

Ansätze zur binauralen Erweiterung einer Algorithmik zur lästigkeitsbezogenen Analyse und Synthese der Schallemissionen von Windenergieanlagen

Stephan Preihs¹, Jakob Bergner¹, Jürgen Peissig¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Kommunikationstechnik

Appelstr. 9A, 30167 Hannover, Email: {vorname.nachname}@ikt.uni-hannover.de

Abstract

Im Rahmen der hier präsentierten Untersuchungen wurde ein bestehendes monaurales Signalverarbeitungsmodell für die WEA-Schallanalyse und Synthese analysiert und implementiert sowie um ein Modul zur Erfassung binauraler Wahrnehmungseigenschaften erweitert. Hierbei soll auf Basis einer in Subbändern erfolgenden blockbasierten Ermittlung interauraler Zeit- und Pegeldifferenzen sowie einer nachgeschalteten Korrelationsanalyse eine Aussage darüber gewonnen werden, zu welchem Grad periodische räumliche Fluktuationen im Schallsignal vorliegen, die einen Einfluss auf die wahrgenommene Lästigkeit haben könnten.

In diesem Beitrag wird in Kürze das Projekt WEA-Akzeptanz [1] vorgestellt, das zugrunde gelegte Modell zur Signalanalyse beschrieben und die verwendete Methodik zur Erweiterung für die Erfassungen binauraler Signaleigenschaften präsentiert. Es werden erste Ergebnisse der Analysen von, im Rahmen des Projektes entstandenen, binauralen Beispielaufnahmen gezeigt und ein Ausblick auf das weitere Vorgehen zur Abschätzung der globalen Lästigkeit gegeben.

Einleitung

Im Zuge des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes WEA-Akzeptanz werden in einer Kooperation verschiedener Institute der Leibniz Universität Hannover interdisziplinäre Ansätze zur Analyse und Modellierung der meteorologieabhängigen Ausbreitung akustischer Emissionen von Windenergieanlagen (WEA) untersucht.

Hierbei soll die gesamte Modellkette von der Entstehung über die Abstrahlung und meteorologieabhängige Ausbreitung bis zur psychoakustischen Perzeption am Immissionsort abgebildet werden (vgl. Abb. 1). Am Ende dieser Modellkette steht demnach eine am Institut für Kommunikationstechnik zu entwickelnde objektivierete Abschätzung der Lästigkeit von akustischen Immissionen. Hierbei soll auch der Frage nachgegangen werden, inwiefern Effekte der binauralen Wahrnehmung einen Einfluss auf die empfundene Lästigkeit haben.

Die Grundidee und das globale Ziel der dabei angestellten Untersuchungen ist es, ein maschinelles Modell zu entwickeln, das mit Hilfe von Ergebnissen aus Probandenversuchen trainiert wird. Hierbei werden die Probandenversuche unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen im Labor durchgeführt, indem reale Schall Szenen von WEA aufgenommen und alle psychoakustisch relevanten Schallfeldparameter bei der Wiedergabe re-

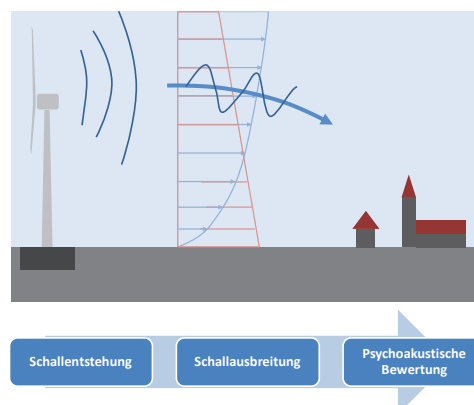


Abbildung 1: Schaubild zur Veranschaulichung der WEA-Akzeptanz Modellkette.



