

Diss. ETH No. 20660

**Full-Scale Wind Turbine Flow Field  
Measurements Using an Instrumented  
Uninhabited Aerial Vehicle**

A dissertation submitted to

**ETH ZURICH**

for the degree of

**DOCTOR OF SCIENCES**

presented by

**GÜLRU KOÇER**

MSc in Aerospace Engineering,  
Middle East Technical University, Ankara, Turkey

born 22 December 1980

citizen of Republic of Turkey

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Reza S. Abhari

Dr. Ndaona Chokani

Prof. Dr. Spyros Voutsinas

2012

# ABSTRACT

There is a rapid increase worldwide in wind energy development. The rapid increase in wind energy development requires taking actions in terms of improving wind turbine technology and maximizing annual energy yield of wind farms. The characteristics of the wake downstream of a wind turbine have an important bearing both on the annual energy yield of a wind farm and on the operation & maintenance costs of the wind turbines within the wind farm. In relation to the former, the annual energy yield, it is well known that the wind speed is reduced in the wake downstream of a wind turbine; the subsequent evolution of the wake is influenced by the topography, and detailed knowledge of this evolution in complex terrain is presently lacking. In regards to the latter, operation & maintenance costs, the wake is characterized by three-dimensionalities & unsteadiness that impact the loads & associated lifecycle of wind turbines. Both of the above factors, the annual energy yield and the operation & maintenance costs, determine the economic viability of a wind farm. Over the last 25 years, measurements in the wake of operational full-scale wind turbines have been reported. But none of these studies have provided detailed information regarding the flow field around full-scale wind turbines. The techniques that have been used so far are lacking in terms of spatial coverage and spatial resolution that are necessary to resolve the wake structure behind a wind turbine. In this thesis, an innovative approach that is comprised of an uninhabited aerial vehicle instrumented with a fast response aerodynamic probe has been developed to provide high-resolution measurements of the flowfield around full-scale wind turbines. The key enabler for this novel measurement approach is the integration of fast response aerodynamic probe technology with miniaturized hardware & software for UAVs that enable autonomous UAV operation. The first-ever measurements of the wake of a full-scale wind turbine using an instrumented uninhabited aerial vehicle are conducted. These high-resolution measurements detail the wake of a full-scale wind turbine that is located in complex terrain. It has been shown in this thesis that the instrumented UAV is capable of providing 3D high-resolution measurements of full-scale wind turbine's wake; hitherto such detailed measurements were not possible.

The measurement system is comprised of an instrumented UAV and a ground control station. The UAV is equipped with a seven-sensor fast response aerodynamic probe; this probe technology has been under development at ETH Zurich for over 20 years, and allows the measurement of the wind velocity with respect to the UAV. The hardware & software of the open-source autopilot system Paparazzi are used to provide measurement of the UAV's velocity with respect to the Earth; furthermore, Paparazzi is adapted for the planning & execution of autonomous UAV flights within the wind turbine's wake. The vector sum of the UAV's velocity and the wind velocity with respect to the UAV yield the wind vector with respect to the Earth. In order to maximize the density of measurement

data, optimized flight trajectories of the UAV are determined based on measurements of the UAV's aerodynamics. The complete UAV was tested in the large low-speed wind tunnel at ETH Zurich. Consequently an aerodynamic model of the UAV is generated. Additionally, the results of the wind tunnel tests indicate that the effects of lift-induced upwash are negligible. Application of the Guide to Extended Uncertainty in Measurements yields a standard uncertainty of 0.7 m/s in the measured wind speed with a confidence level of 67%. The UAV measurements are compared with measurements with the circl flights method, wind tunnel measurements of a sub-scale wind turbine and LIDAR profiler measurements. For all these cases, the UAV measurements are in good agreement in terms of measured wind speed. Discrepancies observed between the horizontal speed profiles measured with LIDAR profiler. One potential reason for the discrepancies is indicated as uniform flow assumption made to retrieve horizontal speeds from LIDAR profiler measurements. Hence, UAV measurements can be used to correct the LIDAR profiler measurements.

