Fachhochschule Kiel

Aerodynamischer Handschuh zur Untersuchung von Strömungsverhältnissen an Rotorblättern von Multi-MW Windturbinen *

Abschlussbericht zum Projekt Nr. 8/12-26
gefördert von der
Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH)

Torben Reichstein
Alois Peter Schaffarczyk

Kiel, 14. Januar 2019

*Bericht **122** des Labors für numerische Mechanik

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **3**

1 Zusammenfassung **4**

2 Einleitung **5**

3 Versuchsaufbau **7**
3.1 Die Windenergieanlage MM92 . . . 7
3.2 Der aerodynamische Handschuh . . . 8
3.3 Messtechnik . . . 8
3.3.1 Mikrofone . . . 8
3.3.2 Initium . . . 9
3.3.3 5-Loch-Sonde . . . 9
3.3.4 Umweltsensoren . . . 9
3.3.5 Datenerfassung . . . 10
3.3.6 Thermografie . . . 11
3.3.7 Spinnerkamera . . . 11
3.3.8 SCADA . . . 11
3.4 Montage . . . 11

4 Strömungssimulation (CFD) **12**

5 Messung **12**
5.1 Kalibrierung 5-Loch-Sonde . . . 17
5.2 Messkampagne an WEA . . . 18

6 Auswertung **20**
6.1 Anströmung . . . 20
6.2 Druckmessung . . . 20
6.3 Mikrofondaten . . . 22
6.4 Thermografie . . . 26
6.5 Zusammenfassung . . . 28

7 Fazit und Ausblick **29**

8 Danksagung **29**

Literatur **31**

Abbildungsverzeichnis

1 Die WEA MM92 (links), Zwischenschritte der Handschuhfertigung (Mitte) sowie der fertige Handschuh (rechts) . . . 7
2 Position der Sensoren: (a) Anordnung auf dem Handschuh; (b) Position der Mikrofone und (c) Position der Druckbohrungen . . . 9
3 Anordnung der Messelektronik . . . 10
4 Impressionen des Aufbaus der Datenerfassung . . . 12
5 Impressionen des Zusammenbaus des Handschuhs . . . 13
6 Impressionen der Montage des Handschuhs am Rotorblatt . . . 13
7 Polare des Profils (Reynoldszahl 4 Millionen) an der Stelle der Messung. Die sog. laminare Nase, d.h. der Bereich kleinen Widerstandes, $c_D < 0.008$, ist deutlich zu erkennen. Die Pfeile symbolisieren die Tangentenkonstruktion zur Bestimmung des Arbeitspunktes. Der N-Faktor wurde (willkürlich, entsprechend einer Einströmturbulenz von 0.7 %) zu 3 gesetzt . . . 14
8 Druckverteilung des Profils aus Abb. 7 mittels Xfoil. Anstellwinkel 3.5° . . 14
9 Erwartete Transitionslagen auf der Saugseite des Handschuhs; Blau: Laminar, Rot: Turbulent . . . 15
10 Druckverteilung aus CFD mit Berücksichtigung der Transition . . . 16
11 Schematischer Aufbau der 5-Loch-Sonde und der Funktionsweise . . . 17
12 Kalibrierung der 5-Loch-Sonde: links: Versuchsaufbau; rechts: Kalibrierkurve 18
13 Messkampagne: links: laufender Betrieb der WEA; Mitte: Aufnahme der Spinnerkamera; rechts: Thermografie der DWG und des BIMAQ . . . 19
14 Anströmung gemessen mit der 5-Loch-Sonde. Oben: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), unten: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr). Jeweils von oben nach unten: Anströmwinkel (AoA), Queranströmung (β) und Anströmgeschwindigkeit (v). Rot: SCADA-Daten . . . 21
15 Beispielhaftes Histogramm einer Geschwindigkeitsverteilung gewonnen aus Daten der 5-Loch-Sonde . . . 22
16 c_p-Verteilung auf dem Handschuh. Oben: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), unten: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr). . . . 23
17 Rohdaten der Mikrofone. Links: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), rechts: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr). . . . 24
18 Detektion der Transitionslage. Oben: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), unten: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr). Jeweils von oben nach unten: Schalldruckpegel (SPL), Rotordrehzahl (RPM) und lokale Beschleunigung (a). . . 25
19 Thermografiebild des DLR beim Anlaufen der Anlage (Farbe invertiert). Anströmung von rechts. . . . 26
20 Thermographiebild der DWG beim Anlaufen der Anlage. Anströmung von unten. Zeit 11:03:59 . . . 27
21 Aufbereitetes Thermographiebild. Anströmung von rechts. Zeit 11:18:11 Drehzahl ca. 9 UPM, Windgeschwindigkeit ca. 6 m/s . . . 27

1 Zusammenfassung

Die Nutzung der Windenergie ist von ungebrochenem Wachstum gezeichnet. Dies betrifft sowohl die internationale Ebene (2017: 53 GW Zubau), Deutschland (2017: 6,1 GW Zubau) als auch Schleswig-Holstein (2017: 0,5 GW Zubau), das flächendeckend die besten Windverhältnisse auszeichnet. Sowohl für Offshore- als auch für Onshore-Anlagen werden weiterhin aerodynamische Optimierungen der Rotorblätter vorgenommen. Für den Onshore-Bereich sind dies sogenannte Schwachwindanlagen mit sehr schmalen Blättern und großen Rotordurchmessern, im Offshore-Bereich wird weiterhin der Rotor vergrößert und es werden auch zunehmend Zweiblattanlagen (aerodyn SCD, SkyWind) entwickelt.

Das Projekt hatte zum Ziel, die Ergebnisse eines vergleichbaren Vorgängerprojektes („Aerodynamischer Handschuh zur Vermessung der aerodynamischen Grenzschichten an rotierenden Windturbinenblättern“, Zukunftsprogramm Wirtschaft (2007-2013) Projekt-Nr. 122-09-010) auf eine Multi-MW Windturbine nach dem Stand der Technik zu übertragen.

Dazu wurden Messungen mit einem aerodynamischen Handschuh an einer Anlage der Multi-MW Klasse in Eggebek durchgeführt um eine Klassifizierung der aerodynamischen Verhältnisse der Grenzschicht zu charakterisieren und somit die aerodynamischen Unterschiede in den verschiedenen Größenklassen dokumentieren und auswerten zu können.

Die Messungen wurden an einer Senvion MM92 Windenergieanlage durchgeführt, die vom Land Schleswig-Holstein als Forschungswindanlage genehmigt wurde und von einer Tochter der Firma Dencker & Wulf betrieben wird. Für die Messungen wurde in den Handschuh ein Messsystem, bestehend aus Drucksensoren, Mikrofonen, Beschleunigungs- und Temperatur-/Feuchtesensoren sowie einem Datenaufnahmesystem installiert, das während des laufenden Betriebs die Anströmung gemessen hat. Parallel dazu wurden von der Deutschen WindGuard, dem Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft und dem DLR Thermografiemessungen durchgeführt, um eine unabhängige Messung des aerodynamischen Grenzschichtzustands vorzunehmen. Darüber hinaus wurden vom Betreiber SCADA-Daten der Anlage zur Verfügung gestellt, so dass ein vollständige Charakterisierung der Anströmung möglich ist.

Alle Messungen zeigen ein konsistentes Bild des aerodynamischen Verhaltens der Grenzschicht: Die Transition [1, 2] ist im Anlaufbetrieb sowohl in den Mikrofondaten als auch in den Thermografibildern deutlich zu erkennen; wandert jedoch aufgrund von Verschmutzung und erhöhter Oberflächenrauheit [1] im Betrieb mit annähernd konstanter Drehzahl sehr weit nach vorn.

Vermutlich waren sowohl das gesamte Rotorblatt(kaum Regen in den Wochen zuvor und somit viel Kontermination durch Verschmutzung) als auch die Oberfläche des Handschuhs selbst (Bestimmmung der Rauheit in Bearbeitung) nicht von der gewünschten aerodynamischen Güte (vergl. Kapitel 4), um die volle laminare Laufstecke zu erhalten.

Insgesamt sollte es mit den Ergebnissen des Projektes in Zukunft möglich sein, genauere Optimierungskriterien für die Auslegung von Windenergieanlagen zu erstellen.

[1] Diese wurden in der FH mit dem Gerät MarTalk an typischen Stellen bestimmt. Es ergaben sich R_Z-Werte von 20 μm bis 60 μm

2 Einleitung

Erneuerbaren Energien und damit auch die Windenergie leisten einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende und damit auch zum Klimaschutz, der in der heutigen Zeit immer stärker in den Fokus rückt. Damit die Windenergie wirtschaftlich konkurrenzfähig bleibt, werden neuere und größere Anlagen, vor allem im Offshore-Bereich entwickelt und aufgestellt.

Entscheidend für diese neuen Anlagen ist eine ertrasgsoptimierte Form der Rotorblätter. Die klassischen aerodynamischen Entwurfsverfahren für Windturbinenblätter gehen im Wesentlichen auf Betz [3], Glauert [4] und Wilson et al. [5] zurück. Allerdings liefern diese Verfahren nur Aussagen integraler Natur, indem sie Verteilungen der Blatttiefe und Verwindung bestimmen. Die Auslegung des zweidimensionalen aerodynamischen Profils, die von den Details der Anströmung, wie z. B. dem Turbulenzgrad, dem Nachlauf anderer Anlagen oder der momentanen Anströmgeschwindigkeit abhängt, wurde erst später systematisch und spezifisch auf Windkraftanlagen übertragen. Inzwischen setzt sich jedoch zunehmend die Ansicht durch, dass direkte Messungen der Anströmung und des Grenzschichtzustandes an repräsentativen Anlagen für zukünftige Auslegungen, differenziert nach On- und Off-shore-Anwendungen, zur Verbesserungen der Blattaerodynamik unerlässlich sind [6]. Dieser Bedarf ist bereits von etlichen Forschungsgruppen erkannt worden. Messungen an kleineren Windturbinen in Windkanälen gipfelten im Jahr 2000 in dem im NASA/Ames Windkanal durchgeführten „Unsteady Aerodynamics Experiment“. Bei diesem Experiment wurde eine zweiblättrige Anlage mit 11 m Durchmesser (ca. 15 kW Nennleistung) komplett unter definierten Anströmbedingungen gemessen. Ähnliche Experimente an einer dreiblättrigen Anlage wurden 2006 in den Niederlanden unter dem Namen MEXICO durchgeführt. Deren umfangreiche Auswertung, insbesondere des gemessenen Strömungsfeldes vor und hinter der Anlage, ist in der ersten und zweiten Phase in der IEAwind-Task 29 „Mexnext“ erfolgreich abgeschlossen worden [7]. Größere aerodynamische Untersuchungen im freien Feld wurden in Deutschland lediglich im Rahmen des GROWIAN Projektes (Abschluss 1989) durchgeführt. Seit 2008 sind in Dänemark unter dem Namen DAN-Aero umfangreiche Experimente vergleichbarer Art und mit moderner Instrumentierung an einer Anlage mit 2 MW Nennleistung und 80 m Rotordurchmesser durchgeführt worden [8]. Die diesem Projekt vorausgehende Untersuchung der aerodynamischen Grenzschicht an einer 250 kW Anlage im Rahmen eines CEwind-Projektes [9, 10] hat gezeigt, dass der Bedarf an verlässlichen Angaben über die Anströmung und über den Zustand der Strömungsgrenzschicht am Rotorblatt noch weitestgehend unbefriedigend gedeckt ist.

Durch die Erschließung von Standorten für Windkraftanlagen auf hoher See (offshore) ist eine signifikante Erhöhung des Ertrages aufgrund der sehr viel höheren mittleren Windgeschwindigkeiten zu erwarten. Die aerodynamische Auslegung der Profile erfolgt hingegen nach den üblichen Verfahren, die für Onshore-Anlagen kleinerer Größe entwickelt wurden. Die in Ref. [11] dargestellten eigenen Voruntersuchungen über Skalierungsaspekte der umströmten Rotorblätter sollen auf Prototypen der Multi-MW-Klasse übertragen werden. Dies gilt insbesondere für die sogenannte Reynoldszahl-Abhängigkeit von Effekten innerhalb der aerodynamischen Grenzschicht. Um diese strömungsrelevante Überlegung anzustellen sind allerdings verlässliche Daten über die tatsächlichen Anströmbedingungen sowie über den Grenzschichtzustand (laminar oder turbulent) unabdingbar. Diese Datenlücke soll im Rahmen dieses Projekts geschlossen werden.

