

Fachhochschule Kiel
Carl von Ossietzki Universität Oldenburg

**Weiterentwicklung eines zweidimensionalen
Atmospheric-Laser-Cantilever-Anemometers
zur hochaufgelösten Untersuchung von
turbulenten Windströmungen
zwecks der Optimierung von
Offshore-Windturbinenblättern**

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ 32399/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Torben Reichstein
Alois Peter Schaffarczyk
Jaroslaw Puczyłowski
Michael Hölling

Kiel, 31. März 2017

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **32399/01**Referat **24/0**

Fördersumme

107.129,00 €

Antragstitel **Weiterentwicklung eines Laser-Cantilever-Anemometers zur hochaufgelösten Untersuchung von turbulenten Windströmungen zwecks der Optimierung von Offshore-Windturbinenblättern**

Stichworte Energie, Wind

Laufzeit

1 Jahr

Projektbeginn

16.12.2015

Projektende

16.12.2016

Projektphase(n)

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger

Fachhochschule Kiel
Sokratesplatz 1
24149 Kiel

Tel 0431/210-1322

Fax 0431/210-61322

Projektleitung
Prof. Dr. A. Schaffarczyk

Bearbeiter
Aleke Behrends

Kooperationspartner Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Ammerländer Heerstr. 114-118
26129 Oldenburg

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Obwohl die Nachfrage an hochaufgelösten Windgeschwindigkeitsdaten seitens der Industrie und der Forschungsgemeinde sehr groß ist, existieren bislang keine derartigen Messungen im Offshore-Bereich und nur sehr wenige Messungen im atmosphärischen Onshore-Bereich. Der Hauptgrund hierfür ist das Fehlen von geeigneten Messinstrumenten. Aus verschiedenen Gründen haben sich auf dem Gebiet der atmosphärischen Strömungen bisher nur robustere, jedoch nicht-hochauflösende Messmethoden etabliert. Die bekanntesten Vertreter dieser Anemometer sind Schalensternanemometer und Ultraschallanemometer. Diese Standardanemometer sind jedoch für die genaue Charakterisierung der atmosphärischen Grenzschicht ungeeignet. Das daher entworfene 2d-Atmospheric Laser Cantilever Anemometer (2D-ALCA) ist ein neuartiger Sensor, der zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen in der atmosphärischen Offshore-Umgebung ermöglicht. Das 2D-ALCA soll in diesem Projekt weiterentwickelt und endgültig validiert werden. Letztlich soll eine solide Grundlage für eine Produktentwicklung in einem Unternehmen geschaffen werden. Der Offshore-Windenergieanlagen-Industrie könnte somit ein neuartiges Messinstrument zur Optimierung der Anströmbedingungen von Rotorblättern an die Hand gegeben werden

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Für eine bessere zeitliche Auflösung (bis etwa 10kHz) des 2D-ALCAs wurde ein gewichtsreduzierter Cantilever entwickelt und ein Prototyp gebaut. Zu diesem Zweck wurde die spiegelnde Oberfläche in den ALCA integriert. Der neue Cantilever wurde aus beständigem und mit Gold beschichtetem Silizium gefertigt. Um zukünftig unabhängiger von der Windrichtung messen zu können, wurde eine fernbedienbare Nachlauführung für das 2D-ALCA entwickelt. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass Messungen nicht unterbrochen oder gar ausfallen müssen, wenn der Wind unerwartet die Richtung ändert. Das 2D-ALCA ist zusätzlich mit einer Abdeckung ausgestattet worden, aus der der Sensor während der Messungen herausgefahren werden kann. Damit wird der Cantilever vor Regen und Verschmutzungen geschont, wenn keine Messungen unternommen werden. Da Temperaturschwankungen zum Driften des Signals führen können und somit die Zuverlässigkeit der Messdaten gefährden könnten, ist der Sensor mit einer Temperaturregelung ausgestattet worden. Der Sensor wurde im Rahmen von Feldmessungen auf der Forschungsplattform FINO3 ausgiebig erprobt.

Ergebnisse und Diskussion

Das 2D-ALCA wurde nach der Weiterentwicklung auf der Forschungsplattform FINO3 installiert und ausgiebig unter Offshore-Bedingungen getestet. Dabei konnte durch die Abdeckung eine sehr viel längere Lebensdauer im Vergleich zu einer früheren Version dieses Messgerätes erreicht werden, so dass über einen längeren Zeitraum Messungen durchgeführt werden konnten. Die eingesetzten Motoren waren auch nach mehreren Monaten Aufenthalt in der Nordsee noch voll funktionstüchtig.

Die atmosphärische Grenzschicht unter Offshore-Bedingungen wurde mit dem 2D-ALCA vermessen. Zeitgleich dazu wurden mit Schalensternanemometer und Utraschallanemometer Referenzmessungen durchgeführt. Beim Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Messmethoden beobachtet. Weiterhin konnte die Turbulenzintensität des Offshore-Windfeldes bestimmt werden. Auch hier wurden sehr gute Übereinstimmungen zwischen den Messsystemen beobachtet.

Durch die viel höhere zeitliche Auflösung des 2D-ALCA konnte das Leistungsspektrum der Windgeschwindigkeit in einer neuen Qualität analysiert werden und das Kolmogorov-5/3-Gesetz des Inertialbereichs im Frequenzspektrum über 6 Dekaden experimentell nachgewiesen werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse dieses Projekts sollen im Rahmen einer Präsentation auf der *DEWEK* 2017 in Bremen vorgestellt und einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Eine mögliche Publikation in einer Fachzeitschrift wird ebenfalls erwogen.

Fazit

Durch die Weiterentwicklung des 2D-ALCA konnte eine neuartige Messmethode validiert werden, welche die Robustheit von bekannten, für den Offshore-Bereich geeigneten Anemometern mit der zeitlichen Auflösung von Hitzdrähten kombiniert und somit eine neue Qualität der Turbulenzmessung in der atmosphärischen Grenzschicht ermöglicht. Im Anschluss an dieses Projekt soll das System im Rahmen einer Produktentwicklung zur Marktreife gebracht werden. Damit würde der Industrie ein nützliches Tool zur Turbulenzmessung im Offshore-Bereich an die Hand gegeben werden, welches einerseits durch seine Robustheit den dort herrschenden Umweltbedingungen standhalten kann, andererseits aber zeitlich und räumlich hochauflösende Messungen ermöglicht, die bislang nur unter Laborbedingungen möglich sind. Ebenfalls sind Anwendungen in anderen Forschungszweigen denkbar, wie Turbulenzmessungen unter Wasser.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen	5
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	6
Begriffe	6
Abkürzungen	6
Defitionen	6
1 Zusammenfassung	7
2 Einleitung	8
3 Hauptteil	11
3.1 AP 1: Weiterentwicklung des 2D-ALCA	12
3.2 AP 2: Weiterentwicklung der Peripherie	13
3.3 AP 3: Charakterisierung im Windkanal	14
3.4 AP 4: Vorabtests und Ausbringung auf FINO3	14
3.5 AP 5: Offshore-Freifeldmessungen auf FINO3	15
3.6 AP 6: Rückbringung des 2D-ALCA	16
3.7 AP 7: Auswertung der Daten	17
Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung	22
Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse	22
Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse	23
4 Fazit	24
Literatur	25

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

1	Darstellung des Messprinzips des 2D-ALCA. a) Bei der Verbiegung und b) der Verdrehung des Cantilevers wird ein Laserstrahl entsprechend auf dem 2D-PSD ausgelenkt. c) Umsetzung des Messprinzips im 2D-ALCA.	11
2	Aufbau des 2D-ALCA. a) schematischer Aufbau. b) Größenvergleich der 2D-ALCA-Generationen. Oben das ältere Modell aus einem früheren Projekt, unten die aktuelle Weiterentwicklung.	12
3	Schematischer Aufbau des Cantilevers.	12
4	Schematische Darstellung der Abdeckung des 2D-ALCA.	13
5	Charakterisierung des 2D-ALCA. a) Aufbau im Windkanal. b) Aus den im Windkanal gemessenen Spannungspaaren entstandene Kalibrierfläche. . . .	14
6	Ausrichtung des 2D-ALCA auf der FINO. a) schematische Darstellung der relativen Positionierung der Messgeräte. b) Aufnahme des montierten Sensors.	15
7	Workflow (links) und Beispiel (rechts) zur Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung.	17
8	Zeitreihe der 2D-ALCA-Messung im Vergleich mit dem Ultraschallanemometer (Ausschnitt aus Messung 11). a) Windgeschwindigkeit, b) Windrichtung. Man beachte die verschiedenen Zeitskalen.	18
9	Übersicht über die gewonnenen Winddaten. Die zugehörigen Werte finden sich in Tab. 2. Rechts: Messungen vom 16.09.2016. Links: Messungen vom 25.09.2016. Von oben nach unten: mittlere Geschwindigkeit (\bar{v}), Strömungsrichtung (α) und Turbulenzintensität (TI)	20
10	FFT der Zeitreihe für die Windgeschwindigkeit. a) Messung 8, b) Messung 11.	21
11	Abhängigkeit der Grenzfrequenz von der mittleren Windgeschwindigkeit.	22

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht über die Messungen	16
2	Übersicht der gemessenen Winddaten.	19

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Begriffe

sonic	Ultraschallanemometer „Ultrasonic anemometer“
cup	Schalensternanemometer „Cup anemometer“
vane	Windfahnenanemometer „Vane anemometer“

Abkürzungen

2D-ALCA	2d-Laser Cantilever Anemometer
2D-PSD	2D Position Sensitive Detector
FINO3	Forschungsplattform in Nord- und Ostsee Nr. 3
KWK	Kaiser-Wilhelm-Koog

Definitionen

\bar{v}	$\frac{m}{s}$	mittlere Geschwindigkeit
\tilde{v}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeitsfluktuation
α	$^{\circ}$	Strömungsrichtung
U	V	Spannung
TI	1	Turbulenzintensität

1 Zusammenfassung

Das Projekt hat zum Ziel, ein bestehendes Messsystem – das 2d-Laser Cantilever Anemometer (2D-ALCA), welches zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeit und -richtung eingesetzt wird – weiter zu entwickeln und dieses System unter realistischen Bedingungen in Offshore-Windfeldern zu erproben. Damit soll eine neuartige zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messung des Offshore-Windfelds ermöglicht werden, welche die bestehenden am Markt erhältlichen Messverfahren deutlich übertrifft.

Dazu wurde zunächst der von der Universität Oldenburg zusammen mit der Fachhochschule Kiel entwickelte Sensorelement verkleinert, um eine Erhöhung seiner Resonanzfrequenz zu erzielen, die außerhalb des Messbereichs (oberhalb 50 kHz) liegt. Um die Robustheit des Messgeräts in der Offshore-Umgebung zu erhöhen, wurde eine Schutzgarage konstruiert, in der der Sensor geschützt vor äußeren Einflüssen ist und aus der er nur für Messungen per Fernsteuerung herausgefahren wird. Ebenso wurde eine Nachführung entwickelt, die es ermöglicht bei Änderungen der Windrichtung die Ausrichtung des Sensors ebenfalls anzupassen, so dass ein Winkelbereich von 180° abgedeckt werden kann. Darüber hinaus wurde eine Temperaturregelung in das System integriert um Driften im Messsignal auf Grund von Temperaturschwankungen zu minimieren.

