

## Abschlussbericht zum Teilprojekt

# Messung und Analyse hochfrequenter (>1kHz) Turbulenzanteile im Offshore-Wind zur Optimierung von aerodynamischen Blattprofilen

Projektnummer: 122-09-023

Projektlaufzeit: 01.07.2009 – 30.06.2012

Berichtszeitraum: 01.07.2009 – 30.06.2012

1. Juli 2012

A. Jeromin<sup>1)</sup> und A. P. Schaffarczyk<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> FEZ FH Kiel GmbH, Schwentinestraße 24, 24149 Kiel, [andreas.jeromin@fh-kiel-GmbH.de](mailto:andreas.jeromin@fh-kiel-GmbH.de)

<sup>2)</sup> Fachhochschule Kiel, Grenzstraße 3, 24149 Kiel, [alois.schaffarczyk@fh-kiel.de](mailto:alois.schaffarczyk@fh-kiel.de)

Im Rahmen des Gesamt-Vorhabens „FINO3- NEPTUN – Kompetenzzentrum Offshore - Windenergienutzung Nordsee Entwicklungsplattform für Technologietransfer und Naturschutz

Förderung mit Landesmitteln des Landes Schleswig-Holstein nach Maßgabe der Richtlinie für die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Technologietransfer, Projektnummer 122-09-023, Förderbescheid vom 24. Juni 2009

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
2. Zielsetzung .....	2
2.1. Ziele für den Berichtszeitraum.....	2
3. Stand der Forschung .....	3
4. Stand der Arbeiten.....	3
4.1. Arbeitsplan.....	3
4.2. Durchgeführte Arbeiten .....	6
5. Erzielte Ergebnisse.....	13
5.1. Ergebnisberichte .....	13
5.2. Verwertung der Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen .....	13
5.3. Veröffentlichungen .....	14
6. Projektabschluss / Fazit des Gesamtprojekts.....	15
7. Anhang.....	16
7.1. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	16
7.2. Abkürzungsverzeichnis .....	16
7.3. Glossar .....	17

## 1. Einleitung

Dies ist der Abschlussbericht zum Projekt „Messung und Analyse hochfrequenter (>1kHz) Turbulenzanteile im Offshore-Wind zur Optimierung von aerodynamischen Blattprofilen“. In den Kapiteln 2 bis 5 werden die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse für den letzten Berichtszeitraum 01.01.12 – 30.06.12 dargestellt. Im Kapitel 6 werden die erzielten Ergebnisse für den gesamten Projektzeitraum kurz dargestellt und ein Fazit gezogen. Die vorhergehenden Zwischenberichte sind Teil des Abschlussberichts.

## 2. Zielsetzung

In der zweiten, durch das Land Schleswig-Holstein geförderten Projektes sollten im Wesentlichen die Arbeiten durchgeführt und fortgesetzt werden, die wegen des zeitlichen Verzugs des Baus von FINO3 nicht in der ersten Phase (1. 1. 2006 – 31. 12. 2008) durchgeführt werden konnten. Des Weiteren wurden inhaltliche Korrekturen insoweit vorgenommen, wie sie sich durch die Weiterentwicklung des Standes der Wissenschaft ergeben haben.

### 2.1. Ziele für den Berichtszeitraum

- LCA Offshore auf FINO3 installiert, Messungen begonnen → abgeschlossen
- Weitere 2D-Profilsimulationen durchgeführt → abgeschlossen
- Weitere 3D-Flügelsimulationen durchgeführt → abgeschlossen

- Abstract zur Veröffentlichung der Ergebnisse aus AP 10 ist eingereicht → abgeschlossen
- Erweiterte Mack'sche Korrelation für atmosphärische Turbulenz ist entwickelt → nicht erreicht.

### **3. Stand der Forschung**

Die aerodynamische Auslegung von Profilen und Blättern stützt sich weitgehend auf Messungen im Windkanal. Erst an Prototypen ist der realitätsnahe Einsatz möglich. Mit diesem Projekt sollen wichtige Parameter, die sich aus dem gemessenen Frequenzspektrum bis ca. 10 kHz ableiten lassen, erstmals ermittelt werden. Dazu sind jeweils eine Messung Offshore und eine vergleichende Onshore notwendig. Übliche Windmessungen berücksichtigen nur den Bereich  $< 5$  Hz, da nur diese Turbulenzen zur Auslegung der Festigkeiten relevant sind.

Da zu erwarten ist, dass der offshore Wind insgesamt weniger turbulent ist, und somit auch die hochfrequenten Turbulenzanteile geringer ausfallen, werden weitreichende Folgen für den Blatt- und Profilentwurf bei offshore Windkraftanlagen erwartet. Die im onshore Einsatz üblichen turbulenten Profile können durch Laminarprofile ersetzt werden. Diese sind durch ihren geringeren Reibungsverlust effizienter.

### **4. Stand der Arbeiten**

#### **4.1. Arbeitsplan**

Die insgesamt geplanten Arbeiten sind in Tabelle 1 aufgelistet und in Abbildung 1 als Balkendiagramm dargestellt.

