Strömungstechnik

Farhan Manegar

Aero-acoustic noise reduction measures for wind turbine blade sections - a comparative numerical and experimental study

SHAKER
VERLAG

Aero-acoustic noise reduction measures for wind turbine blade sections - a comparative numerical and experimental study

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M.Sc. Farhan Manegar

geb. am 27.05.1989 in Chennai, Indien

eingereicht bei der

Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität Siegen

Siegen 2020

Betreuer und erster Gutachter
Prof. Dr.-Ing. M.Sc. Thomas Carolus
Universität Siegen

Zweiter Gutachter
Prof. Dr. Marlène Sanjosé
École de technologie supérieure, Montreal, Kanada

Tag der mündlichen Prüfung
08.10.2020

Berichte aus der Strömungstechnik

Farhan Manegar

Aero-acoustic noise reduction measures for wind turbine blade sections - a comparative numerical and experimental study

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2020

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7864-0
ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Für den Schall von Windkraftanlagen sind verschiedene Mechanismen verantwortlich. Der wichtigste Mechanismus für den aerodynamisch erzeugten Schall ist die Interaktion zwischen der turbulenten Grenzschicht auf der Blattoberfläche im Bereich der Hinterkante und der Hinterkante des Blattes. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist daher die Untersuchung und Bewertung von drei verschiedenen Maßnahmen zur Minderung des Hinterkantenschalls an einem unverwundenen Tragflügelelement: a) Ausblasen von Sekundärluft nahe der Hinterkante auf der Saugseite, b) Hinzufügen von Hinterkantenzacken sowie c) eine poröse Ausführung des Flügelbereichs nahe der Hinterkante. Primäres Untersuchungswerkzeug ist das numerische Lattice-BOLTZMANN-Verfahren. Die Ergebnisse werden aber so weit wie möglich durch gemessene Stromfeld- und Akustikdaten validiert. Für die Fälle ‚Hinterkantenausblasen' und ‚Hinterkantenzacken' werden Strömungs- und vor allem Geometrieparameter aus experimentellen und numerischen Vorstudien gewählt, die nahezu optimal sein dürften. Für die poröse Ausführung des Flügelbereichs nahe der Hinterkante wird hingegen eine erste Konfiguration untersucht, die noch nicht notwendig optimal ist.

Alle drei Maßnahmen zur Schallreduzierung zeigen einen ähnlichen Effekt: Im Vergleich zum unbehandelten Tragflügelelement weist das Fernfeldschalldruckspektrum geringere Pegel im niedrigen bis mittleren, aber immer eine Pegelzunahme im höheren Frequenzbereich auf. Im Falle des Hinterkantenausblasens ist aus den numerisch erzeugten Daten erkennbar, dass der Ausblasstrahl die größeren turbulenten Strukturen in der turbulenten Grenzschicht von der unmittelbaren Hinterkante wegbläst und dabei schallreduzierend wirkt. Dazu wurden aus dem numerisch berechneten Stromfeld u.a. LAGRANGE'SCHE kohärente Strukturen extrahiert. Eine neue dünnere Grenzschicht, die hinter dem Ausblasschlitz entsteht, induziert an der Hinterkante eine KÁRMÁNSCHE Wirbelstraße, die die Schallerhöhung bei höherer Frequenz erklärt. Hinterkantenzacken lassen dagegen die Grenzschicht stromaufwärts von der Hinterkante unberührt. Sie sind akustisch dann besonders effektiv, wenn sich kohärente Strukturen entlang der oberen und unteren Kante der Zacken gut mischen. Der Wirkmechanismus der porösen Hinterkante ist völlig anders. Verantwortlich für den numerisch und experimentell beobachtete Schallreduktion ist der Druckausgleich (die ‚Kommunikation') zwischen der Saug- und Druckseite im porösen Bereich des Tragflügelelements. Die Amplitude der strömungsinduzierten Druckfluktuationen ist sogar größer als beim unbehandelten Flügelelement, und die Korrelationslänge der turbulenten Strukturen in Spannweitenrichtung bleibt gleich. Die Simulation zeigte allerdings nicht die experimentell beobachte Schallzunahme im höheren Frequenzbereich - der Druckverlust im porösen Material wurde mit dem HAZEN-DUPUIT-DARCY-Gesetz modelliert, die Rauhigkeit der Oberflächen jedoch nicht berücksichtigt.

