

Untersuchungen zu einem Ablösephänomen an der Vorderkante von modifizierten Windrad-Flügelprofilen

Investigation of a detachment phenomenon at the leading edge of modified wind turbine airfoils

Marten Danker, Rainer Hain, Maximilian Maigler und Oliver Meyer

Wissenschaftliche Einrichtung für Strömungsmechanik, Fakultät für Maschinenbau 4/2, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Profilmodifikation, Ablöseblase, PIV, Validierung, Thermografie
Airfoil modification, detachment bubble, PIV, validation, thermography

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Umströmung eines modifizierten Windradrotorblattprofils. Ein zusammenfassendes Ergebnis ist, dass sich die Methoden erfolgreich gegenseitig validiert haben. So wurde durch Thermografie, UV-Anstrich und PIV-Messtechnik ein Ausprägen einer Ablösung im Vorderkantenbereich ab einem Anstellwinkel von $\alpha = 8,2^\circ$ beobachtet. Für kleinere Profilanstellungen befindet sich eine Ablöseblase mit Transition auf der Oberseite des Profilmodells. Dies konnte mit LES-CFD, Thermografie und UV-Anstrich übereinstimmend nachgewiesen werden. Weiterhin wurden die Geschwindigkeitsfelder dargestellt und verglichen. Die Robustheit der Messung in der PIV wurde überprüft. Für weitere theoretische Modifikationsvarianten ergibt sich in der Gesamtheit ein funktionierendes Test-Setup. Eine weitere Simulation per LES wäre mit wenigen Anpassungen durchführbar und die gezeigten Experimente im Windkanal bilden wichtige und funktionierende Werkzeuge zur Validierung.

1. Einführung

Windkraftanlagen werden vermehrt zur Stromerzeugung eingesetzt. Die Effizienz und Betriebssicherheit ist dabei von entscheidender Bedeutung, um möglichst kostengünstig Strom zu gewinnen. In einer laufenden Untersuchung am Institut für Strömungsmechanik der Fakultät für Maschinenbau an der Universität der Bundeswehr München werden Windkraftrotorblattprofile und die Wirksamkeit von verschiedenen Modifizierungsmaßnahmen untersucht. In Danker et al. 2022 wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um für ein vorhandenes Basisprofil eine optimale Vorderkantenmodifikation zu finden. Kriterium hierbei ist, die Auftriebspolare des Profils für einen weiten Bereich von Anstellwinkeln nicht zu verändern, jedoch ab einem definierten Auslegungspunkt den Auftriebsbeiwert nicht weiter steigen zu lassen und konstant zu halten. Dies soll im Gesamtkontext einer Windkraftanlage dazu führen, dass die mechanische Belastung der Anlage ab einem bestimmten Auslegungspunkt auch bei böiger Windbelastung oder starkem Anstieg der Windgeschwindigkeit aerodynamisch begrenzt wird und die Anlage weiter betrieben werden kann.

In Danker et al. 2022 wurde zunächst ein CFD-Basisfall aufgesetzt und mit experimentellen Daten validiert. Anschließend wurden parametrisierte Vorderkantengeometrien simuliert, ausgewählt,

gefertigt und im Windkanal untersucht. Die verwendeten RANS Modelle lieferten gute Ergebnisse bei Anstellwinkeln mit geringen Ablöseeffekten. In einigen Bereichen ergab die Simulation allerdings Unsicherheiten, weshalb für ausgewählte Anstellwinkel eine 3D DES Simulation zur Validierung der Daten verwendet wurde. Hierbei ist besonders aufgefallen, dass bei bestimmten Anstellwinkeln des Profils auf der Oberseite der Vorderkante im Bereich der Modifikation eine lokale Ablöseblase entsteht.