Diese Modifikationen wurden zunächst erfolgreich im Windkanal der Universität Oldenburg getestet. Anschließend wurde das 2D-ALCA-System vom DNV-GL auf die Forschungsplattform in Nord- und Ostsee Nr. 3 (FINO3) ausgebracht und Messungen des Offshore-Windfeldes durchgeführt. Auch wenn nur an zwei Messtagen Daten aufgenommen werden konnten, war es möglich, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen des Windfeldes durchzuführen. Dabei ist es nach unseren Kenntnissen zum ersten Mal gelungen, das *Kolmogorov-5/3-Gesetz* [Kol41] für den Inertialbereich des Frequenzspektrums in der atmosphärischen Grenzschicht unter Offshore-Bedingungen über einen Frequenzbereich von 6 Dekaden experimentell nachzuweisen.

Dieses Projekt hat das Messprinzip des ALCA validiert, so dass in einem weiteren Schritt zusammen mit der Sea & Sun GmbH, Trappenkamp eine Produktentwicklung in deren Haus angestrebt werden soll. Erste Gespräche dazu sind am Ende der Projektlaufzeit bereits durchgeführt worden und sind vielversprechend verlaufen.

Antragssteller ist die Fachhochschule Kiel. Als Kooperationspartner war die Universität Oldenburg in das Projekt mit eingebunden. Für eine mögliche Weiterentwicklung hin zur Marktreife des Sensors wurde die Sea & Sun GmbH in das Projekt eingebunden. Das Projekt wurde gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 32399/01.

2 Einleitung

Die erfolgreiche Entwicklung der Offshore-Windenergie spielt im Konzept der im Jahr 2011 durch die Bundesregierung beschlossenen Energiewende eine wichtige Rolle. Dazu zählen insbesondere neue und intelligente Konzepte zum Ausbau der zugehörigen Netzanbindung sowie die stetige Verbesserung (Optimierung) aller Komponenten der Offshore-Windkraftanlagen, damit deren Stromgestehungskosten im Jahr 2020 um bis zu 40% reduziert werden können [Bul15].

Die Komponenten von Offshore-Windkraftanlagen unterscheiden sich von denen von Onshore-Anlagen vor allem durch spezielle Gründungsstrukturen sowie angepassten Rotorblättern. Die verschiedenen Designs sind in den abweichenden Anströmbedingungen begründet, die durch Unterschiede der topographischen Gegebenheiten und der meteorologischen Bedingungen zustande kommen.

Bislang gibt es jedoch keine Vergleichsmessungen in der geforderten Genauigkeit, welche die Unterschiede zwischen atmosphärischen Grenzschichten in Offshore- und Onshore-Gebieten aufzeigen. Momentan sind lediglich grobe Abschätzungen verfügbar, welche auf 10min-Mittelwerten basieren (siehe [TE07]).

Diese Abschätzungen lassen jedoch vermuten, dass das Offshore-Windfeld viel „böiger“ ist, das heißt, dass große Geschwindigkeitsfluktuationen auf kurzen Zeitskalen ($<1s$) auftreten können. Diese Eigenschaft wird „Intermittenz“ genannt und ist von zentraler Bedeutung bei der Charakterisierung atmosphärischer Grenzschichten [MHA12].

Da intermittente Windfelder hohe Lasten an Windkraftanlagen verursachen, die zu Beschädigungen führen können, ist zur Bekämpfung dieser Gefahr eine sehr genaue Kenntnis der Struktur des Windfeldes nötig, also zu wissen, welche Wirbelgrößen wie häufig auftreten können. Dabei ist ebenfalls die Untersuchung der kleinsten Wirbelstrukturen im Bereich weniger Millimeter notwendig. Auch wenn diese keinen bedeutenden Beitrag zu den Lasten liefern, sind sie entscheidend für die Aerodynamik der Rotoren und damit für den Ertrag der Windkraftanlage. Weiterhin dienen hochaufgelöste Daten als Grundlage für die Entwicklung von Turbulenzmodellen, die wiederum essenziell für CFD-Rechnungen sind [BHF⁺09, MHA12]. Diese Simulationen werden häufig in Forschung und Industrie als kostengünstige Alternative zu aufwändigen Messungen eingesetzt und erfahren durch stetig steigende Rechenleistung von Computern zunehmende Beliebtheit.

Auch wenn die Nachfrage nach hochaufgelösten Windgeschwindigkeitsdaten seitens der Industrie und Forschungsgemeinde sehr hoch ist, existieren derzeit keine derartigen Messungen im Offshore-Bereich und nur sehr wenige Messungen im Onshore-Bereich [SLS08, NEG⁺09, SD98, SLS07]. Dies liegt begründet im Fehlen entsprechend geeigneter Messinstrumente. Für Messungen im Windkanal sind Hitzdrähte für hochaufgelöste Messungen ein weitverbreiteter Standard, auf Grund ihrer Beschaffenheit ($1-5\mu m$ dick) aber für einen Einsatz im Offshore-Bereich nicht für langfristige Messungen ungeeignet.

Daher haben sich robustere Messmethoden für den Einsatz in atmosphärischen Grenzschichten etabliert, die bekanntesten Vertreter dieser Anemometer sind Schalensternanemometer „Cup anemometer“ (cup) und Ultraschallanemometer „Ultrasonic anemometer“ (sonic). Beim *cup* werden typischerweise drei Schalen, die an einer leicht rotierenden Achse befestigt sind, durch die Strömung in Bewegung versetzt. Nach erfolgter Kalibrierung kann aus der Rotationsfrequenz des *cup* die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Über eine Windfahne kann die Anströmrichtung gemessen werden. Das Messprinzip des *sonic* basiert auf einer Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen zwischen zwei Schallwandlern. Durch Laufzeitunterschiede kann die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Durch die Verwendung mehrerer zueinander in bekannten Positionen angeordneter Schallwandler kann zeitgleich die Anströmrichtung ermittelt werden. Jedoch sind Anemometer auf Grund ihrer geringen zeitlichen Auflösung (1-20 Hz) nicht für eine genaue Charakterisierung der atmosphärischen Grenzschicht geeignet. Bei einer Windgeschwindigkeit von beispielsweise $v = 20m/s$ weisen sie eine räumliche Auflösung zwischen 1-20m auf.

Neben diesen invasiven Messmethoden werden auch nicht-invasive Messverfahren eingesetzt. Die am weitesten verbreiteten Methoden sind PIV (Particle Image Velocimetry) und LIDAR (Light Detection And Range). Beide Methoden vermessen die Trajektorien von Tracer-Partikeln. Diese müssen entweder der Strömung zugegeben werden oder sind bereits in der Strömung vorhanden (Staubpartikel, Aerosole). Bei PIV werden die Partikel mit Laserimpulsen beleuchtet und deren Reflektion mit Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen. Mittels Korrelationen zwischen Einzelbildern werden die Trajektorien und damit das Strömungsfeld bestimmt. Diese Methode ist jedoch sehr rechenintensiv, so dass nur kurze Sequenzen aufgenommen werden können.

Beim LIDAR wird der Dopplereffekt zur Bestimmung der Geschwindigkeit genutzt. Im Gegensatz zu PIV wird LIDAR für Messungen in der atmosphärischen Grenzschicht vielfach eingesetzt. Mit einer räumlichen Auflösung von 10-50m reicht die Auflösung jedoch auch nicht für eine vollständige Charakterisierung der Grenzschicht.

Somit bedarf es einer neuartigen Messmethode, die einerseits robust ist, um den widrigen Bedingungen der Atmosphäre im Offshore-Bereich zu widerstehen, andererseits jedoch zeitlich und räumlich hochaufgelöst ist, so dass eine vollständige Charakterisierung der atmosphärischen Grenzschicht ermöglicht wird.

Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts zwischen der Fachhochschule Kiel und der Universität Oldenburg wurde an dieser Herausforderung gearbeitet. Dabei wurde das 2D-ALCA entwickelt, welches sowohl räumlich als auch zeitlich hochaufgelöste Messungen im Offshore-Bereich ermöglicht. Das Messprinzip beruht auf einer laserbasierten Messung der Auslenkung eines sehr kleinen Biegebalkens, welcher durch die Strömung ausgelenkt wird. Dieses Sensorelement ist im Vergleich zu Hitzdrähten sehr robust gegen äußere Einflüsse und eignet sich somit grundsätzlich für den Einsatz im Offshore-Bereich.

Damit könnte der Offshore-Windindustrie ein neuartiges Messinstrument zur Optimierung der Anströmbedingungen von Rotorblättern an die Hand gegeben werden. Die daraus resultierenden Umwelteffekte (z.B. Wirkungsgraderhöhung, Minimierung der Geräuschemission etc.) sind nicht nur im Hinblick auf die Energiewende und die notwendige Akzeptanz in der Bevölkerung wesentlich.

Ziel dieses Projekts ist die Weiterentwicklung des bestehenden 2D-ALCA-Messsystems, um die in einem früheren Projekt [JS12] aufgetretenen Probleme zu umgehen, damit am Ende dieses Projekts ein funktionstüchtiger Prototyp steht, der im Rahmen einer Kooperation mit der Sea & Sun GmbH zu einer möglichen Produktentwicklung geeignet ist.

Damit eine bessere zeitliche Auflösung (>10 kHz) erreicht werden kann, soll ein gewichtsreduzierter Cantilever entwickelt werden, damit dessen Resonanzfrequenz außerhalb des Messbereichs liegt. Darüber hinaus soll eine Nachführung entwickelt werden, damit die Offshore-Messungen unabhängiger von der Windrichtung durchgeführt werden können und eine plötzliche Änderung der Windrichtung nicht den Abbruch oder sogar den Ausfall der Messung zur Folge hat. Weiterhin soll die Zuverlässigkeit der Messwerte weiter erhöht werden, indem eine Temperaturregelung den Sensor unabhängiger von Temperaturschwankungen macht und somit Umwelteinflüsse nicht so stark ins Gewicht fallen. Um die Lebensdauer des Messsystems insgesamt zu verlängern soll darüber hinaus eine Abdeckung konstruiert werden, aus der der Sensor nur für die Messungen herausgefahren wird. Diese Maßnahmen haben alle zum Ziel das 2D-ALCA robuster und widerstandsfähiger gegenüber den Offshore-Bedingungen in der Nordsee zu machen. Um die Wirksamkeit dieser Verbesserungen aussagekräftig beurteilen zu können, sollen Freifeldmessungen auf der FINO3 in der Nordsee durchgeführt werden und das System ausgiebig getestet werden.

