

# Zeitliche Veränderungen der durch Windenergieanlagen verursachten Immissionspegel

Till Kühner

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

## Einleitung

Die in großen Entfernungen durch Windenergieanlagen (WEA) verursachten Schalldruckpegel sind durch ständige Veränderungen geprägt.

Zum Teil liegt die Ursache für diese Veränderungen direkt bei der Quelle selbst, deren Schallleistung sich durch unterschiedliche Windbedingungen verändert. Bei den gleichen Windbedingungen können sich die Emissionen in Abhängigkeit der Windenergieanlage selbst ändern, die mit unterschiedlichen Drehzahlen und Rotorstellungen laufen kann. Und da die Schallquellen im Wesentlichen auf den Rotorblättern sitzen, handelt es sich um eine bewegte Quelle, die auch noch eine gerichtete Abstrahlung hat – was zu den als Wuschen oder Stampfen hörbaren Amplitudenmodulationen führen kann.

In großen Entfernungen kommt dazu noch die Dämpfung auf dem Ausbreitungsweg, die zu unterschiedlichen Immissionspegeln führen kann.

Im Folgenden wird anhand einer Beispielmessung gezeigt, wie die Variationen in gemessenen Immissionspegeln aussehen können, und es werden einige der Aspekte gezeigt, die mindestens berücksichtigt werden müssen, wenn Langzeitmittelungspegel [1] bestimmt werden sollen.

## Die Messungen

Im Rahmen des UBA-Projekts „Geräuschwirkung bei der Nutzung von Windenergie an Land“ wurden Messungen bei Sachsenhausen in Nord-Hessen durchgeführt. Die erhobenen Daten wurden für die folgenden Beispiele zur Verfügung gestellt, in dem Projekt selbst geht es primär um die Aspekte

der Wirkung, die eben nicht durch äquivalente Dauerschalldruckpegel [3] erfasst werden.

In Abstand von gut 1000m von der Wohnbebauung stehen drei Enercon-Windenergieanlagen:

- WEA 1 und 2: Typ E-82 Nabenhöhe 137 m
- WEA 3: Typ E-101 mit Nabenhöhe 133 m

Im Emissionsbereich wurde in ca. 180m Abstand von WEA 1 der Wind auf verschiedenen Höhen gemessen. Außerdem wurden im Sekundentakt Leistung, Drehzahl und Windgeschwindigkeit auf Gondelhöhe der WEA 1 aufgezeichnet.

Immissionsmessungen wurde am Rande der Wohnbebauung in gut 1000m Abstand von den WEA mit einem Mikrophon auf 7m Höhe und Windmessern auf 7m und 4m Höhe durchgeführt.

Die Messungen wurden vom 27.04. bis 27.06.2018 durch die deBAKOM GmbH durchgeführt.

## Die Pegel

Bei der Messung von WEA ist es üblich, at  $L_{Aeq,100ms}$  zu betrachten, also A-bewertete Schalldruckpegel mit 100ms Integrationszeit.

Zur allgemeinen Beurteilung können zunächst die Verteilungen der Pegel betrachtet werden. In Abbildung 4 ist die Häufigkeitsverteilung als Histogramm dargestellt. In rot ist die Verteilung für alle Zeiten zu sehen, mit gestrichelten Linien sind die Perzentilpegel L95, L80 und L50 eingezeichnet. Zum Vergleich ist in blau die Häufigkeit nur für die leisen Nachtstunden dargestellt, die hier in der Zeit



Abbildung 1: Lageplan

Quelle: openstreetmap-contributors



Abbildung 2: Emissionsbereich



Abbildung 3: Immissionsbereich

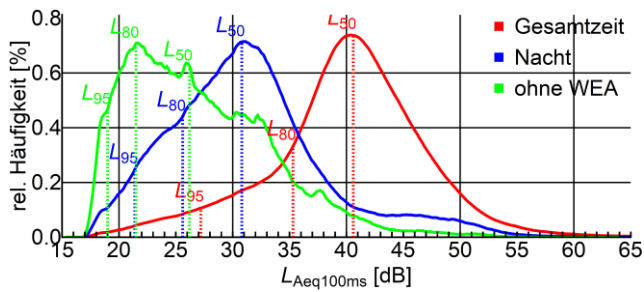


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Schalldruckpegel

von 23 Uhr bis 4 Uhr liegen. Es ist deutlich sichtbar, wie die Verteilung zu kleineren Pegeln verschoben ist.