Tabelle 1: Liste der Arbeitspakete

AP Nr.	Beschreibung	Status	Dauer (Monate)	Beginn (Plan)	Beginn (Ist)	Ende (Plan)	Ende (Ist)	Bemerkungen
1	Datenaufbereitung Onshore (Piezo)	✓	3	01.07.09	01.07.09	29.09.09	15.07.09	
2	Datenaufbereitung Offshore (Piezo)	✓	36	01.07.09	01.07.10	29.06.12	30.03.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten
3	LCA Sensorentwicklung Uni Oldenburg	✓	8	21.10.09	21.10.09	30.06.10	07.03.11	
4	Messung onshore (LCA, Windtest)	✓	6	01.07.10	07.03.11	31.12.10	02.03.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten
5	Messung offshore (LCA, Windtest)	✓	6	01.04.11		30.09.11	15.06.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten
6	Datenaufbereitung LCA (Kiel)	✓	18	01.07.10	01.03.11	29.12.11	30.06.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten
7	Netzerzeugung 2D und 3D	✓	24	01.07.10	15.12.09	29.06.12	31.12.11	
8	2D Profil Simulation	✓	12	01.07.10	15.12.09	30.06.11	31.01.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten
9	Mack'sche Korrelation	✓	12	01.12.10	01.06.12	30.11.11	30.06.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten
10	3D Flügel Simulation	✓	12	01.07.11	01.01.10	29.06.12	30.06.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten
11	Publikationen und Endbericht	✓	6	02.01.12	15.06.12	30.06.12	30.06.12	s. 4.2 Durchgeführte Arbeiten

## Erklärung der Symbole:

- AP ist noch nicht begonnen
- Plan AP ist im Plan
- VS AP ist verspätet
- VF AP ist verfrüht
- ✓ AP ist abgeschlossen
- XX AP wurde gestrichen

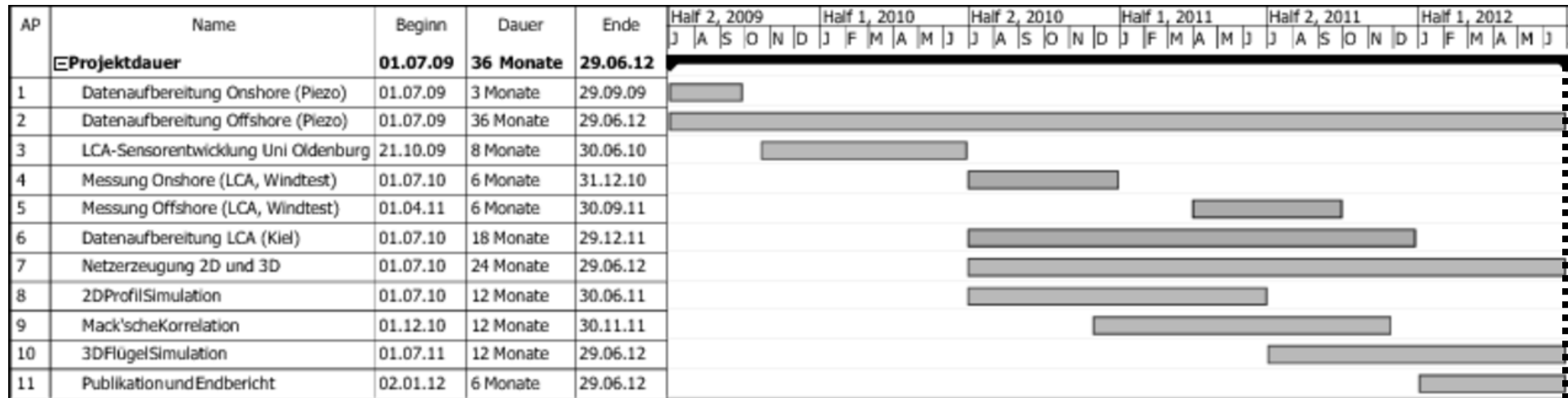


Abbildung 1: Balkenplan

## 4.2. Durchgeführte Arbeiten

Im Berichtszeitraum wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

### **AP 2: Datenaufbereitung Offshore (Piezo)**

Status: abgeschlossen

Die Messungen Offshore mit dem Piezosensor wurden im Zeitraum von August 2010 bis Januar 2011 abgeschlossen und im ersten Halbjahr 2011 einer ersten Analyse unterzogen. Weiterführende Analysen folgten noch im ersten Quartal 2012, die Ergebnisse wurden auf dem EUROMECH Colloquium 528 in Oldenburg einem Fachpublikum vorgestellt und veröffentlicht.

### **AP 4: Messung onshore (LCA, Windtest)**

Status: abgeschlossen

Nach dem Onshore-Test in 2011, der einige Mängel am LCA offenbarte, wurde der Sensor bei unserem Partner an der Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg vollständig in Stand gesetzt. Die Mängel wurden beseitigt und zusätzliche Tests wurden durchgeführt, um die Betriebsfähigkeit des LCA beim nächsten Test sicher zu stellen.

Der zweite Onshore-Test des LCA wurde im Februar 2012 durchgeführt. Am 20.02.2012 wurden der Sensor sowie die notwendigen Apparaturen für den Anschluss nach Kaiser-Wilhelm-Koog gebracht. Am gleichen Tag ist von GL/GH der Aufbau in der Werkstatt getestet worden und die Funktionstüchtigkeit wurde von den Anwesenden (Jeromin, FEZ, Puczykowski, Uni Oldenburg, Rockel, Uni Oldenburg, Schmidt, GL/GH, Kaiser, GL/GH) festgestellt.

Herr Kaiser und Herr Schmidt von GL/GH führten Installation und Datenerfassung mit dem LCA durch. Bereits kurz nach der erfolgreichen Inbetriebnahme standen die ersten Messdaten zur Verfügung, die noch vor Ort von Herrn Jeromin (FEZ) analysiert wurden. Die Messdaten waren von guter Qualität.

