Perzentil-Spektren: Merkmalbezogene Kenngrößen bei Geräuschmessungen

Sergio Martinez, Florian Fennel
TÜV Rheinland Energie GmbH, Florian.Fennel@de.tuv.com

Einleitung

In dieser Arbeit werden Erfahrungen mit der Verwendung von Perzentil-Spektren bei der Auswertung von Geräuschmessungen vorgelegt. Die hier mitgeteilten Ergebnisse und Analysen stehen im Zusammenhang mit den bei Geräuschmessungen erfassten Zeit-Messreihen, wobei die Geräusche sowohl als Gesamtpegel als auch simultan frequenzabhängig z.B. in Terzbandbreite erfasst und ausgewertet werden. Als Anwendungs-Beispiele werden hier näher untersucht:

a) Geräuschimmissionsmessungen im Freien zur messtechnischen Bestimmung Geräuschimmissionen durch anthropogene Geräusche.

b) Geräuschemissionsmessungen an Windenergieanlagen (WEA) unter Normbedingungen (DIN EN 61400-11) [8].

Im Fall a) ist der Anlass der schalltechnischen Untersuchungen eine orientierende Erhebung von Geräuschimmissionspegeln in Wohngebieten in der Nachbarschaft von ausgedehnten, gegliederten Industrie- und Gewerbezonen. Der Bereich ist zusätzlich stark durch Verkehrslärm belastet (Autobahn, Eisenbahn). Die untersuchten Industrie- und Gewerbezonen sind mittels diversen vorangegangenen Planungsstudien lärmkontingentiert. Ziel der Untersuchung war nicht eine direkte Überprüfung des Erfolgs der Planungen - bei einer Belegung der Planungsflächen bereits über ca. 75% -, sondern (unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnissen) eine Empfehlung auszuarbeiten, Immissionsanteile für die Errichtung von Windenergieanlagen auf dem Gebiet einer Fläche angrenzend an den Industrie- und Gewerbezonen zu bestimmen.
Im Fall b) war der Anlass der Auswertungen die Auffälligkeiten im Geräuschemissionsverhalten von WEA mit alternativen, ergänzenden Methoden zur üblichen Anwendung der DIN EN 61400-11 [8] zu analysieren.

Methode

In aktuellen Veröffentlichungen (vgl. [2] - [3] bzw. [6], [7]), die sich mit Fragen der Bestimmung von Kenngrößen und der Beurteilung von Geräuschimmissionen bzw. Geräuschereignissen in urbanen Umgebungen beschäftigen, werden Geräusch-Stichproben als Basis-Erhebungen bevorzugt. Aus diesen Stichproben werden quantitativ oder qualitativ Deskriptoren und Indikatoren abgeleitet.