Um die aufgelisteten Ziele zu erreichen, wird zunächst die Gewichtsreduktion des Cantilevers vorangetrieben. Dies wird von der Universität Oldenburg durchgeführt. Dazu wird geprüft, ob anstelle von Edelstahl auch Silizium verwendet werden kann, welches mit Gold bedampft wird, so dass die Resonanzfrequenz deutlich erhöht werden kann, damit eine bes-

sere zeitliche Auflösung erreicht werden kann. Dieser Schritt ist kritisch um das Projekt erfolgreich durchführen zu können.

Parallel dazu wird die Funktionalität des 2D-ALCA vorangetrieben, ebenfalls von der Universität Oldenburg durchgeführt. Es soll eine Abdeckung für den Sensor entwickelt und gebaut werden, ebenso eine Nachführung sowie eine Temperaturregelung.

Nachdem diese Schritte durchgeführt worden sind, soll das System auf seine Funktionalität getestet werden. Dazu soll es zunächst unter Laborbedingungen im Windkanal der Universität Oldenburg charakterisiert werden und mit anderen Messgeräten verglichen werden, um Aussagen über seine Leistungsfähigkeit treffen zu können.

Nach Abschluss dieser Tests sollen unter realistischen Offshore-Bedingungen Messungen durchgeführt werden. Dazu muss zunächst die gesamte Messelektronik auf diese Bedingungen abgestimmt werden, bevor das System auf die FINO3 in die Nordsee ausgebracht wird. Dafür wird die Expertise des DNV-GL genutzt, deren Mitarbeiter bereits weitreichende Erfahrungen im Bereich Offshore-Messtechnik aufweisen.

Das Herzstück dieses Projekts bilden die Messungen auf FINO3, die einen möglichst umfassenden Einblick in die Offshore-Windbedingungen geben sollen. Dazu ist angestrebt, eine hohe Anzahl von Messreihen bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten aufzunehmen. Die dabei vom DNV-GL aufgenommenen und bereitgestellten Daten sollen im Anschluss von der FH Kiel ausgewertet werden.

Nach Ende der Messkampagne soll der Sensor inklusive Messequipment zurück an Land gebracht werden um zu überprüfen, wie der Sensor die Offshore-Bedingungen überstanden hat um Aussagen über einen möglichen Langzeiteinsatz treffen zu können.

Parallel dazu soll eine detaillierte Dokumentation des Projekts erstellt werden, um die gewonnenen Erkenntnisse im Anschluss einer breiten Öffentlichkeit im Rahmen einer Veröffentlichung zugänglich machen zu können.

3 Hauptteil

Das Hauptziel dieses Projekts war die Weiterentwicklung des 2D-ALCA, welches bereits in einem früheren Projekt sowohl onshore als auch offshore erprobt wurde. Dazu werden im Folgenden die einzelnen Arbeitspakete diskutiert, die zum Gelingen dieses Vorhabens beigetragen haben. Zunächst soll jedoch kurz das Messprinzip des 2D-ALCA erläutert werden.

Messprinzip Die Funktionsweise des 2D-ALCA beruht auf dem Prinzip des Lichtzeigers (siehe Abb. 1). Dabei wird ein Laser auf die reflektierende Oberfläche eines Biegebal-kens (Cantilever) ausgerichtet und der Laserreflex auf einem 2D Position Sensitive Detector (2D-PSD) registriert. Wird der Cantilever durch eine Strömung verbogen, so wird der Laserreflex entlang einer Achse auf dem 2D-PSD ausgelenkt [Abb. 1 a)]. Erfolgt die Anströmung unter einem Winkel, so wird der Cantilever tordiert, wodurch der Laserreflex entlang einer zweiten Achse ausgelenkt wird [Abb. 1 b)]. Somit wird jedem Punkt auf dem 2D-PSD ein Wertepaar aus Anströmgeschwindigkeit v und Anströmwinkel α zugewiesen. Mit Hilfe einer Kalibrierung im Windkanal können somit aus den am 2D-PSD gemessenen Spannungspaaren $[U_1, U_2]$ die physikalischen Strömungsparameter $[v, \alpha]$ bestimmt werden (Kap. 3.3).

In Abb. 1 c) ist der Aufbau im 2D-ALCA schematisch dargestellt. Durch den Einsatz einer Strahlteilerplatte kann der gesamte Aufbau sehr kompakt gestaltet werden, wodurch die Gesamtgröße des Messgeräts klein gehalten werden kann. Einen Überblick über die Anordnung der einzelnen Komponenten ist in Abb. 2 a) dargestellt.

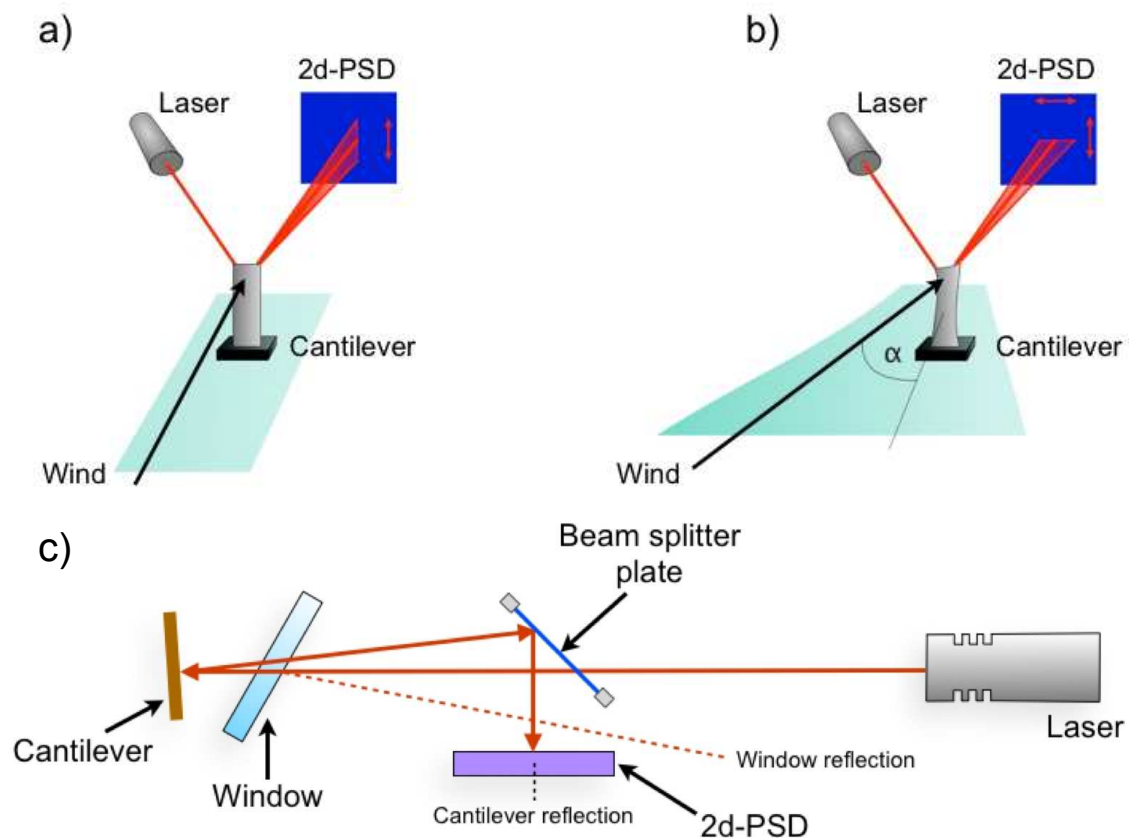


Abb. 1: Darstellung des Messprinzips des 2D-ALCA. a) Bei der Verbiegung und b) der Verdrehung des Cantilevers wird ein Laserstrahl entsprechend auf dem 2D-PSD ausgelenkt. c) Umsetzung des Messprinzips im 2D-ALCA.

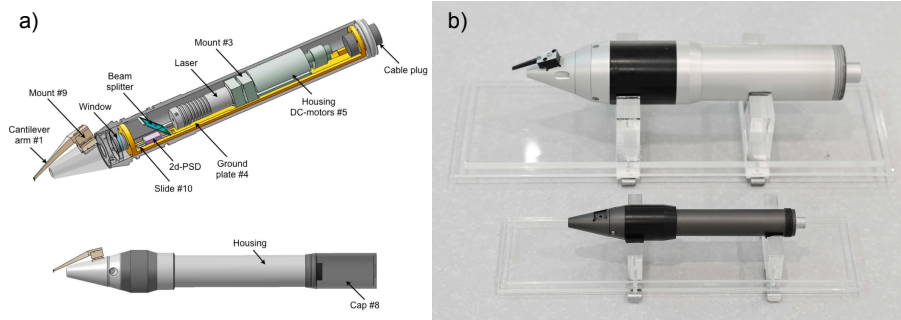


Abb. 2: Aufbau des 2D-ALCA. a) schematischer Aufbau. b) Größenvergleich der 2D-ALCA-Generationen. Oben das ältere Modell aus einem früheren Projekt, unten die aktuelle Weiterentwicklung.

3.1 AP 1: Weiterentwicklung des 2D-ALCA

Ein Problem des 2D-ALCA aus dem vorherigen Projekt [siehe Abb. 2 b)] [JS12] war die Größe des Cantilevers und damit einhergehend seine Masse. Durch die Verwendung eines zusätzlich aufgeklebten Spiegels zur Reflektion des Lasers hatte der Cantilever eine Resonanzfrequenz, die genau im gewünschten Messbereich lag. Dadurch wurden die Messungen sehr stark beeinträchtigt, so dass Messungen nur im Bereich bis etwa 1 kHz möglich waren.

Verschiebung der Resonanzfrequenz Daher wurde angestrebt, die Resonanzfrequenz des Cantilever in den Bereich >10 kHz zu verschieben. Dies ist durch eine Verkleinerung des Cantilevers erreicht worden. Dazu wurde der Cantilever aus Silizium (Si), Siliziumdioxid (SiO_2) und SU-8 mikrostrukturiert. Der schematische Aufbau des Cantilevers ist in Abb. 3 gezeigt. Der Auftrag für die Fertigung wurde an die Firma Micromotive vergeben.

Die Unterseite des Cantilevers wurde mit einer Nickel-Gold-Schicht (Ni/Au) bedampft, welche den Laserstrahl ohne einen zusätzlichen Spiegel reflektiert, so dass der Cantilever durch seine geringere Masse nun eine Resonanzfrequenz >10 kHz und damit außerhalb des Messbereichs besitzt.

Für eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Anströmungen unter einem Winkel wurde eine Fahne aus SU-8 mittig auf der Oberseite des Cantilever aufgebracht. Für eine gute Messqualität musste diese Fahne exakt zentriert werden, was auf Grund der Größe der Struktur sehr zeitintensiv war. Dadurch kam es zu Verzögerungen in der Lieferung der Cantilever. Diese Verzögerung im Zeitplan des Projekts konnte jedoch im Verlauf der weiteren Arbeitsschritte wieder ausgeglichen werden.