Insgesamt konnten in der Nacht vom 20.02. zum 21.02.2012 etwa neun Stunden ununterbrochen Messdaten aufgezeichnet werden. Es wurden Windgeschwindigkeiten bis über 18 m/s von den Schalenkreuzanemometern gemeldet. Erst in den frühen Morgenstunden versagte das LCA, da Regentropfen auf den Cantilever und den Spiegel gelangten. Durch Wassertropfen wurde der Laserstrahl gestreut und konnte nicht mehr auf den photoelektrischen Sensor im Gehäuseinneren zurück geworfen werden.

Die Messdaten wurden in mehrere Dateien aufgeteilt, wobei jede Datei Aufzeichnungen einer vollen Zeitstunde enthielt. Der Speicherbedarf für die Umwandlung der Daten war dennoch sehr hoch. Auch für die Analyse musste eine spezielle Workstation genutzt werden, die mit 24 GB Hauptspeicher gerade eben über ausreichend Speicherplatz verfügte. Zur Spei-

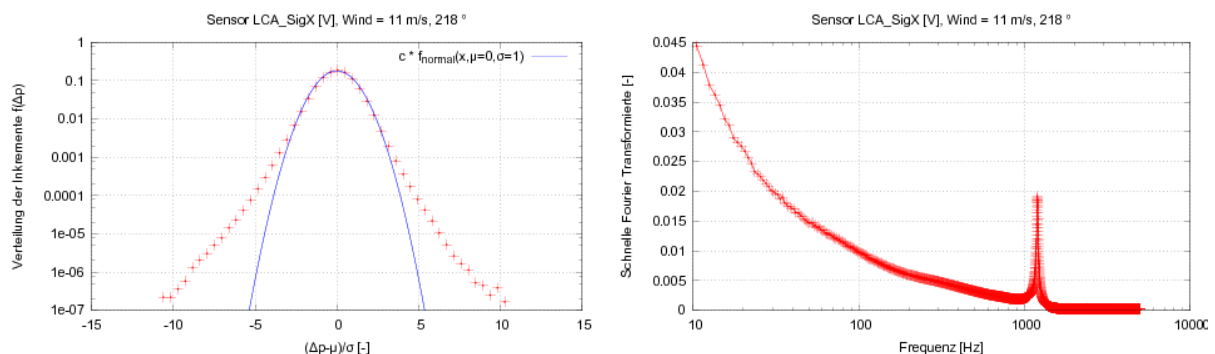
cherung der Datensätze sowie der ausgewerteten Daten war die Beschaffung zusätzlicher Festplatten notwendig.



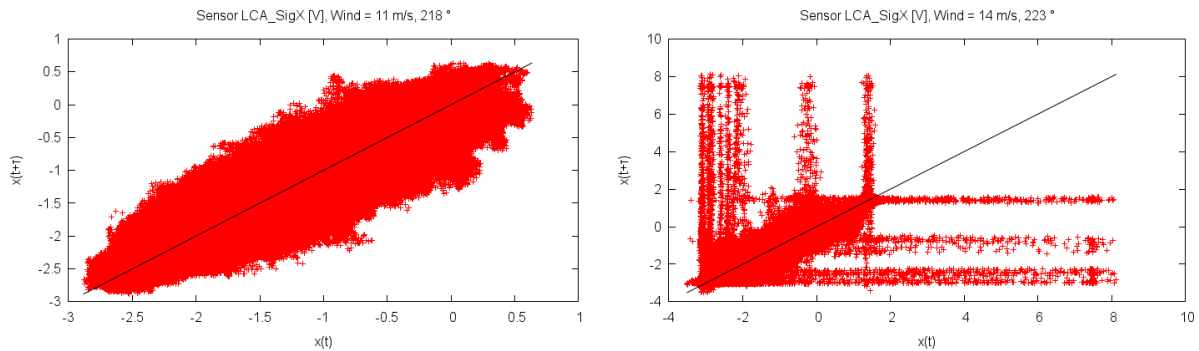
**Abbildung 2: Werkbanktest des LCA (links), Installation auf dem Onshore-Messmast (mitte), Lage des LCA auf dem Messmast (rechts). Das LCA wird durch den roten Pfeil markiert.**

Die Auswertungen haben bislang zu folgenden Ergebnissen geführt:

- Die Sensordaten weisen Intermittenz auf, in den Inkrementverteilungen sind die typischen „fat tails“ zu sehen (Abbildung 3 rechts)
- Die Verteilung des Formfaktors ist schlüssig und entspricht bekannten Ergebnissen aus der Literatur.
- Das Leistungsdichtespektrum und der Frequenzgang zeigen ein Amplitudenmaximum bei 1200 Hz. Dieses Maximum wird auf eine Eigenfrequenz des Cantilevers zurück geführt. An der Spitze des Cantilevers wurde ein Spiegel angebracht, um die Reflexivität für den Laserstrahl zu erhöhen. Durch den Spiegel wurden die Eigenfrequenzmoden des Cantilever jedoch verringert, so dass die niedrigste Mode im Frequenzgang zu sehen war. (Abbildung 3 links)
- Bei Überschreiten der kalibrierten Maximalgeschwindigkeit (16 m/s) weisen die Messdaten ein typisches Verhalten auf, das insbesondere in den Scatterplots zu erkennen ist. (Abbildung 4)



**Abbildung 3: Verteilungsfunktion der Inkremente mit den typischen "fat tails" (links). Frequenzgang mit dem Amplitudenmaximum bei 1200 Hz (rechts)**



**Abbildung 4: Scatterplots einer normalen Messung innerhalb des kalibrierten Geschwindigkeitsbereichs (links) und einer Messung, bei der die kalibrierte Höchstgeschwindigkeit des Windes mehrfach überschritten wurde (rechts)**

Die gewonnenen Messdaten werden mit der Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg geteilt und gemeinsam analysiert. Die Informationen fließen in die Weiterentwicklung des LCA ein.