Die pegelbezogenen Größen (nicht psychoakustischen Messdaten) sind meist der Mittelungspegel L_{Aeq} der Stichprobe, die L_{AFMax}- und L_{AFMin}- Pegel der Stichprobe, diverse Perzentile, vornehmlich L_{Aeq10}, L_{Aeq50}, L_{Aeq90} und zusätzliche Indizes bzw. Pegeldifferenzen, die aus den Perzentilen berechnet werden. In einigen Veröffentlichungen werden diese Parametersätze auch auf die simultan erfassten Terzband-Pegel ausgeweitet. Außerdem werden Kenngrößen zur Streuung der Pegel (meist die arithmetischen Standardabweichungen über die Stichprobendauer) und gelegentlich weitere Indizes aus dem konkreten Pegelzeitverlauf, wie z.B. NNEL>Lα „number of noise events exceeding the noise level Lα“ oder z.B. MIL>Lα Maskierungs-Index, „Zeitanteil, in dem ein „Ereignis“ ein Pegel Lα überdeckt“ (vgl. z.B. [6]). In der Arbeit [7] werden z.B. je Stichprobe bis zu 418 Indikatoren berechnet, die aus dem L_{Aeq} des Gesamtpegels und der Terzbandpegel im Bereich 20 Hz bis 20 kHz ermittelt werden. Zusätzlich werden globale Größen zur Kennzeichnung des Schwerpunktes des Spektrums bei tiefen, mittleren und hohen Frequenzen ermittelt. Die Auswertung erfordert eine umfangreiche statistische Methode mit Clusterbildungsmethoden und statistische manuelle Eingriffe, um die signifikanten Deskriptoren rangmäßig herauszuarbeiten.
Vor dem Hintergrund einer engen Zielsetzung der Untersuchung, wurde der messtechnische und statistische Aufwand in Grenzen gehalten. Um neben den reinen Messwerten auch einen subjektiven Eindruck der Geräuschsituation zu erhalten, wurden die Geräusch-Stichprobenmessungen überwacht durchgeführt.
Aus dem Kollektiv der Messungen werden hier Stichproben von 30 Minuten Messdauer im Nachtzeitraum an einigen der o.a. Immissionsorte (Messpunkthöhen 2 m oder 4 m, im Freien) vorgestellt. Die Messergebnisse – ermittelt innerhalb eines Zeitfensters zwischen 01:00 Uhr und 02:30 Uhr an aufeinander folgenden Nächten - wurden mit üblichen Schallpegelmessern der Klasse 1 gewonnen. Simultan wurden der Gesamtpegel in dB(A) und Terzband-Mittelungspegel (12,5 Hz bis 10 kHz) in 1s-Takt erfasst. Die Wetterbedingungen waren günstig (Lufttemperatur ca. 10-14 °C, Luftfeuchte bis 80%, Windgeschwindigkeit in Bodennähe: windstill bis kleiner als 4 m/s). Nach der eigenen Beobachtung lagen während der erfassten Messzeiten leichte, jedoch windrichtungsabhängige Bodeninversionen (vor allem durch Lufttemperatur) vor.
Auf die explizite Auswertung des o.a. Projektes wird hier nicht näher eingegangen, wohl aber auf die Verwendung eines „modernisierten“ Werkzeuges bei der Datenanalyse. Wie o.a. sind Perzentil-Pegel ein wichtiges Instrument zur Kennzeichnung der Geräusche. Sie sind auch im Kontext der Überlagerung von Geräuschen und zum Zweck einer Geräuschtrennung (vgl. [5]) bedeutend. Die Darstellung der Frequenzabhängigkeit der Perzentile ist u. E. ein offenes Thema (vgl. z.B. [1]). Bei Geräuschüberlagerungen kommt

es zusätzlich zu einer Dekorrelation der Terzbandpegel, wobei der Ursprung dieses Effektes in der fehlenden Korrelation der Geräuschanteile der verschiedenen, gleichzeitig einwirkenden Schallquellen liegt.

In unsere Auswertung wurden aus der ursprünglichen 1s-Takt Messreihe Mittelwerte (energetisch) von 30 Sekunden Dauer gebildet, die als Ausgangswerte für die weiteren Auswertungen dienen. Somit entsteht ein übersichtliches Kollektiv von etwa n ≈ 60 Stichprobenelementen von je 30 Sekunden Dauer zur Verfügung. Ob 10-, 15- oder 60-Sekunden etc. als Mittelungszeit verwendet werden, hängt dabei von der Aufgabenstellung ab. Die n Stichprobenelemente werden nach dem A-bewerteten Mittelungspegel des L_{Aeq}(30s) in aufsteigende Reihenfolge tabelliert.

Daraus folgen nach VDI-Richtlinie 3723-2 [4] unmittelbar die gewünschten Perzentil-Werte der Stichprobe und ihre jeweiligen Vertrauensbereiche. Bei unserer Untersuchung wird ein ergänzendes frequenzabhängiges Mittelungs-Verfahren angewandt. Es wird eine *perzentilabhängige Mittelungs-Prozedur* herangezogen, die konsistente Mittelwert-Spektren bildet, und direkt aus den Stichprobenelementen (30s- Mittelwerten) berechnet wird. Diese *Perzentil-Spektren* werden also dem gewählten *Perzentilbereich* der Verteilung der Gesamtpegel zugewiesen bzw. im Bezug gesetzt. So wird beispielsweise bei n = 60 das Perzentil-Spektrum „*bis* L_{Aeq90}“ aus den Messdaten (Terzband-Spektrum) der Stichprobenelementen von n = 1 bis n = 6 berechnet. Das Perzentil-Spektrum „L_{Aeq90} *bis* L_{Aeq50}“ wird entsprechend aus den Spektren n = 6 bis n = 30 ermittelt.