Dazu sollen Messungen mit einem aerodynamischen Handschuh an einer Anlage der Multi-MW-Klasse (Senvion MM92) auf dem Testfeld in Eggebek etwa 20 km südlich von Flensburg durchgeführt werden. Aerodynamische Handschuhe werden seit Längerem in der Luftfahrt verwendet, um den realen Strömungszustand auf dem Flügel im Betrieb zu gemessen. Eine Übertragung dieser Technik auf Windturbinenflügel wird erst seit wenigen Jahren in Angriff genommen [12, 13, 9, 10, 14] und ist in dieser speziellen Form, d.h. in Form eines wiederverwendbaren, anpassbaren Geräteträgers auf einer Anlage der

Multi-MW-Klasse, noch nicht zur Anwendung gekommen. Die Aufgabe des Handschuhs ist zweierlei: Einerseits sollen Daten über die augenblickliche Anströmrichtung, die Geschwindigkeit und den (hochfrequenten) Turbulenzgrad aufgezeichnet werden. Andererseits soll auf dem Rotorblatt der Zustand der Grenzschicht lokal festgestellt werden, d.h. ob laminar oder turbulent, sowie der Bereich Transition, des Umschlags. Das aus der Flugzeugaerodynamik stammende Handschuhkonzept erlaubt Messtechniken an der Profiloberfläche anzubringen ohne das Rotorblatt selbst mechanisch zu beeinträchtigen.

Eine Fünflochsonde mit Druckwandler wird zur Erfassung der Strömungsrichtung und des Strömungsbetrags des Anströmungsvektors sowie des Turbulenzgrades verwendet. Für die Bestimmung der Druckverteilung auf der Saugseite werden 57 Druckmessstellen vorgesehen. Weiterhin werden 48 Mikrofone über das Profil verteilt, um eventuelle Strömungsablösungen und/oder Transition am Blatt zu erkennen. Die Elektronik dieser Sensoren wird ebenfalls im Handschuh untergebracht. Das System wird zusätzlich mit einem Beschleunigungssensor, einem Temperatur- und Feuchtesensor sowie einem Datenerfassungssystem inklusive eines WLAN-Links zur Bodenstation ausgestattet. Zusätzlich wird im Spinner der Anlage von der Hochschule Flensburg eine Kamera installiert, die auf die Stelle des Handschuhs gerichtet wird und unbedingt notwendige, komplementäre mit optischen Verfahren gewonnene Informationen über die Blattbewegung und den Strömungszustand liefert. Darüber hinaus werden von der Deutschen WindGuard [15] und dem DLR Göttingen [16] Thermografiebilder aufgenommen, die eine weitere unabhängige Detektion des laminar-turbulenten Übergangs auf dem Handschuh ermöglichen [17].

Abb. 1: Die WEA MM92 (links), Zwischenschritte der Handschuhfertigung (Mitte) sowie der fertige Handschuh (rechts)

3 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau beschrieben. Dazu wird zunächst die genutzte Windenergieanlage vorgestellt. Daran anschließend wird die Idee und der Bau des aerodynamischen Handschuhs skizziert, bevor die eingesetzten Messmethoden präsentiert werden. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Darstellung der Montage des gesamten Versuchsaufbaus ab.

3.1 Die Windenergieanlage MM92

Die Messkampagne wurde an einer Anlage der Multi-MW Klasse (Senvion, MM92) auf dem Testfeld in Eggebek etwa 20 km südlich von Flensburg auf dem Gelände eines ehemaligen Marineflughafens durchgeführt.

Die Windenergieanlage (WEA) wurde nach dem Zielabweichungsverfahren des Landes Schleswig-Holstein zu Forschungszwecken genehmigt. Zwischen der Hochschule Flensburg, dem Betreiber der Anlage und dem Hersteller Senvion [18] besteht ein Rahmenvertrag zur Durchführung von Forschungsvorhaben. Somit bot sich die einmalige Gelegenheit, eine Anlage dieser Größenordnung nutzen zu können.

Die Anlage ist seit Dezember 2013 in Betrieb. Sie hat eine Nennleistung von 2.050 kW bei einer Nennwindgeschwindigkeit von 12,5 m/s. Durch die geringe Einschaltgeschwindigkeit von 3 m/s ist ein Betrieb auch bei schwachem Wind zumindest im Teillastbereich möglich. Somit kann ein breiteres Wetterfenster für die Durchführung der Messung genutzt werden. Im Jahr 2018 konnte die Anlage ihren prognostizierten Ertrag von 6,3 GWh erreichen - trotz des Minderertrages im Messzeitraum von ca. 100 MWh. Die Anlage hat eine Nabenhöhe von 100 m und Rotorblätter vom Typ LM45.3p mit einer Blattlänge von 45,2 m [19]. Durch ein „Non-Disclosure Agreement“ mit dem Blatthersteller LM Wind Power [20] sind die CAD-Dateien der verbauten Rotorblätter zugänglich, was es ermöglicht, ein in vielen (aber nicht allen) Details realistisches 3D-Modell der Strömung zu erstellen. In Abb. 1 ist die Anlage links abgebildet.

3.2 Der aerodynamische Handschuh

Der aerodynamische Handschuh hat das Ziel, einen Teil der Blattoberfläche möglichst exakt abzubilden, welcher dann aerodynamisch untersucht werden kann. Weiterhin muss er die gesamte Messelektronik aufnehmen, da laut Kooperationsvertrag das Blatt nicht verändert werden darf, somit keine Bauteile im Inneren des Blattes gestattet waren. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde folgendes Konzept entwickelt: Auf der Blattoberfläche wird eine 20 mm dicke Schicht aus GURIT® CORECELL™ M Schaumplatten aufgebracht, welche die lokale Blattoberfläche erhält. Auf den Schaumplatten wird dann im Handlaminierverfahren ein CFK-Gelege aufgebracht, welches den Umweltbedingungen während der Messung problemlos widersteht. Für die Fertigung des Handschuhs wurde die Firma wingtec [21] beauftragt, die sich auf Instandsetzung von Rotorblättern spezialisiert hat. Wingtec wurde ebenfalls für die Montage des fertigen Handschuhs an der WEA beauftragt. Da auf dem Gelände der Firma ein baugleiches Rotorblatt vom Typ LM45.3p am Boden gelagert war, konnte der Handschuh direkt am Blatt gefertigt werden, so dass der Bau einer kostspieligen und sehr wahrscheinlich nicht ausreichend genauen Negativform aus der CAD-Datei von LM vermieden werden konnte.

Der Bau der Grundform des Handschuhs wurde in zwei Teilen durchgeführt. Zunächst wurde die Druckseite gefertigt, anschließend die Saugseite. Anschließend wurden beide Schalenhälften zusammengeführt. Details der Fertigung sind in Ref. [22] zu finden. Einige Zwischenschritte der Fertigung sind in Abb. 1 gezeigt. Da die Saugseite für die Aerodynamik von entscheidender Bedeutung ist, wurde beschlossen, dass die Messtechnik in einem Kasten auf der Druckseite montiert wird, während die Sensoren auf der Saugseite zu finden sind. Für die Verbindung der Sensoren mit der Elektronik wurden in die Schaumplatten von innen Kanäle gefräst, so dass die Kabel und Schläuche zwischen Handschuh und Rotorblatt verlaufen konnten.

Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass wegen der äußerst begrenzten Mittel weder die Geometrietreue noch die Oberflächenrauheit so beschaffen sind wie in einem klassischen Windkanalversuch [11].

Im folgenden Abschnitt wird die verwendete Messtechnik näher beschrieben.

3.3 Messtechnik

In diesem Abschnitt sollen die verschiedenen Messsysteme kurz vorgestellt und ihr Einsatzgebiet skizziert werden. Auch hier gilt ein entspechender Vorbehalt wie oben formuliert bezüglich der Geometrie: Der Einbau der Sensorik hat die Messung so wenig wie möglich zu stören, was gerade bei Transitionsmessungen zu sehr aufwändigen Anordnungen und Maßnahmen führen kann, die nur im Windkanal realisiert werden können [23].

3.3.1 Mikrofone

Eines der Hauptziele dieses Projekts ist die Bestimmung des Zustands der lokalen Grenzschicht, d.h. laminar oder turbulent, oder solche dazwischen, sog. transitionelle Bereiche. Dazu wurden 48 Mikrofone auf der Oberfläche verteilt. Diese wurden äquidistant entlang einer Geraden mit 20° Neigungswinkel gegenüber der Sehne verteilt, so dass eine Störung stromabwärts liegender Mikrofone durch vordere Mikrofone minimiert wird. Vier Mikrofone wurden auf der Druckseite angebracht, eins an der Vorderkante und die verbleibenden 43 auf der Saugseite. Abb. 2 zeigt die Verteilung der Mikrofone auf dem Handschuh.

Verwendet wurden Sennheiser KE 4-211-2 Mikrofone mit einer guten Rundstrahlcharakteristik und einer sehr kompakten Bauform (Außendurchmesser 4,5 mm), die es ermöglichen, die lokale Geräuschentwicklung aufzunehmen.

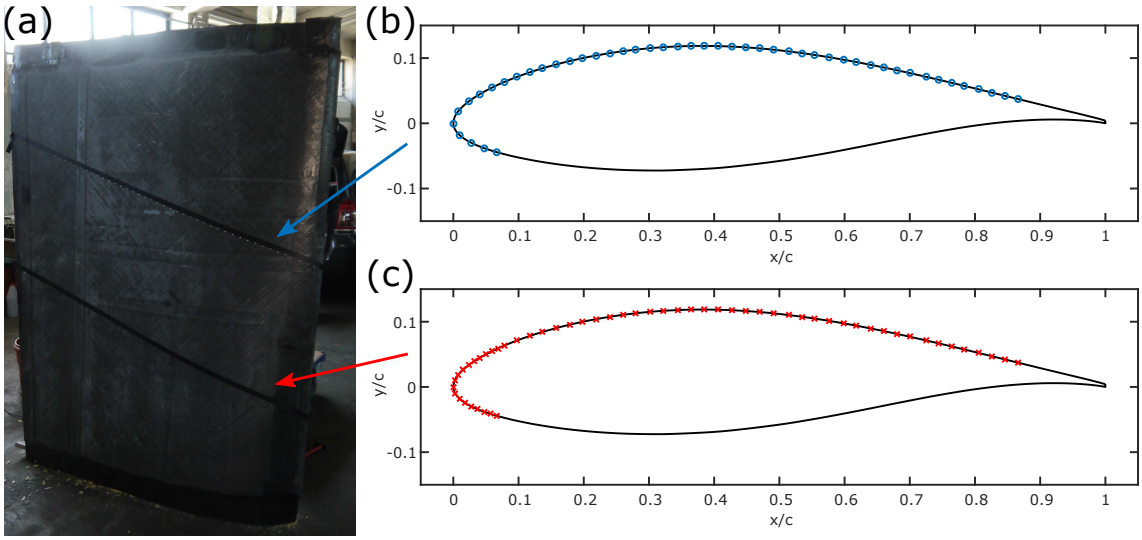

Abb. 2: Position der Sensoren: (a) Anordnung auf dem Handschuh; (b) Position der Mikrofone und (c) Position der Druckbohrungen

3.3.2 Initium

Ebenso sollte die Druckverteilung auf der Oberfläche vermessen werden, die mit CFD (Computational Fluid Dynamics = numerische Strömungssimulation) Rechnungen verglichen werden sollen. Dafür wurden 57 Druckbohrungen auf der Oberfläche vorgenommen. Analog zu den Mikrofonen wurden diese Bohrungen in einem Winkel von 20° gegenüber der Sehne entlang einer Geraden durchgeführt. 48 Druckbohrungen haben die gleichen x/c-Koordinaten wie die Mikrofone. Auf Grund der vorhandenen Messkanäle wurden zwischen den ersten zehn Bohrungen mittig weitere Bohrungen gesetzt. Die Verteilung der Löcher ist in Abb. 2 dargestellt.

Für die Aufnahme der Messwerte wurde ein DTC Initium System von Esterline Pressure Systems verwendet. An diesem ist ein ESP Druckscanner angeschlossen, der zeitgleich 64 Druckmessungen mit einer maximalen Abtastrate von 300 Hz aufnehmen kann. Dieses System wurde bereits im Vorgängerprojekt [24] eingesetzt und hier erneut verwendet.

3.3.3 5-Loch-Sonde

Ein weiteres Ziel des Projekts war die Bestimmung der lokalen Anströmung. Dafür wurde in der Werkstatt der Fachhochschule Kiel eine 5-Loch-Sonde gefertigt, die nach einer Kalibrierung im Windkanal der Universität Oldenburg (siehe Kap. 5.1) an der Vorderkante des Handschuhs montiert wurde.

Die 5-Loch-Sonde besteht aus einer Halbkugel mit 5 Bohrungen, einer zentralen und vier Bohrungen, die kreuzweise um das zentrale Loch angeordnet sind. Auf Grund der Krümmung der Kugeloberfläche weisen die vier äußeren Löcher einen relativen Winkel zur zentralen Öffnung von 30° auf. Da der gemessene Druck vom Winkel zwischen Anströmung und Bohrung abhängig ist, können aus den Verhältnissen der Einzeldrücke Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit (s. Kap. 5.1) bestimmt werden.

Die Drücke der Sonde wurden ebenfalls mit dem Initium aufgenommen.

3.3.4 Umweltsensoren

Neben den Sensoren für die Messung der Grenzschicht wurden weitere Systeme installiert, die ein umfänglicheres Verständnis der Messsituation ermöglichen. So wurde sowohl ein Beschleunigungssensor verbaut, als auch ein kombinierter Temperatur- und Feuchtesensor verwendet.

