

Davide Trabucchi

Lidar measurements and engineering modelling of wind turbine wakes

LIDAR MEASUREMENTS AND ENGINEERING MODELLING OF WIND TURBINE WAKES

Davide Trabucchi

Von der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
zur Erlangung des Grades und Titels eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

DR.-ING.

angenommene Dissertation

von Herrn Davide Trabucchi
geboren in Sondalo, Italien

Gutachter : Prof. Dr. Martin Kühn
Zweitgutachterin : Prof. Dr. Laura Lukassen
Tag der Disputation : 27. August 2019

Abstract

Wind turbines extract energy from the wind. Consequently, wakes with lower wind speed and higher turbulence than in the upstream flow propagate downstream. For this reason, in a wind farm, different energy budgets are generally available to downstream turbines even under steady and homogeneous inflow conditions.

Several models with different orders of detail can estimate the wind deficit in the wake. Engineering wake models – i.e. models implementing simplified equations to describe the fluid mechanics of the wind flow at a low computational cost – are applied in the initial planning phase of a wind farm to predict its annual energy yield. Common simplifications are for instance the assumption of axisymmetric wakes and the possibility to assess the wakes of single turbines independently in a first step and then to combine arithmetically their wind speed deficits.

The main objective of this thesis is to suggest an alternative engineering model to solve the flow equations considering all turbines at once. This research was supported by full-field measurements realised with scanning lidars (remote sensing instruments based on infra-red laser) for the calibration and verification of the model. For this reason, the first part of the thesis is dedicated to lidar experiments for the assessment of wakes and the second one to the novel engineering model.

Lidars can scan the wind speed in a range from tens of metres to ten or more kilometres. However, they have two major limitations: (i) They measure only the projection of the wind vector on the radial direction of the laser beam; hence, wind field reconstruction models are needed to estimate the local wind vector. (ii) They average the wind projection over long (from tens to hundreds of metres) and thin (in the order of ten centimetres) volumes along the radial direction.

In this respect, the first part of the thesis is dedicated to answering the question: How to overcome the limitations of lidar technology when being applied to wake measurements?

A lidar simulator was applied to test several experimental layouts, on the one hand for measurements of the average wind speed profile in wakes and, on the other hand, to study the dynamic path of a single wake (wake meandering). The results indicate that the accuracy of the measurement is sensitive to the experimental configuration (lidar position, scanning trajectory and wind field reconstruction method). In the test cases analysed, the faster trajectories with the lower misalignment with respect to the average flow direction provided better results.

The experimental activities dealt first with wake meandering. Onshore and offshore lidar measurements demonstrate that the effects of wake meandering can be identified in lidar measurements

along a fixed radial direction. The spectral analysis of these measurements suggests that the increased low-frequency turbulent fluctuations at the flanks of the wake can be associated with wake meandering. This result was also confirmed by lidar simulations.

Another offshore campaign was conducted to measure the wake with a nacelle-based lidar. The main goal was to estimate the average wind speed profile in the wake. The measurements compare well with an analytical wake model; however, the results in terms of the initial wake width deviate from the theoretical expectations.

The second part of the thesis deals with the implementation of a three-dimensional shear-layer (3DSL) wake model which is based on the same assumptions as of other engineering wake models, but it is extended to simulate non-axisymmetric flows as the multiple wakes given by the mutual interaction of wind turbines and wakes in wind farms.

The development of the model is presented in two main steps. The first one provides the skeleton of the model with a rough approximation of pressure effects in the downstream induction range of the rotor. A comparison between multiple wakes simulated with the 3DSL model and extracted from large-eddy simulations (LES) highlights the advantages of the 3DSL model in relation to an axisymmetric wake model.

In the second step, a mixing-length model of the turbulent diffusion in the wake and a model for the streamwise pressure gradient within the rotor induction range are implemented into the 3DSL model. These two modules were calibrated and verified for single wakes by means of the aforementioned nacelle-based lidar measurements and LES. The comparison with multiple wakes extracted again from LES confirmed the results obtained with the first development. A detailed analysis of the wind field on selected wake cross-sections indicates that the deviations between the results of the LES and the 3DSL model are partly due to upstream initial conditions and to non-homogeneous convective turbulent structures present in the LES but not included in the 3DSL model.

In the end, the 3DSL model could be seen as a "patchwork wake model" which combines modules taken from other engineering models in order to reproduce in a simple way the complexity of the wind flow in wakes. In this regard, it makes sense to ask: How far is it possible to conveniently improve the physics of engineering wake models? A general answer to this question is suggested in the final remarks of the thesis.