In KW 11 wurde das LCA wieder abgebaut und zur Universität Oldenburg zurück gesendet, um dort auf mögliche Schäden untersucht zu werden. Ebenfalls wurde eine Wartung durchgeführt, bei der der Cantilever getauscht und das LCA neu kalibriert wurde.

Die Ergebnisse sollen auf der Konferenz „The Science of Making Torque from Wind 2012“ in Oldenburg vorgestellt werden. Dazu wurde ein Abstract eingereicht, der als Vortrag akzeptiert wurde.

#### **AP 5: Messung offshore (LCA, Windtest)**

Status: abgeschlossen

Nach dem erfolgreichen Onshore-Test im Februar (siehe AP 4) und der anschließenden Wartung des LCA, wurde der Einsatz auf der Offshore-Plattform FINO3 vorbereitet. Mit freundlicher Unterstützung des Forschungs- und Entwicklungszentrums FH Kiel GmbH, insbesondere der Herren Bachmann und Burghoff, konnte die Installation auf FINO3 am 26.04.2012 durchgeführt werden. Für die Installation wurden Bastian Schmidt und Lutz Domnick von GL/GH sowie Jarek Puczyłowski von der Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg zur FINO3 geflogen.

Die Installation, die neben LCA und Datenerfassung auch zusätzliche Piezosensoren umfasste, verlief erfolgreich und noch am gleichen Tag konnten die ersten Messdaten aufgezeichnet werden.

Der Transfer der aufgezeichneten Daten, insgesamt über 30 GB Rohdaten, zum Festland gestaltete sich auf der Plattform problematisch. Da die Satellitenverbindung eine zu geringe Bandbreite bietet, musste die Festplatte mit den Messdaten per Helikopter geholt werden. Die Daten wurden am 25.05.2012 von L. Domnick und M. Kaiser (GL/GH) zusammen mit dem LCA und den Piezosensoren von FINO3 geborgen.





Abbildung 5: Das Installationsteam: B. Schmidt (l), M. Kaiser (m) und J. Puczyłowski (r) (links). Blick vom Mast auf die Plattform FINO3 (rechts)

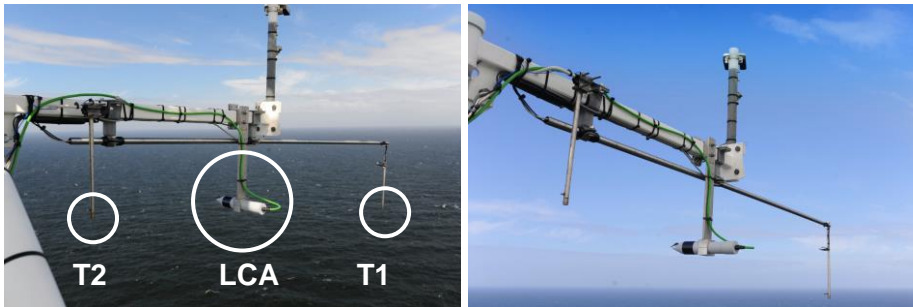


Abbildung 6: Die installierten Sensoren: Das LCA in der Mitte und links und rechts die Piezosensoren T1 und T2 (Bild links & Mitte). Oben ist ein Ultraschallanemometer von GL/GH installiert. Im rechten Bild ist die Station FINO3 skizziert, der rote Pfeil markiert die Lage der Sensoren auf dem Messmast (rechts). Grafik: © Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel GmbH

Für die Umrechnung von Rohdaten in verwertbare Datentabellen wurden leistungsstarke IT-Ressourcen verwendet. Dennoch dauerte die Konvertierung mehrere Tage. Die Gesamtgröße der komprimierten Datensätze betrug über 50 GB und wurde auf einer Festplatte per Post von GL/GH nach Kiel geschickt. Die Festplatte mit den Daten traf am 19.06.2012 ein, es wurde umgehend mit der Auswertung begonnen.

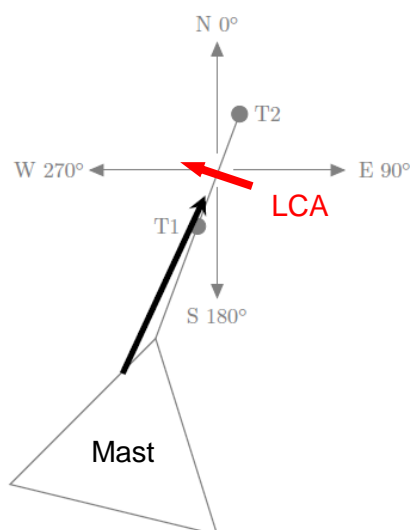
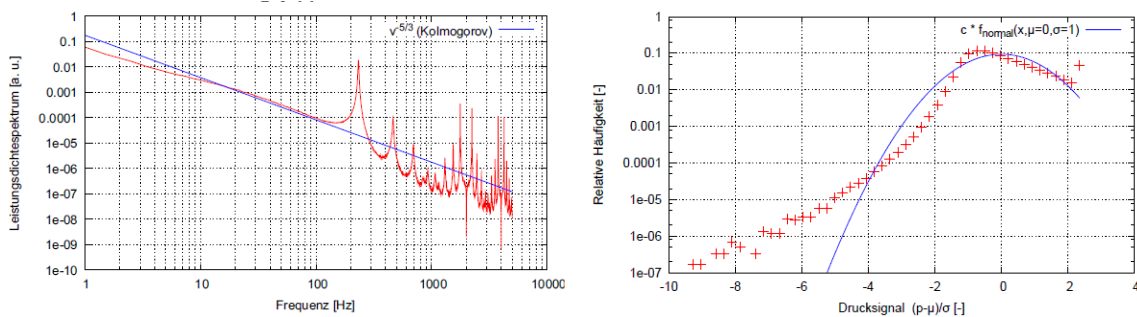


