

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung



Jannik Schottler

Experimental Investigation of Wind Farm Effects using Model Wind Turbines

Experimental Investigation of Wind Farm Effects using Model Wind Turbines

Jannik Schottler

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

DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN
DR. RER. NAT.

angenommene Dissertation

von Herrn Jannik Schottler
geboren am 12.05.1989 in Bad Segeberg



Gutachter: Prof. Dr. Joachim Peinke
Zweitgutachter: Prof. Dr. Raúl Bayoán Cal
Tag der Abgabe: 12.01.2018
Tag der Disputation: 21.03.2018

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Jannik Schottler

**Experimental Investigation of Wind Farm Effects
using Model Wind Turbines**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Oldenburg, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6027-0

ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

„Experience, the best teacher“

— Keith Edward Elam a.k.a. Guru
Above the Clouds, 1998

Contents

Abstract / Zusammenfassung	1
Preface	5
1 Introduction	9
2 Wind energy systems	11
2.1 Energy conversion	11
2.2 Control principles	13
2.3 Wind turbine wakes	14
3 Model wind turbine	19
3.1 Introduction	19
3.2 Turbine design	20
3.3 Load control	21
3.4 Characterization	23
3.5 Improvements and outlook	25
4 This thesis	29
4.1 Motivation for wind tunnel experiments	29
4.2 Summary and context of papers	30
4.3 Outlook and recommendations	31
 PAPER 1: <i>On the impact of non-Gaussian wind statistics on wind turbines - an experimental approach</i>	 35
1 Introduction	37
2 Atmospheric flows	38
3 Methods	41
3.1 Experimental setup	41
3.1.1 Wind tunnel and active grid	41
3.1.2 Model wind turbine	42
3.2 Data preprocessing	44
3.3 Choice of scales	45

4 Results	45
4.1 Inflow	45
4.2 Turbine reaction	47
5 Discussion	48
6 Conclusion	50
Appendices	51
PAPER 2:	
<i>Wind tunnel experiments on wind turbine wakes in yaw: Redefining the wake width</i>	57
1 Introduction	59
2 Method	61
2.1 Experimental methods	61
2.2 Wake center detection	63
2.3 Examined quantities	64
3 Results	65
3.1 The non-yawed wakes	65
3.2 Wakes during yaw-misalignment	70
4 Discussion	73
5 Conclusions	75
Appendices	76
PAPER 3:	
<i>Wind tunnel tests on controllable model wind turbines in yaw</i>	83
1 Introduction	85
2 Model wind turbines	86
2.1 Pitching Mechanism	86
2.2 Load Control	87
3 Experimental Setup	89
4 Results	90
5 Discussion	91
6 Conclusion and Future Work	92

PAPER 4:

Brief Communications: On the influence of vertical wind shear on the combined power output of two model wind turbines in yaw

95

1 Introduction

97

2 Methods

98

3 Results

98

4 Discussion and conclusion

99

A Software

105

A.1 Hierarchy 105

A.2 Data acquisition 105

A.3 State machine architecture & application 111

B Blade specifications

119

C Technical drawings

123

Acknowledgements / Danksagung

125

Curriculum

127

Erklärung

129

List of publications

131

Abstract

Wind farms are complex systems, entailing challenges for scientists and engineers: The turbines are subjected to atmospheric turbulence throughout their life time, whereas the interactions of turbulent wind conditions with the rotors are yet to be fully understood and need investigation. Next, the individual turbines in a wind farm arrangement interact through their wakes, which feature an increased turbulence level and a decreased mean wind velocity. The former is connected to loads and therewith to a turbine's life time, while the latter is directly linked to the energy yield. Thus, the so-called *wake effects* become a very important aspect in wind energy research. In recent years, concepts of active wake control strategies have been discussed throughout the research community, whereas a lateral wake deflection by intentional yaw misalignment gained great attention. In order to successfully apply this concept to future wind farms, a detailed understanding of wind turbine wakes, the effect of yaw misalignment and the impact on downstream turbines is needed. This work aims to contribute to the mentioned discussions by wind tunnel experiments using controllable model wind turbines, which were conducted in three different wind tunnels in Oldenburg, Germany and Trondheim, Norway. Therefore, two model turbines were developed and characterized, including control strategies. In a first experiment, an active grid was used to create two different inflow conditions, being nearly equal regarding mean wind velocities and turbulence intensities, but strongly different regarding two-point statistics. More precisely, one flow showed Gaussian distributed velocity increments, the other one strongly non-Gaussian, heavy-tailed increment probability density functions (PDFs). The impact on the model wind turbine was investigated. Thrust, torque and power data were analyzed, showing that the model turbine does not smooth out intermittency. Intermittent inflow is converted to similarly intermittent turbine data on all scales considered, reaching down to sub-rotor scales in space. Next, full-plane wake measurements were performed using Laser-Doppler-Anemometry (LDA) and two significantly different model wind turbines, isolating turbine specific effects. It was found that areas of intermittent flows surround the velocity deficit of a wake. Besides being deflected laterally, a wake's shape is deformed to a curled „kidney“ shape during yaw misalignment, whereas a vertical momentum transport could be observed that is dependent on the direction of yaw misalignment and rotor rotation. Ultimately, the effect of yaw misalignment on the power output of a two-turbine array was investigated. Firstly, the total power could be increased by yawing the upstream turbine. Additionally, it was shown that the downstream turbine's power and the total power of the array are both asymmetric with respect to the upstream turbine's angle of yaw misalignment. The reasons for this asymmetry were further investigated and could be linked to the vertical shear in the inflow, that interacts with the rotating wake.