Zusammenfassung

Windenergielagen entziehen dem Wind Energie. Daher breiten sich Nachläufe mit geringerer Windgeschwindigkeit und höherer Turbulenz stromabwärts aus. Aus diesem Grund steht Turbinen, die in Windschatten in einem Windpark operieren, generell ein niedrigerer Energiegehalt zur Verfügung, selbst unter stationären und homogenen Bedingungen. Mehrere Modelle mit unterschiedlichen Detailanforderungen können das Winddefizit im Nachlauf abschätzen. In der ersten Planungsphase von Windenergieprojekten werden Modelle zur Vorhersage des jährlichen Energieertrags zukünftiger Windparks angewendet, d. h. Modelle mit vereinfachten strömungsmechanischen Gleichungen, die die Strömung mit geringem Rechenaufwand beschreiben können.

Übliche Vereinfachungen sind beispielsweise die Annahme von achsensymmetrischen Nachläufen und die Möglichkeit, in einem ersten Schritt die Nachläufe einzelner Turbinen unabhängig voneinander zu bewerten und dann deren Winddefizite rechnerisch zu kombinieren.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, ein alternatives Modell vorzuschlagen, um die Strömungsgleichungen unter Berücksichtigung aller Turbinen zu lösen. Diese Forschungsarbeit wurde durch Messungen mit scannenden Lidar-Geräten (auf Laserstrahlen basierende Fernerkundungsmessinstrumente) unterstützt. Aus diesem Grund befasst sich der erste Teil dieser Arbeit mit Lidar-Experimenten zur Bewertung von Nachläufen und der zweite Teil mit den Nachlaufmodellen.

Lidar-Geräte können den Wind in einem Bereich von zehn Metern bis zu zehn oder mehr Kilometern erfassen. Sie haben jedoch zwei Hauptbeschränkungen: (i) Sie messen nur die Projektion des Windvektors auf der radialen Richtung des Laserstrahls; aus diesem Grund werden Windfeldmodelle benötigt, um den lokalen Windvektor abzuschätzen. (ii) Sie mitteln die Windprojektion über lange (von zehn bis Hunderten von Metern) und dünne (in der Größenordnung von zehn Zentimetern) Volumina entlang der radialen Richtung.

In diesem Zusammenhang widmet sich der erste Teil der vorliegenden Arbeit der Beantwortung der Frage: Wie kann mit den Einschränkungen von Lidar-Geräten umgegangen werden, die für Nachlaufströmungsmessungen verwendet werden? Die Antwort wird indirekt durch einige beispielhafte Anwendungen und einige Kommentare in der Schlussfolgerung am Ende der Arbeit gegeben.

Mit einem Lidar-Simulator wurden mehrere Versuchsanordnungen zur Messung des gemittelten Windprofils im Nachlauf und des dynamischen Verlaufs eines einzelnen Nachlaufs (Nachlauf-mäanderströmung) getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeit der Messung von der

experimentellen Konfiguration abhängt (Lidarposition, Abtasttrajektorien und Windfeldrekonstruktionsmethode). In den analysierten Testfällen lieferten die schnelleren Trajektorien mit der geringeren Fehlauseichung in Bezug auf die durchschnittliche Strömungsrichtung bessere Ergebnisse.

Die experimentellen Untersuchungen befassten sich zunächst mit der Nachlaufmäanderströmung. Onshore- und Offshore-Lidar-Messungen haben gezeigt, dass der dynamische Verlauf der Nachläufe in Lidar-Messungen identifiziert werden kann, die entlang einer festen radialen Strahlrichtung abgetastet wurden. Die Spektralanalyse der Messungen legt nahe, dass die erhöhten niederfrequenten turbulenten Fluktuationen an den Flanken des Nachlaufs teilweise auf das Mäandern zurückzuführen sind. Dieses Ergebnis wurde auch durch Lidar-Simulationen bestätigt.