Abbildung 7: Richtung des Windes (dicker Pfeil) der Messung am 26.04.2012 um 14:47 Uhr.

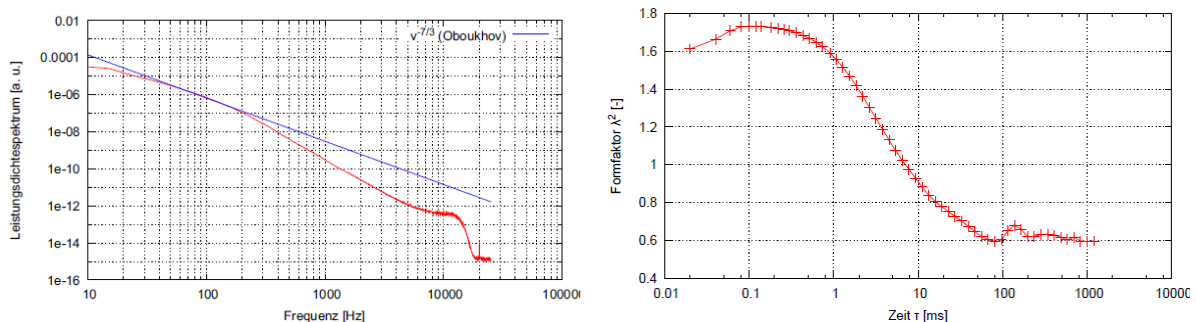
Bei der Auswertung zeigte sich, dass der Wind aus Richtung des Mastes kam. Durch die Strukturen des Mastes wurde künstliche Turbulenz erzeugt, die die natürliche Turbulenz überlagerte. Eine Trennung beider Informationen ist leider nicht möglich. Auch liegt die Anströmung mit ca. 90° außerhalb des Akzeptanzwinkels von  $\pm 40^\circ$ . Da erst ca. 30 % der Messungen ausgewertet und überprüft wurden, besteht noch die Möglichkeit, dass sich bei späteren Messungen die Windrichtung noch positiv einstellt und die Daten aussagekräftig sind. Die Spektrale Leistungsdichte und die Häufigkeitsverteilungen des X-Signals (Abbildung 8) geben entsprechend keine verwertbaren Ergebnisse.



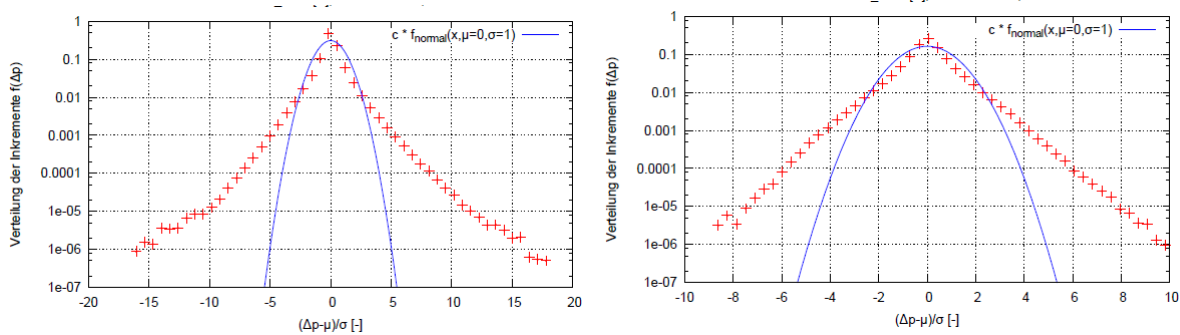
**Abbildung 8: Leistungsdichtespektrum (links) und Häufigkeitsverteilung (rechts) für das X-Signal des LCA bei Anströmung durch den Mast (26.04.2012, 14:47 Uhr)**

Dem gegenüber stehen die Daten des Drucksensors (Piezoelektrischer Sensor), der unabhängig von der Windrichtung arbeitet. Auch hier ist die Messreihe durch die Anströmung durch den Mast überlagert und künstliche Turbulenz bestimmt die Ergebnisse. Dafür zeigen Leistungsdichtespektrum und Formparameter (Abbildung 9) starke Ähnlichkeit mit Messdaten, die im Windkanal aufgezeichnet wurden.

Bei den Verteilungen der Inkremente (Abbildung 10), bei denen die Normalverteilung als blaue Linie zum Vergleich eingetragen wurde, sind die sogenannten „fat tails“ als Indikator für Intermittenz gut zu erkennen. Wie aus bisherigen Analysen ersichtlich war, zeigt sich dieses Phänomen nur unter bestimmten Voraussetzungen.



