild 4** angegeben. Man erkennt sehr gut die Komponente bei 0,6 Hz, dies entspricht  $u_R = 12 \text{ U min}^{-1}$ .

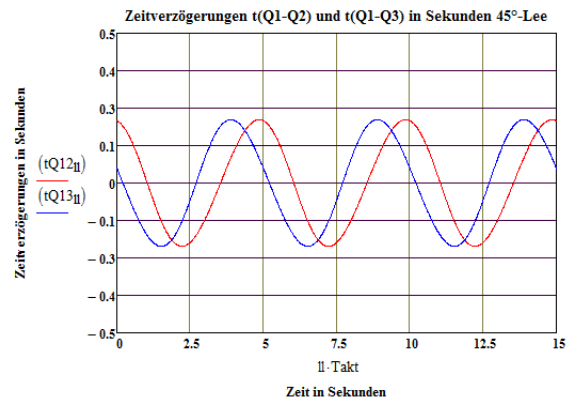


**Bild 6:** Fourieranalyse des Gesamtpegels. Das erste Maximum bei der Analyse des A-bewerteten Pegelzeitverlaufes entspricht mit 0,6 Hz genau der Erwartung ( $u_R = 12 \text{ Umin-1}$ ).

In **Bild 7** werden die Berechnungen nach Bild 4 für einen Immissionspunkt in 200 m Abstand und in 45° Richtung im Lee bezüglich der Normale zur Rotorebene dargestellt.



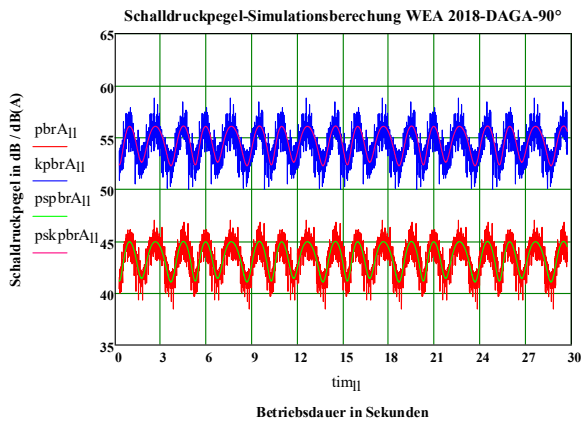
**Bild 7:** Simulationsberechnung mit dem Drei-Quellen Modell. Immissionspunkt 45° im Lee. Die Legende ist wie Bild 4.



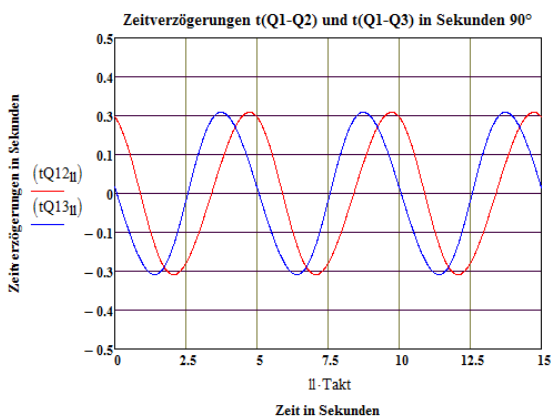
**Bild 8:** Zeitverzögerungen zwischen den drei direkten Strecken von den Punktquellen zum Immissionsort am IP in 45°. (s. Bild 5)

Aus **Bild 8** erkennt man, dass die Zeitverzögerungen bei 45° nunmehr über  $\pm 200 \text{ ms}$  liegen. D.h. wenn sie verantwortlich sind für AM, dann in diesem Fall stärker. Solche Bilder werden ähnlich in [3] und [7] sowie in [11] vorgestellt.

In **Bild 9** wird anschließend der Pegelzeitverlauf am IP bei 90° bezüglich der Normale zur Rotorebene und somit in Querwind aufgezeigt. Aus **Bild 9** erkennt man den Effekt der AM. Der Mittelwert des Immissionspegels liegt annähernd bei rd. 42,5 dB(A) beim A-Pegel und die Amplitude des Signals schwankt um diesen Wert um rd.  $\pm 2,5 \text{ dB}$ .

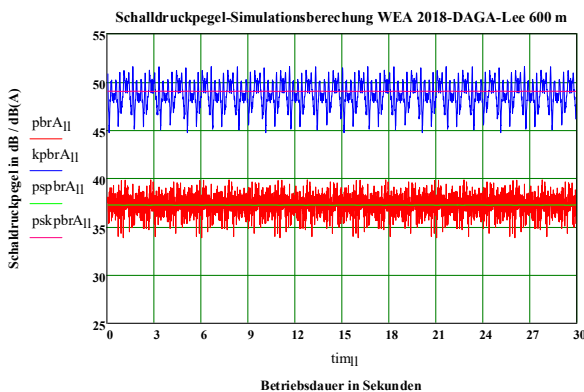


**Bild 9:** Simulationsberechnung mit dem Drei-Quellen Modell. Immissionspunkt 90° im Querwind. Die Legende ist wie Bild 4.



