Einfluss unterschiedlicher Datenverarbeitung bei der Schallquellenlokalisierung an Klappen für Windenergieanlagen

Carl Robert Brand[1], Prof. Jörg Seume[1]

[1] *ForWind - Zentrum für Windenergieforschung, Email: brand@tfd.uni-hannover.de*

Zusammenfassung

Rotoren mit aktiven Klappen sind ein vielversprechendes Konzept zur dynamischen Lastminderung. Die Untersuchung der akustischen Eigenschaften dieser Klappe erfolgt im Rahmen des Verbundprojekts Smart Blades. Dazu wurden Windkanaluntersuchungen an einem Flügelmodell durchgeführt. Die Lokalisierung der Schallquellen im Bereich der Klappe erfolgte mittels eines Mikrofonarrays und eines nachgeschalteten Beamforming-Algorithmus. Die Analyse der Daten weist auf eine positive Korrelation zwischen der Klappenauslenkung und dem Schalldruckpegel im Klappenbereich hin. Demzufolge verursacht die Klappe eine relevante Schallquelle am Rotorblatt. Der quantitative Pegel dieser Quelle ist jedoch signifikant abhängig von der statistischen Güte des zur Bestimmung des Leistungsdichtespektrums verwendeten Schätzers.

Einleitung

Konventionelle Rotoren von Windenergieanlagen sind starken Belastungsschwankungen ausgesetzt, welche beispielsweise durch Windböen und Turminteraktionen verursacht werden. Der Pitch-Regelmechanismus bietet keine Möglichkeit der dynamischen Lastminderung der Rotoren. Ein vielversprechendes Konzept zur Lastregelung stellen aktive Klappen an der Hinterkante der Rotoren dar, die vergleichbar mit Hochauftriebssystemen in der Luftfahrt sind. Die Klappen führen jedoch zu einer Diskontinuität des Profil. An den Seitenkanten zwischen Klappe und Profil kommt es zur Ausbildung von Wirbelstrukturen. Experimentelle Untersuchungen an Klappen für Flugzeugflügel zeigen, dass die Klappe eine relevante Schallquelle bildet [4]. Aus diesem Grund ist die akustische Untersuchung des Klappeneinsatzes für Windenergieanlagen notwendig.

Die Untersuchung erfolgt im Windkanal an einem Flügelmodell mit Klappe. Die Lokalisierung der Schallquellen an der Klappe wird mit einem Mikrofonarray und einem Beamforming-Algorithmus durchgeführt. Der Algorithmus basiert auf einer statistischen Schätzung der spektralen Leistungsdichte der Quellen. Hieraus leitet sich das Ziel dieser Arbeit ab: Die Quantifizierung des Einflusses des Schätzers auf den mit dem Beamforming-Algorithmus bestimmten Schalldruckpegel im Klappenbereich.

Beamforming zur Quellenlokalisierung

Der Beamforming-Algorithmus nutzt zur Lokalisierung von Schallquellen eine Ausbreitungseigenschaft von Schallwellen: Breitet sich eine Schallwelle ausgehend von einer Quelle im Raum aus, liegt an örtlich verteilten Sensorpositionen eine Phasendifferenz in den Sensorsignalen vor. Diese Phasendifferenz ist abhängig von der Relativposition von Schallquelle und Sensor, wodurch die Schallquelle im Raum lokalisiert werden kann.

Der Aufbau des verwendeten Mikrofonarrays legt die dimensionale Auflösung der Lokalisierung fest. Mit Hilfe von 1D-Arrays kann die Quelle nur 1D auf einer Linie lokalisiert werden. Wird hingegen ein 2D-Array verwendet, kann die Quelle in einer definierten Ebene parallel zur Arrayebene lokalisiert werden. Ein solches 2D-Array wird für die weitere Betrachtung verwendet.

