

Numerische Untersuchung von Vorder- und Hinterkantenlärm eines Profils in turbulenter Anströmung

Jonas Illg¹, Ingrid Neunaber², Thorsten Lutz¹, Ewald Krämer¹

¹ Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 21, 70569 Stuttgart,

Email: jonas.illg@uni-stuttgart.de

² Institut für Physik, Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg

Einleitung

Abhängig vom Standort einer Windenergieanlage und den Anströmbedingungen dominiert entweder Hinterkantenlärm oder durch Anströmturbulenz induzierter Vorderkantenlärm [1]. Hinterkantenlärm entsteht durch Grenzschichtturbulenz, die auch ohne turbulente Anströmung vorhanden, jedoch nicht unabhängig von dieser ist. Messungen in einem akustischen Windkanal, begleitet von numerischen Simulationen mit hybriden RANS/LES-Methoden, sollen der Gewinnung neuer Erkenntnisse über das Verhältnis beider Mechanismen bei definierten turbulenten Anströmbedingungen dienen. Die vom vermessenen Profil generierten Emissionen müssen für aussagekräftige Ergebnisse deutlich über dem Hintergrundlärm des Windkanals liegen. Dies konnte durch ein gezielt entworfenes Profil erreicht werden, welches hohe Emissionen von sowohl Vorder- als auch Hinterkantenlärm erzeugt. Da die Profilstromung parallel zu den Windkanalversuchen auch mittels hybriden RANS/LES-Verfahren simuliert wird, wurde Wert auf die Vermeidung von Ablösungen gelegt. Die interne Instrumentierung besteht aus Mikrofonen und Kulite-Drucksensoren und wurde vorab anhand von Simulationsergebnissen definiert. Zur akustischen Auswertung der Simulationen wird ein Ffowcs Williams-Hawkings-Löser verwendet, der mittels geeigneter Wahl von Hüllflächen eine räumlich getrennte Identifizierung der Schallquellen ermöglicht.

Profilentwurf

Der Entwurf eines speziellen Profils erfolgte iterativ über die Vorgabe einer Ziel-Druckverteilung mit der inversen Design-Routine von XFOIL [1]. Dabei wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Möglichst hoher Pegel von Hinterkantenlärm,
- Möglichst hoher Pegel von Vorderkantenlärm,
- Vermeidung von Ablösungen,
- Ausreichend Bauraum für interne Instrumentierung,
- Auslegungs-Reynoldszahl von 1.000.000,
- Turbulator bei 5% Profiltiefe.

Zur Beurteilung der Hinterkantenlärm-Emissionen wurde Rnoise (s. Abschnitt Akustische Analyse) sowie Ergebnisse experimenteller Untersuchungen [2] verwendet. Ein

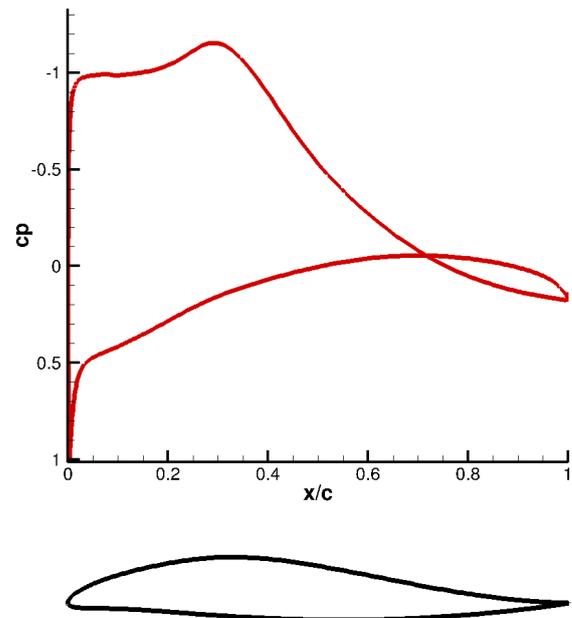


Abbildung 1: Kontur und Druckverteilung des entworfenen Profils aus RANS-Simulation (Reynolds-averaged Navier Stokes) bei 5° Anstellwinkel.