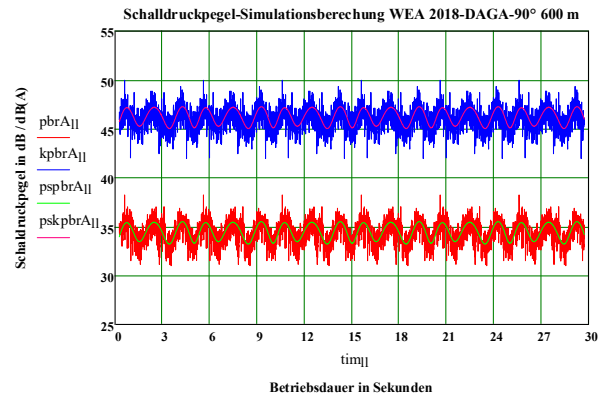
**Bild 10:** Zeitverzögerungen zwischen den drei direkten Strecken von den Punktquellen zum Immissionsort am IP in Querwind

Die Fourier-Analyse des Pegelzeitverlaufes ergibt eine starke Spektral-amplitude bei der AM-Frequenz 0,6 Hz. Aus **Bild 10** erkennt man auch, dass die Zeitverzögerungen bei 90° nunmehr bis über  $\pm 300$  ms liegen. Sie sind hier beinahe eine Konstante der Schallausbreitung in dieser Richtung, an sich gleich ob vor oder hinter dem Rotor. In größeren Entfernungen ändert sich das Bild der Berechnungen allmählich. Im Lee der WEA nehmen die Zeitverzögerungen progressiv ab, und somit auch die AM. Exemplarisch werden nachfolgend (**Bild 11** und **Bild 12**) Berechnungsergebnisse in 600 m Abstand für beide extreme Richtungen, also Lee und Querwind (90°) dargestellt.



**Bild 11:** Simulationsberechnung mit Drei-Quellen Modell. Immissionspunkt Lee, 600m. (Legende s. Bild 4).

Die Zeitverzögerungen bei **Bild 11** sind geringer als bei **Bild 5** und betragen nur noch bis ca. 50 ms. Im Querwind bleiben sie im Grenzfall gleich.



**Bild 12:** Simulationsberechnung mit dem Drei-Quellen Modell. Immissionspunkt 90°, Querwind, 600m. (Legende s. Bild 4).

Aus **Bild 12** erkennt man im Vergleich zu **Bild 11** eine bei 90° (also in Querwind) ausgeprägte AM, die sich bezüglich ihres Ausmaßes überraschend stark präsentiert. Wenn zu solchen Effekten auch Verstärkungen durch Bodeneffekte hinzugezählt werden, dann kann sich in größeren Entfernungen unerwartet starke AM bilden.

## Literatur

- [1] IEEE Standard for Wind Turbine Aero Acoustic Noise Measurement Techniques, Std. 2400-2016
- [2] DIN EN 61400-11: Windenergieanlagen-Teil 11: Schallmessverfahren, Berlin: Beuth Verlag 2007.
- [3] Xue, S. Xiang; Y.; Wei Xiang Z., Rui; Li, Hong Fen, T.; Overview of IEEE standard development on amplitude modulation noise measurement, WTN 2015, Glasgow 20-23 April 2015
- [4] Moreau, D.J.; Brooks, Laura A.; Doolan, Con J.; Broadband trailing edge noise from a sharp-edged strut, J. Acoust. Soc. Am. 129, 2820 (2011)
- [5] Doolan, Con J.; Moreau, D.J.; Brooks, Laura A.; Wind turbine noise mechanisms and some concept for its control, Acoustics Australia, 40, 7(2012)
- [6] Lee, Seunghoon et. al.: Numerical modelling of wind turbine aerodynamic noise in the time domain; J. Acoust. Soc. Am. 133, EL94 (2013)
- [7] Barlas, Emre et al.; Investigation of amplitude modulation noise with fully coupled noise source and propagation model, WTN Rotterdam, 2-5 Mai 2017
- [8] Norum, T.D.; Liu, C.H. ; Point source moving above a finite impedance reflecting plane – experiment and theory, J. Acoust. Soc. Am. 63, 1069 (1978)
- [9] Ochmann, Martin; Exact solution for sound radiation from a moving monopole above an impedance plane, J. Acoust. Soc. Am. 133, 1911 (2013)
- [10] Wempe, J.; Sound propagation in forested areas and shelterbelts, Nijmegen, The Netherlands, March 3-6, 1996, S. 83 ff (*Hinweis auf Delany und Bazley*)
- [11] Falourd, Xavier; et. al. ; Doppler analysis and processing for the localisation of low frequency tonal sources on blades : an experimental approach. WTN Glasgow, 20-23 April 2015