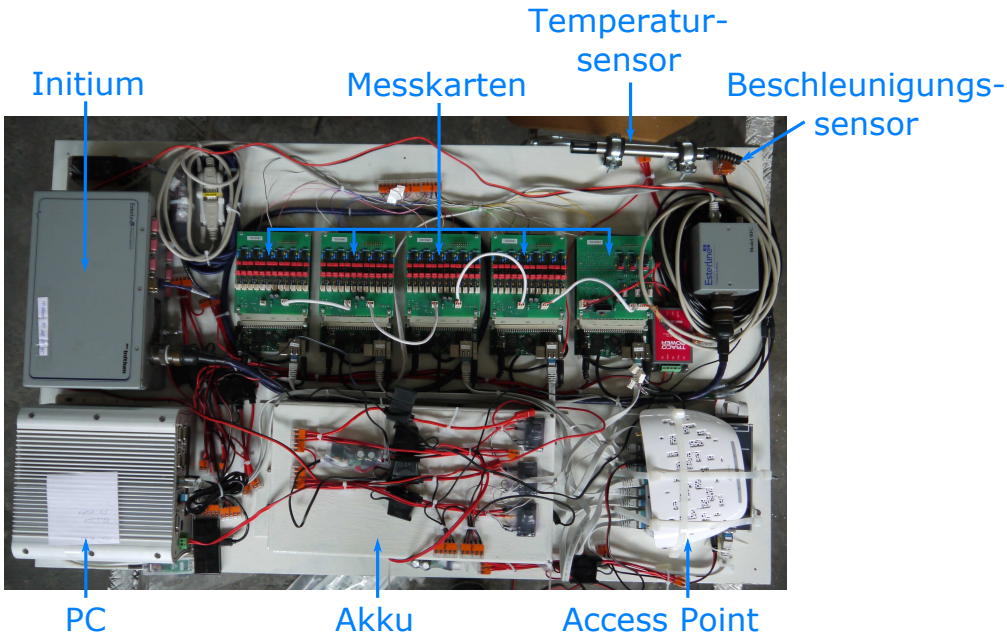

Abb. 3: Anordnung der Messelektronik

Beschleunigungssensor Der 3-Achsen-Beschleunigungssensor 5421MF der Firma ASC GmbH mit einem Messbereich von ±30 g wurde verwendet, um die lokale Beschleunigung zu messen. Zum einen sollte damit überwacht werden, welche Kräfte auf das Equipment wirken, andererseits hat sich gezeigt, dass man aus dem zeitlichen Verlauf Rückschlüsse auf die aktuelle Position des Handschuhs relativ zu einem vollen Umlauf ziehen kann (s. Kap. 6).

Temperatur- und Feuchtesensor Ebenfalls wurde ein kombinierter Temperatur- und Feuchtesensor (FF-GLT-10V-K-TE1 der Firma B+B Thermo-Technik GmbH) im Inneren des Elektronikkastens angebracht um die Temperaturentwicklung sowie die Luftfeuchtigkeit in der unmittelbaren Umgebung der Messelektronik zu überwachen. Für den Fall eines Ausfalls einzelner Komponenten hätte darüber überprüft werden können, ob die Umweltbedingungen während der Messung für die Komponenten außerhalb ihrer Spezifikationen gelegen haben. Da jedoch kein Hardwareausfall aufgetreten ist, ist eine derartige Überprüfung nicht notwendig geworden.

3.3.5 Datenerfassung

Zur Aufnahme der Daten wurde ein Datenerfassungssystem entwickelt. Die Firma J.E.T. Systemtechnik GmbH hat dafür ein modulares Messkartensystem entwickelt, deren fünf Messkarten autark Daten aufnehmen und lokal abspeichern können. Vier Messkarten haben je 12 Mikrofone aufgenommen, während eine Karte für Beschleunigungssensor und Temperaturfühler vorgesehen war. Die Daten wurden von jeder Karte separat auf einer eigenen SSD lokal gespeichert. Für die Datenerfassung des Initiums wurde ein lüfterloser Hutschienenrechner verwendet, der für die Ansteuerung und die lokale Speicherung zuständig war, ebenfalls auf einer SSD. Sowohl die Messkarten als auch der Hutschienenrechner wurden über ein Akkupack mit 24 VDC (30 Ah) versorgt. Weiterhin wurde ein WLAN Access Point verbaut, der es ermöglicht hat, per Funk das System in Betrieb zu nehmen und die Datenerfassung zu starten. Ein Überblick über die Messelektronik ist in Abb. 3 gezeigt.

3.3.6 Thermografie

Neben den Messinstrumenten, die im Handschuh verbaut wurden, konnten wir sowohl die Firma Deutsche WindGuard GmbH mir Unterstützung des BIMAQ als auch das DLR Göttingen gewinnen, die sich bereiterklärt haben während der Messungen Thermografie am Handschuh durchzuführen. Dazu werden Thermographieaufnahmen der Oberfläche des Handschuhs mit einer Infrarotkamera gemacht. Damit ist es möglich, verschieden warme Bereiche sichtbar zu machen. Aufgrund der Erwärmung der Rotorblattoberfläche (bzw. der Handschuhoberfläche) besteht eine initiale Termperaturdifferenz zwischen dem anströmenden (kälteren) Wind und des (wärmeren) Rotorblattes. Da eine laminare Strömung einen schlechteren Wärmetransport aufweist als eine turbulente Strömung, hat der turbulente Grenzschichtbereich eine geringere Oberflächentemperatur als der laminare Bereich. Dies lässt sich mit Thermografie gut sichtbar machen. Somit ist dies eine Methode, die es unabhängig von den Mikrofonen ermöglicht, den laminar-turbulenten Übergang zu detektieren.

3.3.7 Spinnerkamera

Von der Hochschule Flensburg wurde am Spinner eine Kamera installiert, die während der Messung die Druckseite des Handschuhs filmt und es somit ermöglicht bei unvorhergesehenen Schwingungen des Blattes diese optisch zu analysieren. Durch die Vorbiegung der Rotorblätter war es nicht möglich die Saugseite des Handschuhs zu beobachten. Wegen der ausserordentlich guten Wetterbedingungen konnten erstaulihc gute Filmaufnahmen gemacht worden, die es erlauben, sowohl Pitchmanöver als auf die Lage des Blattes relativ zum Boden zu analysieren.

3.3.8 SCADA

Darüber hinaus wurden uns die SCADA-Daten der WEA zur Verfügung gestellt. Diese Daten umfassen die Uhrzeit, die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe, sowie die momentane Drehzahl der Anlage und die Pitchwinkel der drei Blätter. Diese Daten erlauben eine unabhängige Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit und können darüber hinaus die verschiedenen Zustände der Anlage (Stillstand, Anlaufen, Betrieb) klassifizieren, was sich ebenfalls in den gewonnenen Messdaten widerspiegelt. Ein gewisses Problem besteht allerdings in der hinreichend genauen Synchronisierung der unterschiedlichen Messsysteme.

3.4 Montage

Nach der Fertigung der Halbschalen wurden beide miteinander verbunden, so dass die fertige Form des Handschuhs erhalten wurde. Während diese Arbeit von der Firma wingtec durchgeführt wurde, wurden die verschiedenen Datenerfassungssysteme zunächst an der Fachhochschule Kiel auf einer Aluminiumplatte montiert und erste Funktionstests durchgeführt. Auf Grund von Verzögerungen in der Beschaffung der einzelnen Komponenten konnte das System nicht vorab im Windkanal der FH Kiel getestet werden. Somit wurde ein Funktionstest während der Autofahrt nach Eggebek zur Montage des Systems erfolgreich durchgeführt. Abb. 4 zeigt einige Impressionen des Aufbaus der Datenerfassung.

Anschließend wurde der Handschuh vor Ort in Eggebek mit dem Messequipment versehen. Dafür wurden zunächst die Löcher für Mikrofone und Druckmessstellen gebohrt (siehe Abb. 2 (a)) und Kanäle für Druckschläuche und Mikrofonkabel in die Schaumstoffplatten gefräst. Nach Verlegen der Kabel und Schläuche, sowie der Montage der 5-Loch-Sonde wurden die Kanäle ausgeschäumt, damit wieder eine glatte Innenseite des Handschuhs erhalten wurde. Anschließend wurde die Platte mit der Elektronik auf der Druckseite des Handschuhs verschraubt und die Zwischenräume mit SikaFlex, einem starken Kleber, verklebt. Dieser Kleber ist auch zur Befestigung des Handschuhs am Rotorblatt verwendet worden. Nachdem alle Mikrofone und Druckschläuche ordnungsgemäß angeschlossen wurden, wurde ein Kasten aus den Schaumplatten um die Elektronik herum gebaut und an

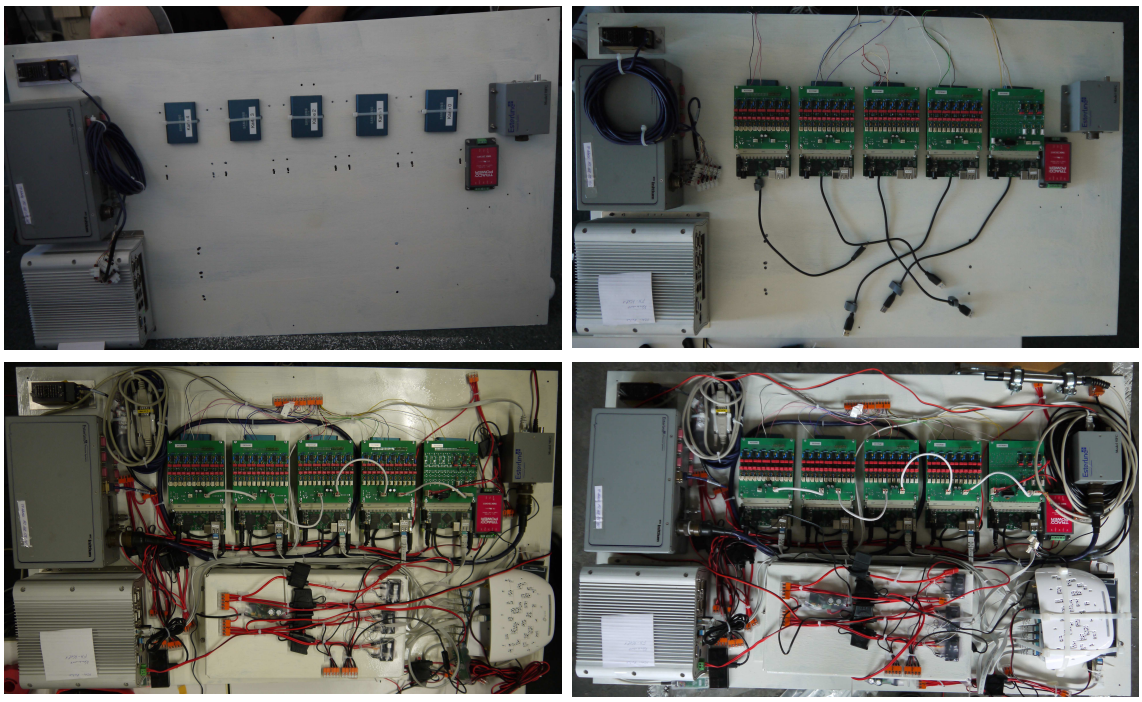

Abb. 4: Impressionen des Aufbaus der Datenerfassung

den Rändern schräg an das Profil der Druckseite angepasst um das System aerodynamisch günstiger zu gestalten. Zwei WLAN-Antennen wurden an der hinteren Seite des Kastens auf der Oberfläche montiert um den Zugriff auf das System vom Boden aus zu ermöglichen. Zu diesen Schritten finden sich in Abb. 5 weitere Impressionen.

Da der Handschuh eine nicht unbedeutende Unwucht an der WEA darstellt, sollte der Betrieb der Anlage mit montiertem Handschuh auf ein Minimum beschränkt werden um keine Schäden an der Anlage zu riskieren. Daher wurde der Handschuh am Donnerstag, den 12. Juli – einen Tag vor der Messung – an der WEA durch die Firma wingtec montiert. Dafür kam eine Seil-Arbeitsbühne zum Einsatz, die von der Gondel abgesenkt wurde und 3 Personen zeitgleich die Arbeit ermöglicht. Gegen 21 Uhr war der Handschuh am Rotorblatt verklebt und mit mehreren Bolzen zusätzlich gesichert. Ein Funktionstest des Messsystems bei festgestellter Bremse der Anlage war ebenfalls erfolgreich. Impressionen zur Montage des Handschuhs am Rotorblatt sind in Abb. 6 zu sehen.