starker Hauptdruckanstieg sorgt für die Entwicklung eines hohen Turbulenzgrades in der Grenzschicht, während ein S-Schlag zu einer dünnen Grenzschicht an der Hinterkante führt (s. Abb. 1). Ersteres führt zu einem hohen Hinterkantenlärmpegel, letzteres hebt die Peak-Frequenz an und erhöht den Pegel weiter. Ein empirisches Modell nach Moriarty et al. [3] wurde zur Beurteilung der Vorderkantenlärm-Emissionen herangezogen. In dieses Modell gehen die relativen Profildicken bei 1% und 10% relativer Profiltiefe ein. Der Vorderkantenradius des Profils wurde entsprechend dieses Modells gering gewählt, jedoch groß genug um eine starke Saugspitze mit der Gefahr einer Vorderkantenablösung im relevanten Anstellwinkelbereich zu vermeiden. Ein beidseitiger Turbulator (Zackenband) wird verwendet, um laminare Ablöseblasen als Lärmquelle auszuschließen und reproduzierbare Bedingungen für die vollturbulent durchgeführte Simulation zu schaffen. Um den Einfluss des Turbulators auf die Turbulenzproduktion in der Grenzschicht möglichst gering zu halten, wurde die Höhe des Turbulators experimentell optimiert. Die Anforderungen an das Profil konnten erfüllt werden. Im Frequenzbereich zwischen HzHzHZ

liegt der Lärmpegel deutlich über dem Hintergrundlärm des Windkanals.

Strömungssimulation

Zur Strömungssimulation wird der ursprünglich vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) entwickelte kompressible, block-strukturierte Finite Volumen CFD-Löser FLOWer [6] verwendet. Der Löser wird hauptsächlich am IAG (Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart) weiterentwickelt. Eine der Weiterentwicklungen ist die Implementierung eines WENO-Schemas zur Berechnung der konvektiven Flüsse mit 5. Ordnung in Kombination mit einem HLLC-Riemannlöser [7]. Insbesondere zur effizienten aeroakustischen Simulation ist die im Vergleich zu niedrigerer Verfahrensordnung geringere Anzahl Gitterpunkte, die benötigt wird, um eine Wellenlänge aufzulösen, vorteilhaft. Da die Bandbreite der Längen- und Zeitskalen für eine direkte numerische Simulation oder eine wandaufgelöste LES (Large Eddy Simulation) mit den verfügbaren Ressourcen zu groß ist, wird ein hybrides RANS/LES Verfahren in Form der IDDES [10] mit SST-Turbulenzmodell verwendet. Insgesamt beträgt die Anzahl der Gitterzellen rund 50 Millionen.

Um Vergleichbarkeit zwischen Experiment und Simulation herzustellen, ist der gesamte Windkanal mit offener Messstrecke vernetzt. Die Windkanalwände, die gleichzeitig als Endscheiben für das Profil dienen, werden jedoch als reibungsfrei angenommen. Außerhalb des Bereichs von turbulenter Zuströmung und Profil wird als Dämpfungszone ein Verfahren 2. Ordnung (JST) mit erhöhter künstlicher Dissipation verwendet, um Reflexionen akustischer Wellen an den Fernfeldrandbedingungen zu vermeiden.

Die Anströmturbulenz wird im Windkanal mittels eines fraktalen Gitters (siehe Abb. 2) erzeugt. Um für die Simulation identische Anströmbedingungen zu erhalten, wird die Gitterströmung am Fraunhofer IWES simuliert [8]. Das instationäre Strömungsfeld wird in Form einer Ebene, die der Austrittsöffnung der Windkanaldüse entspricht, über eine Einströmrandbedingung eingespeist.

Akustische Analyse

Vorderkantenlärm

Zur Ermittlung der Vorderkantenlärm-Emissionen wird der am IAG entwickelte Ffowcs-Williams Hawkins (FW-H) Löser ACCO [5] verwendet. Dies stellt eine Trennung zwischen Strömungs- und Akustiksimulation mittels akustischer Analogie dar. Hierbei wird das instationäre Strömungsfeld auf einer Integrationsfläche ausgewertet und daraus die akustischen Quellterme berechnet. Die Integrationsfläche liegt in diesem Fall direkt auf der Profloberfläche. Voraussetzung ist, dass sich die Beobachterposition im Fernfeld befindet, was hier erfüllt ist. Da das Profil von turbulenter Strömung umgeben ist (s. Abb. 3), muss zwischen hydrodynamischen und akustischen Druckschwankungen unterschieden werden.

