Untersuchung der Schallabstrahlung von der Hinterkante eines Windkraftanlagen Profils mit VLES und Wandmodellierung

Dirk Heitmann[1], Roland Ewert[1]

[1] *Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Technische Akustik, 38108 Braunschweig, Deutschland, Email: dirk.heitmann@dlr.de*

Motivation

In der Literatur finden sich verschiedene Verfahren zur Abschätzung der Schallabstrahlung durch turbulente Strömungen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Rechenaufwandes und dem Maß an zugrundeliegender Modellierung. Empirische Methoden zeichnen sich durch geringen Rechenaufwand aus, sind aber auf solche Fälle beschränkt, die denen, für die sie kalibriert wurden, ähneln. Die Genauigkeit bei abweichenden Geometrien ist häufig unbekannt. Bei der direkten numerischen Simulation dagegen wird keine Modellierung verwandt und die Methode ist universell für alle Geometrien anwendbar. Der Rechenaufwand ist allerdings derart hoch, dass dieses Verfahren für technische relevante Fälle im Allgemeinen nicht anwendbar ist. Bei der Large Eddy Simulation (LES), siehe z.B. [1], wird durch die Modellierung der kleinsten Skalen der Rechenaufwand reduziert. Dabei werden die großen, Energie-tragenden Wirbel direkt aufgelöst und nur die kleinen Wirbel modelliert. Der Rechenaufwand wird dadurch deutlich reduziert.

Unsere Arbeiten zielen auf eine Effizienzsteigerung von solchen Large Eddy Simulationen ab. In der Vergangenheit, siehe z.B. [2, 3], wurde ein aktives Backscatter Verfahren als alternatives Subgittermodels vorgestellt, welches die Verwendung gröberer Gitter ermöglicht. In der aktuellen Arbeit wird nun ein Wandmodell vorgestellt, welches in Wandnähe gröbere Gitter ermöglichen soll. Gerade hier sind üblicherweise kleine Zellen erforderlich, die den Rechenaufwand erheblich steigern. Eine solche Wandmodellierung stellt natürlich einen erheblichen Eingriff in die von der Simulation aufgelöste Physik dar. Als Testfall wurde das DU 96 Profil gewählt, welches auch im BANC III Kategorie 1 Workshop untersucht wurde. Somit stehen umfangreiche numerische und experimentelle Vergleichsdaten zur Verfügung (siehe z.B. [4]), die eine Validierung des Wandmodells ermöglichen sollen.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Wandmodelle aus der Literatur gegeben und die hier angewandte Implementierung vorgestellt. Anschließend wird der Testfall und einige ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

Wandmodellierung

In der Literatur findet sich eine Vielzahl verschiedener Wandmodelle für LES Anwendungen (WMLES). Eine lesenswerte Übersicht ist in [5] gegeben. Dort werden die Modelle in zwei Klassen eingeteilt: (i) hybride RANS/LES Methoden und (ii) Wandschubspannungsmodelle. Bei den hybriden Verfahren reicht das LES Rechengebiet nicht bis zur Wand, sondern nur bis zu einer Schicht mit gewissem Wandabstand. Der Bereich von der Wand bis zu dieser Schicht wird mit RANS gerechnet. Bei der Klasse (ii) dagegen reicht das LES Gebiet bis zur Wand. An oder nahe der Wand erfolgen z.B. in Form einer modifizierten Wandrandbedingung Korrekturen, welche die Wandschubspannung korrigieren.

In der hier vorliegenden Arbeit erfolgt die LES in NLDE-Formulierung, d.h. in der LES werden Schwankungsgrößen berechnet. Die mittlere Strömung wird in einem vorhergehenden Schritt mit RANS berechnet und in die LES eingelesen. Durch diesen Ansatz ist eine Wandmodellierung nach (i) bereits inherent enthalten. Dies wird im Folgenden als implizite Wandmodellierung bezeichnet. Bei der angestrebten Gittervergröberung sind allerdings zusätzliche Maßnahmen in Form einer modifizierten Randbedingung und einer modifizerten Hintergrundströmung nötig. Dadurch wird ein Wandmodell entsprechend Kategorie (ii) realisiert.