4 Strömungssimulation (CFD)

Parallel zu den Vorbereitungen für die Messung wurden zunächst ausführliche 2D Simulationen mit Xfoil erstellt. Abb. 7 zeigt deutlich, dass es ein sog. Laminarprofil verwendet wurde- Weiterhin kann man der sog. Tangentenkonstuktion den Arbeitpunkt $(\alpha_{des}, c_{L,des})$ bei der höchsten Gleitzahl $c_{L,des}/c_{D,des}$ erkennen. Abb. 8 zeigt den (2D-)Druckverlauf auf der Oberfläche. Weiterhin wurden auch voll 3D-Simulationsmodelle erstellt und genutzt, um (3D-)Transitionslagen (s. Abb. 9) sowie den Einfluss des Kastens auf die Druckverteilung auf der Saugseite (s. Abb. 10) zu bestimmen.

5 Messung

In diesem Abschnitt soll auf die durchgeführte Messung selbst eingegangen werden. Die einzelnen Komponenten wurden vor der Montage am Handschuh an der FH Kiel auf ihre Funktion getestet. Das Initium-Druckmesssystem wurde bereits für eine frühere Messkampagne verwendet, daher wurde die Bedienoberfläche lediglich an die neue Messkampagne

Abb. 5: Impressionen des Zusammenbaus des Handschuhs

Abb. 6: Impressionen der Montage des Handschuhs am Rotorblatt

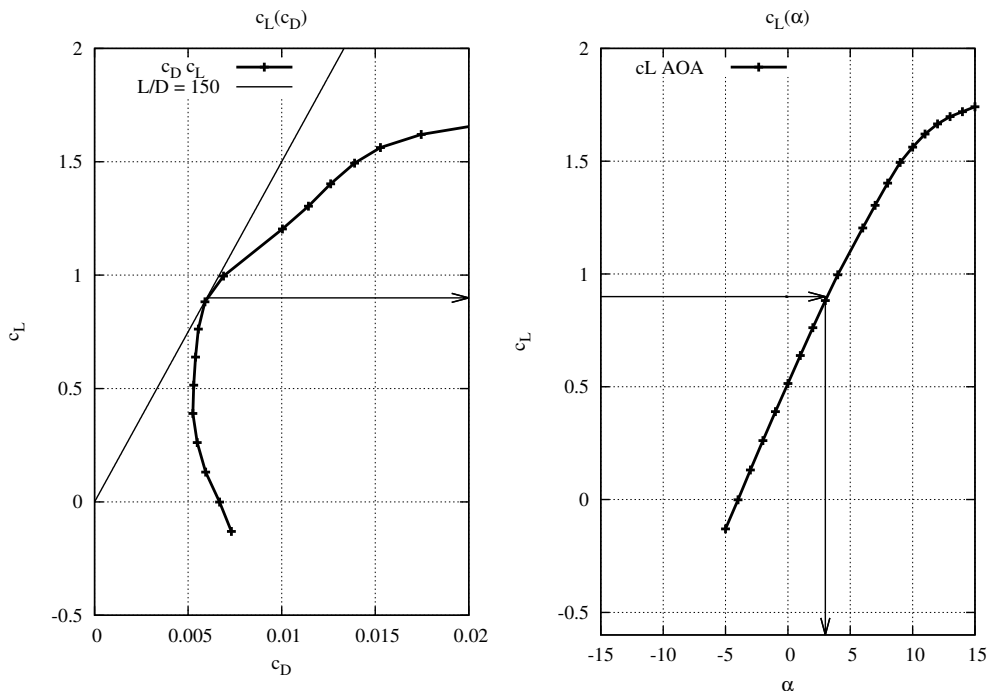

Abb. 7: Polare des Profils (Reynoldszahl 4 Millionen) an der Stelle der Messung. Die sog. laminare Nase, d.h. der Bereich kleinen Widerstandes, $c_D < 0.008$, ist deutlich zu erkennen. Die Pfeile symbolisieren die Tangentenkonstruktion zur Bestimmung des Arbeitspunktes. Der N-Faktor wurde (willkürlich, entsprechend einer Einströmturbulenz von 0.7 %) zu 3 gesetzt

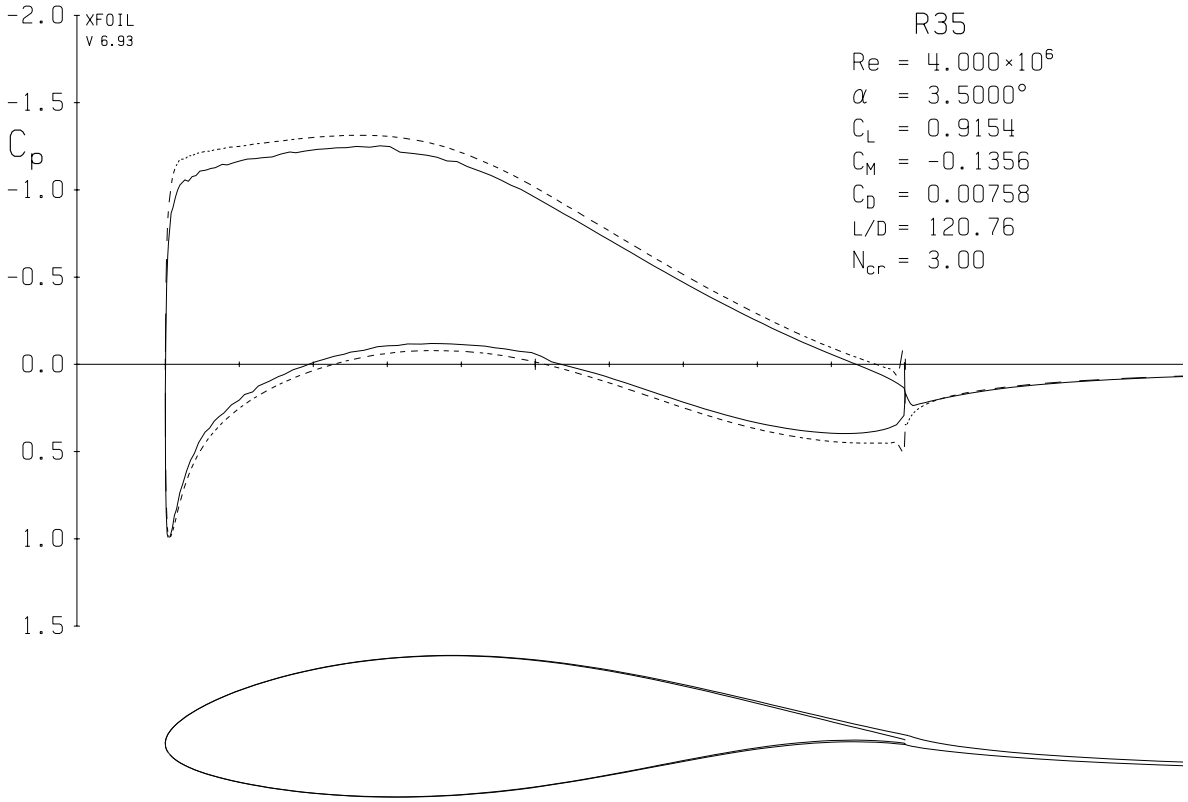

Abb. 8: Druckverteilung des Profils aus Abb. 7 mittels Xfoil. Anstellwinkel 3.5°

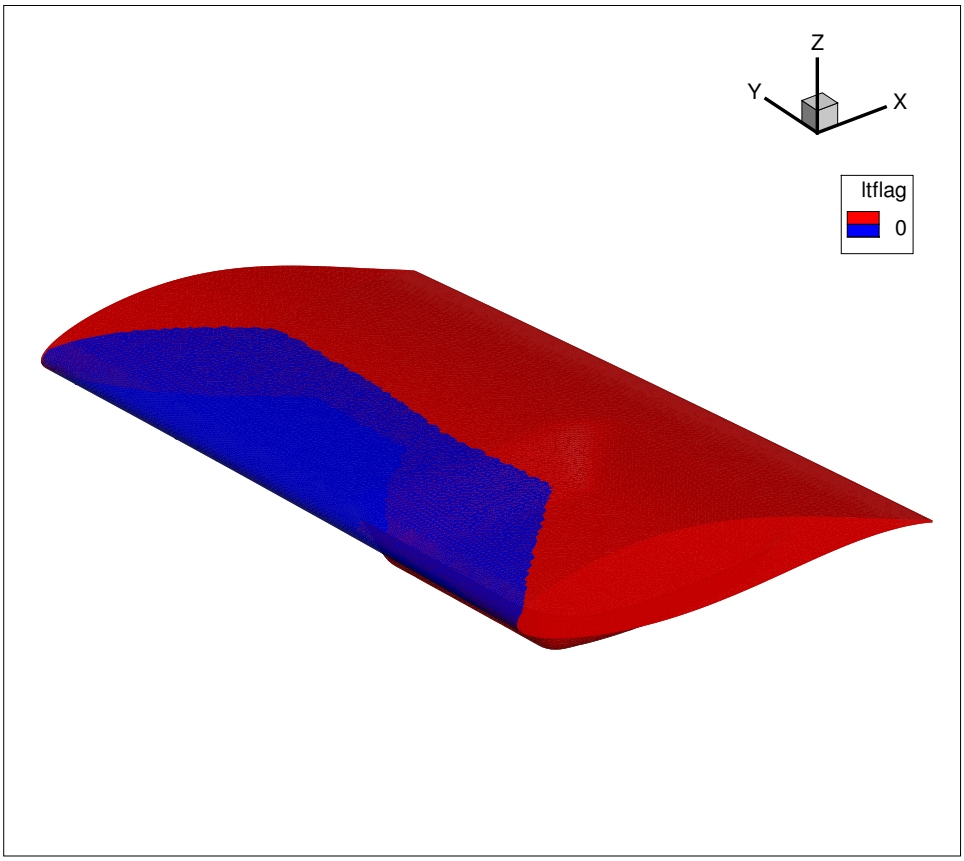

Abb. 9: Erwartete Transitionslagen auf der Saugseite des Handschuhs; Blau: Laminar, Rot: Turbulent

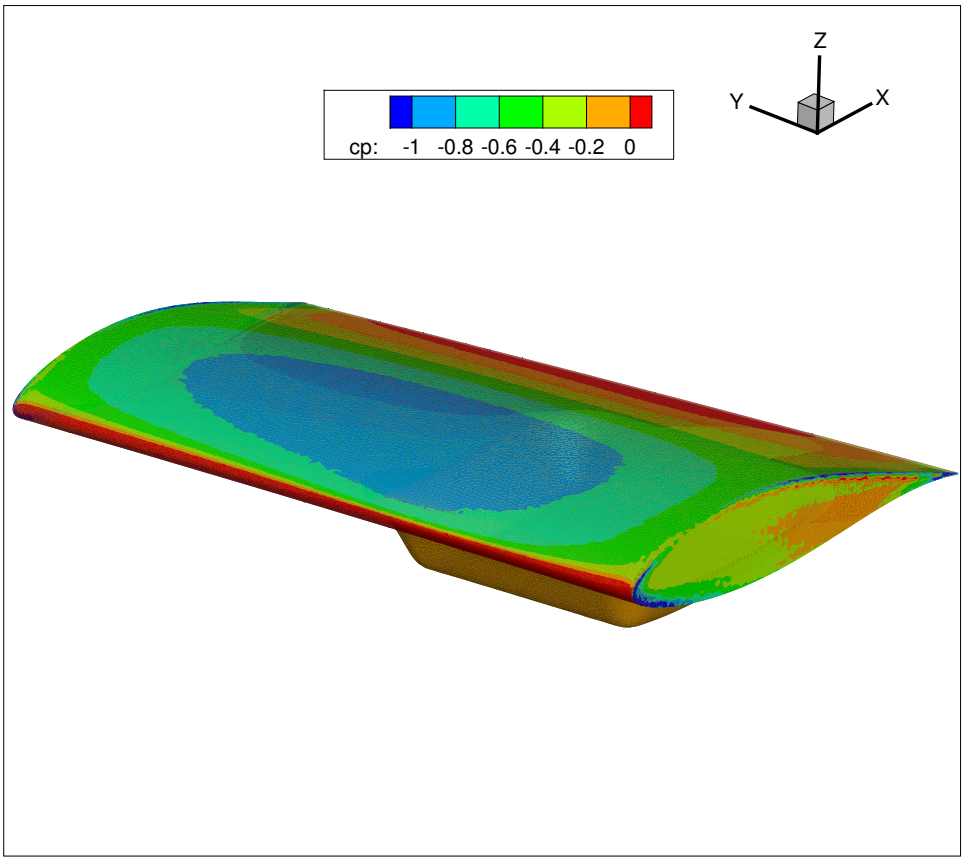

Abb. 10: Druckverteilung aus CFD mit Berücksichtigung der Transition

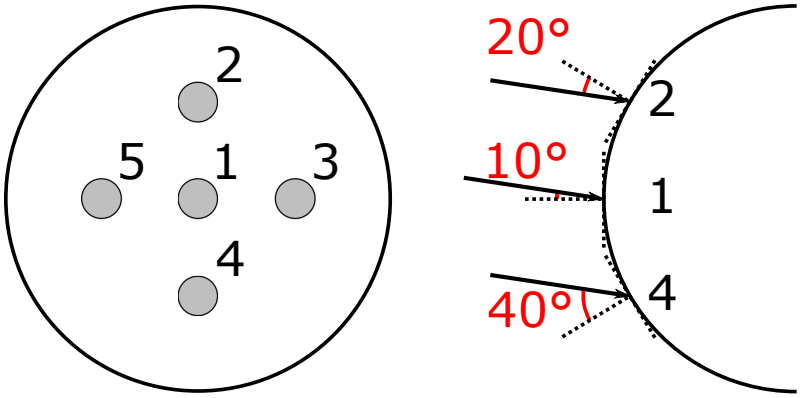

Abb. 11: Schematischer Aufbau der 5-Loch-Sonde und der Funktionsweise

angepasst. Die Mikrofone sowie die Umweltsensoren wurden ebenfalls geprüft, so dass ein defektes Mikrofon vor der Kampagne ausgetauscht werden konnte. Da die 5-Loch-Sonde in der Werkstatt der FH Kiel gefertigt wurde, musste diese zunächst kalibriert werden. Dies ist im folgenden Abschnitt beschrieben. Anschließend wird die Durchführung der Messkampagne genauer erläutert.