Downwind of the wind turbine, profiles of the wind speed show that there is strong three-dimensional shear in the near-wake flow. Along the centreline of the wake, the deficit in wind speed results from the wakes of the rotor, nacelle and tower. By comparison the profiles away from the centreline, show only the effects of the rotor wake. Away from the centreline, where the wake of the nacelle is absent but the effect of the rotor wake is present, the deficit in wind speed shows little variation with stream wise direction and is approximately constant  $\approx 25\%$  over the whole measurement distance,  $0.5 < x/D < 3$ . However, along the centreline, the deficit is  $\approx 65\%$  near to the rotor,  $0.5D - 1.75D$ , and only decreases to  $\approx 25\%$  downstream of  $2.5D$ . In order to better understand the wake aerodynamics of the full-scale wind turbines, the flowfield measured by the instrumented UAV is mapped on measurement planes from  $x/D=1$  up to  $x/D=3$ . Mapping is done in the post processing of the raw data by applying interpolation. 3D volumetric data are analyzed thoroughly to understand the evolution of the wake along stream wise direction and variation of the flow quantities across the wake. Strong non-uniformities in the near wake are observed close to the rotor. The non-uniformities are due to the existence of tower and nacelle shadowing effect close to the wind turbine. The recovery of the velocity deficit further downstream of the wind turbine is clearly seen. Further more, a strong upward motion of the flow is observed. It has been shown that the mass flow rate passing through the lower part of the rotor is higher than in the upper part due to non-uniform work extraction. This mismatch in mass flow rates leads to the upward motion of the flow from the lower volume of the wake towards the upper volume of the wake, which results in the high pitch angles. Additionally, it is shown that there is generally good agreement in the measured evolutions of the wakes at the two sites. Thus, it may also be surmised that the detailed wake structure is representative of the wake of a full-scale turbine.

This confirms the utility of this novel measurement approach using an instrumented UAV.

The wake measurements taken with the instrumented UAV are used to assess the wake model recently developed in Laboratory for Energy Conversion, ETH Zurich. A good agreement between the ETH Wake Model and UAV measurements are observed with some discrepancies due to tower wake, thermal stratification and ground effect. The wake model validated with UAV measurements can be useful in various wind application for wind turbine control to energy yield calculations of the wind farms.

In summary, an innovative approach that is comprised of a UAV instrumented with a fast response aerodynamic probe has been developed to provide high-resolution measurements of the flow field around full-scale wind turbines. The innovative approach is superior to the existing measurement methods in terms of horizontal spatial coverage and resolution. The first-ever measurements of the wake of a full-scale wind turbine using an instrumented UAV are conducted. These high-resolution measurements detail the wake of a full-scale wind turbine that is located in complex terrain. The measurements are being used to validate the advanced wind simulation tool, which is under development in Laboratory for Energy Conversion, at ETH Zurich. The measurements are also used to assess the wake model recently developed in Laboratory for Energy Conversion, ETH Zurich. The wake model validated with UAV measurements can be useful in various wind applications from wind turbine control to energy yield calculations of the wind farms.

# ZUSAMMENFASSUNG

Weltweit ist ein rapider Anstieg in der Nutzung von Windkraft zu beobachten. Dieser Anstieg erfordert es die Technologie zur Nutzung von Windkraft zu verbessern und die jährliche Energieproduktion zu maximieren. Die Eigenschaften der Nachlaufströmung hinter einer Windturbine haben eine grosse Bedeutung sowohl für die jährliche Energieproduktion eines Windparks als auch auf die Betriebs- und Instandhaltungskosten der Windturbinen in einem Windpark. Bezüglich der jährlichen Energieproduktion ist es bekannt, dass die Windgeschwindigkeit im Nachlaufgebiet einer Windturbine reduziert ist. Die weitere Entwicklung der Nachlaufströmung wird von der Topografie beeinflusst. Momentan fehlt das Wissen zur Beschreibung dieser Entwicklung in komplexem Gelände. Auf Betriebs- und Instandhaltungskosten wirkt sich die Nachlaufströmung durch Räumlichkeit und Unstetigkeit, was zu einer Veränderung der mechanischen Beanspruchung und der damit verbundenen Lebensdauer der Windturbine führt, aus. Beide erwähnten Faktoren, die jährliche Energieproduktion und die Betriebs- und Instandhaltungskosten, bestimmen die Wirtschaftlichkeit eines Windparks. In den letzten 25 Jahren wurden Messungen der Nachlaufströmung von in Betrieb befindlichen, vollmasstäblichen Windturbinen durchgeführt. Jedoch hat keine dieser Studien detaillierte Informationen über das Strömungsfeld um eine Windturbine in Originalgrösse geliefert. Die bisher verwendeten Messtechniken weisen nicht genügend Flächendeckung und räumliche Auflösung für die Abbildung der Nachlaufstrukturen hinter einer Windturbine auf. In dieser Arbeit wurde ein innovativer Ansatz, bestehend aus einem mit einer schnellen aerodynamischen Sonde bestückten unbemannten Flugzeug (UAV), entwickelt um hochaufgelöste Messungen des Strömungsfelds in der Umgebung einer Windturbine in Originalgrösse zu ermöglichen. Der Schlüssel zu dieser neuartigen Messmethode ist die Integration der schnellen aerodynamischen Sondentechnologie mit miniaturisierter Hardware und Software in Drohnen, um deren autonomen Einsatz zu ermöglichen. Es werden die allerersten Messungen der Nachlaufströmung einer vollmasstäblichen Windturbine mit einer instrumentierten Drohne durchgeführt. Diese hochaufgelösten Messungen liefern eine detaillierte Beschreibung der Nachlaufströmung einer Windturbine in Originalgrösse, die sich in komplexem Terrain befindet. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die instrumentierte Drohne dreidimensionale, hochaufgelöste Daten über die Nachlaufströmung einer vollmasstäblichen Windturbine in einem bisher unerreichten Detaillierungsgrad liefern kann.