Das hier implementierte explizite Wandmodell korrigiert die Wandschubspannung. Dabei wird der LES bei definiertem Wandabstand die Geschwindikeit entnommen. Basierend auf dieser Geschwindigkeit wird mittels des Wandgesetzes die Wandschubspannung berechnet und als Randbedingung an der Wand gesetzt. Dies erfolgt mittels einer zusätzlichen turbulenten Viskosität. Ferner wird an der Wand die Haftbedingung aufgehoben. Stattdessen wird eine slip-Bedingung gesetzt, durch welche die Gradienten an den ersten off-wall Punkten korrigiert werden. Ein solches Vorgehen wurde in der Literatur bereits vorgestellt, siehe z.B. [6].

Diese Modellierung bzw. der Eingriff in wandnahe Turbulenz stellen natürlich einen Eingriff in die Simulation dar. Bei Strömungen, bei denen Schall durch wandnahe Turbulenz entsteht, stellt sich durchaus die Frage, inwieweit der Schall mit einer WMLES korrekt vorhergesagt werden kann. Larsson et al. [5] schreiben hierzu, dass Schallvorhersagen nur unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz vertrauenswürdig sind, die sich aus der Schichtdicke der Wandmodellierung ergibt. Andererseits wurden beispielsweise in [7, 8] sehr sinnvolle Schallvorhersagen mit WMLES-Methoden getroffen.

Testfall

Als Testfall wurde das DU96-W-180 Profil gewählt, welches in Abb. 1 dargestellt ist. Dieses Profil wurde auch im Benchmark for Airframe Noise Computations (BANC) Workshop genutzt, sodass umfangreiche numerische und experimentelle Vergleichsdaten vorliegen, siehe [4]. Das Profil hat eine Sehnenlänge von $L_{\mathrm{ref}} = 0,3\,\mathrm{m}$ und wird bei einem Anstellwinkel von 4° mit 60 m/s angeströmt. Dies entspricht einer Machzahl von 0,173 und einer Reynoldszahl von $1,13 \times 10^6$.

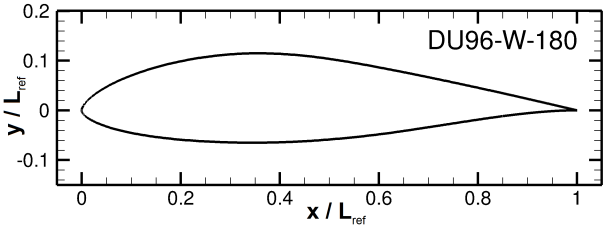


Abbildung 1: Geometrie des Testfalls: Das DU96 Profil.

Für die Simulationen wurden die DLR-Codes TAU, PIANO und FRPM verwendet, siehe [9, 10, 11]. Das mittlere Strömungsfeld sowie die Turbulenzstatistiken (kω-Modell) wurden mit dem TAU-Code in einer 2D-Rechnung mit ca. 435.000 Punkten bestimmt.

Dieses mittlere Strömungsfeld wurde in PIANO eingelesen, wo die LES der Schwankungsgrößen 4.-ter Ordnung genau durchgeführt wurde. Das mit PIANO laufzeitgekoppelte FRPM Modul rekonstruiert, basierend auf den TAU-Turbulenzstatistiken, die Backscatter-Schwankungen im Bereich der Hinterkante. Informationen zu diesem Backscatter-Modell sind in [2, 3] gegeben.