Der Cantilever ist trotz seiner Größe beständig gegenüber Wettereinflüssen und weist eine hohe Sensitivität im Geschwindigkeitsbereich von 4-35m/s auf. Somit ist er optimal geeignet für die Bedingungen in der atmosphärischen Grenzschicht im Offshore-Bereich.

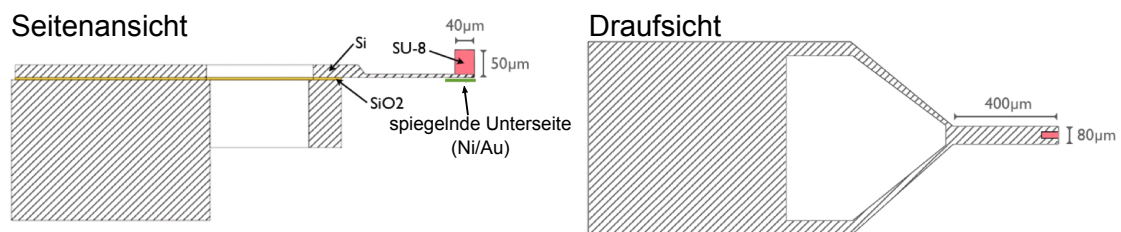


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Cantilevers.

3.2 AP 2: Weiterentwicklung der Peripherie

Neben der Weiterentwicklung des 2D-ALCA wurde ebenfalls die Peripherie weiterentwickelt. Dabei wurden drei Kernprobleme der Messungen im vorherigen Projekt [JS12] angegangen. Zum einen wurde ein Driften des Laserstrahls auf Grund von Temperaturschwankungen in der Umgebung beobachtet. Weiterhin war der Sensor bereits nach kurzer Zeit durch die Umweltbedingungen in der Nordsee defekt, so dass keine Messungen mehr möglich waren. Ebenfalls trat das Problem auf, dass durch eine unglücklich gewählte Ausrichtung des ALCA bei der Montage auf der FINO3 die Anströmung „von hinten“ kam, so dass keine aussagekräftigen Daten gewonnen werden konnten. Um diese Limitierungen zu umgehen, wurden mehrere Anpassungen an der Peripherie vorgenommen.

Temperaturregelung Da das Messsystem als zu vertreibendes Produkt für den Dauereinsatz konzipiert sein soll, muss es Temperaturschwankungen (Tag-Nacht-Wechsel, Jahreszeiten, Sonneneinstrahlung) schadlos vertragen. Bei der früheren Variante wurde eine Drift des Signals auf Grund von Temperaturschwankungen beobachtet. Daher wurde um das ALCA eine Heizspule angebracht, die das 2D-ALCA auf einer konstanten Temperatur von 32 °C hält (siehe Abb. 4). Da die Messungen im Rahmen dieses Projekts im Herbst 2016 durchgeführt wurden, konnte davon ausgegangen werden, dass keine höheren Temperaturen zu erwarten waren. In der verwendeten Konfiguration bestand nur die Möglichkeit, das System zu heizen, jedoch nicht zu kühlen. Beim Einsatz im Offshore-Bereich in norddeutschen Breiten sollte dies jedoch keine Probleme darstellen.

Abdeckung Um die Lebensdauer des 2D-ALCA zu verlängern, wurde eine Abdeckung entwickelt. Diese wurde aus wetterbeständigem ABS-Kunststoff gefertigt. Abb. 4 zeigt den schematischen Aufbau der Abdeckung. Die Funktionsweise basiert auf einem Motor (angesteuert über LAN), der einen Schlitten über ein Zahnrad antreibt. Auf diesem Schlitten befindet sich das 2D-ALCA zusammen mit der Heizspule. Der Deckel ist mit Federn vorgespannt und wird lediglich vom Schlitten aufgeschoben. Somit ist der Sensor vor äußeren Wettereinflüssen geschützt, wenn er nicht zu einer Messung genutzt wird, wodurch seine Lebensdauer deutlich verlängert wird.

Nachführung Da sich die Windrichtung in turbulenten Strömungen im Offshore-Bereich schnell ändern kann, ist eine starre Ausrichtung des 2D-ALCA nicht wünschenswert und kann zum Ausfall einer Messung führen. Vielmehr ist eine Nachführung, die den Sensor optimal zum Wind ausrichtet, eine Option für eine bessere Verfügbarkeit der Messmethodik. Dazu wurde die Abdeckung auf eine zu diesem Zweck entwickelte Nachführungsvorrichtung montiert. Die Nachführung wird ebenfalls mit einem Motor (angesteuert über LAN)

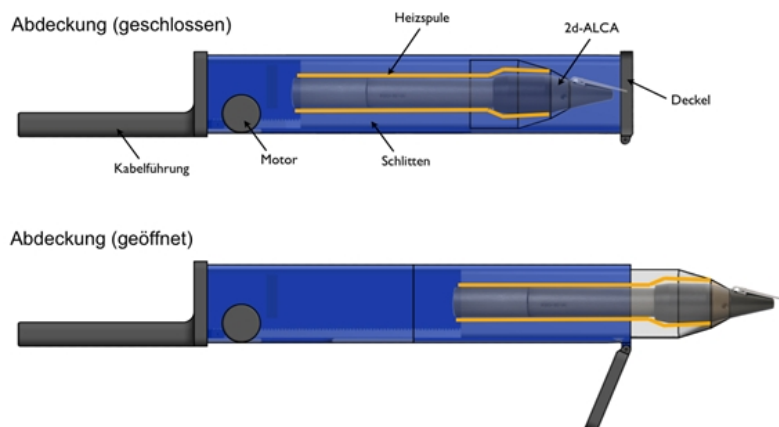


Abb. 4: Schematische Darstellung der Abdeckung des 2D-ALCA.

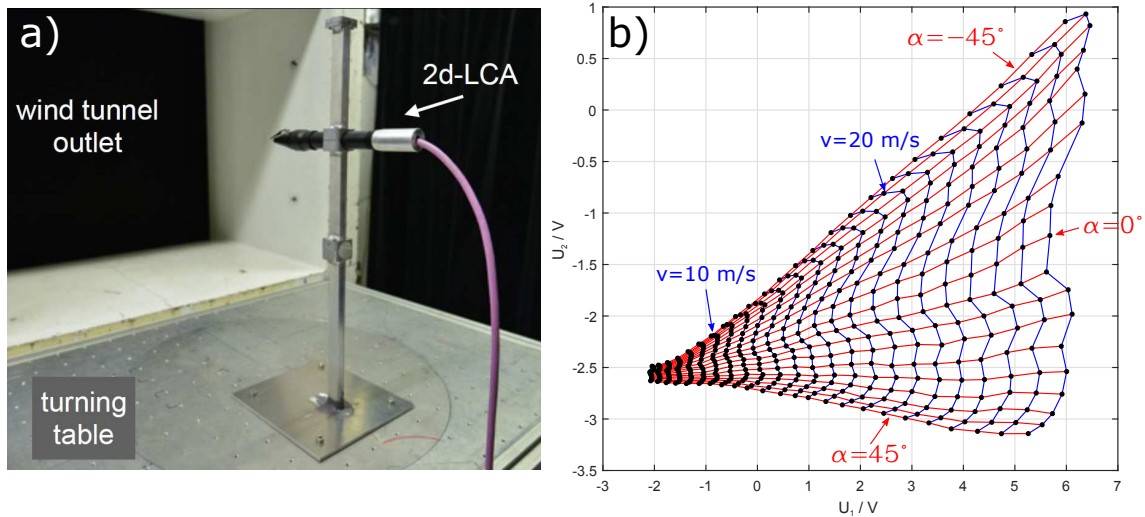


Abb. 5: Charakterisierung des 2D-ALCA. a) Aufbau im Windkanal. b) Aus den im Windkanal gemessenen Spannungspaaren entstandene Kalibrierfläche.

betrieben. Auf Grund der begrenzten Möglichkeiten der Fernsteuerung des Systems auf der FINO3 wurde die Nachführung mit Endschaltern versehen, so dass zwei Endpositionen angefahren werden konnten. Diese entsprechen Ausrichtungen im rechten Winkel zueinander. Da das 2D-ALCA einen Akzeptanzbereich von $\pm 45^\circ$ besitzt (Kap. 3.3), ist somit eine maximale Abdeckung von 180° möglich, eine erhebliche Verbesserung gegenüber der starren Variante des früheren Projekts [JS12]

3.3 AP 3: Charakterisierung im Windkanal

Nachdem die Weiterentwicklung des 2D-ALCA abgeschlossen war, wurde er im Windkanal der Universität Oldenburg vermessen und charakterisiert. Der Aufbau ist in Abb. 5 a) gezeigt. Das 2D-ALCA auf einem Drehteller vor dem Auslass des Windkanals positioniert. Für die Kalibrierung werden für feste Anströmgeschwindigkeiten und Winkelpositionen die Spannungen U_1 , U_2 des 2D-PSD gemessen. Daraus ergibt sich eine zweidimensionale Kalibrierfläche mit den Messwerten als Stützpunkte. Diese Fläche ist in Abb. 5 b) gezeigt. Die Messwerte sind schwarze Punkte, während Linien gleicher Geschwindigkeit blau und Linien gleichen Winkels zur besseren Sichtbarkeit rot dargestellt sind. Somit ergibt sich innerhalb dieser Fläche eine eindeutige Zuordnung jedes Spannungspaars $[U_1, U_2]$ zu einem Geschwindigkeits-Winkel-Paars $[v, \alpha]$ im Bereich von $v=[4,30]$ m/s und $\alpha=[-45^\circ, 45^\circ]$. Spannungspaare, die außerhalb dieser Fläche liegen, können keinen physikalischen Werten zugeordnet werden und bekommen den Wert NaN zugewiesen.

Anschließend wurde ein Vergleich zwischen 2D-ALCA und einer Hitzdraht-Sonde durchgeführt. Beide Messsysteme wiesen eine sehr gute Übereinstimmung auf, so dass das 2D-ALCA für Messungen im Offshore-Bereich auf der FINO3 einsatzbereit war.

3.4 AP 4: Vorabtests und Ausbringung auf FINO3

Ein Ziel des Projekts war die Vermessung der Turbulenz des Windes im Offshore-Bereich, um genauere Erkenntnisse über die Energieverteilung in der Atmosphäre zu gewinnen. Wie bereits im vorherigen Projekt wurde dafür das System auf die Forschungsplattform FINO3 ausgebracht. Der DNV-GL als externer Partner hat bereits langjährige Erfahrung in der Ausbringung und Überwachung von Messgeräten im Offshore-Bereich und war bereits im vorherigen Projekt mit eingebunden.