Zur nachgelagerten Signalverarbeitung sind verschiedene Beamforming-Algorithmen entwickelt worden, die sich in ihrer Komplexität und Robustheit unterscheiden [1]. Der am weitesten verbreitete Algorithmus ist der Delay-and-Sum Algorithmus, der durch einen einfachen Aufbau und Robustheit bezüglich der Eingangsgrößen gekennzeichnet ist. Für die Anwendung des Delay-and-Sum Algorithmus wird zuerst ein zweidimensionales Gitterraster vor dem Array definiert, auf dem die Schallquellverteilung berechnet werden soll. Als nächstes erfolgt in einem Zwei-Schritt-Verfahren die Bestimmung des auf die Gitterpunkte fokussierten Signals. Dazu erfolgt in Schritt eins eine Verzögerung (Delay) aller Signale, sodass die Phasendifferenz auf Grund der räumlich verteilten Sensorpositionen bezogen auf den aktuellen Fokuspunkt korrigiert ist. Im zweiten Schritt erfolgt die Überlagerung (Sum) aller Signale durch Addition. Liegt hierbei an dem fokussierten Gitterpunkt eine Schallquelle vor, so kommt es durch die Überlagerung zu einer konstruktiven Interferenz, wodurch das Signal verstärkt wird. Liegt hingegen an dem Gitterpunkt keine Schallquelle vor, interferieren die Signale destruktiv, wodurch das fokussierte Signal abgeschwächt wird. Wird dieser Algorithmus für jeden Gitterpunkt durchgeführt, kann abschließend die akustische Quellverteilung auf dem Gitterraster angegeben werden. Zusammenfassend gibt [3] mit

$$p(\vec{x}_f, t_f) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} p_m(t_f + t_{fm}) w_m \frac{r_{fm}}{r_{ref}} \qquad (1)$$

die Grundgleichung des Beamformings im Zeitbereich an, welche das fokussierte Signal $p(\vec{x}_f, t_f)$ in Abhängigkeit vom Fokuspunkt $\vec{x}_f$ und der Emissionszeit t_f beschreibt. Dabei ist $p_m(t_f + t_{fm})$ das um die Zeit t_{fm} verzögerte Signal des m-ten Mikrofons. Der Faktor $\frac{r_{fm}}{r_{ref}}$ berücksichtigt die Schallwellenausbreitung im Raum als Kugelwelle und

der Parameter w_m ist ein optionaler Gewichtungsfaktor für die Mikrofonsignale.

Mit Hilfe von Gl. (1) wird die akustische Quellverteilung im Zeitbereich bestimmt. Meist ist jedoch die Quellverteilung im Frequenzbereich von Interesse, da beispielsweise hochfrequente Schallquellen zur Lärmminderung gezielt lokalisiert werden sollen. Für die Arbeit im Frequenzbereich werden die Mikrofonsignale zuerst mittels Fourier-Transformationen (FFT) in den Frequenzbereich überführt und anschließend überlagert und summiert (vgl. [3]). Die zu Gl. (1) entsprechende Gleichung im Frequenzbereich lautet

$$P(\vec{x_f}, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} P_m(\omega) e^{-j\omega t_{fm}} \frac{r_{fm}}{r_{ref}}. \tag{2}$$

Dabei ist $P_m(\omega)$ die komplexe Fourier-Transformierte des Mikrofonsignals für die Kreisfrequenz ω. Die zeitliche Verzögerung wird im Frequenzbereich durch die Phasendrehung $e^{-j\omega t_{fm}}$ abgebildet.

Die akustische Quellverteilung wird häufig als Leistungsdichtespektum S_{PP} (Einheit Pa^2/Hz) angegeben. Das Leistungsdichtespektum S_{PP} kann aus Gl. (2) mittels weiterer mathematischer Operationen erhalten werden. Eine direkte Berechnung des Leistungsdichtespektums S_{PP} kann unter Verwendung der Kreuzspektralmatrix $\mathbb{C}_{mn}$ erfolgen. Nach [3] lautet die Grundgleichung des Beamformings im Frequenzbereich unter Verwendung der Kreuzspektralmatrix

$$S_{PP}(\vec{x}_f, \omega) = \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{M} \vec{g}_{fn} \mathbb{C}_{mn}(\omega) \vec{g}_{fn}^{*}. \tag{3}$$