Das LES Rechengebiet beschränkt sich auf ±3 Profillängen um das Profil, vgl. Abb. 2. Die spannweitige Erstreckung beträgt in der Simulation $10\%\,L_{\mathrm{ref}}$. Dieser Bereich wurde mit etwa 60 Mio. Punkten vollstrukturiert vernetzt. Das Gitter löst akustische Wellen bis zu Frequenzen von ca. 30 kHz auf. An der Hinterkante ist das Gitter deutlich verfeinert, siehe Abb. 3. So beträgt der dimensionslose Wandabstand y^+ bei $X/L_{\mathrm{ref}} = 0,9$ ca. 15. In der Mitte des Profils ($X/L_{\mathrm{ref}} = 0,5$) ist dagegen $y^+ \approx 150$.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird auf ausgewählte Ergebnisse der skalenauflösenden Simulationen eingegangen. Zum Vergleich wird zunächst auf die Simulationen ohne explizite Wandmodellierung eingegangen. Durch den NLDE Ansatz, bei dem in der LES lediglich die Fluktuationen auf einer RANS Hintergrundströmung berechnet werden, liegt auch in diesem Fall eine implizite Wandmodellierung vor. Anschließend werden die Effekte der expliziten Wandmodellierung behandelt.

Die Abbildung 4 zeigt die Druckverteilung am Profil entsprechend RANS und LES (implizite Wandmodellierung). Für die LES Kurve wurden die instationären

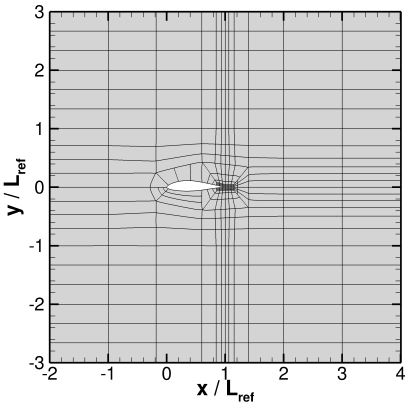


Abbildung 2: Abmessungen des Rechengebietes und Blocktopologie.

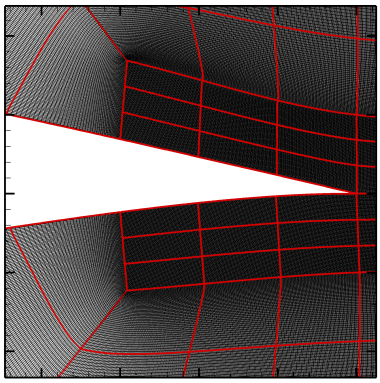


Abbildung 3: Gitter im Bereich der Hinterkante.

Wanddruckfluktuationen über einen Zeitraum von 20 ms gemittelt und zur RANS-Lösung addiert. Im Bereich der Hinterkante sind geringe Abweichungen zwischen RANS und LES erkennbar. Dies ist erklärbar durch die Verwendung unterschiedlicher numerischer Methoden mit Verfahren unterschiedlicher Ordnungen und die Verwendung verschiedener Rechengitter. Im Falle der LES war das Rechengitter zudem sehr grob, vgl. Abschnitt Testfall. Aus diesen Gründen enthält die LES neben den Schwankungen zudem konstante Anteile und konvergiert so zu einer geringfügig anderen Lösung für die mittlere Strömung. Die Abweichungen sind jedoch gering. Die Abweichungen werden deutlicher erkennbar bei den in Abb. 5 gezeigten Grenzschichten für Saug- und Druckseite bei $X/L_{\mathrm{ref}} = 0,9$. In beiden Fällen werden die Grenzschichten in der LES etwas dünner vorhergesagt als in der RANS. In beiden Fällen beträgt die Abweichung etwa 3 mm.

Die Abb. 6 zeigt das Schallfeld in Form der Divergenz der Geschwindigkeitsfluktuationen. Der Dipolcharakter und der Ursprung des Schalls an der Hinterkante sind sehr gut erkennbar. Der Schall wird erzeugt von die Hinterkante überströmenden turbulenten Strukturen. Diese Strukturen finden sich hauptsächlich auf der Saugseite und sie sind in der Abbildung in Form des Q-Kriteriums angedeutet.