Abbildung 2: Flußgraph des Vorgehens zum Gewinn von Referenz-Lästigkeitswerten aus Probandenversuchen.

konstruiert werden (vgl. Abb. 2 und [2]). Die Parameter für das Modell stammen dabei aus der Analysestufe des im folgenden Abschnitt beschriebenen Synthesemodells.

Signalverarbeitungsmodell

Ausgangspunkt für die hier vorgestellten Überlegungen ist das von Pieren et al. in [3] vorgestellte Signalverarbeitungsmodell zur Synthese von WEA-Emissionen. Abbildung 3 zeigt einen aus [3] entnommenen und von uns ergänzten Flußgraph der Signalverarbeitung. Hierbei erfolgt eine Verarbeitung in 1/3-Oktav Bändern zur Generierung eines Signales, das sich aus gefärbtem Rauschen zusammensetzt und dem in den einzelnen Subbändern

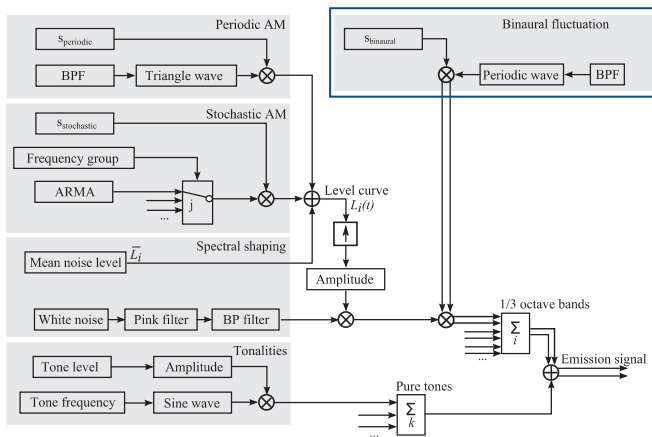


Abbildung 3: Vorschlag für binaurales Synthesemodell aufbauend auf [3] (blaue Box kennzeichnet Erweiterung).

periodische und stochastische Amplitudenmodulationen aufgeprägt werden. Zusätzlich werden auch tonale Anteile zum Signal addiert. Die Algorithmik von Pieren et al. enthält auch eine Analysestufe zum Extrahieren der Syntheseparameter aus Aufnahmen realer WEA.

Ansatz zur binauralen Erweiterung

In seiner ursprünglichen Version stellt das Signalverarbeitungsmodell von Pieren et al. an seinem Ausgang lediglich ein monaurales Signal zur Verfügung. Bekanntermaßen kann besonders in der näheren Umgebung einer WEA insbesondere zum Zeitpunkt des Herunterschlagens eines Blattes ein räumlich veränderlicher Ort der primären Schallquelle wahrgenommen werden. Diese Wahrnehmung wird u.a. verursacht durch zeitlich veränderliche binaurale Pegel- und Laufzeitunterschiede (ILD und ITD) $\Delta\tau(t)$ und $\Delta L(t)$ (vgl. Abb. 4) am Kopf des Rezipienten. Im Rahmen unserer Untersuchungen wollten wir daher herausfinden, ob und wie sich diese periodischen binauralen Fluktuationen detektieren und in ein Synthesemodell integrieren lassen. Hierbei machen wir uns die aus den Grundlagen der Signalverarbeitung bekannte Tatsache zu Nutze, dass sich die Periode T eines periodischen Zeitsignales im Abstand der Maxima seiner Autokorrelierten niederschlägt (vgl. Abb. 5).

Die angestrebte Erweiterung des Synthesemodells aus Abb. 3 besteht demnach in einer Reproduktion der in Subbändern detektierten und gemessenen Fluktuationen der binauralen Pegel- und Laufzeitunterschiede zur Erzeugung eines binauralen Synthesesignales.