Um einen möglichst reibungslosen Ablauf auf der FINO3 zu realisieren, wurde noch im Entwicklungsstadium ein Vorabtest im Kaiser-Wilhelm-Koog (KWK) in den Räumen

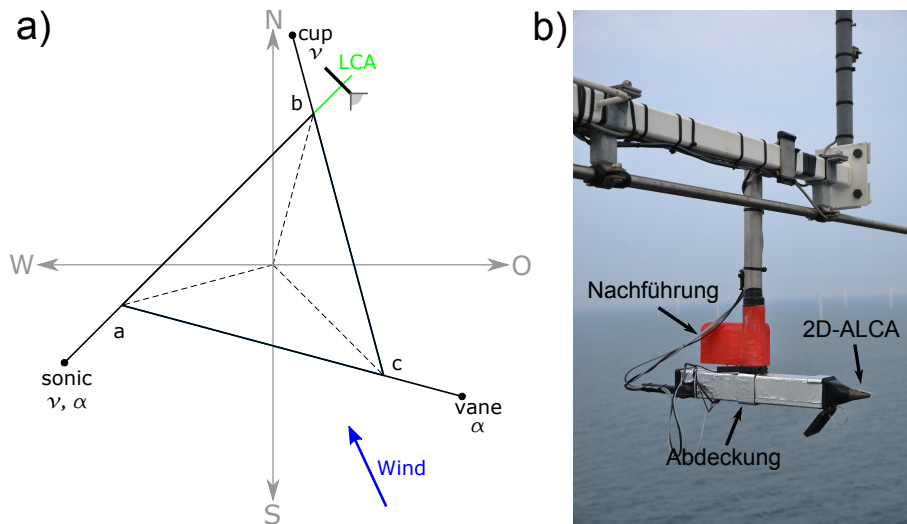


Abb. 6: Ausrichtung des 2D-ALCA auf der FINO. a) schematische Darstellung der relativen Positionierung der Messgeräte. b) Aufnahme des montierten Sensors.

des DNV-GL durchgeführt. Dabei wurde getestet, ob die bisher verwendete Messelektronik auch mit der weiterentwickelten Version des ALCA kompatibel ist. Da dieser Test erfolgreich war, konnte auf das bestehende Equipment zugegriffen werden, so dass keine umfangreichen Änderungen am Aufbau nötig waren. Darüber hinaus wurde genau abgesprochen, welche Rahmenbedingungen auf der FINO3 für die Messungen vorgegeben sind. Daher wurde die gesamte Messelektronik in einer wasserdichten Metallbox eingehaust, um in der salzhaltigen Atmosphäre überdauern zu können. Da der Sensor auf 95m Höhe ü.N.N. Messungen durchführen soll, wurde eine spezielle Relais-Schaltung entwickelt, die es ermöglicht, per LAN den Sensor zu schwenken bzw. aus seiner Schutzgarage herauszufahren (siehe Kap. 3.2).

Nachdem diese Vorabtests erfolgreich abgeschlossen waren, wurde der Sensor inklusive der Messelektronik Mitte September 2016 auf die FINO3 ausgebracht und montiert. Neben einem Mitarbeiter der Universität Oldenburg waren Mitarbeiter des DNV-GL vor Ort, um die Installation zu überwachen und erste Testmessungen durchzuführen, damit ein reibungsloser Ablauf der Freifeldmessungen gewährleistet werden konnte. Abb. 6 zeigt die Positionierung des ALCA auf dem Ausleger in 95 m ü.N.N. zusammen mit weiteren Messinstrumenten, die auf 100 m ü.N.N. befestigt sind und als Referenz genutzt werden. Daneben ist eine Aufnahme des montierten Sensors gezeigt.

3.5 AP 5: Offshore-Freifeldmessungen auf FINO3

Bei der Montage des ALCA wurde dieser in Richtung SO ausgerichtet. Mit Hilfe der Nachführung konnte eine Ausrichtung in O bzw. S erreicht werden. Positionen dazwischen waren aufgrund der eingeschränkten Steuermöglichkeiten nicht möglich. Da der Sensor jedoch einen Akzeptanzbereich von $\pm 45^\circ$ besitzt, konnten Windrichtungen von SW bis NO abgedeckt werden, was einem Bereich von 180° entspricht. Die Ausrichtung während der Montage wurde gewählt, da am Tag der Montage Wind aus SO vorherrschte und ebenfalls für die nächsten Tage vorhergesagt war.

Da der Wind jedoch an den Tagen nach der Montage hauptsächlich aus W kam, musste auf bessere Bedingungen gewartet werden. Ende September konnten bei guten Bedingungen weitere Messungen durchgeführt werden. Anfang Oktober herrschten weitere gute Windbedingungen, jedoch war es dem DNV-GL nicht möglich per Fernzugriff weitere Messungen zu starten. Grund dafür war wahrscheinlich ein Problem mit der LAN-Verbindung zwischen Messrechner am Fuß der Plattform und dem Datenlogger oben im Mast. Da eine Reparatur nur vor Ort durchgeführt werden konnte, sollte während eines Routineflugs zur

Tab. 1: Übersicht über die Messungen

#	Datum	Uhrzeit	f_{LCA}	f_{cup}	f_{vane}	f_{sonic}
1	16.09.2016	12:23	20 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
2	16.09.2016	12:34	20 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
3	16.09.2016	12:51	20 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
4	16.09.2016	13:01	20 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
5	16.09.2016	13:09	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
6	16.09.2016	13:20	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
7	16.09.2016	13:30	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
8	16.09.2016	13:44	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
9	25.09.2016	13:32	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
10	25.09.2016	13:42	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
11	25.09.2016	14:01	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
12	25.09.2016	14:15	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
13	25.09.2016	14:26	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz
14	25.09.2016	14:37	50 kHz	1 Hz	1 Hz	20 Hz

FINO3 diese durchgeführt werden. Jedoch waren die Witterungsbedingungen vor Ort so schlecht, dass erst Anfang Dezember die Möglichkeit bestand, das Problem zu beheben. Zu diesem Zeitpunkt lieferte der 2D-ALCA-Sensor jedoch keine brauchbaren Daten mehr, so dass nur an zwei Messtagen Daten aufgenommen werden konnten.

In Tab. 1 sind die wichtigsten Parameter der durchgeführten Messungen dargestellt. Am ersten Messtag (16.09.2016) waren Windgeschwindigkeiten im Bereich 6-8 m/s gegeben, während am zweiten Messtag (25.09.2016) höhere Geschwindigkeiten im Bereich 10-12 m/s gemessen wurden. Insgesamt konnten 14 Messreihen mit je 10 Minuten Länge aufgenommen und ausgewertet werden. Zeitgleich zu den Messungen mit dem 2D-ALCA wurde auf 100 m ü.N.N. die Windgeschwindigkeit mit einem Ultraschallanemometer (siehe Abb. 6, Bezeichnung *sonic*) und einem Schalensternanemometer (*cup*) gemessen. Ebenso wurde die Windrichtung mit dem *sonic* und einem Windfahnenanemometer (*vane*) gemessen.

Diese Daten wurden mit Hilfe eines Trigger-Impulses zeitgleich aufgenommen, so dass ein Vergleich der verschiedenen Messinstrumente möglich ist. Dazu wurde per Fernzugriff auf einem Messrechner, der sich auf der FINO3 befindet, zunächst das Signal zum Herausfahren des Sensors gesendet. Nachdem dieser vollständig herausgefahren war, wurde die Messung gestartet. Nachdem die Messserie beendet wurde, wurde der Sensor wieder in seine Schutzgarage zurückgefahren, um ihn vor weiteren Umwelteinflüssen zu schützen.

Die gewonnenen Daten vom 2D-ALCA, Ultraschallanemometer, Schalensternanemometer und Windfahne wurden auf einer externen Festplatte auf der FINO3 gespeichert. Bei einem Besuch der FINO3 durch den DNV-GL wurde die Festplatte zurückgeholt und an die FH Kiel übergeben, damit diese die Daten auswerten konnte.

3.6 AP 6: Rückbringung des 2D-ALCA

Vorgesehen war, dass nach Abschluss der Messungen das gesamte Messequipment vom DNV-GL zurückgeholt und den Projektpartnern übergeben wird, damit überprüft werden kann, wie die einzelnen Bauteile die Kampagne überstanden haben. Ziel dieser Untersuchung war, in einer möglichen sich an dieses Projekt anschließenden Projektentwicklung zusammen mit der Firma Sea & Sun GmbH noch weitere Verbesserungen des Aufbaus vorzunehmen um die Lebensdauer des Messsystems noch weiter zu erhöhen.

Da die LAN-Verbindung zwischen Messrechner und Sensoren auf der FINO3 nach dem zweiten Messtag gestört war, wurde der Wiederherstellung der Verbindung zwischen 2D-ALCA und Messrechner höchste Priorität eingeräumt. Auf Grund der schwierigen Witterungsbedingungen im Herbst 2016 mussten mehrere Flüge gestrichen werden oder es war

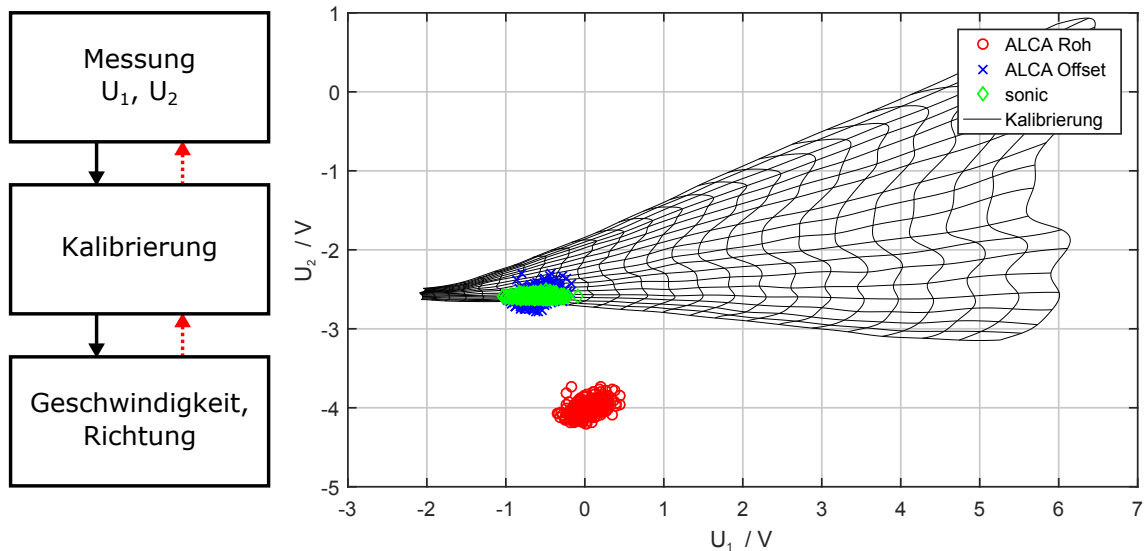


Abb. 7: Workflow (links) und Beispiel (rechts) zur Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung.

aus Sicherheitsgründen nicht möglich in den Mast zu steigen. Anfang Dezember konnte die LAN-Verbindung wiederhergestellt werden, jedoch lieferte der Sensor zu diesem Zeitpunkt keine Daten mehr. Da an diesem Tag Windgeschwindigkeiten von etwa 15 m/s gemessen wurden, wurde der Aufenthalt im Mast so kurz wie möglich gehalten und das Messequipment ist im Mast verblieben, da ein Abbau sicherheitstechnisch nicht zu verantworten gewesen wäre. Im Winter 2016/17 sind keine weiteren Flüge zur FINO3 durchgeführt worden, so dass der Sensor weiterhin auf der FINO3 verblieben ist. Im Frühjahr 2017 sind weitere Flüge geplant, so dass in deren Zuge dann auch die Rückbringung durch den DNV-GL erfolgen soll. Somit sind zu diesem Zeitpunkt keine Aussagen über den Gesamtzustand des 2D-ALCA möglich.