Die zum Messsystem gehörende instrumentierte Drohne wird von einer Bodenstation aus gesteuert. Die schnelle aerodynamische Sonde des UAVs umfasst sieben Sensoren (7S-FRAP). Diese Messtechnik wird seit 20 Jahren an der ETH entwickelt und ermöglicht die Messung der Windgeschwindigkeit relativ zum

UAV. Die Hardware und Software des Open-Source Autopiloten namens Paparazzi wird zur Geschwindigkeitsbestimmung des UAVs über Grund verwendet. Des Weiteren wird Paparazzi für die Planung und Ausführung autonomer Drohnenflüge innerhalb der Nachlaufströmung einer Windturbine angepasst. Die Vektorsumme der Geschwindigkeit des UAVs und des Windes relativ zum UAV ergeben die Windgeschwindigkeit bezüglich der Erdoberfläche. Um die Dichte der Messdaten zu maximieren, werden auf Basis der Aerodynamik des UAVs optimierte Flugbahnen bestimmt. Das gesamte UAV wurde im grossen Windkanal für niedrige Geschwindigkeiten an der ETH Zürich getestet, woraufhin ein aerodynamisches Modell des UAVs erzeugt wird. Die Resultate der Windkanalmessungen zeigen ausserdem, dass die Effekte durch den vom Auftrieb erzeugten Zuwind vernachlässigbar sind. Die Anwendung des Guide to Extended Uncertainty in Measurements ergibt eine Standardunsicherheit von 0.7m/s mit einer statistischen Sicherheit von 67% für die Windgeschwindigkeit. Die mit dem UAV ausgeführten Messungen werden mit Messungen mit der Kreisflugmethode, mit Windkanalmessungen einer Modellwindturbine und mit LIDAR Profiler Messungen verglichen. In allen Fällen zeigen die UAV Messungen gute Übereinstimmung für die Windgeschwindigkeit. Diskrepanzen treten beim Vergleich der horizontalen Geschwindigkeitsprofile, die mit dem LIDAR Profiler gemessen wurden, auf. Ein möglicher Grund für die Abweichung ist die Annahme einer gleichförmigen Strömung zur Berechnung der horizontalen Geschwindigkeiten in den LIDAR Profiler Messungen. Die UAV Messungen des also zur Korrektur der LIDAR Profiler Messungen verwendet werden.