**Abbildung 9: Leistungsdichtespektrum (links) und Formparameter  $\lambda^2$  (rechts) für den Piezodrucksensor**



**Abbildung 10: Verteilung der Inkremente für den Piezodrucksensor bei Zeitabständen von 1 ms (links) und 10 ms (rechts)**

### AP 6: Datenaufbereitung LCA (Kiel)

Status: abgeschlossen

Die Messdaten Onshore standen teils als 10-Minuten-Messreihen zur Verfügung, teils als 60-Minuten-Messreihen. Insgesamt standen über 13 Stunden ununterbrochene Aufzeichnungen zur Verfügung. Die Datenreihen wurden mit der automatischen Berichterstellung sowie den für den Piezosensor entwickelten Methoden bearbeitet und ausgewertet. Die Bearbeitung einer 60-Minuten-Messreihe benötigte ca. 7 Stunden Rechenzeit. Für die Größe der Datensätze war eine spezielle Workstation mit 24 GB Arbeitsspeicher nötig. Die Umrechnung von X- und Y-Signalen in Geschwindigkeit und Anstellwinkel wurde bisher nicht durchgeführt, da nicht ausreichend Rechen- und Personalkapazitäten zur Verfügung standen. Dies wird aber für die geplante Präsentation der Ergebnisse auf der Konferenz „The Science of Making Torque from Wind 2012“ noch durchgeführt.

Nach der Übermittlung der Messdaten Offshore konnte mit der Auswertung und Aufbereitung der Daten begonnen werden. Auf die Umrechnung des X-Y-Signals in Geschwindigkeit und Anstellwinkel wurde vorerst verzichtet. Dafür wurden die Sensorsignale mit dem zuvor für den Piezosensor entwickelten Methoden und Programmen wie etwa die automatische Berichterstellung bearbeitet. Der Umfang einer einzelnen Datendatei betrug ca. 1,5-2,0 GB unkomprimiert, für die Auswertung musste auch hier auf eine spezielle Workstation zurück gegriffen werden, die über 24 GB Arbeitsspeicher verfügt. Die Bearbeitung eines Datensatzes über 10 Minuten Messaufzeichnung nahm insgesamt 11 Zeitstunden in Anspruch.

Zum Projektende ist die Auswertung der Messungen Offshore erst zu ca. 30 % abgeschlossen. Die Auswertung wird über das Projektende hinaus durchgeführt.

Darüber hinaus sind vom Deutschen Wetterdienst Temperaturdaten für die Luft in Bodennähe angefordert worden. Diese Daten sollen helfen, den Zustand der atmosphärischen Grenzschicht (stabil, neutral, instabil) zu bestimmen. Die Bestimmung wurde noch nicht durchgeführt, soll aber im Zeitschriftenartikel mit aufgenommen werden.

Wir danken dem Deutschen Wetterdienst für die bereitgestellten Informationen und für die freundliche Kooperation.

Die gewonnenen Erkenntnisse der Messungen mit LCA und Piezosensor werden gegenwärtig in einem Artikel für die Zeitschrift „Journal of Boundary Layer Meteorology“ des Springer-Verlages zusammen gestellt.

#### **AP 8: 2D Profil Simulation**

Status: abgeschlossen

Die letzten Profilsimulationen wurden durchgeführt und das Arbeitspaket abgeschlossen.

#### **AP 9: Mack'sche Korrelation**

Status: abgeschlossen

Mit den vorliegenden Daten und Informationen ist es bislang nicht möglich gewesen, eine sinnvolle Anpassung der Mack'schen Korrelation durchzuführen.

#### **AP 10: 3D Flügel Simulation**

Status: abgeschlossen

Im Rahmen der Beteiligung am internationalen IEA Wind Task 29 „MEXNEX(T)“, Nachfolger des Projekts „MEXICO – Model experiments in controlled conditions“ wurde ein komplettes Rotorblatt der Modellwindkraftanlage mit unstrukturierten Netzen gerechnet. Im Berichtszeitraum wurde der Abschlussbericht des Projekts verfasst und an die Projektkoordinatoren versandt.

#### **AP 11: Publikation und Endbericht**

Status: abgeschlossen

Der Abschlussbericht / Endbericht liegt mit diesem Dokument vor.

Die neben den Zwischenberichten und diesem Abschlussbericht erfolgten Veröffentlichungen unserer wissenschaftlichen Ergebnisse ist in Kapitel 5.3. aufgelistet. Folgende Publikationen Erschienen erst nach Abschluss des Projekts:

- A. Jeromin, A.P. Schaffarczyk, J. Puczyłowski, J. Peinke and M. Hölling: Highly Resolved Measurement of Atmospheric Turbulence with the new 2d-Atmospheric Laser Cantilever Anemometer, The Science of Making Torque from Wind 2012, Journal of Physics: Conference Series 555 (2014) 012054,

- A. Jeromin and A.P. Schaffarczyk, Advanced Statistical Analysos of High-Frequency Turbulent Pressure fluctuations for On- and Off-shore Wind, In: Wind Energy – Impact of Turbulence, M. Hölling, J. Peinke and S. Ivanell (Ed), Research Topics in Wind Energy 2, Springer, Berlin 2014

## 5. Erzielte Ergebnisse

Ergebnisse sind in der Beschreibung der Arbeitspakete sowie in den vorhergehenden Zwischenberichten gezeigt.