Perzentil-Spektren und Geräuschimmissionsmessungen im Freien

Nachfolgend werden in den Abbildungen 1(1), 1(2) und 1(3) einige Auswertungen der Messungen am Io1 am 1. Messtermin dargestellt, wobei dabei die o.a. Methode der Perzentil-Spektren zur Anwendung kommt. In den Abbildungen 2(1), 2(2) und 2(3) wird die Auswertung der Messungen am gleichen Io1, aber an einem anderen Messtermin (zwei Tage später) in vergleichbarer Art dargestellt.

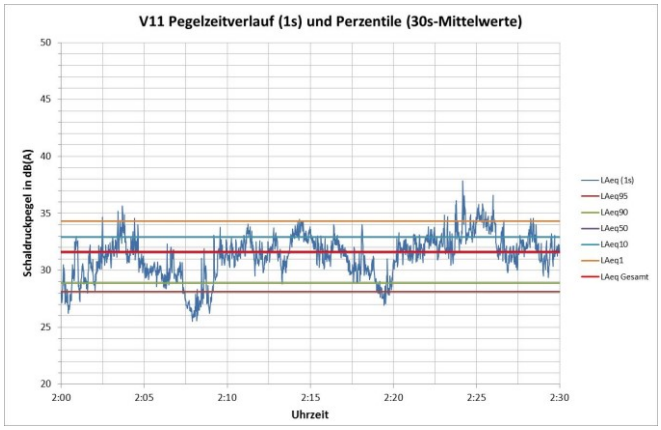

Abbildung 1(1): Messung Io1, 1. Termin, Pegelzeitverlauf.

Aus Abbildung 1(1) erkennt man, dass der Pegelzeitverlauf eine Dynamik von 10 dB(A) aufweist, eine Art Amplituden - Modulation über Perioden von etwa 10 Minuten zeigt und dass der L_{Aeq} symmetrisch zwischen L_{Aeq1} und L_{Aeq95} liegt. Dieses Pegelverhalten ist typisch für Verkehrslärm in großen Entfernungen und stimmt auch mit dem subjektiven Eindruck überein.

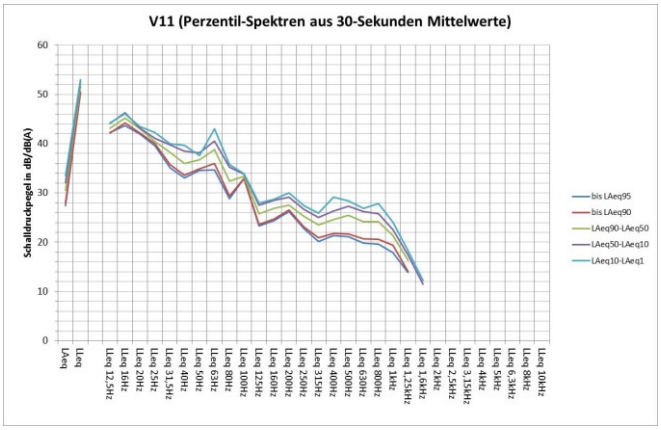

Abbildung 1(2): Messung IO1, 1. Termin, Perzentil-Spektren.

Die Abbildung 1(2) zeigt die entsprechenden *Perzentil-Spektren*. Wie der Abbildung 1(2) zu entnehmen ist, korrelieren die Pegel im Bereich zwischen 16 Hz - 25 Hz nicht mit dem L_{Aeq}, da die Terzpegel im Mittel wenig variieren. Der Terzbandpegel bei 100 Hz ist sehr konstant, d.h. gleich groß über alle Perzentil-Spektren.