3.7 AP 7: Auswertung der Daten

Die vom DNV-GL zur Verfügung gestellten Daten wurden mit MATLAB ausgewertet. Zusätzlich wurde der FH Kiel die Kalibrierung des 2D-ALCA von der Universität Oldenburg zur Verfügung gestellt (siehe Kap. 3.3).

Bestimmung von v und α In Abb. 7 ist links der Workflow zur Bestimmung von Windgeschwindigkeit v und Windrichtung α skizziert. Bei der Messung wird die Position des Laserreflexes auf dem PSD-Sensor als ein Spannungspaar $[U_{1,A}, U_{2,A}]$ registriert. Der Index A steht für das 2D-ALCA. Mit Hilfe der vorher erfolgten Kalibrierung (Kap. 3.3) werden durch Interpolation auf der Kalibrierfläche das zugehörige Wertepaar $[v_A, \alpha_A]$ bestimmt. Diese Daten werden im Anschluss weiter ausgewertet.

Jedoch lagen alle Messwerte des 2D-ALCA außerhalb der Kalibrierfläche. Eine mögliche Ursache könnte eine Dejustage von wenigen μm während Transport und Montage des Systems sein. Dies ist jedoch nicht zweifelsfrei zu klären gewesen. Somit war eine einfache Bestimmung von v und α nicht möglich. Daher wurde das *sonic* als „Behelfskalibrierung“ verwendet. Die Untersuchungen im Windkanal haben gezeigt, dass das 2D-ALCA sehr gute Übereinstimmung mit Referenzmesssystemen aufweist. Da bei einer Windrichtung aus SSO sowohl das 2D-ALCA als auch das *sonic* vom Mast der FINO3 nicht beeinflusst werden, sollte eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Messgeräten zu erwarten sein. Daher wurde für die Messwerte des *sonic* die umgekehrte Reihenfolge gewählt, d.h., ausgehend von v_S und α_S wurden die zugehörigen Spannungswerte $U_{1,S}$ und $U_{2,S}$ bestimmt (in Abb. 7 durch rote Pfeile angedeutet). Im Vergleich mit den zugehörigen zeitgemittelten

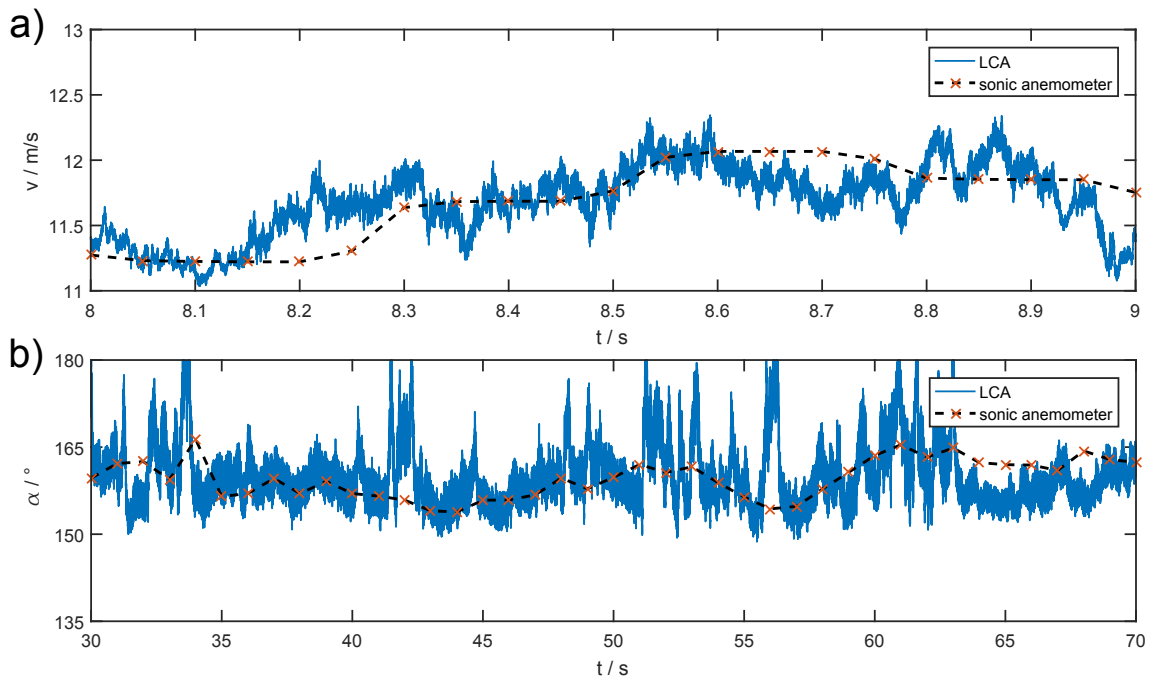


Abb. 8: Zeitreihe der 2D-ALCA-Messung im Vergleich mit dem Ultraschallanemometer (Ausschnitt aus Messung 11). a) Windgeschwindigkeit, b) Windrichtung. Man beachte die verschiedenen Zeitskalen.

Spannungswerten des 2D-ALCA wurde eine Offset-Korrektur der 2D-ALCA-Messwerte durchgeführt. Im Anschluss daran konnte dann die Bestimmung von v_A und α_A für die 2D-ALCA-Daten erfolgen.

In Abb. 7 ist rechts am Beispiel von Messung 11 dieses Verfahren dargestellt. Die zeitgemittelten 2D-ALCA-Rohdaten (rot) liegen außerhalb der Kalibrierfläche. Die aus den Messwerten des *sonic* gewonnenen Spannungswerte (grün) liegen in der Fläche. Mittels einer Offset-Korrektur (Verschiebung entsprechend der Spannungsdifferenzen der Mittelwerte der Zeitreihen zwischen *sonic* und 2D-ALCA) werden die 2D-ALCA-Daten in die Kalibrierfläche verschoben (blau). Anschließend werden aus den korrigierten Spannungswerten die physikalischen Größen v_A und α_A bestimmt. Spannungswertepaaren außerhalb der Kalibrierfläche wird dabei der Wert NaN zugewiesen.

In Abb. 8 ist ein Ausschnitt aus einer Zeitreihe dargestellt. Man sieht eine gute Übereinstimmung zwischen *sonic* und 2D-ALCA. Weiterhin ist jedoch ersichtlich, dass in der Zeitreihe des 2D-ALCA auf Grund der sehr viel höheren zeitlichen Auflösung bedeutend mehr Informationen enthalten sind. So können hochfrequente Änderungen in Windgeschwindigkeit und -richtung beobachtet werden, die vom *sonic* nicht aufgelöst werden können.

Vergleich der Messsysteme Eine Analyse der Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurde für alle Messungen durchgeführt. Dabei wurden die mittlere Windgeschwindigkeit \bar{v} und die Geschwindigkeitsfluktuation (\tilde{v}) (Standardabweichung) bestimmt. Darüber hinaus wurde die Turbulenzintensität $TI = \tilde{v}/\bar{v}$ bestimmt. Zusätzlich wurden die zugehörigen Windrichtungen (zeitliches Mittel und Standardabweichung) bestimmt. Eine Übersicht über diese Ergebnisse ist in Tab. 2 gegeben.

Für einen besseren Überblick über die Daten sind in Abb. 9 die in Tab. 2 angegebenen Messergebnisse grafisch dargestellt. Somit ist ein einfacher Vergleich zwischen den verschiedenen Messgeräten möglich. In der linken Spalte sind die Messungen vom ersten Messtag dargestellt, in der rechten Spalte entsprechend vom zweiten Messtag. Von oben nach unten sind Windgeschwindigkeit v , Windrichtung α und Turbulenzintensität TI gezeigt.

Tab. 2: Übersicht der gemessenen Winddaten.

Windgeschwindigkeiten						
#	v_C [m/s]	v_S [m/s]	v_A [m/s]	TI_C	TI_S	TI_A
1	7,54 ± 0,39	7,61 ± 0,32	7,63 ± 0,28	5,21%	4,23%	3,67%
2	7,58 ± 0,42	7,59 ± 0,39	7,58 ± 0,44	5,52%	5,20%	5,80%
3	7,14 ± 0,36	7,14 ± 0,36	7,17 ± 0,34	5,06%	5,06%	4,73%
4	7,17 ± 0,35	7,21 ± 0,33	7,23 ± 0,29	4,95%	4,58%	4,00%
5	6,87 ± 0,42	6,91 ± 0,41	6,93 ± 0,35	6,09%	5,94%	5,11%
6	6,34 ± 0,46	6,39 ± 0,44	6,41 ± 0,37	7,24%	6,94%	5,79%
7	6,24 ± 0,40	6,28 ± 0,39	6,32 ± 0,34	6,42%	6,18%	5,35%
8	6,23 ± 0,42	6,29 ± 0,40	6,34 ± 0,31	6,80%	6,38%	4,96%
9	11,31 ± 0,75	11,41 ± 0,68	11,42 ± 0,57	6,63%	5,97%	5,03%
10	10,32 ± 1,15	10,82 ± 0,60	10,86 ± 0,53	11,17%	5,50%	4,87%
11	9,88 ± 1,07	10,66 ± 0,58	10,70 ± 0,54	10,84%	5,43%	5,07%
12	9,07 ± 1,37	10,45 ± 0,58	10,50 ± 0,51	15,08%	5,59%	4,84%
13	9,23 ± 1,23	10,10 ± 0,66	10,14 ± 0,52	13,38%	6,53%	5,12%
14	9,91 ± 1,58	10,78 ± 0,66	10,81 ± 0,63	15,91%	6,08%	5,87%