Da die Immissionen durch WEA untersucht werden sollen, liegt es nahe, zu vergleichen, wie die Pegel ohne WEA aussehen. In grün ist in Abb. 4 die Verteilung für die leisen Nachtstunden dargestellt, in denen die WEA 1 eine Leistung kleiner als 100kW hatte. Der L50 liegt bei ca. 26 dB(A), der L95 – der oft als Hintergrundpegel bezeichnet wird – liegt bei nur 19 dB(A).

Es handelt sich also in der Nacht um eine relativ leise Umgebung. Für die folgenden Darstellungen sind diese Pegel gering genug, um vereinfachend gemessene Pegel weitgehend den WEA zuzuweisen. Eine derart grobe Vereinfachung wäre für eine quantitative Bestimmung von Langzeitmittelungspegeln völlig unzureichend, soll aber für die folgenden qualitativen Illustrationen reichen.

### Abhängigkeit von der Leistung der WEA

Eine naheliegende Betrachtung ist die Verteilung der Pegel in Abhängigkeit der Leistung der WEA, die in Abb. 5 dargestellt ist. Dabei wurden nur die leisen Nachtstunden

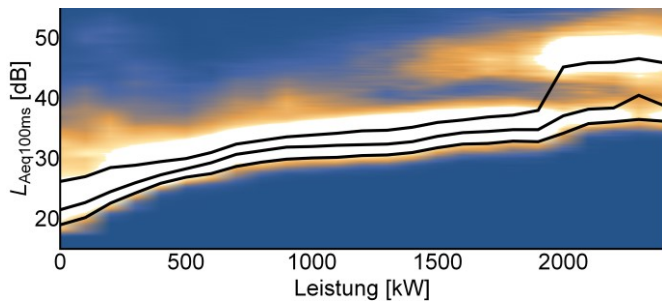


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilungen  $L_{Aeq,100ms}$  gegen Leistung von WEA 1. Als schwarze Linien L95, L80 und L50.

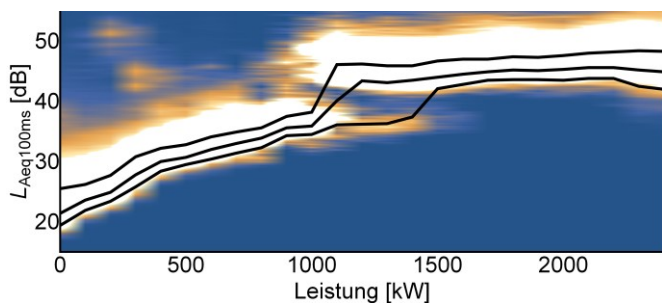


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilungen  $L_{Aeq,100ms}$  gegen Leistung von WEA 1, bei günstigen Windrichtungen.

berücksichtigt, um den Einfluss von Fremdgeräuschen klein zu halten.

Von kleinen Leistungen ausgehend, wird die Häufigkeitsverteilung mit zunehmender Leistung der WEA zu höheren Pegeln verschoben. Der erwartete Zusammenhang zwischen Leistung und Pegeln scheint bestätigt. Der Sprung bei ca. 1900kW könnte zunächst als Sondereffekt bei hohen Leistungen betrachtet werden.

Neben der Leistung der WEA kann mit Sicherheit erwartet werden, dass die Windrichtung einen Einfluss auf die Immissionspegel in großen Abständen hat. Während in Abb. 5 Pegel für alle Windrichtungen dargestellt sind, sind in Abb. 8 nur Pegel bei ausbreitungsgünstigen Windrichtungen („Mitwind“) berücksichtigt. Bis zu ca. 1000kW steigen die Pegel mit der Leistung der WEA schneller, bzw. die Häufigkeitsverteilung ist bei 1000kW zu höheren Pegeln verschoben als in der Verteilung für alle Windrichtungen – ein Ergebnis, das den Erwartungen entspricht.