### 5.1. Ergebnisberichte

Die aktuellen Erkenntnisse aus AP 2: Datenaufbereitung Offshore (Piezo) sind auf dem EUROMECH Colloquium 528 in Oldenburg als Poster präsentiert worden. Ebenfalls wurde auf dem EUROMECH Colloquium 528 ein Poster zum LCA von Jarek Puczyłowski präsentiert. Vorhergehende Ergebnisse wurden auf der EWEA Offshore 2011 in Amsterdam als Poster präsentiert und im Bericht des Labors für numerische Mechanik 78 zusammengestellt.

Die Ergebnisse aus den AP 4: Messung onshore (LCA, Windtest), AP 5: Messung offshore (LCA, Windtest) und AP 6: Datenaufbereitung LCA (Kiel) werden noch veröffentlicht und auf der Konferenz „The Science of Making Torque from Wind 2012“ in Oldenburg präsentiert. Eine Veröffentlichung als Zeitschriftenartikel ist ebenfalls in Vorbereitung (s. a. Bericht zu AP 11 in Kapitel 4.2).

Die bislang erzielten Ergebnisse aus AP 8: 2D Profil Simulation wurden auf der Deutschen Windenergiekonferenz DEWEK 2010 vorgestellt und in einem Vortrag präsentiert.

Die Ergebnisse aus AP 10 3D Flügel Simulation wurden auf den Projektmeetings des IEA Task 29 MexNext in Heraklion, Griechenland, Amsterdam, Niederlande und Jeju-do, Südkorea, präsentiert.

### 5.2. Verwertung der Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse sind zunächst von hohem, wissenschaftlichem Interesse, da bisher nicht bekannt ist, inwieweit die Turbulenzspektren offshore tatsächlich dem vermuteten Kolmogorow-Spektrum ähneln. Des Weiteren ist die Kenntnis der Turbulenzstruktur und insbesondere die des hochfrequenten Anteils notwendig, um die Profil- und Blattform zu optimieren. Die aus den Untersuchungen resultierenden Ergebnisse können daher direkt zu wirtschaftlichem Nutzen in Beziehung gesetzt werden. Damit sind Anwender und Blatthersteller von Windkraftanlagen onshore und offshore prädestiniert.

### 5.3. Veröffentlichungen

- A. Jeromin, A.P. Schaffarczyk, J. Puczyłowski, J. Peinke and M. Hölling: Highly Resolved Measurement of Atmospheric Turbulence with the new 2d-Atmospheric Laser Cantilever Anemometer, The Science of Making Torque from Wind 2012, Journal of Physics: Conference Series 555 (2014) 012054,
- A. Jeromin and A.P. Schaffarczyk, Advanced Statistical Analysis of High-Frequency Turbulent Pressure fluctuations for On- and Off-shore Wind, In: Wind Energy – Impact of Turbulence, M. Hölling, J. Peinke and S. Ivanell (Ed), Research Topics in Wind Energy 2, Springer, Berlin 2014
- A. Jeromin, A.P. Schaffarczyk, Measurement of high frequency pressure fluctuations at German offshore platform FINO3, EWEA Offshore 2011 Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 29. November – 1. December 2011
- J. Puczyłowski, J. Peinke and M. Hölling, New anemometer for offshore use, Proceedings of the 13<sup>th</sup> European Turbulence Conference, Warsaw, Poland, 12.-15. September 2011
- A. Jeromin, A.P. Schaffarczyk, Task 4.2: Deeper investigation of Reynolds number sensitivity, Presentation at final IEA Wind Annex 29 (MexNext) Meeting, Jeju-do, South Korea, 14. -16. June 2011
- A. Jeromin, A.P. Schaffarczyk, Statistische Auswertungen turbulenter Druckfluktuationen auf der off-shore Messplattform FINO3, Bericht des Labors für numerische Mechanik 78, FH Kiel, März 2011
- A. Jeromin, A.P. Schaffarczyk, "Task 4.2: Reynolds number sensitivity", Presentation at 4th IEA Wind Annex 29 (MexNext) Meeting, Amsterdam, The Netherlands, 18. January 2011
- Wolf, M., Jeromin, A. & Schaffarczyk, A. P., Numerical Prediction of Airfoil Aerodynamics for Thick Profiles Applied to Wind Turbine Blade Roots, DEWEK2010, Bremen, Germany, November 2010
- A. Jeromin, A.P. Schaffarczyk, Full 3D Computations of a Rotating Blade Using Unstructured Grids, Presentation at 3rd IEA Wind Annex 29 (MexNext) Meeting, Forth, Heraklion, Crete, Greece, 2. July 2010
- D. Schwab, A.P. Schaffarczyk, Advanced investigations of the properties of turbulence on wind turbine blades under on- and off-shore conditions, 3rd Conference of Making Torque from Wind, Crete, Greece, 28-30 June 2010

## 6. Projektabschluss / Fazit des Gesamtprojekts

Im Projektzeitraum 01.07.09 – 30.06.12 wurde das Projekt „Messung und Analyse hochfrequenter (> 1kHz) Turbulenzanteile im Offshore-Wind zur Optimierung von Blattprofilen“ durchgeführt. Insgesamt kann das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden. Dennoch gab es einige Ereignisse, die hier erwähnt werden sollen.