Im BANC Workshop (Ref. [4]) wurden Terzspektren

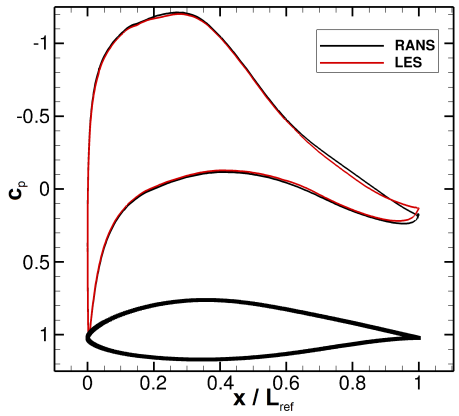
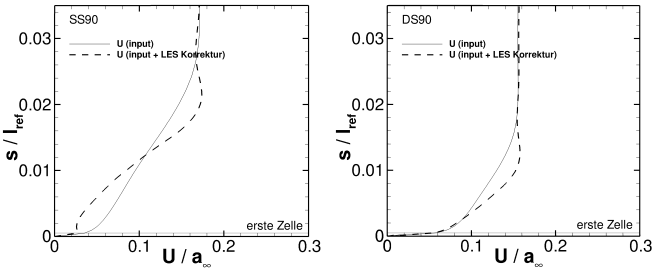


Abbildung 4: Druckverteilung am DU 96-Profil nach RANS und mit offset durch die LES.



(a) Saugseite (b) Druckseite

Abbildung 5: Grenzschichtverläufe entsprechend RANS und LES ($x/L_{\mathrm{ref}} = 0.9$).

der verschiedenen Teilnehmer 1 m unterhalb der Hinterkante verglichen. Die Abb. 7 wurde dieser Quelle entnommen und die Ergebnisse der LES wurden eingefügt. Gezeigt werden einerseits Windkanaldaten versehen mit Fehlerbalken und andererseits numerische Vorhersagen verschiedener Workshop Teilnehmer. Alle Teilnehmer trafen mit ihren Vorhersagen die Messergebnisse relativ gut und auch die hier gezeigten LES Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit den Messungen überein. Das Maximum des Spektrums bei ca. 1 kHz ist zu etwas höheren Frequenzen verschoben, so dass es im Bereich 1-2 kHz geringe Abweichungen gibt. Diese geringe Verschiebung zu höheren Frequenzen ist konsistent zu den Grenzschichten, deren Dicke etwas unterschätzt wurde.

Bei der bisher gezeigten LES wurde die Hintergrundströmung direkt einer RANS entnommen. Im Folgenden werden Ergebnisse gezeigt, bei denen durch Modifikation der Hintergrundströmung ein explizites Wandmodell realisiert wurde. Dies erfolgte zum einen durch Vorgabe einer zusätzlichen turbulenten Viskosität und zum anderen durch die Einführung einer slip-Bedingung an der Wand. Die Abb. 8 zeigt exemplarisch diese slip-Bedingung an der Position $x/L_{\mathrm{ref}} = 0.5$ auf der Saugseite. Gezeigt wird die RANS Vorhersage der Grenzschicht, die Diskretisierung auf dem groben LES Gitter (input der zuvor gezeigten Simulation) und eine gestrichelte Kurve, bei der die Gradienten der ersten off-

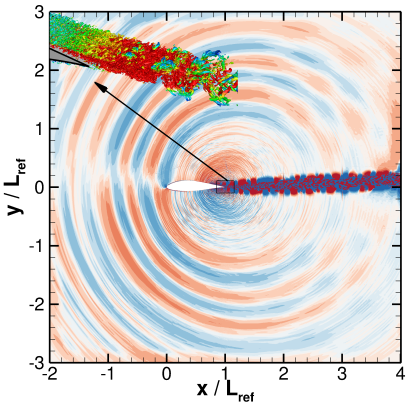


Abbildung 6: Schallfeld in Form der Dilatation.