Bei ca. 1100kW ist ein Sprung in der Verteilung zu erkennen, ähnlich wie bei ca. 1900kW in der Verteilung für alle Windrichtungen. An dieser Stelle wird dieser Sprung nicht weiter untersucht – für die Bestimmung eines Langzeitpegels müsste die Ursache geklärt werden.

### Klassierung der Pegel

In den Häufigkeitsverteilungen ist die Verschiebung zu höheren Pegeln mit zunehmender Leistung zu sehen. Im Bereich 500kW bis 1000kW sind bei günstigen Windrichtungen die Pegel ca. 10dB höher als ohne WEA. Wäre der Abstand zwischen L95 und L50 durch Fremdgeräusche bedingt, dann müsste deren Einfluss mit

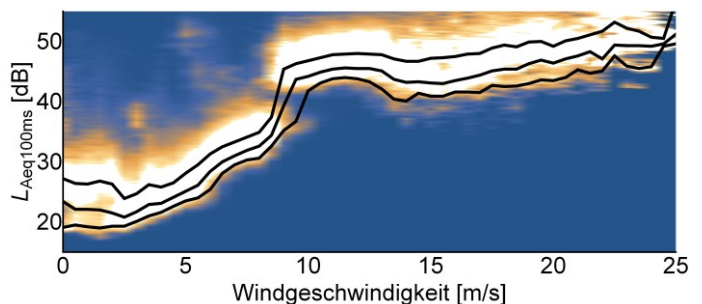


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilungen  $L_{Aeq,100ms}$  gegen Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe von WEA 1, ausbreitungsgünstige Windrichtungen.

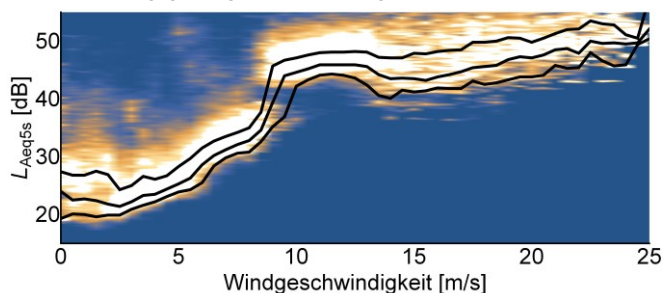


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilungen  $L_{Aeq,5s}$  gegen Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe von WEA 1, ausbreitungsgünstige Windrichtungen.

zunehmendem durch die WEA verursachtem Pegel sinken. Tatsächlich ändert sich der Abstand zwischen L95 und L50 mit zunehmender Leistung der WEA ab ca. 400kW kaum noch. Das heißt vermutlich, dass die durch die WEA verursachten Pegel selbst so breit verteilt sind. Der Abstand zwischen L95 und L50 liegt bei ca. 4dB, d.h. die Breite der Verteilung ist ca. 8 dB.

Die Darstellung der Pegel als Häufigkeitsverteilung gegen die Leistung der WEA kann auch als Klassierung interpretiert werden. Verschiedene Emissions- und Ausbreitungszustände werden in Klassen eingeteilt, und die Pegel in diesen Klassen betrachtet.

ISO 1996 [2] verlangt, dass die Wetterbedingungen zu bekannten und begrenzten Variationen in den Pegeln führen müssen. Das heißt, die Verteilungen in den Klassen müssen begrenzt sein, und es muss nachvollziehbar sein, wie die Unterschiede zwischen den Klassen zustande kommen.

Ein nicht erklärter Sprung wie in Abb. 5 und 8 wäre in der Auswertung eines Langzeitmittelungspegels entsprechend nicht zulässig.

Ob Klassenbreiten mit 8dB bei großzügiger Auslegung die Anforderung der ISO 1996 erfüllen, ist fraglich. Wünschenswert sind sicherlich Klassen, in denen die Pegelverteilungen enger sind.

### Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Eine weitere Klassierungsmöglichkeit bietet die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe der WEA 1. Gemessen werden Pegel, die durch drei WEA verursacht werden, die Leistung einer einzelnen WEA könnte dabei nicht ausreichend repräsentativ sein.

In Abb. 7 ist die Häufigkeitsverteilung der Pegel gegen die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe an WEA 1 dargestellt.

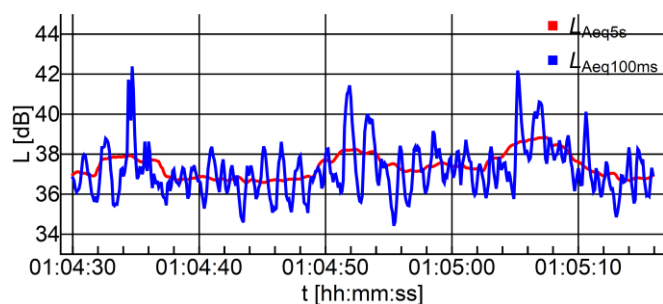


Abbildung 9: Pegelschrieb mit Amplitudenmodulationen

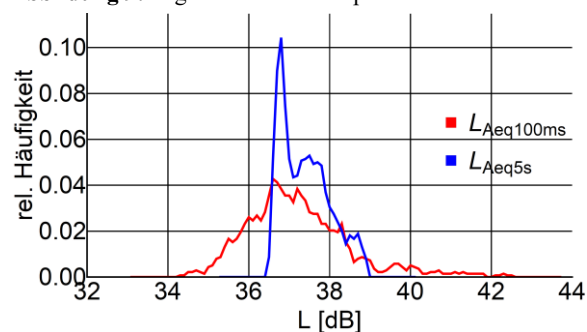


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung zu Abb. 9

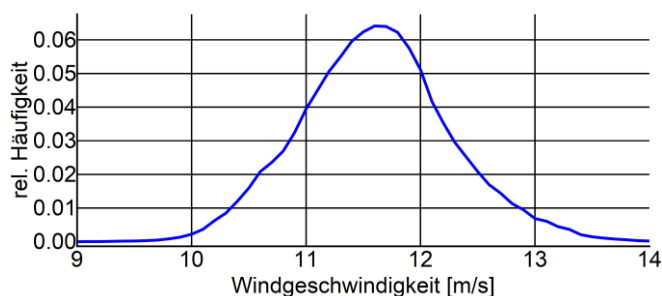


Abbildung 11: Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe bei 2100kW

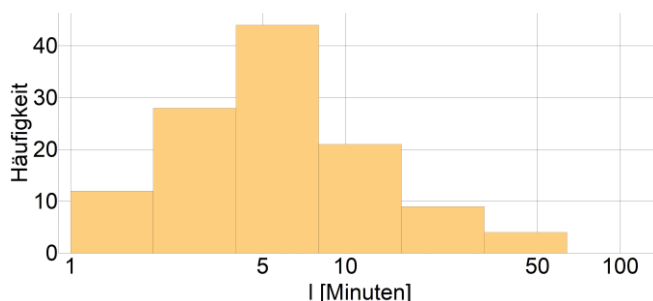


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung für die Längen der Zeitabschnitte mit dem gesuchten Windbereich

Qualitativ hat sich am Bild wenig geändert; die Pegel verschieben sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit nach oben, und bei ca. 10m/s ist ein Sprung in der Verteilung zu sehen. Die Breite der Verteilung liegt bei ca. 8dB, eine Verbesserung der Klassierung ist somit nicht erreicht.

### Kurzfristige Pegelschwankungen

Die betrachteten  $L_{Aeq,100ms}$  sind bei der Untersuchung von WEA deshalb interessant, weil sie ausreichend kurze Integrationszeiten haben, um Amplitudenmodulationen in Pegelschrieben sichtbar zu machen.