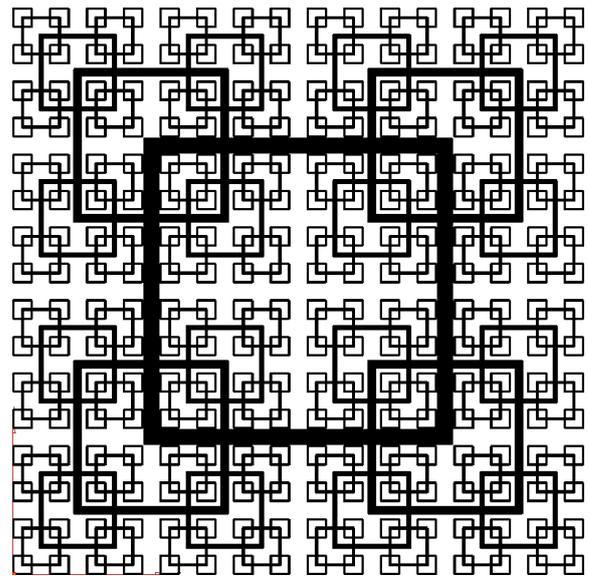


Abbildung 2: Fraktales Gitter zur Generierung der Anströmturbulenz.

Durch die Verwendung einer akustischen Analogie ist diese Trennung gegeben. Ein weiterer Vorteil des FW-H-Verfahrens ist, dass durch geeignete Wahl der Integrationsflächen Quellen in bestimmten Zonen von einander getrennt betrachtet werden können.

Hinterkantenlärm

Die Längenskalen der Grenzschichtturbulenz, die Hinterkantenlärm verursacht, sind deutlich kleiner als die der Anströmturbulenz und können mit dem verwendeten RANS/LES-Verfahren nicht vollständig aufgelöst werden. Ein großer Anteil der Grenzschichtturbulenz wird durch das verwendete Turbulenzmodell modelliert. Zur Auswertung des Hinterkantenlärms wird daher das am IAG entwickelte semi-empirische Verfahren Rnoise [4] verwendet, das auf dem TNO-Blake-Modell [9] basiert. Eingangsparemeter sind das mittlere Geschwindigkeitsprofil der Grenzschicht sowie die Parameter der modellierten Turbulenz in unmittelbarer Nähe der Hinterkante. Der von der Strömungssimulation aufgelöste Teil der Grenzschichtturbulenz wird berücksichtigt, indem die aufgelöste turbulente kinetische Energie zur modellierten addiert wird. Zusätzlich wird die Annahme getroffen, dass die Dissipationsrate im Bereich der aufgelösten Wellenzahlen vernachlässigbar klein ist.

Ergebnisse

Vorderkantenlärm

In Abb. 4 ist das Spektrum des Vorderkantenlärms für drei Bereiche in Profiltiefenrichtung (2,5%, 20% und 100% Profiltiefe) aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass ein Großteil der Lärmemissionen auf den vorderen 20% der Profiltiefe entsteht und nicht ausschließlich direkt an der Vorderkante. Alle Spektren zeigen Breitbandcharakter. Da die Simulationszeit begrenzt ist, sind die Spektren je-

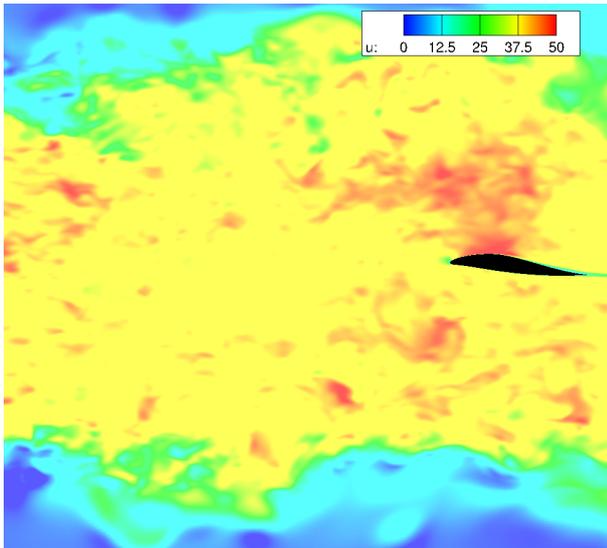


Abbildung 3: Profil im turbulenten Strömungsfeld, axiale Strömungsgeschwindigkeit in m/s.

doch nicht glatt. Die Peaks, die im Bereich von 4 kHz auftreten, können in der Messung nicht beobachtet werden. Die Ursache dieses Phänomens konnte bisher nicht geklärt werden.