Für die Detektion von binauralen Fluktuationen haben wir die in Abb. 6 dargestellte Signalverarbeitungskette entwickelt. Aufbauend auf die Two!Ears Toolbox [4] werden hierbei für einen Signalblock eines Gesamtsignales ILD bzw. ITD-Zeitverläufe in überlappenden Teilblöcken für 30 Subbänder bestimmt. Die so erhaltenen ILD/ITD-Kurven werden einer Glättung durch ein rekursives Filter erster Ordnung unterzogen. Im Anschluss erfolgt die bereits erwähnte Berechnung der Autokorrelation sowie eine Detektion des ersten und zweiten Nebenmaximums und die Bestimmung der Abweichung von einer Periodizitätsbedingung.

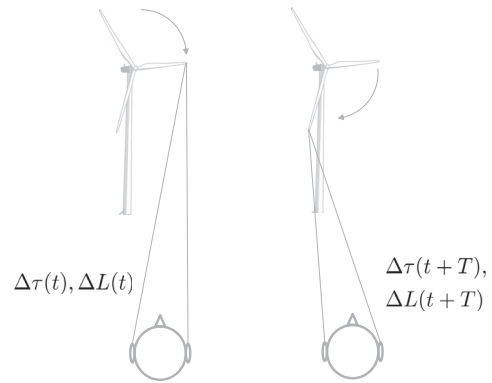


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Entstehung binauraler Pegel- und Zeitdifferenzen.

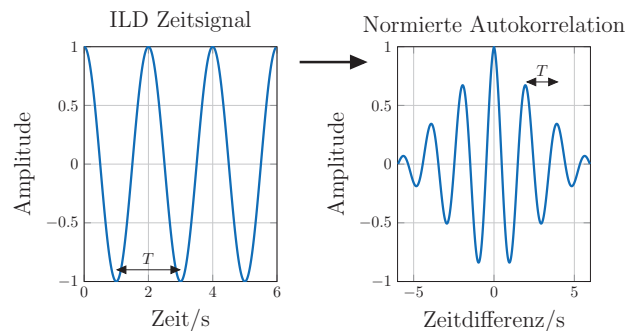


Abbildung 5: Beispiel zur Identifikation der Periodendauer T über die Autokorrelation eines Zeitsignales.

Für die Analyse längerer Signalsequenzen und weitere Aggregation der Daten kann eine Abbildung auf einen Einzahlwert für überlappende Makro-Teilblöcke k eines Gesamtsignales erfolgen.

Erste Ergebnisse - Laboraufnahmen

Um die Leistungsfähigkeit der entwickelten Signalverarbeitung zu testen, wurden zunächst Aufnahmen unter kontrollierten Laborbedingungen erstellt. Im reflexionsarmen Raum des IKT wurde deshalb eine Apparatur zur Rotation eines Miniaturlautsprechers auf einer Kreisbahn mit ca. $12,4 \text{ min}^{-1}$ installiert (vgl. Abb 7). Über den Lautsprecher wurde rosa Rauschen bei einem Pegel von ca. 62 dBA in 1,6 m Abstand wiedergegeben und die Schallszene mit einem Neumann KU100 Kunstkopf aufgenommen. Zur exakten Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit und Position des Lautsprechers wurde ebenfalls ein Referenzmikrofon unterhalb der Drehvorrichtung platziert.

Für die Signalanalyse gemäß Abb. 6 wurde eine Blocklänge für die ILD/ITD-Analyse von 18 s gewählt. Entgegen der üblichen Größe der Fenster für die ILD/ITD-Bestimmung wurde eine Fensterlänge von 100 ms eingestellt, da wir von verhältnismäßig stationären Signalen ausgehen. Die Schrittweite bei der ILD/ITD Berechnung wurde auf dem vorgegebenen Wert von 10 ms belassen und die höchste Mittenfrequenz der Gammatone-Filterbank auf 10 kHz begrenzt.