Wird ein Langzeitmittelungspegel gesucht, dann sind diese kurzfristigen Schwankungen nicht von direktem Interesse. Es könnte sein, dass gerade diese Schwankungen zu ungewollten breiten Verteilungen der Pegel führen. Eine Möglichkeit, den Einfluss von kurzfristigen Schwankungen zu unterdrücken, ist die Verlängerung der Integrationszeit z.B. auf 5s, und entsprechend einen  $L_{Aeq,5s}$  zu betrachten.

In Abb. 9 ist ein Pegelschrieb für einen Zeitabschnitt mit deutlichen Amplitudenmodulationen dargestellt. Die kurzfristigen Schwankungen des  $L_{Aeq,100ms}$  sind zusammen mit dem  $L_{Aeq,5s}$  zu sehen, der eher einem langsamen Trend folgt.

In den zugehörigen Häufigkeitsverteilungen in Abb. 10 ist die Verteilung für den 5s-Pegel deutlich schmäler, da die kurzfristigen Schwankungen effektiv weggemittelt wurden. Die Verteilungsbreite für die 5s-Pegel liegt für diesen Zeitausschnitt von unter einer Minute Länge bei rund 2dB.

Werden Pegel als  $L_{Aeq,5s}$  und nicht als  $L_{Aeq,100ms}$  klassiert, dann besteht die Hoffnung, dass die Breite der Verteilungen entsprechend sinkt. Die in Abb. 8 gezeigte Verteilung der



5s-Pegel gegen die Windgeschwindigkeit hat sichtbare aber kleine Unterschiede zur Verteilung für 100ms-Pegel, die angestrebte Reduzierung der Breite der Verteilungen ist jedoch nicht erreicht.

### Zeitabhängige Klassierung

Im Sinne der ISO 1996 können Zeitabschnitte gewählt werden, in denen die meteorologischen Bedingungen zu möglichst wenig Veränderungen führen. Ein Ansatz ist die Suche nach Zeiten mit konstanten Windgeschwindigkeiten.

Als Beispiel wird der Bereich untersucht, in dem die WEA 1 bei 2100kW liegt. In Abb. 11 ist die Verteilung des Winds auf Nabenhöhe bei 2100kW dargestellt. Entsprechend werden Zeiten gesucht, in denen die Windgeschwindigkeit im Bereich 11,0 bis 12,4 m/s liegt.

Bei der Suche nach solchen Zeitabschnitten ist ein Problem, dass die gemessenen Windgeschwindigkeiten kurzfristigen Schwankungen unterliegen. Ob diese durch die Messtechnik oder durch tatsächliche Schwankungen entstehen, ist zunächst sekundär – bei der Suche nach Zeitabschnitten sind diese kurzfristigen Schwankungen nicht hilfreich. Das Windgeschwindigkeitssignal wird mit einem Tiefpassfilter konditioniert, um stabile Werte zu erhalten.

In den zwei Monaten der Messzeit finden sich 119 Abschnitte, in denen die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe bei 11,0 bis 12,4 m/s lag, und die WEA 1 mindestens einmal 2100kW Leistung hatte. Durchschnittlich sind die Abschnitte knapp über 8 Minuten lang (siehe Abb. 12).

In Abb. 13 ist der Pegelschrieb für den längsten passenden Zeitabschnitt dargestellt. Da selbst die 5s-Pegel verglichen mit den dargestellten 41 Minuten relativ schnell schwanken, ist zusätzlich eine langsamere Trendlinie für die Pegel dargestellt. Eine derartige Trendlinie kann z.B. genutzt werden, um drei Fremdgeräusch-Ereignisse (00:14, 00:18 und 00:23 Uhr) zu erkennen. Selbst die Trendlinie zeigt im Zeitabschnitt Schwankungen, und entsprechend breit sind die Häufigkeitsverteilungen in Abb. 14.