Zusammenfassung

Windparks sind komplexe Systeme, die diverse Herausforderungen für Wissenschaftler und Ingenieure mit sich bringen: Windenergieanlagen sind während ihrer gesamten Lebenszeit atmosphärischer Turbulenz ausgesetzt, wobei die Interaktionen turbulenter Windfelder mit den Rotoren noch nicht gänzlich verstanden sind. Die individuellen Anlagen in einem Windpark interagieren durch deren Nachlaufströmungen, die sich durch erhöhte Turbulenz und eine verminderte mittlere Strömungsgeschwindigkeit auszeichnen. Ersteres beeinflusst die Lasten und somit die Lebensdauer einer Windenergieanlage, letzteres ist direkt mit dem Leistungsertrag verknüpft. Somit sind die sogenannten *Windparkeffekte* aktuell enorm wichtige Aspekte der Windenergieforschung. In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Ansätze zur aktiven Beeinflussung von Nachlaufströmungen in der Forschungsgemeinde verfolgt, wobei eine horizontale Ablenkung der Nachlaufströmung durch eine gezielte Gier-Fehlstellung des Rotors ein vielversprechendes Konzept darstellt. Um den Ansatz in zukünftigen Windparks erfolgreich umsetzen zu können, ist zunächst ein detailliertes Verständnis der Nachlaufströmungen, der Effekte einer Gier-Fehlstellung und die Auswirkungen auf im Nachlauf operierende Anlagen notwendig. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zu den beschriebenen Fragestellungen durch Windkanalexperimente mit regelbaren Modell-Windenergieanlagen zu leisten, die in drei verschiedenen Windkanälen in Oldenburg und Trondheim durchgeführt wurden. Hierzu wurden zwei Modell-Windenergieanlagen entwickelt, charakterisiert und Regelstrategien wurden entwickelt.

In einem ersten Experiment wurden zwei verschiedene Strömungen mittels eines aktiven Gitters erzeugt, mit nahezu identischen Mittelwerten und Turbulenzintensitäten der Windgeschwindigkeit, zugleich jedoch stark unterschiedlicher Zweipunktstatistiken. Eine Strömung wies eine Gauß'sche Verteilung von Geschwindigkeitsinkrementen auf, während die andere deutlich nicht-Gauß'sche, intermittente Inkrementenverteilungen zeigte. Der jeweilige Einfluss auf eine Modell-Windenergieanlage wurde untersucht, wobei Schub-, Drehmoment- und Leistungsdaten analysiert wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die Modellturbine die Intermittenzen nicht glättet oder filtert. Intermittente Einströmungen werden zu ähnlich intermittenten Anlagendaten konvertiert, und zwar auf allen untersuchten Skalen, bis hin zu räumlichen Skalen kleiner als der Rotordurchmesser. Als nächstes wurden Querschnitte von Nachlaufströmungen mittels Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) hinter zweier grundsätzlich verschiedenen Modell-Windenergieanlagen vermessen, wodurch anlagenspezifische Effekte isoliert wurden. Es wurde gezeigt, dass ein ringförmiger Bereich stark intermittenter Strömung das Geschwindigkeitsdefizit einer Nachlaufströmung umgibt. Zusätzlich zur lateralen Ablenkung wird eine Nachlaufströmung bei Gier-Fehlstellung zu einer Bohnen- bzw. Nierenform verformt. Außerdem wurde ein vertikaler Momentumtransport festgestellt, der von der Rotationsrichtung des Rotors sowie der Richtung der Gier-Fehlstellung abhängt. Letztlich wurde der Einfluss einer Gier-Fehlstellung auf die Leistungsausbeute einer Konfiguration bestehend aus zwei Anlagenmodellen untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Gesamtleistung durch Gieren gesteigert werden konnte. Des Weiteren ist die Leistung der im Nachlauf betriebenen Anlage, sowie die Gesamtleistung beider Anlagen asymmetrisch bezüglich des Gierwinkels des vorderen Rotors. Die Gründe hierfür wurden untersucht, wobei eine starke Abhängigkeit der Asymmetrie vom vertikalen Gradienten in der Einströmung gefunden wurde, der mit der rotierenden Nachlaufströmung interagiert.

Preface

This thesis consists of two parts. The first part introduces the general topic, introducing the basic concepts of wind energy, allowing the reader to follow this thesis. Within the scope of this work, two model wind turbines were developed along with the respective software for data acquisition and turbine control. Chapter 3 describes the technical aspects as well as the characterization of a single turbine. Chapter 4 motivates wind tunnel experiments, summarizes the papers this thesis consists of and puts them in context of the broader topic. Additionally, an outlook on future work and follow up questions is given.

The second part consists of the four papers presenting the scientific content of this thesis. Details about the software and further technical aspects are presented in the appendix.