Der Vektor $\vec{g}_{fn}$ wird als Steuerungsvektor bezeichnet und $\vec{g}_{fn}^{*}$ ist dessen komplex Konjugierte. Durch die Einführung des Steuerungsvektors ergibt sich für Gl. (3) eine mathematische Trennung zwischen den Ausbreitungsinformationen (Interferenzfunktion $e^{-j\omega t_{fm}}$, Amplitudenkorrektur r_{fm}/r_{ref}, Gewichtung w_m) und den Mikrofonsignalen (Kreuzspektralmatrix $\mathbb{C}_{mn}$). Die Kreuzspektralmatrix $\mathbb{C}_{mn}$ beinhaltet die Leistungsdichtespektren aller Mikrofonsignale. Das Leistungsdichtespektrum

$$\mathbb{C}_{mn}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{mn}(\tau_1) e^{-j\omega\tau} d\tau_1 \tag{4}$$

ist definiert als das Integral über die Fourier-Transformierte der Korrelationsfunktion $R_{mn}(\tau_1)$. Auf Grund von diskret vorliegenden Messwerten, wird das Leistungsdichtespektum $\mathbb{C}_{mn}$ überführt in den diskreten Schätzer

$$\hat{\mathbb{C}}_{mn}(\omega) = \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} \hat{R}_{mn}(k) e^{-j\omega k}, \tag{5}$$

der als Korrelogramm bezeichnet wird. Das Korrelogramm $\hat{\mathbb{C}}_{mn}$ ist jedoch nicht konsistent: Der mittlere quadratische Fehler (MQF) des Korrelogramms konvergiert auch mit wachsender Signallänge nicht gegen Null. Somit ist die Schätzung des Leistungsdichtespektums asymptotisch nicht erwartungstreu und die Streuung des Schätzers konvergiert nicht gegen Null [2].

Für eine konsistente Spektralschätzung stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, wobei die Methode nach Welch (vgl. [6]) das am häufigsten angewendete Verfahren ist. Das gesamte Zeitsignal wird in K Blöcke unterteilt. Jeder Block wird mit einer Fensterfunktion multipliziert und anschließend für jeden Block separat das Korrelogramm berechnet. Abschließend wird das arithmetische Mittel aller Korrelogramme bestimmt. Auf Grund der Mittelung wird ein konsistenter Schätzer für das Leistungsdichtespektrum erhalten. Der Erwartungswert des Korrelogramms nach der Welch-Methode (vgl. [2]) ist

$$E\left\{\hat{\mathbb{C}}_{mn}^{W}\right\} \approx \frac{1}{A \cdot L} \sum_{k=0}^{L-1} f_L^2(k) \cdot \mathbb{C}_{mn} \tag{6}$$

mit der Normierungskonstante A und je L Abtastwerten je Block. Die Varianz wird angegeben als

$$Var\left\{\hat{\mathbb{C}}_{mn}^{W}\right\} \approx \frac{1}{K} \mathbb{C}_{mn}^2. \tag{7}$$

Aus Gl. (6) und Gl. (7) ist erkennbar, dass zwei Faktoren einen Einfluss auf die Qualität der Schätzung des Leistungsdichtespektrums haben: Die Anzahl K der für die Mittelung berücksichtigter Blöcke und die Wahl der Fensterfunktion f_L.

Blockanzahl

Die Anzahl der Blöcke K ist direkt mit der Blocklänge L verknüpft. Je kleiner die Blocklänge L wird, desto mehr Blöcke stehen für die Mittelung zur Verfügung und desto kleiner wird der MQF. Jedoch reduziert sich durch die verringerte Blocklänge auch die Frequenzauflösung Δf des Leistungsdichtespektrums. Diese ist gegeben durch

$$\Delta f = \frac{f_s}{L_{NFFT}}, \tag{8}$$

mit der Signalabtastfrequenz f_s und der nächsten, zur Blocklänge L dazugehörigen 2-er Potenz. Dieser Zielkonflikt kann abgeschwächt werden, indem sich die Einzelblöcke (im folgenden als Grundblöcke bezeichnet) überschneiden. Dadurch bleibt die Blocklänge L und somit die Frequenzauflösung Δf erhalten, die Anzahl K der für die Mittelung zur Verfügung stehenden Blöcke erhöht sich jedoch signifikant. Beispielsweise führt eine Überlagerung um jeweils die Hälfte der Abtastwerte zu einer annähernden Verdoppelung der für die Mittelung zur Verfügung stehenden Blöcke, wodurch die Varianz des Korrelogramme annähernd halbiert wird (vgl. [2]). Die Überlappung der Blöcke kann jedoch nicht größer gewählt werden, da sonst die statistische Unabhängigkeit

der Einzelkorrelogramme im arithmetischen Mittel nicht mehr gewährleistet ist.