- Bei der Entwicklung des LCA kam es aufgrund der herausragenden technischen Komplexität des Sensors immer wieder zu Verzögerungen. Die Auswahl eines geeigneten Fertigungsprozesses für den Cantilever nahm viel Zeit in Anspruch.
- Die Verzögerungen führten dazu, dass wertvolle Offshore-Daten erst zum Ende der Projektlaufzeit gewonnen werden konnten. Die Auswertung und Interpretation der Daten war nur oberflächlich möglich.
- Ursprünglich war eine größere Anzahl an Einzelmessungen mit dem LCA geplant. Dies war aufgrund der Verzögerungen jedoch nicht mehr möglich.
- Für die bisher gewonnenen Erkenntnisse sind zusätzliche Informationen zum Zustand der atmosphärischen Grenzschicht (stabil, neutral, instabil) notwendig. Die zur Zustandsabschätzung benötigten Daten wurden beim Deutschen Wetterdienst bestellt, standen aber erst am Ende der Projektlaufzeit bereit.
- Die Entwicklung einer angepassten Mack'schen Korrelation war leider nicht mehr möglich, da nicht mehr ausreichend Zeit zur Verfügung stand.

Trotz der Schwierigkeiten wurden mit dem Projekt sehr wichtige Ziele erreicht:

- Es wurden Onshore und Offshore Messungen der atmosphärischen Turbulenz durchgeführt, die in ihrer Art und in ihrem Umfang weltweit einmalig sind. Die Daten für die turbulenten Druckschwankungen erlauben einen tiefen Einblick in den Bereich der hochfrequenten Turbulenz in der atmosphärischen Grenzschicht.
- Das Konzept des Laser Cantilever Anemometers wurde trotz aller Schwierigkeiten erfolgreich vom Laborgerät für Anwendungen im Feld weiter entwickelt. Wichtige, technische Fragestellungen konnten dabei geklärt werden. Auch der Einsatz in potentiell feindlichen Umgebungen (Offshore) ist mit diesem Gerät möglich.
- Erstmals sind in der Atmosphäre gleichzeitig turbulente Geschwindigkeits- und Druckfluktuationen bei hohen Frequenzen gemessen worden. Eine Korrelation der statistischen Eigenschaften beider Messgrößen ist damit möglich.

Wichtige Ziele sind erreicht worden. Die Fülle an Daten ermöglicht noch weitergehende Forschung, die einen tiefen Einblick in grundlegende Strömungsphänomene erlaubt. Die späte

Erhebung der LCA-Offshore-Daten führte dazu, dass diese nicht in gleicher Tiefe und Sorgfalt ausgewertet werden konnten wie die Druckmessdaten zuvor.

Es wird daher empfohlen, ein anschließendes Projekt durch zu führen, um die erhobenen Daten gründlich zu analysieren und zu bewerten. Die Durchführung weiterer Messungen, um die getroffenen Aussagen auf eine sichere Basis zu stellen, wird empfohlen. Es wäre sehr schade, wenn die gewonnenen Daten nicht weiter verwendet werden könnten.

## 7. Anhang

### 7.1. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

#### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Balkenplan.....	5
Abbildung 2: Werkbanktest des LCA (links), Installation auf dem Onshore-Messmast (mitte), Lage des LCA auf dem Messmast (rechts). Das LCA wird durch den roten Pfeil markiert. ....	7
Abbildung 3: Verteilungsfunktion der Inkremente mit den typischen "fat tails" (links). Frequenzgang mit dem Amplitudenmaximum bei 1200 Hz (rechts).....	7
Abbildung 4: Scatterplots einer normalen Messung innerhalb des kalibrierten Geschwindigkeitsbereichs (links) und einer Messung, bei der die kalibrierte Höchstgeschwindigkeit des Windes mehrfach überschritten wurde (rechts).....	8
Abbildung 5: Das Installationsteam: B. Schmidt (l), M. Kaiser (m) und J. Puczyłowski (r) (links). Blick vom Mast auf die Plattform FINO3 (rechts).....	9
Abbildung 6: Die installierten Sensoren: Das LCA in der Mitte und links und rechts die Piezosensoren T1 und T2 (Bild links & Mitte). Oben ist ein Ultraschallanemometer von GL/GH installiert. Im rechten Bild ist die Station FINO3 skizziert, der rote Pfeil markiert die Lage der Sensoren auf dem Messmast (rechts). Grafik: © Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel GmbH.....	9

#### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der Arbeitspakete .....	4
--	---

### 7.2. Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn
CFD	Computational Fluid Dynamics, numerische Strömungssimulation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
evtl.	eventuell



FEZ	Forschungs- und Entwicklungszentrum
FINO3	Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee Nr. 3
FH	Fachhochschule
HLRN	Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen
LCA	Laser Cantilever Anemometer

### 7.3. Glossar

2D-Profil	Querschnitt eines Flügels oder Rotorblatts
Druckseite	Flügelseite, auf der sich ein Überdruck relativ zur Umgebung einstellt
Grenzschicht	Schicht, die sich aufgrund von Reibung an der Oberfläche umströmter Körper einstellt
Kolmogorow	Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow, russischer Mathematiker und Turbulenzforscher. Die Kolmogorow-Skala beschreibt die von ihm entwickelte Theorie, nach der die Energie turbulenter Geschwindigkeitsschwankungen mit steigender Frequenz proportional zu $\exp(-5/3)$ abnimmt.
Laminarprofil	Spezielles Flügelprofil, das den Umschlag von laminarer zur turbulenten Strömung hinauszögert und somit die Reibungsverluste deutlich senkt. Häufig im Segelflugsport verwendet.
N-Faktor	Modellparameter des Transitionsmodells $e^N$
offshore	Sich auf dem Meer befindend
onshore	Sich auf festem Land (Festland, Küste, Insel) befindend
Saugseite	Flügelseite, auf der sich ein Unterdruck relativ zur Umgebung einstellt
Transition	Übergang von laminarer zu turbulenter Grenzschichtströmung