Eine weitere Offshore-Kampagne wurde durchgeführt, um den Nachlauf mit einem gondelbasierten Lidar zu messen. Das Hauptziel war die Messung des mittleren Windprofils im Nachlauf. Im Allgemeinen lassen sich die gemessenen Profile gut mit einem analytischen Nachlaufmodell vergleichen. Die Ergebnisse in Bezug auf die anfängliche Nachlaufbreite weichen jedoch von den theoretischen Erwartungen ab.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der Implementierung eines dreidimensionalen Scherungsgrenzschicht-Nachlaufmodells (3DSL), das auf den gleichen Annahmen wie die anderen technischen Nachlaufmodelle basiert, jedoch erweitert wurde, um nicht-achsensymmetrische Strömungen zu simulieren, die durch die Wechselwirkung von Windenergieanlagen und Nachläufen in Windparks entstehen.

Die Entwicklung des Modells wird in zwei Schritten vorgestellt. Der erste liefert das Gerüst des Modells mit einer groben Näherung der Druckwirkungen im stromabwärts gelegenen Gebiete hinter dem Rotor. Ein Vergleich zwischen mehreren mit dem 3DSL-Modell simulierten und aus Large-Eddy-Simulationen (LES) extrahierten Nachläufen zeigt die Vorteile des 3DSL-Modells gegenüber einem axialsymmetrischen Nachlauf-Modell.

Im zweiten Schritt werden ein Mischungs-Längenmodell der turbulenten Nachlaufdiffusion und ein Modell für den Druckgradienten entlang der Strömung im Rotorinduktionsbereich vorgestellt. Diese beiden Module werden mit den oben genannten gondelbasierten Lidar-Messungen und LES anhand von Einzelnachläufen kalibriert und verifiziert. In einem Vergleich mit mehreren Nachläufen, die erneut aus LES extrahiert wurden, wurden die Ergebnisse des ersten Arbeitsschnitts bestätigt. Eine detaillierte Analyse des Windfeldes an ausgewählten Nachlaufquerschnitten zeigt, dass die Abweichungen zwischen LES- und 3DSL-Modellsimulation teilweise auf vorgelagerte Anfangsbedingungen und auf inhomogene konvektive turbulente Strukturen zurückzuführen sind, die in LES vorhanden, aber nicht im 3DSL-Modell enthalten sind.

Am Ende könnte das 3DSL-Modell als "Patchwork Wake-Modell" anzusehen sein, bei dem Module aus anderen technischen Modellen kombiniert werden, um die Komplexität des Windfeldes im Nachlauf auf einfache Weise zu reproduzieren. In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll zu fragen: Inwieweit ist es möglich, die physikalische Beschreibung von Nachlauf-Modellen zu verbessern? Eine allgemeine Antwort auf diese Frage wird in den Schlussbemerkungen am Ende der Arbeit gegeben.

Preface

During my years as a university student, I would have never thought to do academic research after my graduation. The decision of writing my master thesis at the Stiftungslehrstuhl Wind Energy at the University of Stuttgart gave me the opportunity to start my adventure in the wind energy research which brought me to pursue a PhD at Oldenburg University.

The main objective of this manuscript is the conclusion of my journey as a PhD candidate. Furthermore, it aims to disseminate the results of my research project. Some of them have been already published as papers, which are also included in the dissertation as stand-alone chapters. I tried to write also the other chapters in a stand-alone form to facilitate the consultation by readers not interested in the entire work. This means that sometimes there are repetitions through the chapters. Eventually, the dissertation has also a personal meaning: Collecting all the results and formatting them in the manuscript acted as self-acknowledgement of the achievements.

Completing a research project is never the work of a sole person. My results were only possible thanks to all the colleagues and friends at Forwind - Oldenburg University. In particular, I am grateful to Jörg Schneemann, Juan-José Trujillo and Stephan Voss for the close collaboration; to Björn Witha, Gerald Steinfeld and Lukas Vollmer for providing the wind fields based on large-eddy simulations; thanks also to David Bastine and Matthias Wächter for the enlightening discussion about turbulence. I also would like to thank all my co-authors and the many people who discussed with me intermediate results or reviewed my research results and manuscripts before their publication. I thank the students who helped with experimental campaigns, data analysis and investigation of alternative ideas too. For what concerns this manuscript, Elia Daniele, Jonas Schmit, Jörg-Hendrik Bach, Klaus Franke, Martin Dörenkämper and Simon Stokes receive my acknowledgement for their comments and suggestions.

I owe my supervisor, Prof. Martin Kühn, a debt of gratitude. Beyond acquiring the funds for this long-lasting research, he trusted my work, dedicated time to fruitful discussions, guided my intuitions and kept me focused.

Many thanks go also to Prof. Laura Lukassen who took part with enthusiasm to the examination of the PhD.