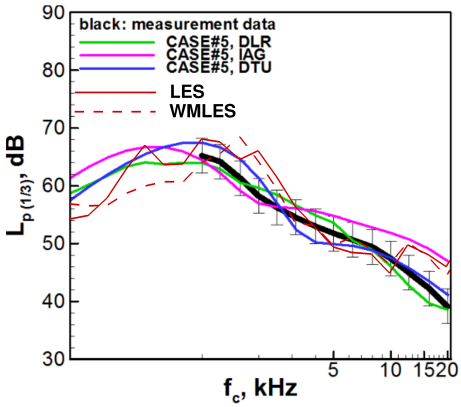


Abbildung 7: Terzspektren 1 m unterhalb der Hinterkante als Ergebnis des BANC Workshops. Die Abbildung wurde [4] entnommen und die eigenen Kurven wurde eingefügt.

wall Punkte durch Vorgabe einer Wandgeschwindigkeit korrigiert sind. Bei dem groben Gitter ($y^+ \approx 150$ in diesem Bereich) ergibt sich eine signifikante slip-Geschwindigkeit an der Wand von $U/a_\infty = 0.15$.

Das mit dieser WMLES ermittelte Schallfeld ist nahezu identisch zu dem LES Ergebnis in Abb. 6 und wird daher nicht gezeigt. In der Abb. 7 ist auch eine Kurve für die WMLES an der BANC Mikrofonposition gegeben. Die LES und WMLES Spektren sind nahezu identisch. Tatsächlich setzt bei der WMLES Kurve der Abfall bei ca. 2 kHz etwas früher ein und passt somit besser zu den Messungen in Abb. 7. Der Unterschied ist allerdings marginal.

Insgesamt ist die Übereinstimmung der LES und auch der WMLES zu den BANC Daten sehr gut. Dies scheint der hier verwendeten Gitterauflösung geschuldet zu sein, die derart grob war, dass die „Korrektur“ der mittleren Strömung in der LES sehr gering waren. Eben diese „Korrekturen“ sollte das Wandmodell kompensieren.

Um dies zu testen wurden Simulationen mit feinerer Auflösung durchgeführt. Die Abbildung 9 zeigt als Beispiel die Grenzschichten der Saugseite bei $x/L_{\mathrm{ref}} = 0.5$ entsprechend LES auf groben ($y^+ = 150$) und feinem

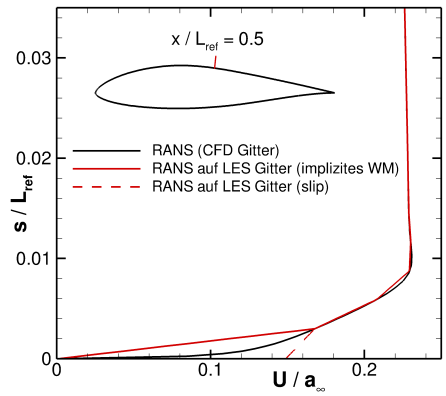


Abbildung 8: Beispiel für die slip-Bedingung im Rahmen der Wandmodellierung.

($y^+ = 25$) Gitter. Während die Grenzschichtdicke bei der groben LES dem RANS Ergebnis entspricht wird sie auf dem feinerem Gitter deutlich dünner vorhergesagt. Es ist anzunehmen, dass in diesem Fall das Wandmodell die Grenzschicht entsprechend korrigieren würde. Ein entsprechendes Verhalten konnte in Simulationen an ähnlichen Profilen gezeigt werden. Für das hier betrachtete Profil liegen diese Simulationen allerdings noch nicht vor.

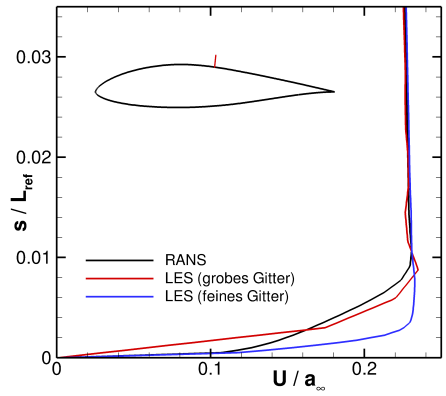


Abbildung 9: Grenzschichten entsprechend RANS und LES mit unterschiedlichen Gitterfeinheiten ($y^+ = 150$ und $y^+ = 25$).