Windrichtungen			
#	α_C [°]	α_S [°]	α_A [°]
1	147,85 ± 3,12	147,31 ± 3,22	145,92 ± 17,62
2	151,28 ± 2,96	150,44 ± 3,15	143,66 ± 20,99
3	153,28 ± 2,71	151,95 ± 2,84	152,18 ± 12,39
4	153,45 ± 2,35	151,98 ± 2,35	149,48 ± 19,51
5	155,70 ± 3,50	153,91 ± 3,54	153,98 ± 10,77
6	155,88 ± 3,54	154,46 ± 3,36	153,86 ± 10,90
7	154,13 ± 3,42	152,59 ± 3,49	151,94 ± 12,67
8	156,28 ± 3,69	154,63 ± 3,60	152,18 ± 16,06
9	159,14 ± 3,35	157,47 ± 3,18	157,44 ± 4,59
10	162,41 ± 3,38	160,13 ± 3,34	160,07 ± 4,78
11	163,73 ± 2,76	161,53 ± 2,98	161,65 ± 4,64
12	165,27 ± 2,78	163,07 ± 2,81	162,98 ± 4,87
13	163,59 ± 3,49	161,44 ± 3,66	161,45 ± 5,47
14	163,17 ± 4,28	160,97 ± 4,11	160,64 ± 4,92

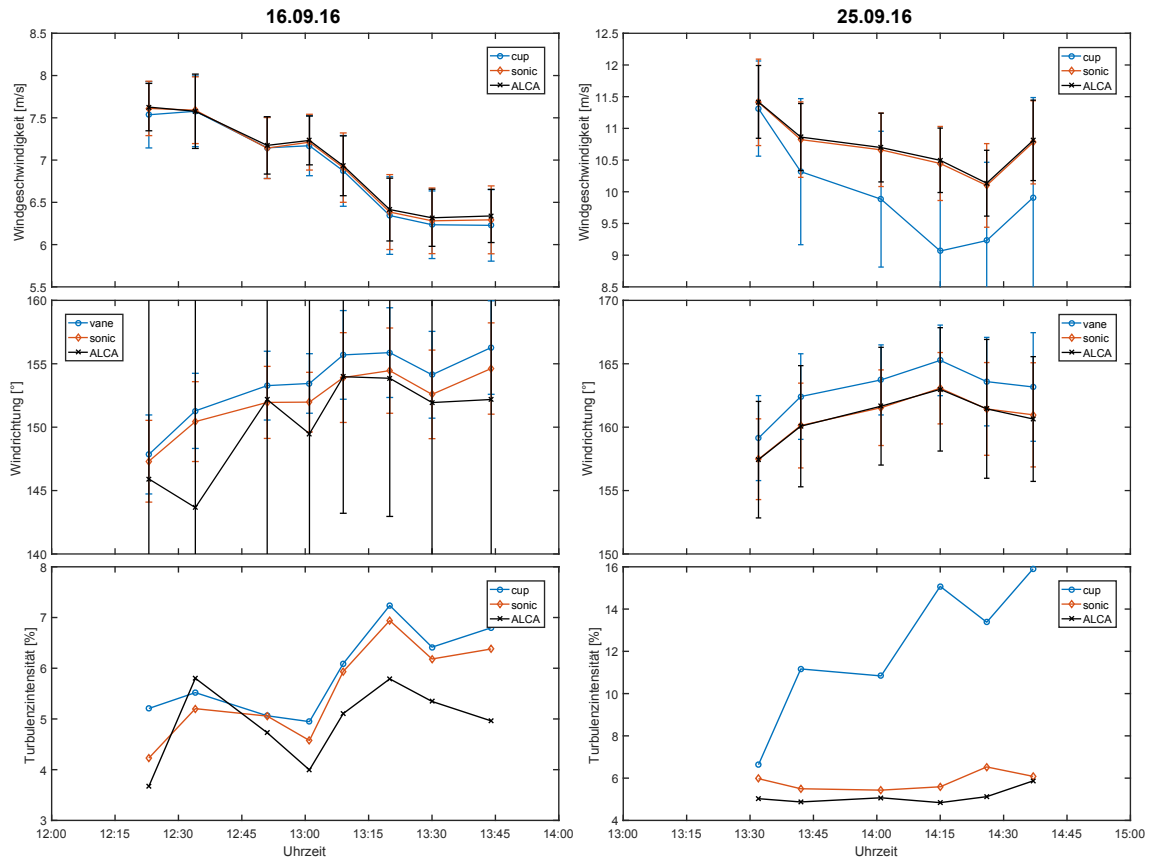


Abb. 9: Übersicht über die gewonnenen Winddaten. Die zugehörigen Werte finden sich in Tab. 2. Rechts: Messungen vom 16.09.2016. Links: Messungen vom 25.09.2016. Von oben nach unten: \bar{v} , α und TI

Am ersten Messtag wurden deutlich geringere Windgeschwindigkeiten gemessen ($\bar{v}=6-8\text{ m/s}$) als am zweiten Messtag ($\bar{v}=9-12\text{ m/s}$). Auf Grund der nachträglichen Offsetkorrektur weisen 2D-ALCA und *sonic* nur sehr geringe Abweichungen untereinander auf. Am zweiten Messtag registriert das *cup* deutlich geringere Geschwindigkeiten. Dies ist bei Betrachtung der Windrichtungen verständlich. Da das *cup* in 345° ausgerichtet ist, bedeutet eine Anströmung aus Richtung 165° , dass das *cup* die Windgeschwindigkeit im Windschatten des Mastes der FINO3 misst, so dass geringere Geschwindigkeiten zu erwarten sind. Am ersten Messtag war durch eine Anströmung aus Richtung 150° dieser Effekt nicht ausgeprägt.

Bei der Betrachtung der Windrichtungen fällt auf, dass die Abweichungen am ersten Tag beim 2D-ALCA sehr groß sind, verglichen mit den anderen Messgeräten aber auch mit den 2D-ALCA-Daten vom zweiten Tag. Dieses könnte daran liegen, dass für geringe Windgeschwindigkeiten die Linien mit konstantem Anströmwinkel in der Kalibrierfläche in diesem Bereich dichter beieinander liegen, so dass kleine Änderungen im Spannungssignal zu überproportional großen Winkeländerungen führen könnten. Ebenso ist denkbar, dass eine Strömung mit höherer mittlerer Geschwindigkeit „gerichteter“ ist, also geringere Schwankungen im Anströmwinkel aufweist. Da die zeitliche Auflösung von *vane* und *sonic* bei weitem nicht ausreicht, um diese Schwankungen zu messen, ist bei ihnen kein Unterschied in der Standardabweichung zu beobachten.

Der Vergleich der Turbulenzintensitäten weist auch eine gute Übereinstimmung zwischen den Messgeräten auf. Der starke Anstieg für das *cup* am zweiten Messtag ist erneut der Tatsache geschuldet, dass es im Windschatten des Masts misst. Somit ist zum einen die mittlere Geschwindigkeit geringer, dafür die Geschwindigkeitsfluktuationen höher.

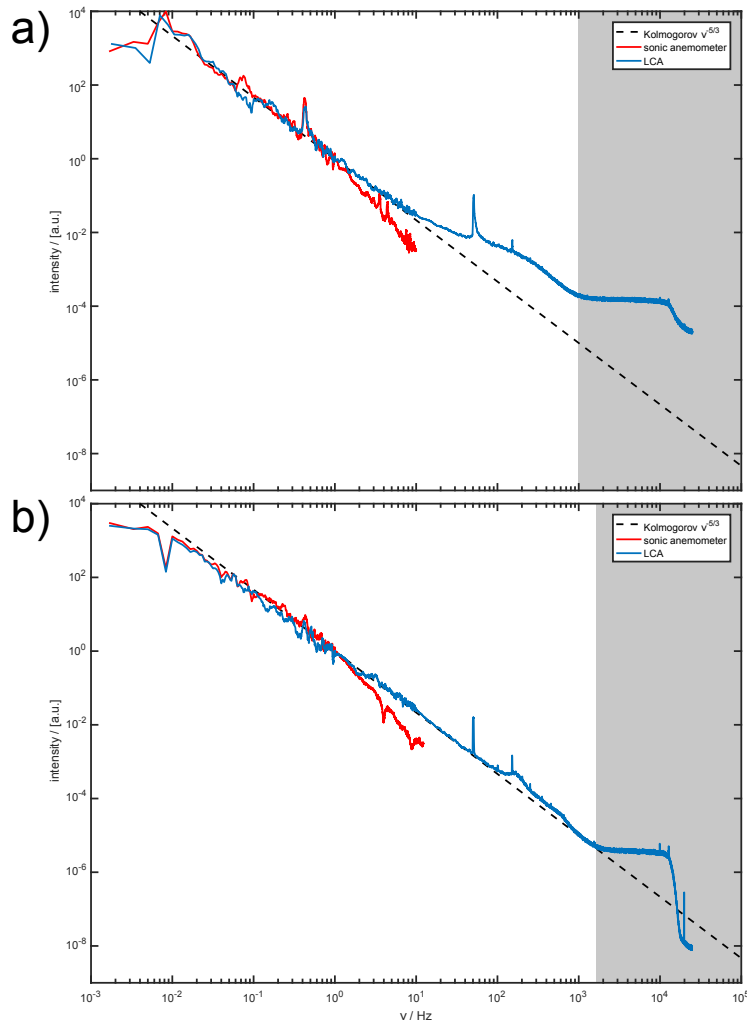


Abb. 10: FFT der Zeitreihe für die Windgeschwindigkeit. a) Messung 8, b) Messung 11.

FFT-Analyse der Zeitreihen Allein die Bestimmung von TI liefert noch keinen entscheidenden Vorteil des 2D-ALCA gegenüber den beiden Referenzsystemem. Daher wurde das Leistungsspektrum der Geschwindigkeitszeitreihe berechnet. Beispielhaft sind zwei Spektren in Abb. 10 für Messung 8 [$\bar{v}=6,3$ m/s, a)] und Messung 11 [$\bar{v}=10,7$ m/s, b)] dargestellt. Zusätzlich ist ebenfalls das zugehörige Leistungsspektrum des *sonic* gezeigt. Darüber hinaus ist zur besseren Sichtbarkeit eine Funktion $\propto \nu^{-5/3}$ dargestellt. Diese entspricht der theoretischen Abnahme der Leistung mit zunehmender Frequenz ν nach der Theorie von Kolmogorov [Kol41]. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden alle Kurven auf 1 bei $\nu=1$ Hz normiert.

Beginnend bei 0,01 Hz weisen beide Spektren einen Verlauf gemäß $\propto \nu^{-5/3}$ auf. Während das Spektrum des *sonic* nur bis 10 Hz reicht, kann im Spektrum des 2D-ALCA diese Gesetzmäßigkeit über 6 Dekaden bis 1 kHz beobachtet werden. Oberhalb von etwa 1 kHz knickt das Signal ab und weist ein Plateau auf. Oberhalb von 10 kHz kommt es durch einen Filter im Messkreis zu einem starken Abfall des Signals. Somit ist es mit dem 2D-ALCA möglich gewesen, den Nachweis zu erbringen, dass im Offshore-Bereich die Atmosphäre vollturbulent ist und keinerlei unerwartete Anomalien aufweist.