Hinterkantenlärm

In Abb. 5 sind die Ergebnisse der Hinterkantenlärm-Auswertung in Form von Fernfeld- und Wanddruckspektren dargestellt. Zum Vergleich dienen Spektren bei gleicher mittlerer Anströmgeschwindigkeit ohne Anströmerturbulenz. Wird nur der durch das Turbulenzmodell modellierte Anteil der Grenzschichtturbulenz berücksichtigt, liegen die Amplituden unterhalb der Vergleichskurve. Unter Berücksichtigung des aufgelösten Anteil liegen die Amplituden bei niedrigen Frequenzen deutlich höher, was dadurch erklärt werden kann, dass ein großer Anteil der großen turbulenten Längenskalen von der Strömungssimulation aufgelöst wird, während kleinere Längenskalen überwiegend modelliert werden. Dies ist auch aus dem Spektrum der aufgelösten Wanddruckfluktuationen ersichtlich.

Durch die Anströmerturbulenz wird die Peak-Frequenz des Hinterkantenlärms bei erhöhtem Pegel zu tieferen Frequenzen verschoben, was durch die dickere Grenzschicht mit höherem Turbulenzgrad im Fall mit turbulenter Anströmung erklärt werden kann.

Zusammenfassung

Zur experimentellen und numerischen Untersuchung von Vorder- und Hinterkantenlärm eines Profils in turbulenter Anströmung wurde ein spezielles Profil entworfen, welches Pegel von Vorder- und Hinterkantenlärm erzeugt, die deutlich über dem Hinterkantenlärm des Windkanals liegen. Die Strömungssimulation erfolgte mittels einem Verfahren hoher Ordnung unter Verwendung eines hybriden RANS/LES-Verfahrens. Die Vorderkantenlärm-Emissionen wurden für mehrere Berei-

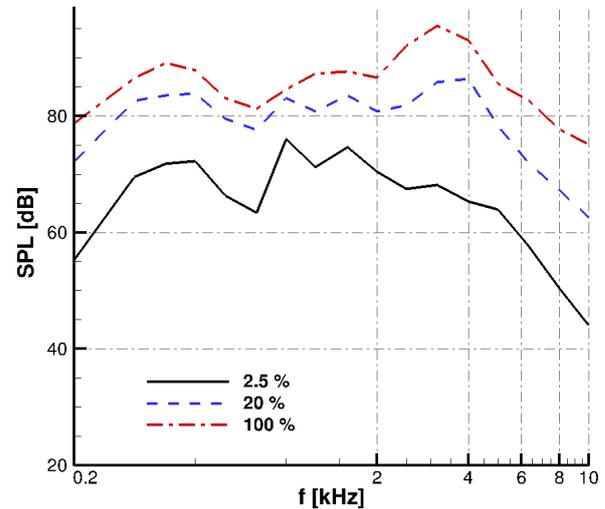


Abbildung 4: Terzspektren des simulierten Vorderkantenlärms in 1 m Abstand über der Vorderkante. Der Anteil der Emissionen, der in den vordersten 2,5% bzw. 20% des Profils entsteht ist getrennt aufgetragen.

che in Profiltiefenrichtung getrennt mit einem Ffowcs-Williams Hawkins-Verfahren ausgewertet. Vorderkantenlärm wird nicht nur unmittelbar an der Vorderkante, sondern zum größten Teil auf den vordersten 20% des Profils emittiert. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss von Anströmerturbulenz auf den Hinterkantenlärm mit einem semi-empirischen Modell zur Hinterkantenlärm-Berechnung erfasst werden kann. Anströmerturbulenz erhöht den Hinterkantenlärm-Pegel und verringert dessen Peak-Frequenz.

Danksagungen

Die Autoren danken dem DLR für das zur Verfügung stellen des CFD-Lösers FLOWer, dem HLRS (Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart) für die Rechenkapazität, dem Fraunhofer IWES für die Simulation des fraktalen Gitters sowie der Universität Oldenburg für die Durchführung der Messungen.