Zusammenfassung

In den Piano Solver wurde ein Wandmodell zur Verwendung bei skalenauflösenden Simulationen auf groben Gittern implementiert. Als Testfall für diese Erweiterung wurde das DU96 Profil (BANC Testfall) gewählt und Simulationen mit und ohne explizite Wandmodellierung durchgeführt. Für beide Simulationen war die Übereinstimmung zu den BANC Ergebnissen aus der Literatur sehr gut. Dies heißt aber auch, dass der Effekt des Wandmodells sehr gering war.

Die aktuelle Hypothese ist, dass dieser geringe Effekt von der hier vorliegenden sehr geringen Gitterauflösung ($y^+ = 150$) verursacht wird. Untersuchungen an anderen Geometrien deuten an, dass Gitterauflösungen mit $y^+ = 30 \cdots 50$ für sinnvolle Anwendungen der Wandmodellierung nötig sind. Diese Untersuchungen werden zurzeit durchgeführt.

Literatur

[1] Garnier, E.; Adams, N.; Sagaut, P.: *Large Eddy Simulation for Compressible Flows*, Springer, 2009.

[2] Heitmann, D.H.; Ewert, R.: *Numerische Untersuchung der Vorflügel-Schallabstrahlung mit Hilfe eines aktiven Backscatter Modells in VLES*, DAGA 2019, 18.-21. März 2019.

[3] Heitmann, D.H.; Ewert, R.: *Charakterisierung eines aktiven Backscatter Modells in VLES anhand der Vorflügel-Schallabstrahlung bei einem 3-Element-Hochauftriebsflügel*, DAGA 2020, 16-19 März 2020.

[4] Herr, M.; Ewert, R.; Rautmann, C.; Kamruzzaman, M.; Bekiropoulos, D.; Arina, R.; Iob, A.; Batten, P.; Chakravarthy, S.; Bertagnolio, F.: *Broadband Trailing-Edge Noise Predictions - Overview of BANC-III Results*, AIAA 2015-2847, 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 22-26 June 2015.

[5] Larsson, Johan and Kawai, Soshi and Bodart, Julien and Bermejo-Moreno, Ivan: *Large eddy simulation with modeled wall-stress: recent progress and future directions*, Mechanical Engineering Reviews, 3 (1). pp. 15-00418. ISSN 2187-9753, 2016.

[6] Bose, S. T.; Moin, P.: *A dynamic slip boundary condition for wall-modeled large-eddy simulation*, Phys. Fluids 26, 015104, 2014.

[7] Joseph George, K.; Lele, S.K.: *Wall Modeled Large Eddy Simulation of Airfoil Trailing Edge Noise*, AIAA 2014-3304, 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 16-20 June 2014.

[8] Joseph George, K.; Lele, S.K.: *Large Eddy Simulation of Airfoil Self-Noise at High Reynolds Number*, AIAA 2016-2919, 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 30 May - 1 June, 2016.

[9] *TAU-code User Guide*, Tech. rep., Institute of Aerodynamics and Flow Technology, German Aerospace Center, Release April 2017.

[10] Delfs, J.W.; Bauer, M.; Ewert, R.; Grogger, H.A.; Lummer, M.; Lauke, T.: *Numerical simulation of aerodynamic noise with DLRs aeroacoustic code Piano*, Manual of Piano version 5.2, Tech. rep., Institute of Aerodynamics and Flow Technology, German Aerospace Center, Release Jan. 2008.

[11] Ewert, R.: *RPM - the fast Random Particle Mesh method to realize unsteady turbulent sound sources and velocity fields for CAA applications*, AIAA-2007-3506, 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Rome, Italy, 2007.