Fensterung

Stimmt die Blocklänge L nicht mit der Periodendauer der Signale überein, tritt zusätzlich der Leckage-Effekt auf: Frequenzanteile im Spektrum werden nicht klar aufgelöst. Es kommt zu einer Verschmierung der Frequenzauflösung. Dieser Effekt kann reduziert werden, indem das Signal vor der Fourier-Transformation mit einer Fensterfunktion f_L multipliziert wird. Anfang und Ende eines Blocks werden somit geringer gewichtet. Jedoch entscheidet die Wahl der Fensterfunktion f_L signifikant über die Qualität der Minderung des Leckage Effekts. In [6] schlägt Welch die Verwendung einer Hamming-Fensterfunktion vor, die sich als geeignete Fensterfunktion erwiesen hat. Aus diesem Grund wird das Hamming-Fenster auch in dieser Arbeit verwendet.

Beschreibung der Anwendung

Der im vorherigen Abschnitt diskutierte Einfluss der Blockanzahl und prozentuale Anteil der Überschneidung auf die Schätzung des Leistungsdichtespektrums einer akustischen Quellverteilung wird im Folgenden an einem Messdatensatz gezeigt. Die Messdaten sind im Rahmen der akustischen Messkampagne des Smart Blades Projekt aufgenommen worden [5]. Die Untersuchungen erfolgten im aeroakustischen Windkanal des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig (vgl. Abb. 1). In der Messstrecke war ein DU08-W-180 Profil mit einer aktiven Hinterkante montiert. In einem Abstand von 1 m von der Saugseite des Profils war ein 2D-Mikrofonarray (96 Einzelmikrofone, optimierte Geometrie) platziert. Mit Hilfe des Arrays erfolgt die Schallquellenlokalisierung im Seitenkantenbereich der ausgelenkten Klappe.

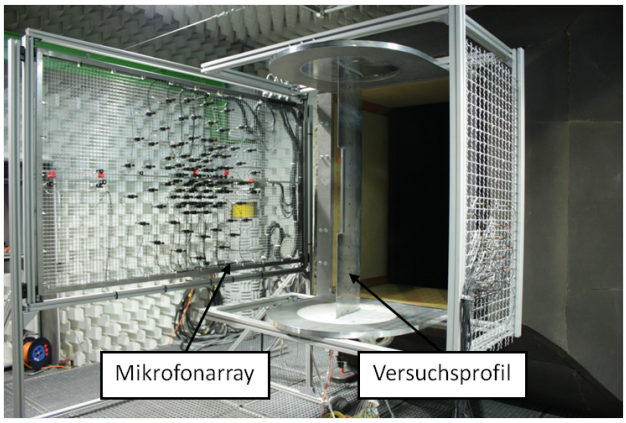

Abbildung 1: Versuchsaufbau im aeroakustischen Windkanal des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit einem in MATLAB implementierten Beamforming-Algorithmus auf Basis von Gl. (3). Das entwickelte Skript greift zur Berechnung der Kreuzspektralmatrix auf die Funktion *cpsd* der Signal Processing Toolbox (Version 6.21) zurück.

Die Untersuchung des Einflusses der beiden Parameter wird an Hand des Zusammenhangs zwischen Klappenauslenkung und Schalldruckpegel im Klappenbereich durchgeführt. Dazu sind Schätzungen der spektralen Leistungsdichte mit verschiedenen Werten der beiden Parameter Blockanzahl und Überschneidung durchgeführt und in den Schalldruckpegel

$$SPL_w = 10 \cdot log_{10}\left(\frac{S_{PP}}{(2 \cdot 10^{-5})^2}\right)$$

überführt worden. Aus der Quellverteilung wird der mittlere Schalldruckpegel im Bereich einer Klappenseitenkanten bestimmt und der so erhaltene mittlere, fokussierte Schalldruckpegel $\overline{SPL}_{W,F}$ über dem Klappenwinkel abgetragen. Die Auswertung erfolgt für die Terzmittenfrequenz 6300 Hz und für den aerodynamischen Anstellwinkel 6°.