Abstract

The noise emitted by wind turbines are caused due to different mechanisms. The dominant mechanism behind the aerodynamic noise emitted is the interaction between the turbulent boundary layer developing over the blade surface near the trailing edge and the trailing edge itself. The overall objective of this thesis is to investigate and assess three different trailing edge noise reduction measures on an undistorted airfoil section: a) trailing edge blowing (TEB) on the suction side using secondary air unit, b) attachment of trailing edge serrations (TES) and c) porous trailing edge (PTE). The main investigation tool used is the numerical Lattice BOLTZMANN method. The simulation results are extensively validated with numerous experimentally measured flow-field and acoustic results. The flow parameters and mainly the geometrical design parameters of TEB and TES are driven towards their close-to-optimal using experimental and numerical results from pre-studies. For the PTE configuration, unlike the other two measures, a first but not necessarily optimal configuration is investigated.

The three noise reduction measures show a similar effect: In comparison to the untreated airfoil, the far-field noise spectrum shows noise reduction in the low to mid frequency range, but also an increase in noise at higher frequencies. On numerical analysis of TEB, it is revealed that the blowing jet blows away the larger turbulent structures in the turbulent boundary layer, thereby reducing the noise. As an additional analysis, the LAGRANGIAN coherent structures are extracted from the flow-field. A resulting smaller boundary layer, which develops after the blowing slot, induces KÁRMÁN type vortex shedding, which explains the increase of high frequency noise. In TES, on the contrary, the boundary layer upstream of the trailing edge remains unaffected. TES are acoustically very effective, when the coherent structures along the top and bottom edges of TES mix well with each other. The noise reduction mechanism of PTE is completely different. The noise reduction observed in the simulation and experiment is attributed to the flow-field communication between the suction and pressure sides of the porous regions of the airfoil. The amplitude of the flow induced surface pressure fluctuations is even larger compared to the untreated airfoil, and the span-wise correlation length of pressure fluctuations close to the trailing edge remains unchanged. The simulations, however, do not show the noise increase in the high frequency range – as the pressure drop within the porous region are modeled using the HAZEN-DUPUIT-DARCY law, where the surface roughness is not considered.

Acknowledgement

First and foremost, I would like to thank God Almighty for providing all his blessings. The first time I walked into the Institut für Fluid- und Thermodynamik group was six years ago, as a student wanting to do his third semester thesis (Studienarbeit). I am deeply thankful and grateful to the enormous support and motivation provided by my Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Thomas Carolus. If not for his enthusiasm and dedication to strengthen this chair, none of this would have been possible. I would then like to thank Dr.-Ing. Tao Zhu, who nurtured my work ethics and constantly supported me during my Master program. I am proud to have worked for him as a student assistant and fondly looking forward to work with him in SIEG-ENIA-AUBI KG.

Christine Krause and Bernd Homrighausen, are not just the secretary and lab engineer in Prof. Carolus' chair, they are the backbone of the whole work environment. Their mental and emotional support has made me come through every difficulty I faced in Germany. I would like to thank my senior colleagues, namely, Dr.-Ing. M. Sturm, Dr.-Ing. K. Bamberger, Dr.-Ing. T. Gerhard and Dr.-Ing. C. Moisel, who taught me some valuable lessons based on their experience. My colleagues at the coffee table: Nicholas, Caro, Kevin, Leonard and Kathrin, with whom I got to socialize and exchange so many ideas during my entire stay here, are the best colleagues I could ever wish for.

I thank Marlène Sanjosé for her umpteen ideas and encouragements. Mr. Ernst Bender from manufacturing workshop was pivotal in the experiments conducted at DLR-AWB, my heartfelt thanks to him. Part of this work was supported by the Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy) of Germany within the project RENEW (FKZ 0325838B). The author greatly appreciates all support and assistance, especially by Dr. R. Binois from Senvion GmbH who monitored RENEW.

I acknowledge gratefully Dassault Systemes Deutschland GmbH for providing the licenses and technical assistance to carry out the LBM simulations. I also thank the TU Delft group for hosting me as visiting researcher in 2018/19 for eight weeks, where special thanks goes to Prof. C. Damiano, supervisors F. Avallone and D. Ragni and the close working opportunity with the PhD candidate C. Teruna.

Finally, my family, starting from my mom Shahida, dad Ashraf, sister Shaistha and nephew Abyaan, the warmth they have been providing me my entire life is beyond words to explain. Hannes and Conny are not just my in-laws, I see them as my parent figures in Germany, who care so much for my well-being. The most special and gratitude filled thanks goes to my one and only beloved partner Kathi, without her in my life, neither would I have got Lina-Sofía, nor the stability to achieve all this.

To my parents,
Shahida and Ashraf,
and to my life partner,
Kathi,
and our daughter,
Lina-Sofía

Contents