5.1 Kalibrierung 5-Loch-Sonde

Die 5-Loch-Sonde besteht aus einer Halbkugel, in die 5 Löcher gebohrt wurden, eines davon zentral auf der Spitze und vier andere kreuzförmig um das zentrale Loch herum angeordnete. Abb. 11 zeigt den Aufbau und die Funktionsweise schematisch. Der gemessene Druck an einer Bohrung abhängig vom Winkel zwischen Anströmung und Oberflächennormalen. Durch die Anordnung der Bohrungen auf der Halbkugel weisen gegenüberliegende Löcher einen Winkel von $\pm 30°$ gegenüber dem zentralen Loch auf. Somit werden bei einem Anströmwinkel (AoA *„angle of attack“*) je Achse (vertikal: Löcher 1, 2, 4; horizontal: Löcher 1, 3, 5) drei Drücke gemessen. Im skizzierten Fall von AoA=10° werden auf Grund der verschiedenen lokalen Winkel unterschiedliche Drücke gemessen. Somit sind die Verhältnisse $p_v = (p_2 - p_4)/p_1$ und $p_h = (p_3 - p_5)/p_1$ (p_X bezeichnet den Druck an Loch X, p_v das Verhältnis in vertikaler Richtung und p_h das Verhältnis in horizontaler Richtung) winkelabhängig. Durch eine Kalibrierung bei bekannten AoA können p_v und p_h vermessen werden um später die Daten der Messkampagne auswerten zu können.

Im Windkanal der Universität Oldenburg wurde die 5-Loch-Sonde kalibriert. Dabei konnten sowohl die Anströmgeschwindigkeit v als auch die Anströmwinkel $(\alpha, \beta) = \phi$ reproduzierbar eingestellt werden. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 12 links gezeigt. Es wurden folgende Messungen durchgeführt:

1. vertikale Ausrichtung der Sonde (Löcher 1, 2, 4 bilden vertikale Achse), $\phi = 0°$, Variation von v
2. vertikale Ausrichtung (Löcher 1, 2, 4 bilden vertikale Achse), $\alpha = [-25° : 5° : 25°]$, Variation von v
3. horizontale Ausrichtung (Löcher 1, 3, 5 bilden vertikale Achse), $\beta = [-25° : 5° : 25°]$, Variation von v
4. diagonale Ausrichtung (Achsen um 45° gedreht), $\phi = [-20° : 10° : 20°]$, Variation von v

Aus der ersten Messreihe wurde der Zusammenhang zwischen v und gemessenem Druck bei idealer Anströmung bestimmt ($\alpha = 0°$). Mit Hilfe von der zweiten und dritten Messung konnte der Zusammenhang zwischen Anströmwinkel und gemessenem Druck bestimmt werden. Es wurden zwei Winkel eingeführt: α und β. α entspricht dabei dem AoA und

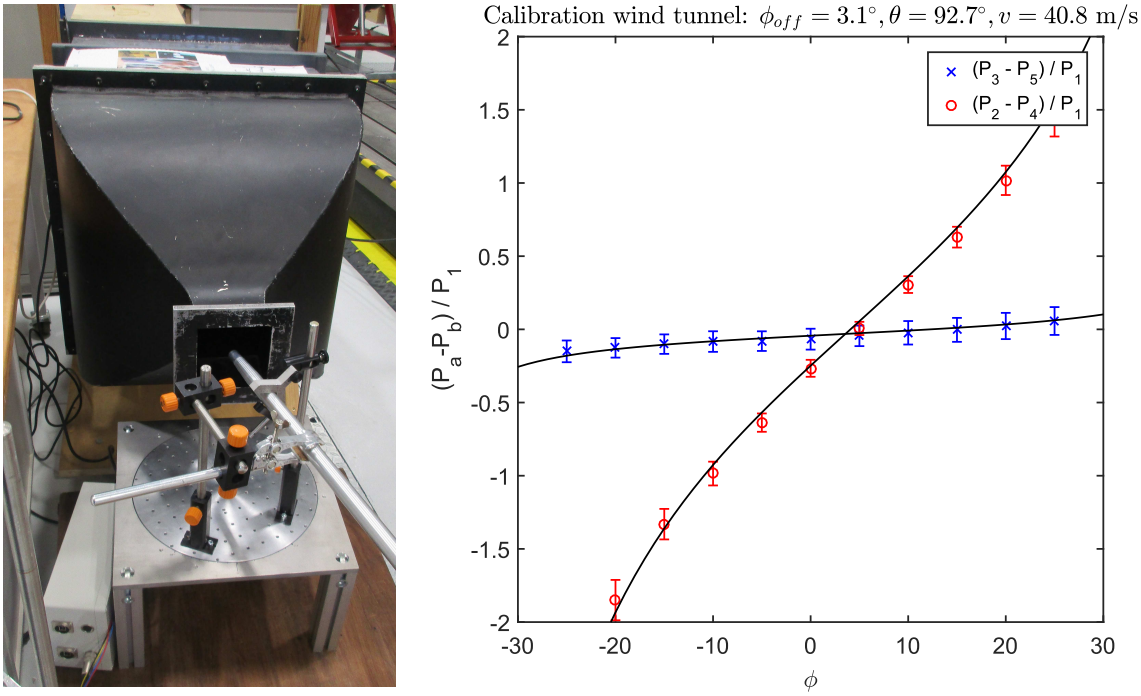

Abb. 12: Kalibrierung der 5-Loch-Sonde: links: Versuchsaufbau; rechts: Kalibrierkurve

beschreibt den Winkel zwischen Anströmung und Oberflächennormalen an Loch 1 entlang der vertikalen Achse (s. 11), β beschreibt analog den Winkel entlang der horizontalen Achse und beschreibt eine Queranströmung. Details zur Kalibrierung sind u. a. in Ref. [25] zu finden. In Abb. 12 rechts sind die resultierenden Ergebnisse der 3. Messung gezeigt, zusammen mit dem theoretischen Verlauf einer reibungsfreien Strömung (Potentialströmung). Aus den Verläufen lässt sich die Verdrehung der Sonde von 92° gegenüber der vertikalen Achse bestimmen, was sogar erlaubt kleinere Abweichungen im Versuchsaufbau nachträglich zu quantifizieren. Somit können an Hand des theoretischen winkelabhängigen Druckverlaufs aus den gemessenen Druckdaten der Messkampagne die Anströmwinkel α und β bestimmt werden.

5.2 Messkampagne an WEA

Nach erfolgreicher Überprüfung der Messsysteme und der Montage des Handschuhs an die WEA wurde die eigentliche Messkampagne am 13. Juli 2018 in Eggebek durchgeführt. Für die Steuerung der Anlage waren Vertreter des Anlagenbetreibers Denker & Wulf vor Ort, für die Thermografiemessungen Teams vom DLR Göttingen, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik und der Deutschen WindGuard, sowie des BIMAQ. Weiterhin wurde von der HS Flensburg die Kamera zur Beobachtung der Druckseite betrieben. Die Druck- und Mikrofonmessungen wurden von der FH Kiel durchgeführt. Abb. 13 zeigt einige Impressionen der Messung.

Die Druckdaten wurden mit 250 Hz aufgenommen, die Mikrofon- und Umweltdaten mit 25 kHz. Auf Grund der begrenzten Übertragungsrate des Initiums wurden Sequenzen mit 60 s Dauer aufgenommen. Um genügend Zeit zur Speicherung der Daten zu haben, wurde zwischen den Sequenzen eine Pause von 30 s eingelegt. Die Thermografieaufnahmen wurden ortsfest durchgeführt, es wurde das Blatt also einmal je Umlauf aufgenommen.

Zunächst wurde die Umströmung bei arretierter Bremse gemessen, also bei Stillstand des Blattes. Dabei wurden 5 Sequenzen à 60 s aufgenommen. Anschließend wurde die Bremse gelöst und die Anlage ist angelaufen. Da ein Betrieb im Teillastbereich [2] nicht einzustellen war, ist die Anlage im Normalbetrieb gelaufen, also optimiert an die herrschenden Wind-

[2] Als Betrieb mit fester Drehzahl unterhalb der Nenndrehzahl zu verstehen

Abb. 13: Messkampagne: links: laufender Betrieb der WEA; Mitte: Aufnahme der Spinnerkamera; rechts: Thermografie der DWG und des BIMAQ

verhältnisse. In diesem Zustand wurden weitere 31 Sequenzen aufgenommen. Im Anschluss an die letzte Sequenz hat das Initium auf Grund eines unbekannten Fehlers keine Daten mehr aufgezeichnet, jedoch haben die Messkarten weiter Mikrofon- und Umweltdaten aufgenommen. Da die Karten die Daten schneller speichern konnten, wurden kontinuierlich 13 Sequenzen à 300 s aufgenommen. Während dieser Sequenzen wurde die Anlage mehrfach gestoppt und wieder gestartet um das Verhalten beim Anfahren genauer zu untersuchen. Somit wurde ein sehr umfangreicher Datensatz aufgenommen, der ein umfängliches Bild der Strömungsverhältnisse an der Oberfläche eines Rotorblattes einer WEA im laufenden Betrieb ermöglicht.

6 Auswertung

In diesem Abschnitt sollen nun die aus den Daten erzielten Ergebnisse präsentiert werden. Diese werden zunächst nach Messsystem geordnet diskutiert, bevor sie anschließend zueinander in Relation gesetzt werden.

Neben der Frage, wie sich die Umströmung im laufenden Betrieb ausbildet, ist es von besonderem Interesse, wie dieser stationäre Betrieb erreicht wird. Dabei von besonderem Interesse ist das Verhalten der Grenzschicht während des Anlaufens der Anlage, da sich hier die Umströmung im Übergang von Stillstand zum stationären Betrieb befindet und somit möglicherweise transiente Vorgänge beobachtet werden können.

Daher wurde für die Analyse der Vergleich dieser beiden Fälle (Anlaufen der Anlage – Stationärer Betrieb) in der weiteren Darstellung gewählt um die zeitliche Entwicklung der Grenzschicht während des Betriebs der Anlage zu dokumentieren.

6.1 Anströmung

Zunächst sollen die Ergebnisse der 5-Loch-Sonde präsentiert werden. Dazu wurden zwei Datensätze [Anlaufen der Anlage (Dataset: 11:01) und stationärer Betrieb (Dataset: 11:18)] exemplarisch ausgewählt. Die Kalibriermessung im Windkanal der Universität Oldenburg (Kap. 5.1) hat gezeigt, dass die theoretische Druckverteilung einer Potentialströmung sehr gut geeignet ist, um die Messwerte wiederzugeben. Daher konnten aus den relativen Drücken p_v und p_h der Anströmwinkel AoA und der Winkel der Queranströmung β bestimmt werden. Aus der Relation $p = 1/2 * \rho * v^2$ lässt sich ebenfalls die Anströmgeschwindigkeit v bestimmen. Für beide Datensätze sind zwei exemplarische 10s-Sequenzen in Abb. 14 dargestellt, oben für das Anlaufen der Anlage und unten für den stätionären Betrieb. Gezeigt sind (jeweils von oben nach unten) der Anströmwinkel AoA, die Queranströmung β sowie die Anströmgeschwindigkeit v. In orange ist zusätzlich die SCADA-Anströmgeschwindigkeit, errechnet aus der mittleren Windgeschwindigkeit an der Gondel und der Rotationsgeschwindigkeit an der Position des Handschuhs, dargestellt.

Während beim Anlaufen der Anlage die beiden Geschwindigkeiten noch einen Offset zueinander haben, passen im stationären Betrieb die Geschwindigkeiten gut zueinander. Auffällig ist, dass die Anströmgeschwindigkeit während eines Umlaufs nicht konstant ist, sondern periodisch während eines Umlaufs variiert. Dies ist ein direkter Nachweis der Schichtung der atmosphärischen Grenzschicht.