Ergebnisse

In Abb. 2 ist der Schalldruckpegel $\overline{SPL}_{W,F}$ über dem Anstellwinkel der Klappe für drei verschiedene Einstellungen der Welch-Methode dargestellt.

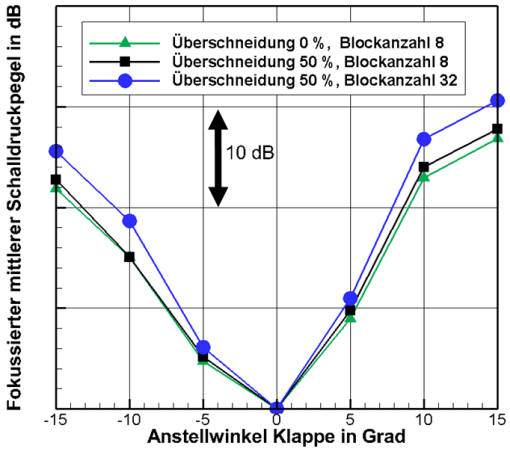

Abbildung 2: Einfluss der prozentualen Überschneidung und der Blockanzahl auf den fokussierten Schalldruckpegel über dem Anstellwinkel der Klappe

Qualitativ zeigen alle drei Funktionen den gleichen Verlauf: Eine betragsmäßige Auslenkung der Klappe führt immer zu einer Erhöhung des $\overline{SPL}_{W,F}$. Ebenfalls ist der $\overline{SPL}_{W,F}$ für eine positive Auslenkung (in Richtung der Saugseite) immer höher als für den gleichen, negativen Auslenkungswinkel (in Richtung der Druckseite). Der maximale $\overline{SPL}_{W,F}$ liegt für alle drei Funktionen für die maximale positive Auslenkung von 15° vor.

Quantitativ unterscheiden sich die drei Funktionen jedoch signifikant. Sowohl eine erhöhte Überschneidung der Blöcke, als auch eine Erhöhung der Grundblockzahl führt zu einer Erhöhung des $\overline{SPL}_{W,F}$. Die maximale Differenz des $\overline{SPL}_{W,F}$ liegt hierbei wiederum für die maximale, positive Auslenkung von 15° vor. Die Differenz beträgt $\Delta SPL_{Fokus} \approx 1\ dB$ für die erhöhte Überschneidung und

$\Delta SPL_{Fokus} \approx 3,8\ dB$ für die Vervierfachung der Grundblockanzahl.

Die Wirkung der beiden variierten Einstellungen ist auf die gleiche statistische Ursache zurückzuführen: Die Güte der Schätzung für das Leistungsdichtespektrum wächst mit der Anzahl der Blöcke, die in die Welch-Methode eingehen. Für die Überschneidung von 0% gehen nur 8 Grundblöcke in die weitere Berechnung mit der Welch-Methode ein. Hingegen wird durch eine 50%-ige Überschneidung die Blockanzahl mit 15 Blöcken (8 Grundblöcke + 5 Blöcke durch die Überschneidung) fast verdoppelt. Werden 32 Grundblöcke mit einer 50% Überschneidung eingesetzt, wird die Blockanzahl mit insgesamt 63 Blöcken fast verachtfacht.

Die detaillierte Darstellung des Einflusses der Blockanzahl B auf den $\overline{SPL}_{W,F}$ ist in Abb. 3 dargestellt. Abgetragen ist die Differenz zwischen dem $\overline{SPL}_{W,F}$, berechnet mit verschiedener Blockanzahl, und dem $\overline{SPL}_{W,F}$ für die Blockanzahl $B = 63$. Die abgetragene Blockanzahl ist bereits die Blockanzahl, die in die Welch-Methode eingeht, also die Grundblockanzahl zuzüglich der Blöcke auf Grund einer 50%-igen Überschneidung.