Part of this research was based on experimental measurements. Concerning the offshore campaigns, I would like to thank the former DEWI institute (now part of UL International) and the Fachhochschule Kiel for their friendly and uncomplicated support during the deployments in alpha ventus; for the same reason, I would like to acknowledge Niko Mittelmeier, who facilitated the

sharing of data by Senvion GmbH and provided the information needed to analyse those data. With respect to the measurement equipment – the scanning lidars – many thanks for the constructive collaboration go to the staff of DTU-Wind Energy and particularly to Nikola Vasiljevic who shared the struggle of working with prototypes.

The research reported in this dissertation was mainly funded by the projects GW-Wakes (grant no. 0325397A by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy) and CLUSTERDESIGN (project no. 283145; FP7 Energy). I acknowledge all project partners, specially the ones of the research initiative RAVE Offshore (Research at alpha ventus) and Senvion GmbH for providing access to part of the data analysed in the present study.

Last but not least, I would like to thank my great wife Marina for her patience and unconditional support during the last years.

Contents

Abstract	vii
Zusammenfassung	ix
Preface	xi
Nomenclature	xvii
List of figures	xxv
List of tables	xxvii
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 State of art	3
1.2.1 Wind turbine wakes	3
1.2.2 Wake models	5
1.2.3 Doppler wind lidar for wake measurements	7
1.3 Objectives and structure of the thesis	10
2 Lidar simulations for the design of wake measurement campaigns	13
2.1 Introduction	13
2.2 Wind speed and wake profiles from lidar measurements	14
2.2.1 Wind field reconstruction	14
2.2.2 Wake characterisation	17
2.3 LIdar SCanner SIMulator (LiXim)	18
2.4 Lidar simulations of wake measurements	20
2.4.1 Wind field: unsteady wake simulations	21

2.4.2	Measuring the average vertical profile of the wind speed in the wake of a wind turbine	21
2.4.3	Dynamic tracking of the wake centre position	25
2.5	Summary	31
3	Application of staring lidars to study the dynamics of wind turbine wakes	33
3.1	Introduction	35
3.2	Experimental realization	36
3.3	Wake identification	38
3.4	Wake identification	39
3.5	Wake dynamics	40
3.6	Conclusions	41
3.7	List of symbols	42
3.8	Acknowledgements	42
3.9	References	42
4	Study of wake meandering by means of fixed point lidar measurements: Spectral analysis of line of sight wind component	43
4.1	Introduction	45
4.2	Influence of the lidar beam inclination	46
4.3	Application of fixed point lidar measurements to the study of the wake meandering	47
4.4	Offshore lidar measurements of the wake meandering	48
4.5	Conclusion	52
4.6	Acknowledgements	53
4.7	References	53
5	Nacelle-based lidar measurements for the calibration of a wake model at different offshore operating conditions	55
5.1	Introduction	57
5.2	Measurements	58
5.3	Measurements	60
5.4	Wake model description and fit	61
5.5	Results and discussion	62
5.6	Conclusions	66
5.7	Aknowledgements	67
5.8	References	67

6	3-D shear-layer model for the simulation of multiple wind turbine wakes: Description and first assessment	69
6.1	Introduction	71
6.2	Model description	72
6.3	Wake simulations	76
6.4	Results	77
6.5	Discussion	83
6.6	Conclusions	83
6.7	Appendix A	85
6.8	Acknowledgements	88
6.9	References	88
7	3-D shear-layer model for the simulation of multiple wind turbine wakes: Further development, calibration and assessment	89
7.1	Introduction	89
7.1.1	Basic formulation of the 3DSL model	89
7.1.2	Objectives	90
7.2	Model of the streamwise pressure gradient	91
7.3	Numerical implementation	93
7.4	Calibration of the turbulence length scale in a single wake	96
7.4.1	Profiles of the wind deficit in the wake from nacelle-based lidar measurements	96
7.4.2	Turbulence length scale of a single wake	97
7.5	Parameter assessment for the pressure gradient model	99
7.6	Evaluation of the 3DSL model: Simulation of multiple wakes	101
7.7	Summary and discussion of the results	103
8	Conclusion	109
8.1	Summary and final remarks	109
8.2	Outlook	111
	References	113
	Publications	121
	List of peer-reviewed publications on which this thesis is based	121
	Further peer-reviewed publications	122
	Conferences and colloquia	122
	Curriculum vitae	125
	Declaration of authorship	127