Ebenfalls lässt sich beobachten, dass der Anströmwinkel zeitlich nicht konstant ist, sondern ebenfalls variiert. Beim Anlaufen der Anlage ändert er sich langsam von negativen Werten hinzu positiven Anstellwinkeln, wie es zu erwarten ist. Im annähernd drehzahlkonstanten Betrieb ist diese Variation sehr viel geringer ausgeprägt.

Abb. 15 zeigt exemplarisch eine aus 2500 Messpunkten (entsprechend 10 Sekunden) gewonnene Verteilungsfunktion der Anströmgeschwindigkeit. Zum Vergleich ist eine Gaußkurve mit gleicher Standardabweichung eingezeichnet. Man erkennt deutlich, dass eine sinnvolle, aerodynamische Turbulenzintensität so nicht gewonnen werden kann und vermutlich deutlich unter 2 % liegt.

6.2 Druckmessung

Neben der Bestimmung der Anströmbedingungen wurde ebenfalls die Druckverteilung auf der Saugseite des Handschuhs vgemessen. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden für die Analyse die gleichen 10s-Sequenzen wie in Abb. 14 verwendet. Dazu wurden die gemessenen Drücke über die 10s gemittelt und die Druckbeiwerte c_p gemäß

$$c_p = \frac{p - p_0}{1/2\rho v^2}$$

bestimmt. In Abb. 16 sind für die beiden Fälle die c_p-Verteilungen dargestellt. Zusätzlich wurden mit XFOIL [26] bestimmte c_p-Verteilungen für verschiedene AoA dargestellt.

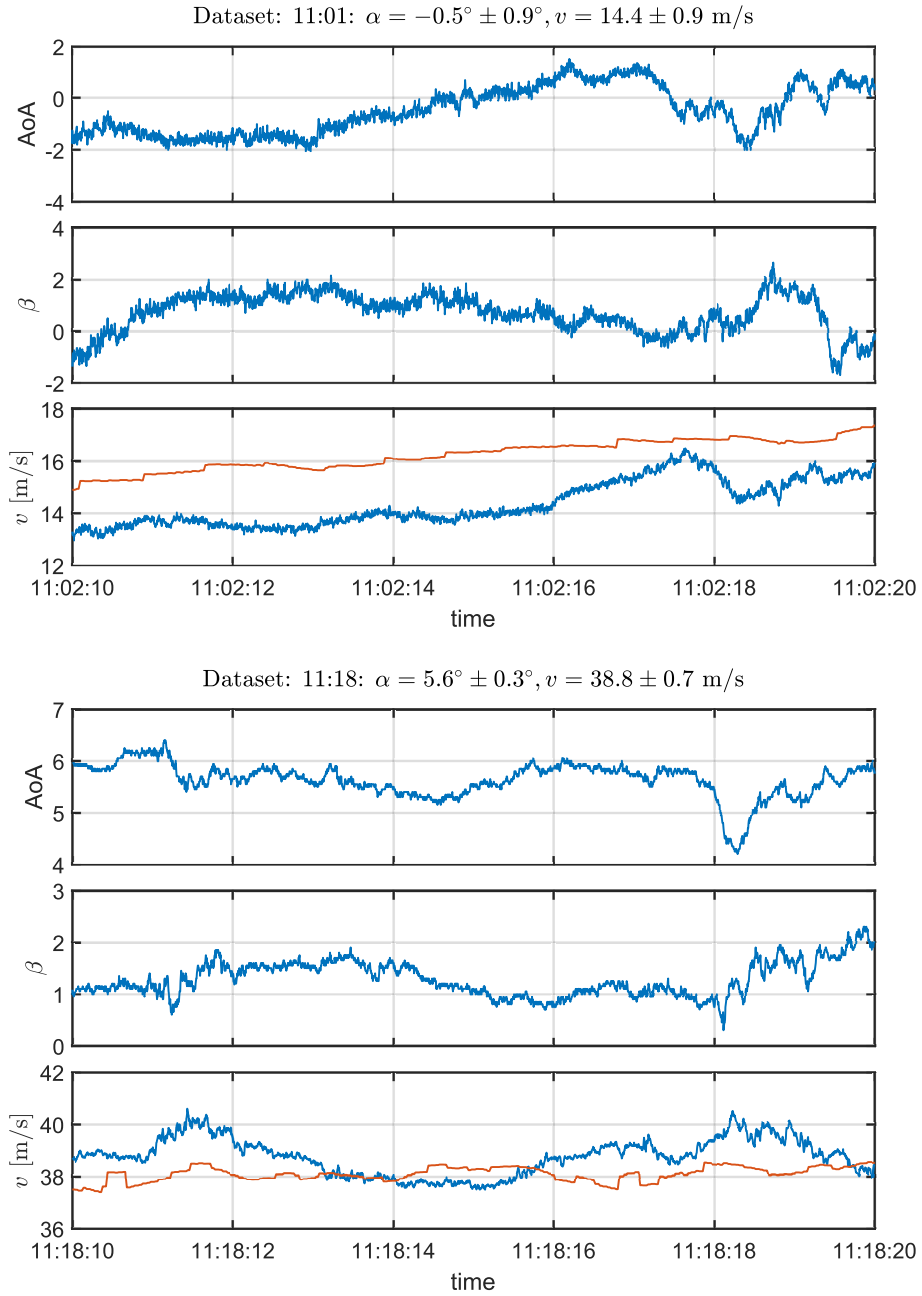

Abb. 14: Anströmung gemessen mit der 5-Loch-Sonde. Oben: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), unten: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr). Jeweils von oben nach unten: Anströmwinkel (AoA), Queranströmung (β) und Anströmgeschwindigkeit (v). Rot: SCADA-Daten

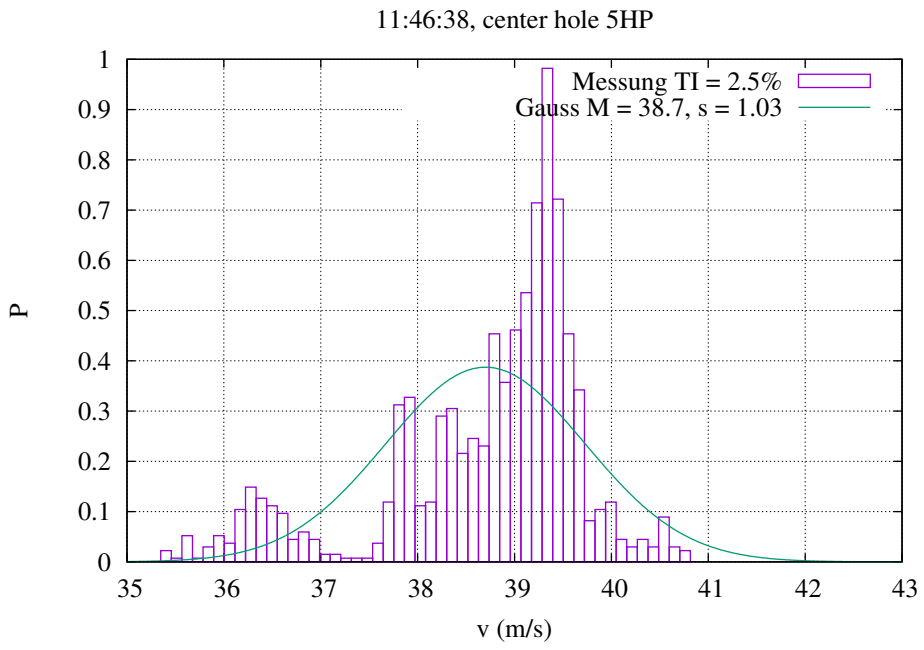

Abb. 15: Beispielhaftes Histogramm einer Geschwindigkeitsverteilung gewonnen aus Daten der 5-Loch-Sonde

Im Anlaufbereich der Anlage ist keine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messung und XFOIL zu beobachten. Dies ist sehr wahrscheinlich auf den transienten Charakter der Sequenz zurückzuführen, in der sich AoA von -2° auf +1° ändert, was den Vergleich mit einem stationären AoA erschwert.

Im stationären Betrieb der Anlage ist eine bessere Übereinstimmung zu beobachten, Messwerte und XFOIL-Daten für AoA=5° liegen innerhalb der Fehlertoleranzen. Der Mittelwert aus der 5-Loch-Sonde von AoA=$5,6 \pm 0,3°$ (s.Abb. 14) passt gut zu den ogigen Werten.

Auffällig ist, dass in beiden Fällen die Daten der Sensoren auf der Druckseite nicht zu den XFOIL-Kurven passen. Da die Druckverteilung empfindlich von der lokalen Krümmung an der Vorderkante abhängig ist, resultieren bereits geringe Abweichungen der Form des Handschuhs in großen Abweichungen der Beiwerte. Da das Budget für die Fertigung eines Handschuhs in Windkanalqualität (s.o.) den Rahmen des Projekts weit überschritten hätte, sind daher diese Abweichungen am ehesten so zu erklären.

6.3 Mikrofondaten

Neben der Untersuchung der Druckverteilung sollte ebenfalls der Charakter der Grenzschichtströmung (laminar – transitionell – turbulent) bestimmt werden. Dazu wurde die Geräuschentwicklung mittels der 48 Mikrofone auf der Saugseite aufgenommen. Mikrofon 5 befindet sich an der Vorderkante des Handschuhs, 1-4 auf der Druckseite und 6-48 auf der Saugseite.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Transitionslage erfolgt analog zu Ref. [8]. In Abb. 17 sind die Rohdaten der Mikrofone für Anlaufen (links) und stationären Betrieb (rechts) der Anlage dargestellt. Es fällt direkt auf, dass im stationären Betrieb viel stärkere Signale gemessen wurden, was auf einen deutlich höhreren Turbulenzgrad der Grenzschicht hinweist.

Für eine genauere Analyse wurde der Schalldruckpegel L_p bestimmt. Er berechnet sich aus dem Leistungsdichtespecktrum P_{sp} gemäß [8]

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{p_{ref}} \right)$$

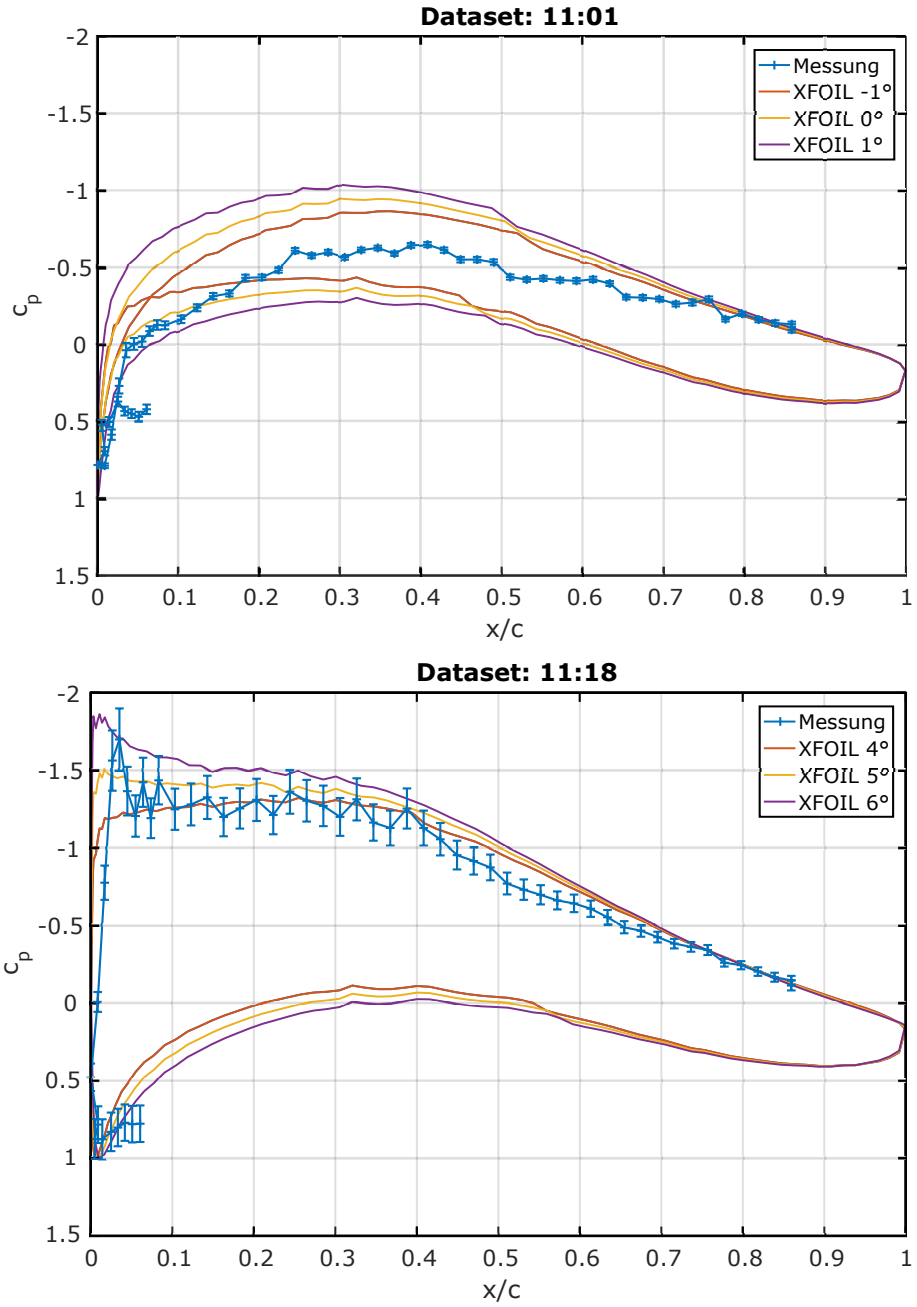

Abb. 16: c_p-Verteilung auf dem Handschuh. Oben: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), unten: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr).