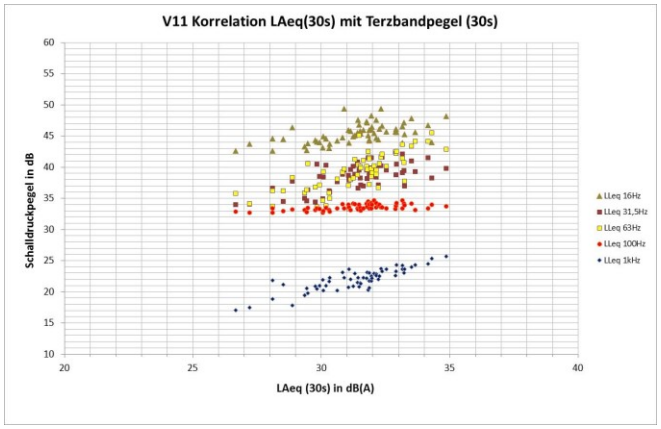

Abbildung 1(3): Messung Io1, 1. Termin, Korrelation A-Pegel und Terzbandpegel**.**

Die Abbildung 1(3) zeigt die entsprechenden *Korrelationen*. Es zeigt sich, dass der Terzbandpegel bei 100 Hz nicht mit L_{Aeq} korreliert. Die großen Streuungen der 30s-Mittelwerte (!) in den Terzbändern unter 80 Hz sind bemerkenswert. Der Korrelationskoeffizient (akzeptabel bei 1 kHz) sinkt hierbei stark ab.

Aus Abbildung 2(1) erkennt man, dass der Pegelzeitverlauf auch eine Art Amplituden - Modulation über Perioden von etwa 5-7 Minuten aufweist und dass der L_{Aeq} etwa symmetrisch zwischen L_{Aeq1} und L_{Aeq95} liegt. Das alles ist nach wie vor typisch für Verkehrslärm in großer Entfernung. Die Gesamtpegel liegen aber um 5 dB über den Gesamtpegeln, die am 1. Messtermin ermittelt wurden. Die Erhöhung ist auf die geänderten Wetterverhältnisse zurückzuführen und konnte auch subjektiv wahrgenommen werden.