Auffällig bei den Spektren ist, dass die Frequenz, bei der das Spektrum vom Kolmogorov-Verlauf abweicht und in ein Plateau übergeht, von der Windgeschwindigkeit abhängig ist. Zur besseren Visualisierung wurde daher diese „Grenzfrequenz“ f_G in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Dies ist in Abb. 11 dargestellt. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen zu beobachten.

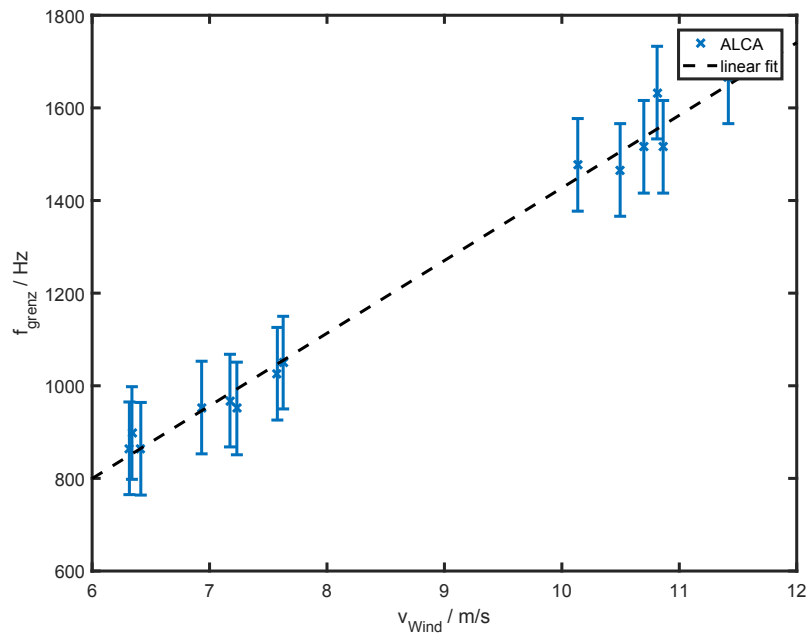


Abb. 11: Abhängigkeit der Grenzfrequenz von der mittleren Windgeschwindigkeit.

Somit lässt sich eine „Grenzlänge“ $l_G = v/f_G$ aus dem linearen Fit zu $l_G=7,2$ mm bestimmen. Ob diese Länge, und wenn ja, welche physikalische Bedeutung besitzt, kann bislang jedoch noch nicht zweifelsfrei geklärt werden und sollte in Zukunft weiter untersucht werden.

Bewertung der Ergebnisse des im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung

Ziel des Projektes war die Weiterentwicklung und Validierung eines robusten, für den Offshore-Bereich geeigneten Messsystems, welches hochauflösende Messungen des Windfeldes ermöglicht. Dazu sollte die zeitliche Auflösung deutlich erhöht werden, ein größerer Winkelbereich abzudecken sein, sowie die Lebensdauer des Systems deutlich verlängert werden. Darüber hinaus sollte durch eine Temperaturregelung ein Driften des Signals hervorgerufen durch Temperaturschwankungen minimiert werden.

Durch die Miniaturisierung konnte die Masse des Cantilevers reduziert und dessen Resonanzfrequenz erhöht werden, so dass eine höhere zeitliche Auflösung (25 kHz) erreicht wurde. Mit Hilfe einer Nachführung konnte das System um 90° geschwenkt werden, so dass durch den Akzeptanzwinkel des 2D-ALCA Messungen in einem Winkelbereich von 180° ermöglicht wurden, so dass auch bei einer Änderung der Windrichtung weiterhin Messungen durchgeführt werden konnten. Das System wurde mit einer Abdeckung versehen, welche den Sensor vor äußeren Einflüssen schützt, wenn keine Messungen durchgeführt werden. Auch eine Temperaturregelung für das 2D-ALCA wurde entwickelt. Das gesamte System wurde anschließend im Offshore-Bereich auf der FINO3 ausgiebig erprobt. Somit konnten alle Ziele des Projekts prinzipiell erreicht werden. Allerdings wurde ein Offset zwischen Kalibrierung und Messung beobachtet, der ohne den Einsatz des Ultraschallanemometers als Referenz eine Auswertung der Daten unmöglich gemacht hätte. Da der Offset möglicherweise um eine Dejustierung des Cantilevers von wenigen μm entstanden sein könnte, muss Transport und Montage des System mit sehr großer Sorgfalt geschehen. Weiterhin wurde bei der Auswertung der Daten beobachtet, dass die Spektren einen von der Windgeschwindigkeit abhängigen Knick aufweisen, dessen Ursache bislang unbekannt ist und weiter untersucht werden muss.

Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse

Durch die Validierung des Messsystems konnte die Grundlage für ein neuartiges, robustes Messgerät geschaffen werden, welches zeitlich und räumlich hochaufgelöst Strömungen vermessen kann. Somit kann nach erfolgreicher Produktentwicklung in Zusammenarbeit mit der Sea & Sun GmbH ein Messgerät angeboten werden, das wertvolle Informationen über die Anströmbedingungen von Rotorblättern liefert und somit als ein kleiner Baustein zur deren Optimierung dienen. Im Vorgespräch mit der Sea & Sun GmbH wurde ebenfalls der Einsatz in Unterwasserströmungen diskutiert, wie beispielsweise die Vermessung des Strömungsfeldes unter Eisbergen, was genauere Erkenntnisse in der Durchmischung von Wasserschichten liefern würde und somit ein sehr interessantes Messsystem im Bereich der Umwelttechnik darstellen könnte.

Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Nach der Auswertung der Daten ist angestrebt, die erzielten Ergebnisse im Rahmen einer wissenschaftlichen Veröffentlichung der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Angestrebt ist dafür eine Präsentation der Ergebnisse auf der *DEWEK* 2017 in Bremen. Ebenso ist eine Publikation in einer Fachzeitschrift angedacht.

4 Fazit

Das Ziel dieses Projekts war die Weiterentwicklung des 2D-ALCA um ein robustes und für den Offshore-Bereich geeignetes Messverfahren zu validieren, welches zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen der atmosphärischen Grenzschicht ermöglicht. Durch die Miniaturisierung des Cantilever und das Aufdampfen einer reflektierenden Schicht auf der Unterseite konnte dessen Masse und damit dessen Resonanzfrequenz so erhöht werden, dass ungestörte Messungen mit einer Abtastrate von bis zu 50 kHz durchgeführt werden können. Mit der Entwicklung einer Abdeckung konnte die Lebensdauer des Sensors deutlich verlängert werden, durch Nachführung und Temperaturregelung konnte darüber hinaus eine verbesserte Winkelabdeckung und stabilere Signalqualität erreicht werden. Somit konnte eine erhebliche Verbesserung des Systems erreicht werden und unter Offshore-Bedingungen getestet werden.

Die Messungen haben trotz kleinerer Probleme gezeigt, dass die atmosphärische Grenzschicht unter Offshore-Bedingungen mit dem 2D-ALCA zeitlich hochaufgelöst vermessen werden kann. Dabei konnte eine neue Qualität des Leistungsspektrums des Windfelds erreicht werden. Durch getriggerte Messungen konnte die Messmethode direkt durch andere Anemometer validiert werden. Darüber hinaus konnte die Lebensdauer des Systems deutlich verlängert werden, auch wenn eine detaillierte Aussage über die Lebensdauer auf Grund von externen Problemen in der Datenverbindung (bereitgestellt durch den DNV-GL) nicht abschließend gegeben werden kann. Neben dem Einsatz in der Offshore-Turbulenzmessung sind auch weitere Einsatzmöglichkeiten in anderen Forschungsbereichen vorstellbar.

Insgesamt ist das System aber bereits so ausgereift, dass eine Produktentwicklung in Zusammenarbeit mit der Sea & Sun GmbH angestrebt wird, dessen Ziel ein marktfähiges Produkt für den Einsatz in der Turbulenzmessung von Wind oder mit Modifikationen auch unter Wasser ist. Erste vielversprechende Gespräche dazu sind bereits durchgeführt worden und sollen in naher Zukunft fortgeführt werden.

Literatur

- [BHF⁺09] BARTHELMIE, R. J. ; HANSEN, K. ; FRANDSEN, S. T. ; RATHMANN, O. ; SCHEPERS, J. G. ; SCHLEZ, W. ; PHILLIPS, J. ; RADOS, K. ; ZERVOS, A. ; POLITIS, E. S. ; CHAVIAROPOULOS, P. K.: Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore. In: *Wind Energy* 12 (2009), Nr. 5, S. 431–444. – ISSN 1099–1824
- [Bul15] BULDER, B.: *Can we reduce the cost of Energy by 40 innovations are needed and how/what will they contribute?* 2015. – EWEA Offshore 2015, Copenhagen, Denmark, Oral presentation
- [JS12] JEROMIN, Andreas ; SCHAFFARCZYK, Alois P.: Messung und Analyse hochfrequenter (>1 kHz) Turbulenzanteile im Offshore-Wind zur Optimierung von aerodynamischen Blattprofilen / Abschlussbericht zu Projekt 122-09-023, gefördert vom Land Schleswig-Holstein. 2012. – Forschungsbericht
- [Kol41] KOLMOGOROV, A. N.: The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very high Reynolds number. In: *Dokl. Akad. Nauk. SSR* 32 (1941)
- [MHA12] MÜCKE, Tanja ; HARKNESS, Christine ; ARGYRIADIS, Kimon: Offshore Wind Turbulence - Model versus Measurement. In: *EWEA Offshore 2012, Copenhagen, Denmark*, 2012
- [NEG⁺09] NEUMANN, T. ; EMEIS, S. ; GRIGUTSCH, K. ; RIEDEL, V. ; TÜRK, M.: OWID Offshore Wind Design Parameter. In: *DEWI Magazin Nr. 35* (2009)
- [SD98] SREENIVASAN, K. R. ; DHRUVA, B.: Is there Scaling in High-Reynolds-Number Turbulence? In: *Progress of Theoretical Physics Supplement No 130* (1998)
- [SLS07] SIEBERT, Holger ; LEHMANN, Katrin ; SHAW, Raymond A.: On the use of a hot wire anemometer for turbulence measurements in two-phase flows – A wind tunnel study. In: *Journal of Atmos. Ocean. Technol.* (2007)
- [SLS08] SCHRECK, S. ; LUNDQUIST, J. ; SHAW, W.: U.S. Department of Energy Workshop Report: Research Needs for Wind Resource Characterization, National Renewable Energy Laboratory / NREL/TP-500-43521. 2008. – Forschungsbericht
- [TE07] TÜRK, M. ; EMEIS, S.: Abhängigkeit der Turbulenzintensität über See von der Windgeschwindigkeit. In: *DEWI Magazin Nr. 30* (2007)