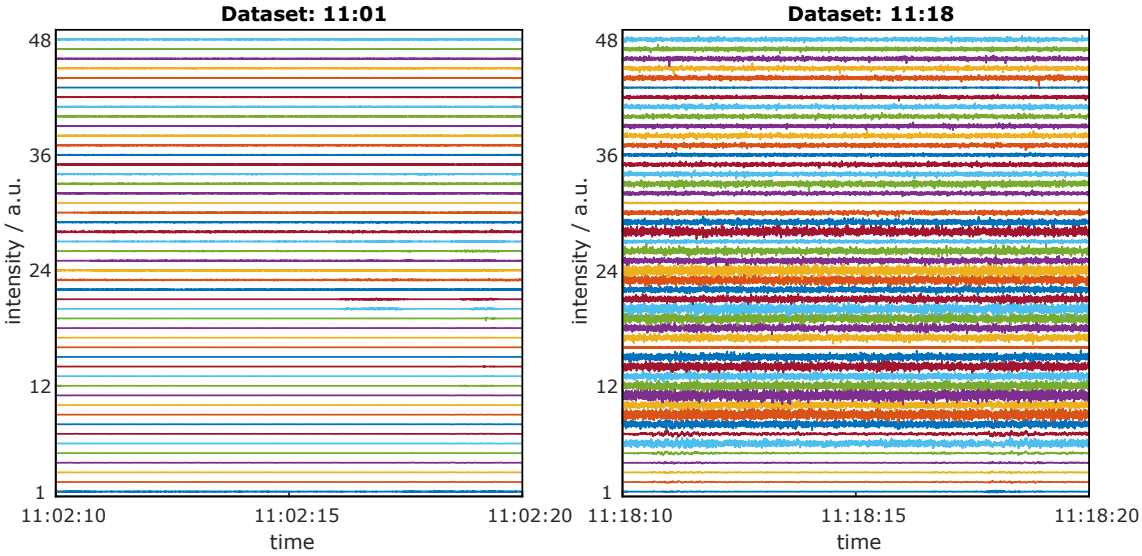

Abb. 17: Rohdaten der Mikrofone. Links: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), rechts: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr).

mit $p_{ref} = 20\ \mu$Pa und

$$P_{rms}^2 = 2\int_{f_1}^{f_2} P_{sp}(f)df$$

aus dem Frequenzintervall $[f_1; f_2]$=[2 kHz; 6 kHz]. Hierbei ist

$$P_{sp}(f) = \int P_{sf}(t) \cdot e^{ift}\, dt\ . \tag{1}$$

Um die zeitliche Entwicklung des Schalldruckpegels (eng. *sound pressure level* SPL) zu untersuchen, wurden Sequenzen von je 2048 Messwerten analysiert und daraus ein SPL-Wert bestimmt. Somit ergibt sich eine zeitliche Auflösung von etwa 12 Hz für den Schalldruckpegel. In Abb. 18 sind für Anlaufen und stationären Betrieb die zeitliche Entwicklung von SPL dargestellt, zusammen mit der aktuellen Rotordrehzahl und der radial nach außen gerichteten lokalen Beschleunigung.

Die Farbskala verläuft von blau über grün und gelb nach rot mit ansteigendem SPL. Während des Anlaufens ist das gesamte Niveau von SPL geringer als im stationären Betrieb. Weiterhin kann beobachtet werden, dass im hinteren Bereich der Saugseite Bereiche mit höheren SPL-Werten beobachtet werden, die mit zunehmender Rotordrehzahl in Richtung Vorderkante wandern.

Im stationären Betrieb ist das gesamte Niveau von SPL höher. Zu beobachten ist ein ausgeprägter Bereich an der Vorderkante des Handschuhs, in dem SPL deutlich geringer ist. Dieser Bereich weist eine laminare Grenzschicht auf, während weite Teile der Handschuh-Saugseite eine turbulente Grenzschicht aufweist.

Andeutungsweise ist eine periodische Variation der Position der Transitionskante anhand der Variationen der an der Druckseite plazierten Mikrophone (Nr. 1 bis 4) zu erkennen. Durch die periodische Änderung der radialen Beschleunigung kann die Position des Handschuhs relativ zum Boden abgeschätzt werden. Am höchsten Punkt wirken Zentrifugalbeschleunigung und Gravitation entgegen, im tiefsten Punkt wirken beide in die gleiche Richtung. Somit tritt ein lokales Maximum in der Beschleunigung beim Turmdurchlauf auf, genau dann, wenn eine Variation der Transitionskante zu beobachten ist. Ist der Hanschuh dem Boden näher (Zentrifugalbeschleunigungund Gewicht addieren sich) so wird auch die Anströmturbulenz größer sein und größere turbulente Anteile der Grenzschicht sollten sich zeigen.

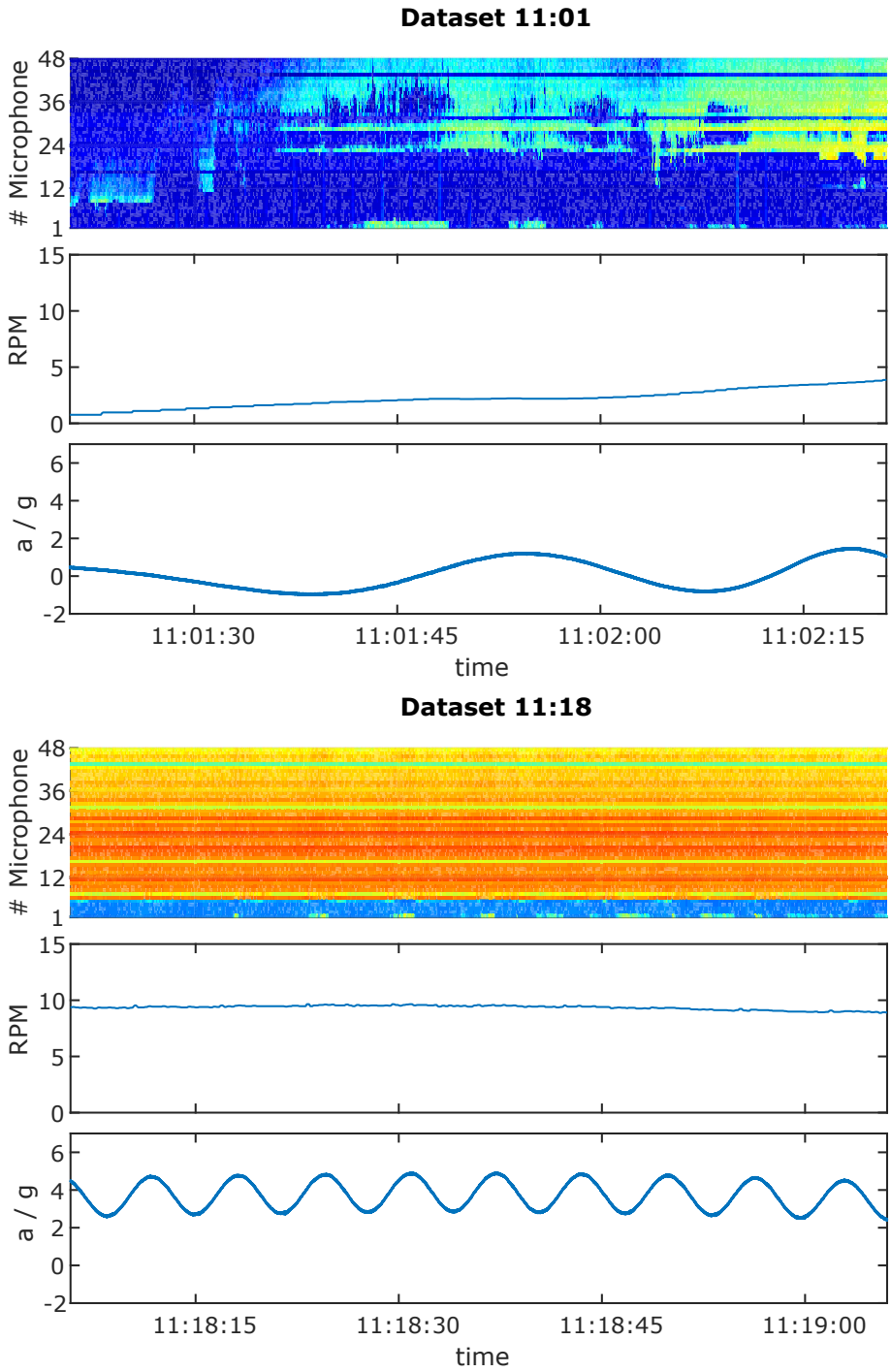

Abb. 18: Detektion der Transitionslage. Oben: Anlaufen der Anlage (11:01 Uhr), unten: Stationärer Betrieb (11:18 Uhr). Jeweils von oben nach unten: Schalldruckpegel (SPL), Rotordrehzahl (RPM) und lokale Beschleunigung (a).

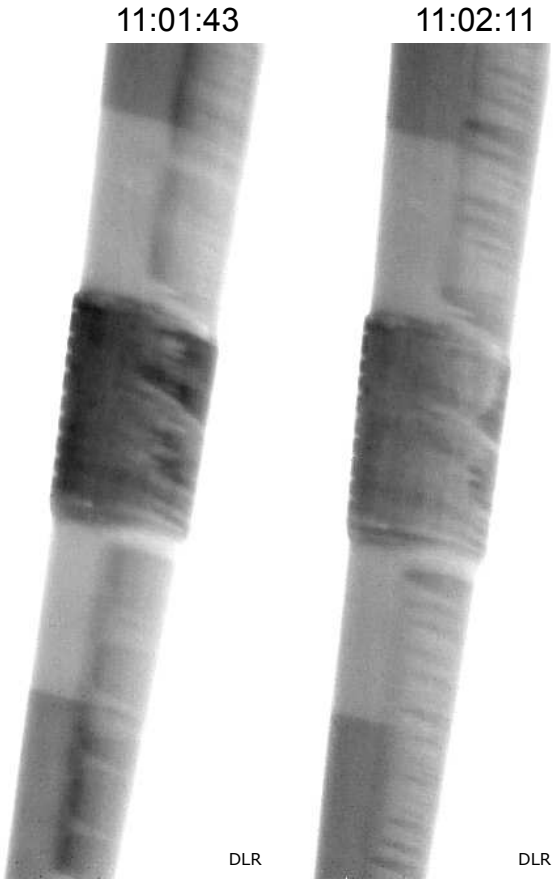

Abb. 19: Thermografiebild des DLR beim Anlaufen der Anlage (Farbe invertiert). Anströmung von rechts.

6.4 Thermografie

Zusätzlich zu den Messungen im Handschuh wurden durch die Teams vom DLR und der Deutschen WindGuard und dem BIMAQ Thermografieaufnahmen des Handschuhs vorgenommen. In Abb. 19 sind zwei Bilder vom DLR gezeigt, die beim Anlaufen der Anlage aufgenommen wurden. Zwischen den Aufnahmen liegen 28s.

Auf Grund des unterschiedlich guten Wärmetransports der laminaren bzw. turbulenten Grenzschicht weisen beide Bereiche unterschiedliche Temperaturen auf, die sich in unterschiedlichen Helligkeiten widerspiegeln. Die Transitionslinie ist durch einen Helligkeitssprung zu identifizieren. Gut ist die Transitionslinie auf dem Blatt ober- und unterhalb des Handschuhs zu erkennen, ebenso eine Turbulenzkeile, die durch die Verschmutzung des Blattes hervorgerufen werden. Im Vergleich der Aufnahmen lässt sich eine stärkere Ausbildung dieser Keile zum späteren Zeitpunkt beobachten.

Die Aufnahmen zeigen im Bereich des Handschuhs selbst keine Transitionsline dafür viele Turbulenzkeile und es ist ersichtlich, dass die Transition im Vergleich zum umgebenden Rotorblatt deutlich in Richtung Vorderkante verschoben ist (vergl. Abb. 21). Dies ist auf die vergrößerte Oberflächenrauhigkeit des Handschuhs zurückzuführen. Weiterhin ist zu erkennen, dass bei späteren Aufnahmen der laminare Grenzschichtbereich auf dem Handschuh erheblich kleiner geworden ist und beinahe die gesamte Saugseite turbulent ist. Dies ist in Einklang mit den Erkenntnissen aus den Mikrofondaten, dass sich die turbulente Grenzschicht während des Anlaufens der Anlage von der Hinterkante nach vorne ausbreitet, bis nur noch ein sehr kleiner laminarer Bereich an der Vorderkante existiert. Mit steigender Anströmgeschwindigkeit reagiert die Grenzschicht aufgrund ihrer verkleinerten Dicke empfindlicher auf geometrische Störungen wie z. Bsp. erhöhter Rauheit.