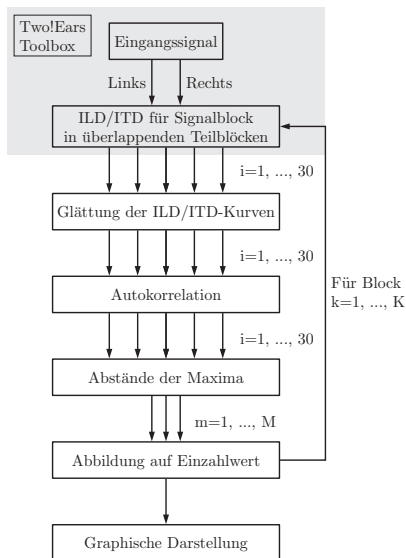


Abbildung 6: Flußgraph der angewandten Signalverarbeitung zur Detektion binauraler Fluktuationen.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch die aus einem Signalblock erhaltenen Verläufe der ILD und der entsprechenden Autokorrelation des neunten Bandes (Mittenfrequenz 524,4 Hz). Der sich aus dem Signal des Referenzmikrofons berechnete Referenzwert für das erste Maximum der Autokorrelation liegt bei 482, was auf eine ausreichend hohe Genauigkeit des Schätzwertes schließen lässt. Allgemein sind für die meisten Bänder besonders in der mittleren Frequenzbereich (Band 15-20, 1-3 kHz) glatte Zeitverläufe und damit klar ausgeprägte Maxima zu erkennen. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der normierten Autokorrelation aller Bänder. Grundsätzlich bestätigen sich die Aussagen und die Periodenlängen stimmen überein. Lediglich für die Bänder 1-4 ergeben sich keine ausgeprägten Maxima. Dies liegt daran, dass die Grenzfrequenz des verwendeten Lautsprechers oberhalb der Mittenfrequenz dieser Bänder liegt.

Der Vergleich der Ergebnisse von ILD und ITD zeigt deutlich glattere Verläufe für die ILD. Allgemein wurde die ILD-Berechnung dabei auch als unempfindlicher bewertet. Da auch der Rechenaufwand für die ILD geringer ausfällt, wurde im Folgenden hauptsächlich mit dieser gearbeitet.

Zur Untersuchung des Einflusses eines veränderlichen Signal-Rausch-Verhältnisses auf die Detektion periodischer binauraler Fluktuationen wurden die Aufnahmen aus dem reflexionsarmen Raum im Nachhinein mit additivem Gaußschen Rauschen beaufschlagt und die Detektionsalgorithmik angewandt. Für die Auswertung wurde eine Schwelle festgelegt, ab der eine Detektion als richtig gewertet wird. Hierbei wurde eine relative Abweichung von ca. 2% in Bezug auf die Referenzwerte des ersten und zweiten Maximums als sinnvoller Wert ermittelt und eingestellt. Abbildung 10 zeigt den Verlauf des Anteils korrekter Bänder sowie die Ergebnisse einzelner Bänder über dem SNR. Es ist zu erkennen, dass sich schon bei negativen SNRs eine hohe Anzahl korrekter Bänder ergibt und bei ca. -4 dB bereits 50% der Bänder korrekt



Abbildung 7: Foto des Aufbaus zum Erstellen von Testaufnahmen im reflexionsarmen Raum des IKTs.

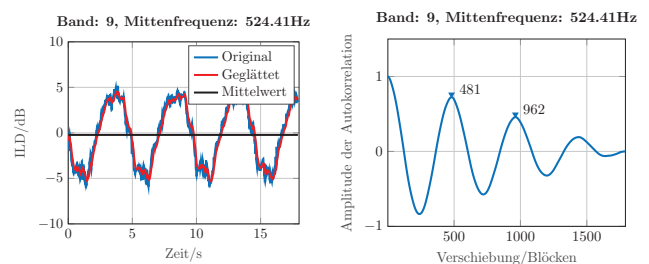


Abbildung 8: Exemplarischer Verlauf der ILD für das neunte Band und entsprechende normierte Autokorrelation.