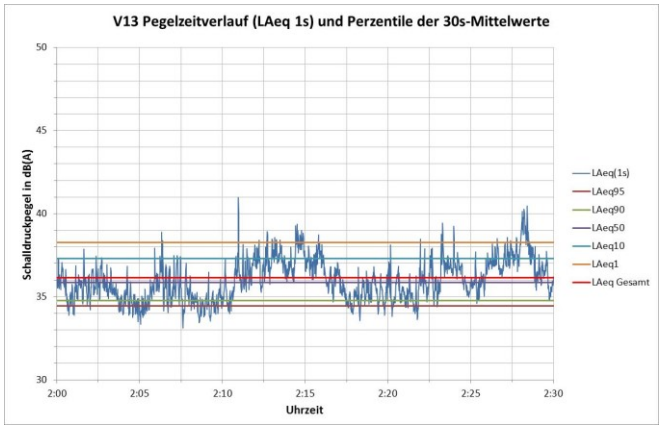

Abbildung 2(1): Messung IO1, 3. Termin, Pegelzeitverlauf

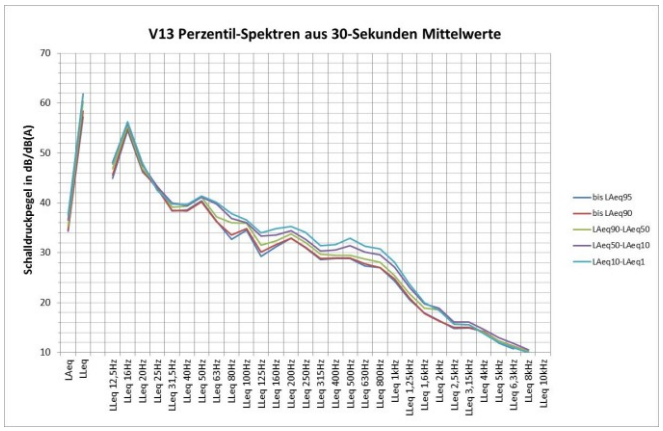

Abbildung 2(2): Messung IO1, 3. Termin, Perzentil-Spektren

Die Abbildung 2(2) zeigt wieder die entsprechenden *Perzentil-Spektren*. Wie der Abbildung 2(2) zu entnehmen ist, korrelieren die Pegel im Bereich zwischen 16 Hz - 25 Hz analog zu Abbildung 1(2) ebenfalls nicht mit dem L_{Aeq}, da die Terzpegel im Mittel wenig variieren. Bei 16 Hz sind Anzeichen einer Tonhaltigkeit (Quelle unbekannt) erkennbar. Der Terzbandpegel bei 100 Hz ist in ruhigen Phasen vergleichbar konstant wie beim 1. Messtermin, d.h. gleich groß über alle Perzentil-Spektren. Nimmt der Anteil des Verkehrslärms zu, entsteht eine leichte Abhängigkeit vom L_{Aeq}. Die unbekannte Quelle existiert also weiterhin.

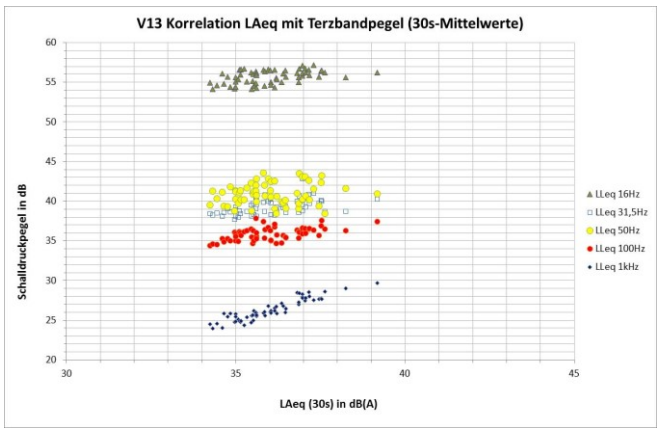

Abbildung 2(3): Messung IO1, 3. Termin, Korrelation A-Pegel und Terzbandpegel

Einen Eindruck dieses Verhaltens erhält man in Abbildung 2(3) (*Korrelationen*). Man erkennt, dass an diesem Messtermin die Terzbandpegel unter 50 Hz unabhängig von L_{Aeq} sind und große Streuungen aufweisen, die anscheinend nichts mit dem Verkehrslärm zu tun haben. Der Korrelationskoeffizient (akzeptabel bei 1 kHz) ist sehr klein.

Perzentil-Spektren und Geräuschemissions-messungen an WEA

Im Folgenden wird die Methode der *Perzentil-Spektren* bei Geräuschemissionsmessungen an WEA angewandt. Die vorgestellten Messdaten wurden gemäß DIN EN 61400-11 [8] am Referenzmesspunkt ermittelt. Es handelt sich um einen Kollektiv von 10 Sekunden – Mittelwerte (N = 810), die in diesem Fall aus Messungen in 1s-Takt gewonnen werden. Die WEA ist eine moderne Anlage der 2,4 MW Leistungsklasse, mit Getriebe.

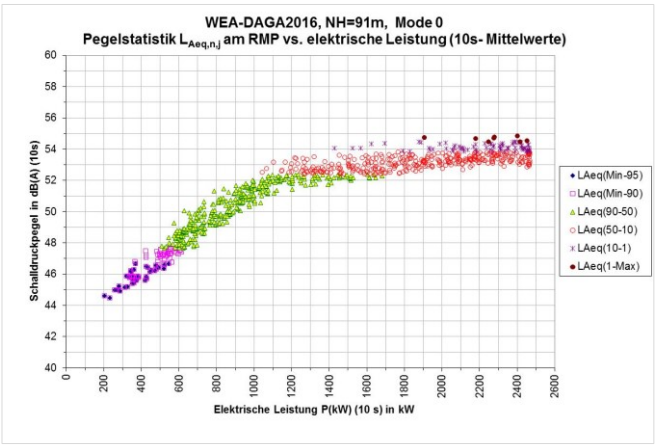

Abbildung 3(1): Schalldruckpegel LAeq am Referenz-messpunkt (10s-Mittelwerte), Perzentil-Statistik der Messwerte LAeq,n,j (N= 810)