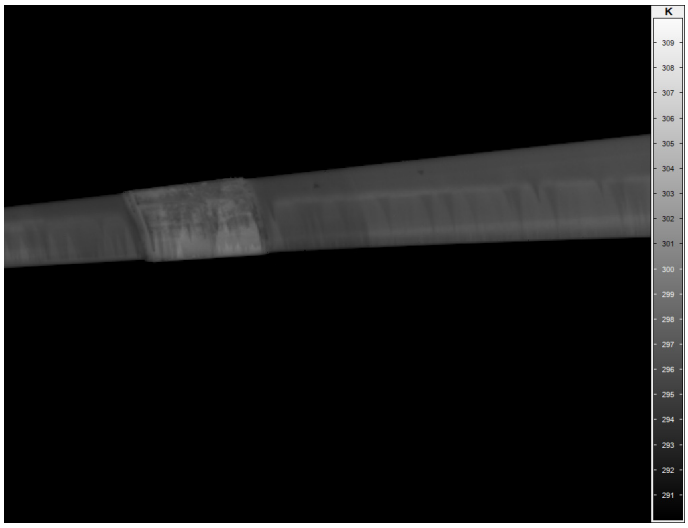

Abb. 20: Thermographiebild der DWG beim Anlaufen der Anlage. Anströmung von unten. Zeit 11:03:59

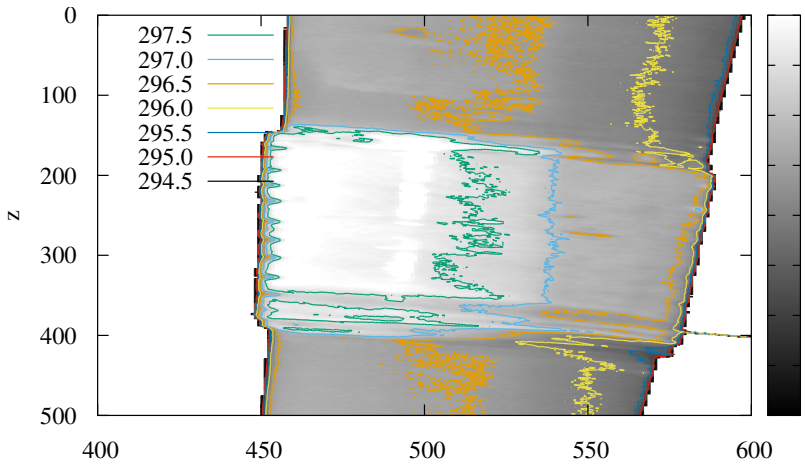

Abb. 21: Aufbereitetes Thermographiebild. Anströmung von rechts. Zeit 11:18:11 Drehzahl ca. 9 UPM, Windgeschwindigkeit ca. 6 m/s

6.5 Zusammenfassung

Aus den verschiedenen Messungen konnte ein konsistentes Bild der Entwicklung der aerodynamischen Grenzschicht gewonnen werden. Mit Hilfe der 5-Loch-Sonde wurden Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit bestimmt, die mit Werten aus der Simulation gut korrelieren. Die Anströmgeschwindigkeit ist ebenfalls in guter Übereinstimmung mit den SCADA-Daten - die unabhängig von der 5-Loch-Sonde erhoben wurden - wenn ein geeigneter Offset in den Zeitskalen vorgenommen wird.

Aus Anströmgeschwindigkeit und Druckverteilung konnten die Druckbeiwerte auf der Saugseite bestimmt werden. Ein Vergleich mit XFOIL-Daten zeigt auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen vorgegebenem und mittels der Sonde bestimmten Anströmwinkel.

Darüber hinaus konnte mit Hilfe der Mikrofondaten die Transition zwischen laminarer und turbulenter Grenzschicht bestimmt werden und die zeitliche Entwicklung der Transition beobachtet werden. Diese Befunde decken sich mit den Thermografiemessungen, die von unabhängiger Seite vorgenommen worden sind.

Somit konnte aus der Kombination verschiedener Messsysteme eine in weiten Bereichen konsistente Beobachtung der Grenzschichtdynamik eines Rotorblattes einer Multi-MW-WEA im laufenden Betrieb erreicht werden.

7 Fazit und Ausblick

Die hier dargelegten Ergebnisse unserer Messungen zeigen ein konsistentes Bild der Anströmbedingungen eines Rotorblatts einer Multi-MW-Windenergieanlage im laufenden Betrieb. Diese Art der Messung ist nach unserem Kenntnisstand einmalig und liefert einen tiefen Einblick in die aerodynamischen Prozesse einer Windenergieanlage.

Abweichungen von theoretischen Vorhersagen lassen sich größtenteils auf die unzureichende Oberflächenbeschaffenheit beding durch den zu wählenden kostengünstigen Fertigungsprozess des Handschuhs zurückführen, so dass hier Optimierungspotenzial gefunden wurde. Diese Messung sollte als proof-of-principle angesehen werden, dass es also möglich sei, die aus der Flugzeugaerodynamik bekannte Technik eines aerodynamischen Handschuhs auf Windenergieanlagen der Multi-MW-Klasse zu übertragen. Für eine mögliche Weiterentwicklung des Systems muss eine höhere Oberflächengüte erreicht werden. Es sollte - wenn auch mit erheblich höheren Kosten - möglich sein, den Handschuh aus einer Negativform herzustellen, was sowohl eine exaktere Geometrie als auch eine geringere Oberflächenrauigkeit ermöglicht. Ebenfalls könnte die Bedienbarkeit erhöht werden bzw. das System weitgehend autonom operieren, sowie sog. *smart-blade* Objekte, wie aktive Hinterkanten, Ausblasen und Absaugen an spezifischen Stellen, etc., einbezogen werden. Darüber hinaus wäre es denkbar, die konstruktive Gestaltung der Befestigung am Rotorblatt zu verbessern, so dass der Handschuh wiederverwendet werden kann. Damit wäre es möglich, an baugleichen Anlagen (zumindest gleiche Blätter) an verschiedenen Standorten Messungen durchzuführen, um somit die Umwelteinflüsse verschiedener Standorte miteinander zu vergleichen.

Dennoch ist das Projekt in der durchgeführten Form ein Erfolg, das ein umfassendes Bild der Grenzschichtströmung einer Windenergieanlage im laufenden Betrieb liefert. Diese Art der Forschung kann sicherlich dazu beitragen, die Entwurfkriterien für Rotorblätter -insbesondere in Bezug auf den Einsatz von sog. Laminarprofilen - zu verbessern damit Windenergieanlagen zu optimieren und somit einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz zu liefern.

8 Danksagung

Es ist wahrscheinlich nicht möglich, an dieser Stelle angemessen all denen zu danken, die seit den ersten Ideen im Jahr 2004 und konkreterer Planung an einer Multimegawatt-Anlage seit 2011 zum Gelingen der hier beschriebenen Messung im Jahr 2018 beigetragen haben. Nichtsdestotrotz sollen einige Namen herausgehoben werden: Herr Korjahn, Herr Dr.-Ing. Erbslöh und Herr Dr. Bayerbach von der Fa. Senvion (ehem. REpower) haben sich stets im Haus des Herstellers in unserem Sinne eingesetzt, Herr Levsen, Herr Vogel und Herr Rick vom Beitreiber Denker & Wulf waren genauso konstruktiv dabei und vom praktischen Know-How des Teams der WingTec GmbH, Eggebek, haben wir maßgeblich bei der Fertigung und der Montage des Handschuhs profitiert. Thermographische Aufnahmen wurden von den Hrn. Balaresque, Deutsche WindGuard GmbH, Dr.-Ing. Dollinger, BIMAQ und Dr. Schülein, DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen, erstellt. Rechenzeit wurde vom HLRN, dem Norddeutschen Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen, zur Verfügung gestellt.

Meinem lieben Kollegen von der Hochschule Flensburg, Clemens Jauch und Herrn Marcel Schedat danke ich für Unterstützung bei der Vertrags- und Antragsgestaltung sowie der Montage der Spinnerkamera und für die Bereitstellung der SCADA-Daten.

Selbstverständlich wäre es ohne die Förderung durch die EKSH nie zu einer Realisierung gekommen.

Herr Dr.-Ing. Dollinger, Universität Bremen, hat ausführliche Korrekturen für diesen Bericht vorgeschlagen und Herr Marc Petsche (ehem. Senvion) hat sich ebenfalls in dieser Richtung eingebracht.

Allen sei nochmals herzlichst für ihr Interesse und ihre Mühe gedankt.

Literatur

[1] A.P. Schaffarczyk, R. Boisard, K. Boorsma, B. Dose, C. Lienard, T. Lutz H. Å Madsen, H. Rahimi, T. Reichstein, G. Schepers, N Sørensen, B. Stoevesand, and P. Weihing. Comparison od 3d transitional cfd simulations for rotating wings with measurements. In *The Science of Making Torque from Wind*, Milan, Italy, 2018.

[2] Lobo, Brandon. Investigation into Boundary Layer Transition on the MEXICO Blade. In *The Science of Making Torque from Wind*, Milan, Italy, June 2018.

[3] Albert Betz. Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, 26, 1920.

[4] H. Glauert. *Airplane Propellers*, pages 169–360. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1935.

[5] R E. Wilson, P B. S. Lissaman, and S N. Walker. Aerodynamic performance of wind turbines. *ERDA/NSF/04014-7611*, 06 1976.

[6] E.W.E. Association. *UpWind - Design limits and solutions for very large turbines.* Ewea, 2011.

[7] https://www.mexnext.org/resultsstatus/.

[8] Niels Troldborg, Christian Bak, Helge Aagaard Madsen, and Witold Robert Skrzypinski. *DANAERO MW: Final Report.* DTU Wind Energy, Denmark, 2013.

[9] D. Schwab, S. Ingwersen, and A.P. Schaffarczyk. Abschlussbericht zum Teilprojekt 1: „Aerodynamischer Handschuh zur Vermessung der aerodynamischen Grenzschicht an rotierenden Windturbinenblättern“ der Projektphase II des Verbundprojektes CEwind. Technical report, FH Kiel, 2013.

[10] A. P. Schaffarczyk, D. Schwab, and M. Breuer. Experimental detection of laminar-turbulent transition on a rotating wind turbine blade in the free atmosphere. *Wind Energy*, 20(2):211–220, 2017.

[11] K. Freudenreich, K. Kaiser, A.P. Schaffarczyk, H. Winkler, and B. Stahl. Reynolds number and roughness effects on thick airfoils for wind turbines. *Wind Engineering*, 28(5):529–546, 2004.

[12] Daniela Schwab, Stefan Ingwersen, Alois Peter Schaffarczyk, and Michael Breuer. Aerodynamic boundary layer investigation on a wind turbine blade under real conditions. In Michael Hölling, Joachim Peinke, and Stefan Ivanell, editors, *Wind Energy - Impact of Turbulence*, pages 203–208, Berlin, Heidelberg, 2014. Springer Berlin Heidelberg.

[13] A P Schaffarczyk, D Schwab, S Ingwersen, and M Breuer. Pressure and hot-film measurements on a wind turbine blade operating in the atmosphere. *Journal of Physics: Conference Series*, 555(1):012092, 2014.

[14] A.P. Schaffarczyk. *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics.* Springer Verlag, Berlin, 2014.

[15] Deutsche WindGuard GmbH, Varel.

[16] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) - Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen.

[17] C. Dollinger, M. Sorg, N. Balaresque, and A. Fischer. Measurement uncertainty of ir thermographic flow visualation measurements for transition detection on wind turbines in operation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, pages 279–289, 2018.

[18] Senvion S. A., senvion.com.

[19] https://www.senvion.com/global/de/produkte-services/windenergieanlagen/mm/mm92/.

[20] LM WindPower, Kolding, Dänemark.

[21] wingtec GmbH, Eggebek.

[22] Berkan Gültek. Fertigung eines aerodynamischen Handschuhs aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff - Projekt im Unternehmen. Fachhochschule Kiel, 2017.

[23] J. Romblad, D. Ohno, T. Nemitz, W. Würz, and E. Krämer. Laminar to turbulent transiiton due to unsteady inflow coditions: Wind tunnel experiments at increased turbulence levels. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018*, DocumentID: 480138, 2018.

[24] A. P. Schaffarczyk, D. Schwab, and M. Breuer. Experimental detection of laminar-turbulent transition on a rotating wind turbine blade in the free atmosphere. *Wind Energy*, 20(2):211–220, 2016.

[25] A. L. Treaster and A. M. Yocum. The calibration and application of five-hole probes. In K. E. Kissell, editor, *24th International Instrumentation Symposium*, pages 255–266, 1978.

[26] XFOIL v6.99, https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/.