Für den Beispielzeitraum wurden Windgeschwindigkeiten auf verschiedenen Höhen gemessen. Die Veränderungen in den Windgeschwindigkeiten sind klein, ein Zusammenhang mit den Pegelschwankungen nicht offensichtlich. Größere Veränderungen gibt es in den Varianzen der Windgeschwindigkeiten. Um diese zu erhalten, wird für jeden Windsensor ein Trend bestimmt, und dann die

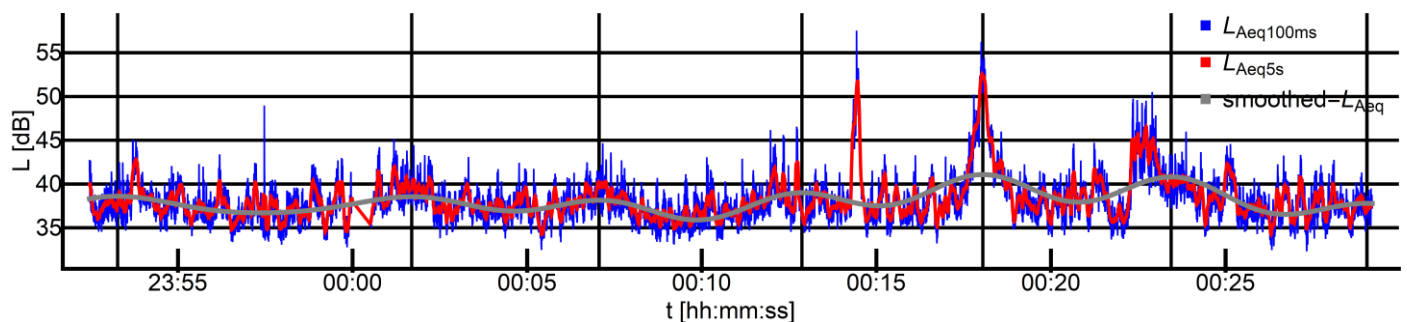


Abbildung 13: Pegelschrieb für eine Beispielzeit, in der immer die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe zwischen 11,0 bis 12,4 m/s lag.

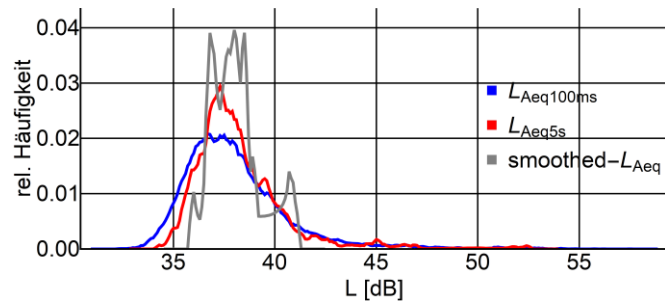


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung für den Pegelschrieb in Abb. 13

Differenzen der kurzzeitigen Windmessungen zum Trend gebildet. Veränderungen in diesen Varianzen sind auffälliger als in den Windgeschwindigkeiten selbst, aber nicht offensichtlich kleineren oder größeren Pegeln zuzuordnen.

### Fazit

Bei der Untersuchung von durch Windenergieanlagen verursachten Immissionspegeln ist die Bildung von Klassen, in denen die Verteilungen möglichst eng sind, wichtig.

In den gezeigten Beispielen sind die Klassenbreiten so groß, dass geeignetere Klassierungen gefunden werden müssen.

In allen Beispielen wurden A-bewertete Pegel genutzt, und keinerlei Fremdgeräuschtrennung durchgeführt. Um tatsächlich einen äquivalenten Dauerschalldruckpegel für eine Windenergieanlage zu bestimmen, müssten mindestens statistisch die Fremdgeräusche berücksichtigt werden.

Ein Abgleich der Spektren, um den Einfluss vor allem von windinduzierten Geräuschen genauer zu bestimmen, ist dringend zu empfehlen. Insofern ist das Dargestellte nur als Illustration zu verstehen.

### Literatur

- [1] ISO 1996-1:2016 Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 1: Basic quantities and assessment procedures
- [2] ISO 1996-2:2017 Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 2: Determination of sound pressure levels
- [3] ISO 9613-2:1996 Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors -- Part 2: General method of calculation