Die Messungen nach [8] sehen die Erfassung von Zeitreihen der frequenzabhängigen Geräuschpegel der WEA am Referenzmesspunkt und die Parametrierung dieser Geräuschpegel mit der zeitgleich vorherrschenden Wind-geschwindigkeit (10m Höhe über Boden nach Edition 2 oder in Höhe des Rotormittelpunktes nach Edition 3 [8]) und mit der von der WEA erzeugten elektrischen Leistung vor (s. dazu Abbildung 3(1) und 3(2)).

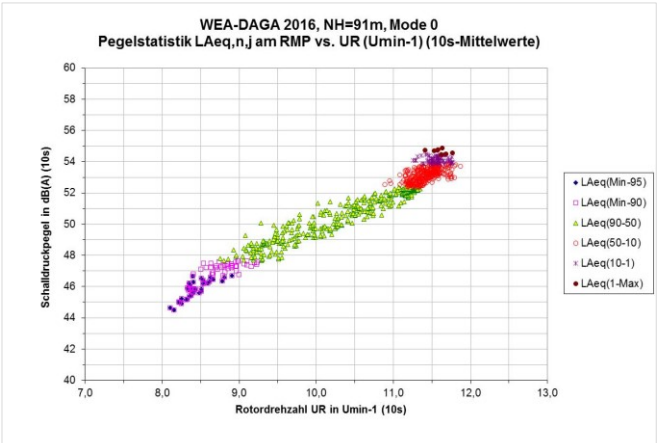

Abbildung 3(2): Rotordrehzahl UR in (Umin-1) (10s-Mittel-werte), Perzentil-Statistik der Messwerte LAeq,n,j (N= 810)

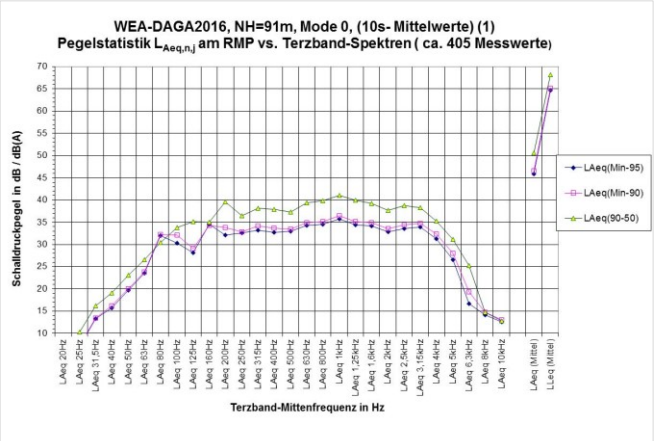

Abbildung 3(3): *Perzentil-Spektren* (Ausgangsdaten 10s-Mittelwerte) bis LAeq50**.**

Der gesamte elektrische Leistungsbereich der WEA ist also durch akustische Messdaten abgedeckt.

Aus Abbildung 3(3) erkennt man, analog zu den bisher gezeigten *Perzentil-Spektren*, dass im Bereich bis L_{Aeq90} die Perzentil-Spektren zwei herausragende Terzbänder, nämlich 80 Hz und 160 Hz zeigen. Betrachtet man die Mittelwerte (s.a. Abbildung 3(4) bis L_{Aeq50} so kann man beobachten, dass die Mittelungspegel des Terzbandes 80 Hz etwas sinken (!). Es existiert bei 160 Hz keine Korrelation mit dem L_{Aeq}. Zusätzlich erkennt man eine weitere Auffälligkeit bei 200 Hz.

Diese Effekte treten gemäß Abbildung 3(4) offenkundig in unteren Lastbereich der WEA auf.