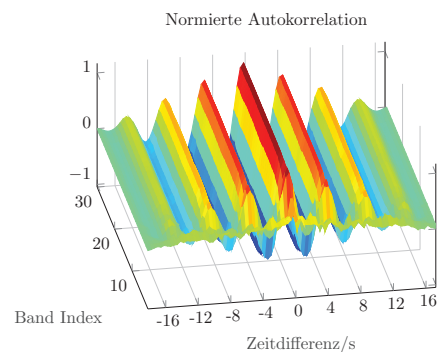


Abbildung 9: Exemplarischer Verlauf der normierten Autokorrelation aller Bänder.

detektiert werden. Bei positiven SNRs sättigt die Kurve dann bei 80-90% ein. Die fehlenden 10% lassen sich durch die unteren 3-4 Bänder erklären, deren Ergebnisse stets falsche Ergebnisse liefern.

Erste Ergebnisse - Reale Aufnahmen

Für das Testen der vorgestellten Algorithmik unter realen Bedingungen wurden auch Analysen von Signalen echter WEA durchgeführt. Die Signale stammen aus einer im Rahmen des Projektes WEA-Akzeptanz durchgeführten Messkampagne im Zuge von Abnahmemessungen. Die Aufnahmen erfolgten wiederum mit dem Neumann KU100 Kunstkopf jedoch unter Benutzung eines Soundman OKM Windschutzes. Im Verlauf der Messungen stellte sich allerdings heraus, dass der verwendete

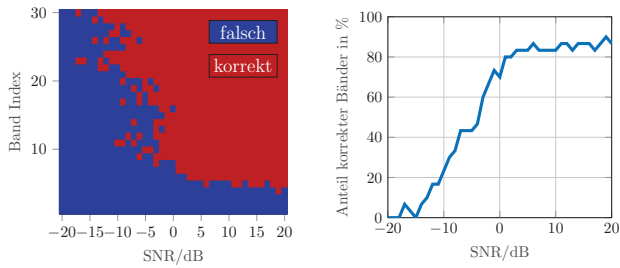


Abbildung 10: Verlauf des Anteils korrekt detektierter Bänder über dem SNR.

Windschirm für die erreichten Windgeschwindigkeiten nicht zu einer vollständigen Unterdrückung von Windgeräuschen führt. Die WEA hatte eine Gondelhöhe von 100 m, einen Rotordurchmesser von 100 m und die Rotor-drehzahl lag bei ca. 13 min^{-1} . Die Messungen fanden im Abstand von ca. 100-200 m, also bewusst unnatürlich nah an der Anlage statt. Die Umgebungsbedingungen waren wie folgt - Temperatur: $13\text{-}17^\circ\text{C}$, Luftdruck: 1015 hPa, Windgeschwindigkeiten: 6-14 m/s.

Zur weiteren Aggregation und graphischen Darstellung der Daten haben wir den so genannten Periodizitätsindex $P(x)$ definiert. Er berechnet sich aus dem Abstand x des ersten und zweiten Nebenmaximums M_1 und M_2 und $x = M_1 - M_2/2$ über

$$P(x) = 1.1 - 0.1 \cdot 10^{\frac{|x|}{\alpha}} \quad (1)$$

wobei $10 \leq \alpha \leq 40$ gilt. Bei Überschreitung einer Schwelle $|x| = \alpha$ gilt $P(x) = 0.1$. Im Folgenden wird $\alpha = 20$ verwendet.

Abbildung 11 zeigt den für alle Bänder über der Zeit aufgetragenen Periodizitätsindex eines Beispielsignales. Der nicht perfekte Windschutz ermöglicht es zu zeigen, dass sich Änderungen in der wahrnehmbaren räumlichen Ortbarkeit der Primärschallquelle auch in den Messdaten niederschlagen. In Phasen stärkeren Windes ist ein deutlicher Einbruch des Periodizitätsindex in einer Vielzahl von Bändern zu beobachten. Dies korreliert auch mit dem subjektiven Eindruck.