Im Nahbereich stromabwärts der Windturbine zeigen die Windprofile stark ausgeprägte dreidimensionale Scherströmungen. Das Windgeschwindigkeitsdefizit entlang der Mittelachse der Nachlaufströmung resultiert aus den Nachläufen des Rotors, der Gondel und des Masts. Demgegenüber zeigen die Windprofile abseits der Mittelachse nur den Einfluss des Rotors. Hier, wo der Nachlauf der Gondel nicht vorhanden ist, zeigt das Windgeschwindigkeitsdefizit über die gesamte Messdistanz stromabwärts ( $0.5 < x/D < 3.0$ ) kaum Veränderungen und ist mit 25% näherungsweise konstant. Entlang der Mittelachse nahe dem Rotor, zwischen  $0.5D - 1.75D$ , beträgt das Windgeschwindigkeitsdefizit jedoch 65% und nimmt dann  $2.5D$  stromabwärts auf 25% ab. Um die Aerodynamik des Strömungsnachlaufs von Windturbinen in Originalgrösse besser zu verstehen, wurden die Strömungsmessungen des mit Sonden ausgestatteten UAVs auf den Messebenen zwischen  $x/D = 1$  und  $x/D = 3$  aufgezeichnet. Diese Abbildungen wurden mit Hilfe von Interpolation der Rohdaten bei der Auswertung erstellt. Die dreidimensionalen Daten wurden eingehend analysiert um die Entwicklung des Strömungsnachlaufs stromabwärts und die Veränderung der Strömungsgrössen quer zum Strömungsnachlauf zu verstehen. Nahe am Rotor sind starke Unregelmässigkeiten zu beobachten. Diese Unregelmässigkeiten sind eine Folge der Abdeckungseffekte des Masts und der Gondel nahe der Windturbine. Die Reduktion des

Windgeschwindigkeitsdefizits weiter stromabwärts der Windturbine ist klar ersichtlich. Ausserdem ist eine stark aufwärts gerichtete Strömung deutlich sichtbar. Es konnte weiter gezeigt werden, dass der Massenstrom auf Grund der ungleichmässigen Leistungsentnahme durch den unteren Teil des Rotors grösser als der durch den oberen Teil des Rotors ist. Diese Diskrepanz der Massenströme führt zu einer Aufwärtsbewegung der Strömung aus dem unteren Bereich des Strömungsnachlaufs in den oberen, was zu den hohen Steigungswinkeln führt. Des Weiteren konnte die generell gute Übereinstimmung der gemessenen Strömungsnachläufe an den zwei Standorten gezeigt werden. Es kann daher vermutet werden, dass die im Detail aufgezeigte Struktur des Strömungsnachlaufs repräsentativ für eine Windturbine im Originalmassstab ist. Diese Tatsache bestätigt die Brauchbarkeit des neuartigen Messansatzes mittels einer mit einer Sonde ausgestatteten UAV.

Die mit dem instrumentierten UAV aufgenommenen Messungen der Nachlaufströmung werden für die Bewertung des Nachlauf-Modells, das am Laboratory for Energy Conversion der ETH Zürich entwickelt worden ist, verwendet. Es liegt eine gute Übereinstimmung des ETH-Nachlauf-Modells mit den UAV-Messungen vor, wobei durch den Mast-Nachlaufs, die thermische Schichtung und den Boden-Effekts Unterschiede auftreten. Das mit UAV-Messungen validierte Nachlauf-Modell kann in verschiedenen Windanwendungen nützlich sein, von der Regelung der Windturbinen bis hin zur Berechnung der Energieproduktion von Windparks.

Es ist also ein innovativer Ansatz entwickelt worden, der aus einem mit einer schnellen aerodynamischen Sonde instrumentierten unbemannten Luftfahrzeug besteht. Der Ansatz dient dazu, hochauflösende Messungen des Strömungsfeldes an Windturbinen in Originalgrösse bereitzustellen. Der innovative Ansatz ist den bestehenden Messmethoden hinsichtlich der horizontalen Raumabdeckung und Auflösung überlegen. Es sind die allerersten Messungen des Nachlaufs einer Windturbine in Originalgrösse unter Verwendung eines instrumentierten unbemannten Luftfahrzeugs durchgeführt worden. Diese hoch-auflösenden Messungen geben den Nachlauf einer Windturbine in Originalgrösse, die sich in komplexem Gelände befindet, im Detail wieder. Die Messungen werden dafür verwendet das erweiterte Windsimulationstool, das am Laboratory for Energy Conversion der ETH Zürich entwickelt wird, zu validieren. Die Messungen werden ebenfalls dafür verwendet um das Nachlauf-Modell zu bewerten, welches kürzlich am Laboratory for Energy Conversion der ETH Zürich entwickelt worden ist. Das mit UAV-Messungen validierte Nachlauf-Modell kann in verschiedenen Windanwendungen nützlich sein, von der Regelung der Windturbinen bis hin zur Berechnung der Energieproduktion von Windparks.