Literatur

- [1] Drela, M. und Giles, M. B.: Viscous-inviscid analysis of transonic and low Reynolds number airfoils. AIAA journal 25, 10 (1987), 1347–1355
- [2] Herrig, A., Würz, W. und Wagner, S.: Silent Rotors by Acoustical Optimization (SIROCCO), EU project SIROCCO, Deliverable D9, Tech. Report (2003), Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart
- [3] Moriarty, P., Guidati, G. und Migliore, P.: Prediction of turbulent inflow and trailing-edge noise for wind turbines. 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2005), Monterey, CA
- [4] Kamruzzaman, M., Lutz, Th., Herrig, A. und Krämer, E.: Semi-Empirical Modeling of Turbulent

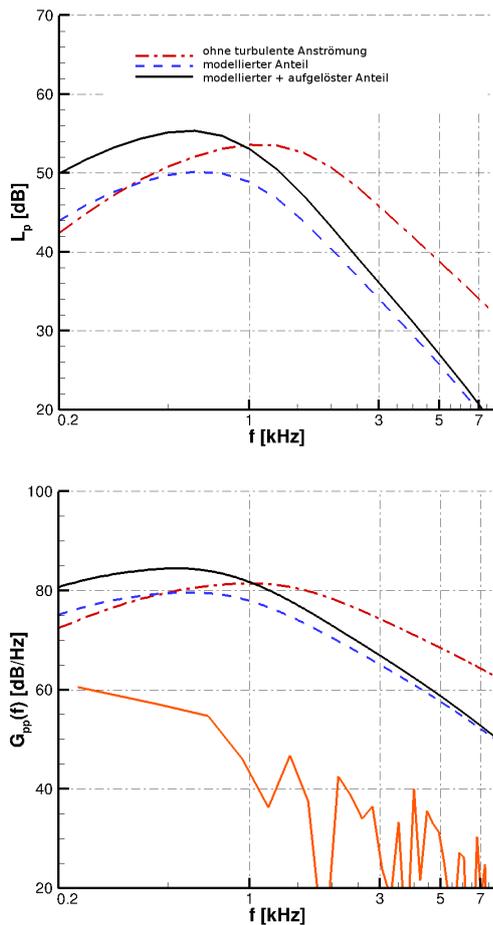


Abbildung 5: Terzspektren des Hinterkantenlärms in 1 m Abstand über der Hinterkante (oben) und Schmalbandspektren der Oberflächendruckfluktuationen (unten), jeweils ohne turbulente Anströmung, mit turbulenter Anströmung mit/ohne Berücksichtigung des aufgelösten Anteils der Grenzschichtturbulenz. Zusätzlich sind die aufgelösten Wanddruckfluktuationen (orangene Linie) aufgetragen.

Anisotropy for Airfoil Self-Noise Predictions. AIAA journal 50 (2012)

- [5] Keßler, M. und Wagner, S.: Source-time dominant aeroacoustics. Computers & fluids 33 (2004), Seiten 791-800
- [6] Kroll, N., Rossow, C. C., Schwamborn, D., Becker, K. und Heller, G.: MEGAFLOW — a numerical flow simulation tool for transport aircraft design. Proceedings ICAS Congress (2002)
- [7] Kowarsch, U., Keßler, M. und Krämer, E.: High Order CFD-Simulation of the Rotor-Fuselage Interaktion. 39th European Rotorcraft Forum (2013), Moskau
- [8] Mihoubi, C., Rinn, P. und Stoevesandt, B.: Higher-order statistical analysis of DDES simulation. iTi 2014 - Conference on Turbulence (2014), Bertinoro, Italien
- [9] Parchen, R.: Report DRAW, a prediction scheme for trailing-edge noise based on detailed boundary-layer characteristics. HAG-RPT-980023 (1998), TNO Institute of Applied Physics

- [10] Shur, M., Spalart, P., Strelets, M. und Travin, A.: hybrid RANS-LES model with delayed DES and wall-modeled LES capabilities. Int. J. Heat Fluid Flow, 29 (2008), Seiten 1638-1649
- [11] Wagner, S., Bareiß, R. und Guidati, G.: Wind turbine noise. Springer Berlin, Heidelberg, 1996