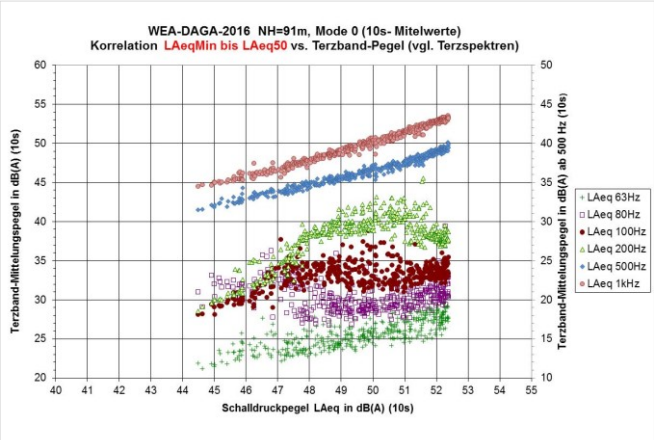

Abbildung 3(4): Korrelation der Gesamtpegel LAeq,n,j unter LAeq50 mit den zugehörigen Terzband-Mittelungspegel (ca. 400 LAeq,n,j Messdaten)

Es ist erkennbar (s. Abbildung. 3(4)), dass bei 1 kHz und 500 Hz jeweils eine gute Korrelation der Terzbandpegel mit dem Gesamtpegel vorliegt. Die Terzbandpegel aber bei 80 Hz sind zwischen 46-48 dB(A) stark überhöht. Zwischen 47-50 dB(A) tritt ein vergleichbarer Effekt bei 100 Hz sowie zwischen 48-51 dB(A) bei 200 Hz auf. Das sind genau die Pegelbereiche bei denen nach Abbildung 3(2) die Rotordrehzahl zwischen UR ≈ 9 Umin-1 und UR ≈ 11 Umin-1 verändert wird. Nach unserer Kenntnis leitet sich dabei nicht eindeutig eine Tonhaltigkeit der WEA-Geräusche ab, aber es zeigt sich, dass bei schwacher Last die WEA einen Emissionsschwerpunkt bei niedrigeren Frequenzen aufweist.

Ausblick

Die *Perzentil-Spektren* bei Messaufgaben mit umfangreicher Pegelstatistik sind ein interessantes Analyse- Werkzeug, um – u.a. - das gemeinsame Einwirken von unterschiedlichen Schallquellen zu studieren. Mit geeigneten weiteren Annahmen (z.B. einer Schmalbandanalyse der Geräusche) erleichtert diese Methode die Aufgabe der Geräuschtrennung und kann Hinweise dazu bieten, die Beiträge und die Rangfolge von Komponenten innerhalb einer Lärmbelastungsanalyse zu bestimmen.

Literatur

[1] D. Kühner, “Long-term Leq errors expected and how long to measure (Uncertainty and noise monitoring), Forum Acusticum 2005, S. 1269-1274.

[2] G. Brambilla et. al. “Accuracy of temporal samplings of environnement noise to estimate the long-term Lden value”, Inter-Noise 2007

[3] Validation of the Harmonoise models, Document D21, Technical Report HAR28TR-041109-TNO.doc vom 24.02 2005, hier Fig. 5.30 und 5.31 “Ladenburg”

[4] VDI-Richtlinie 3723-2, März 2006, Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen- Teil 2: Qualitätsprüfung bei der Beurteilung von Geräuschsituationen, Anhang B und Anhang C.

[5] S. Martinez, „Statistische Methoden bei Geräuschmessungen im Freien“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 48(2001) S. 43-55.

[6] L. Brocolini, C. Lavandier, M. Quoy, C. Ribeiro, Measurements of acoustics environments for urban soundscapes: Choice of homogeneous periods, optimization of durations and selection of indicators, J. Acoust. Soc. Am 134(1), Pt.2, Juli 2013, 813-821

[7] A. Can, G. Guillaume, B. Gavreau, Noise indicators to diagnose urban sound environnements at multiple spatial scales. Acta Acustica united with Acustica, Vol 101(2015) 964-974.

[8] DIN EN 61400-11 (VDE 0127-11): 2013-09 Windenergieanlagen – 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) (Edition 2).