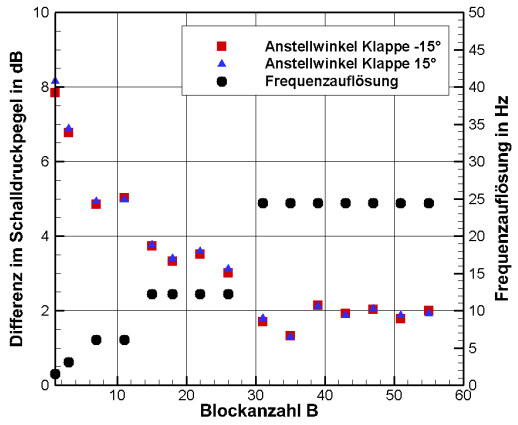

Abbildung 3: Differenz im Schalldruckpegel für verschiedene Blockanzahlen, 50% Überschneidung

Für die Differenz des $\overline{SPL}_{W,F}$ liegt über den ganzen variierten Blockanzahlbereich ein asymptotischer Verlauf vor. Dieser ist jedoch nicht streng asymptotisch. Bis zur Blockanzahl $B = 30$ fällt die Differenz streng monoton auf $\Delta SPL_{Fokus} \approx 2$ dB. Im Bereich zwischen $30 < B < 60$ schwankt die Differenz um einen konstant Wert von 2 dB.

Im ersten Bereich wirkt sich vermutlich die Güteerhöhung des Schätzers durch eine Erhöhung der Blockanzahl aus. Im zweiten Bereich kommt es vermutlich zu einer Kompensation der Güteerhöhung durch die Verringerung der Frequenzauflösung in der Spektralschätzung. Dieser Kompensationseffekt könnte noch zusätzlich durch die Terzbandbetrachtung verstärkt werden. Die verringerte Frequenzauflösung führt dazu, dass immer weniger Stützstellen der FFT in dem betrachteten Terzband liegen.

Schlussfolgerungen

Die Welch-Methode ist ein gängiges Verfahren zur Schätzung des Leistungsdichtespektrums im Rahmen der Schallquellenlokalisierung mittels Beamforming-Algorithmen. Die Anwendung der Welch-Methode erfordert aber erhöhte Sorgfalt, da sich die Einstellungen signifikant auf die Qualität der Schallquellenlokalisierung auswirken. Ein wichtiger Faktor ist dabei die Anzahl der in der Welch-Methode berücksichtigen Signalblöcke, wodurch ein Zielkonflikt zwischen Güte der Schätzung und Frequenzauflösung entsteht. Eine optimale Blockanzahl ist abhängig vom Anwendungsfall und kann beispielsweise durch die in dieser Arbeit exemplarisch durchgeführten Parameterstudie bestimmt werden. Aus dieser Studie wird für den betrachteten Anwendungsfall die optimale Einstellung von 18 Grundblöcke mit einer 50%-igen Überschneidung (insgesamt 35 Blöcke) bestimmt. Diese Einstellung wird für weitere zukünftige Untersuchungen im Rahmen des Projekts angewendet.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes Smart Blades durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) unter dem Förderkennzeichen 0325601A/B/C/D auf Beschluss des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literatur

[1] D. H. Johnson; D. E. Dudgeon. *Array signal processing: concepts and techniques.* Simon & Schuster, 1992.

[2] K.D. Kammeyer; K. Kroschel. *Digitale Signalverarbeitung.* Springer Vieweg, 2012.

[3] M. Möser. *Messtechnik der Akustik.* Springer, Berlin and Heidelberg, 2010.

[4] M. R. Fink; R. H. Schlinke. Airframe noise component interaction studies. *Journal of Aircraft*, 1980.

[5] C. R. Brand; J. R. Seume. Flaps for wind turbine applications: First results of the experimental investigations. *Wind Turbine Sound 2014 - EWEA Technology Workshop, Malmö, Schweden*, 2014.

[6] P. Welch. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, pages 70–73, 1967.