In Abbildung 12 ist der über alle Bänder summierte Periodizitätsindex dargestellt. Hier ist ebenfalls deutlich zu erkennen, wie in Phasen stärkeren Windes durch den unzureichenden Windschutz der summierte Periodizitätsindex abnimmt und in Ruhephasen den Mittelwert zum Teil deutlich übersteigt. Dadurch sind wir zuversichtlich ein Maß definiert zu haben, das eine grundsätzliche Aussage über das Vorhandensein periodischer räumlicher Fluktuationen ermöglicht.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Ansätze zu einer binauralen Erweiterung eines Synthesemodells für WEA-Emissionen vorgestellt. Es wurde eine Algorithmik zur Analyse von WEA-Schall in Bezug auf periodische räumliche Fluktuationen präsentiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, diese mit dem vorgestellten Verfahren zu detektieren.

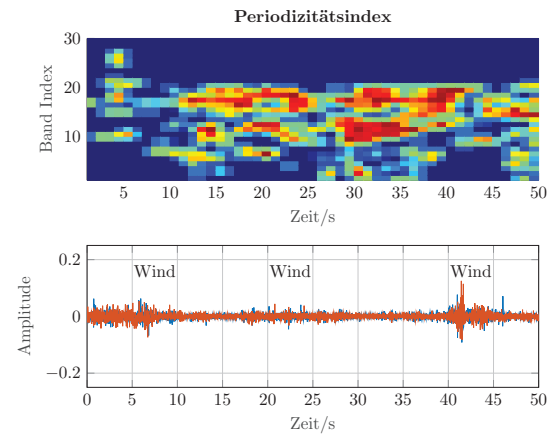


Abbildung 11: Periodizitätsindex einzelner Bänder über der Zeit für ein Beispielsignal.

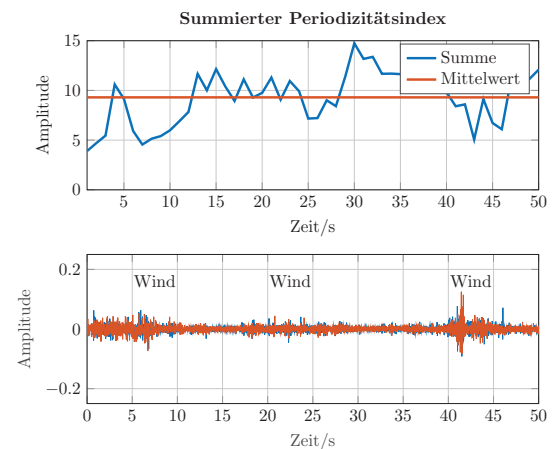


Abbildung 12: Summierter Periodizitätsindex und Mittelwert über der Zeit für ein Beispielsignal.

Dennoch bedarf es weiterer Untersuchungen für die finale Integration in ein Synthese- bzw. Lästigkeitsmodell. Ein Abgleich mit subjektiven Ergebnissen aus Probandenstudien muss ebenfalls erfolgen.

Förderung

Das Projekt WEA-Akzeptanz ist gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0324134A.

Literatur

- [1] Homepage des Projektes WEA-Akzeptanz, URL: <https://www.wea-akzeptanz.uni-hannover.de>, Online; accessed 31-03-2019.
- [2] Bergner, J., Preihs, S., and Peissig, J., On Wind Turbine Noise Scape Reproduction for Perceptual Evaluation, DAGA, 2019.
- [3] Pieren, R., Heutschi, K., Müller, M., Manyoky, M., and Eggenschwiler, K., Auralization of Wind Turbine Noise: Emission Synthesis, volume 100, pages 25–33, Acta Acustica united with Acustica, 2014.
- [4] Raake, A. et al., Final Project Report - Two!Ears Project, 2017.