Um die Profilmodifikationen parametrisierbar zu machen wird ein definierbarer Radius mit x - und y -Abstand zur Vorderkante tangential an das Basisprofil angeschlossen. Die neue Profilform ist im Vorderkantenbereich somit zwar tangentialstetig, aber nicht krümmungstetig. Es erscheint also klar, dass die Ablösung durch die Art der Modifikation an der Vorderkante entsteht, da die Strömung bei stärkerer Profilanstellung der Kontur nicht mehr folgen kann. Ob und in welcher Form die Ablöseblase auch am realen Profil auftritt, soll im Folgenden untersucht werden.

2. Methodik

Für die Untersuchung der Umströmung des Rotorblattprofils wird ein CFD-Datensatz aus Danker et al. 2022 um eine Large Eddy Simulation (LES) erweitert. Die Ergebnisse dienen als Basis für die Validierungsuntersuchungen im Windkanalexperiment.

2.1. Numerischer Ansatz

Im Gegensatz zu RANS-Modellen sind LES Simulationen transient und instationär, je nach Netzfeinheit, verschiedene Wirbelskalen aufzulösen. Eine vorangegangene RANS Simulation erzeugt die initialen Größen wie Geschwindigkeit und Druck. Nachdem sich die instationären Effekte ausgeprägt haben, werden die Daten jede ms ausgegeben und für den Fortlauf von 5 charakteristischen Längen gemittelt.

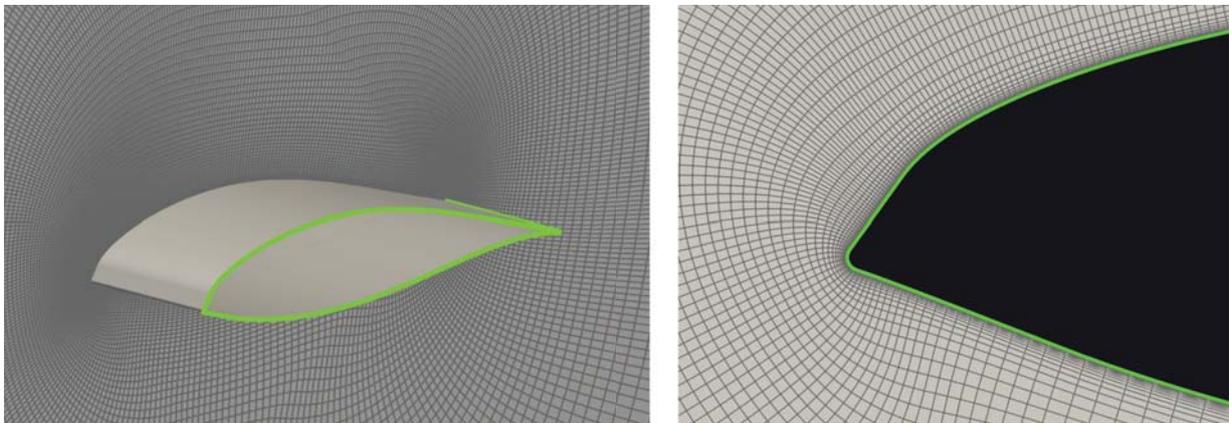


Abbildung 1: Schnitt in der Mittelebene durch das voll-strukturierte LES Netz (links) mit Detailansicht (rechts)

In Abb. 1 ist ein Schnitt des Netzes zu sehen (O-Grid). Die Fernfeld-Randbedingung befindet sich 50 Sehnenlängen vom Profil entfernt, um den Einfluss dieser auf die Simulation zu minimieren. Ein y^+ von 0.1 sowie $x^+ = z^+ \approx 20$ werden auf dem Profil vernetzt, um eine größtmögliche Auflösung bei gleichzeitig akzeptabler Rechenzeit zu ermöglichen. Das von Nicoud und Ducros 1999 entwickelte WALE Modell wird als das SGS-Modell für die Modellierung der nicht direkt aufgelösten Skalen verwendet. Insgesamt werden zwei interessante Anstellwinkel simuliert: $\alpha = 6,4^\circ$ (Strömung befindet sich kurz vor dem Einstellen des Ablöseeffekts an der Vorderkante) sowie $\alpha = 14,4^\circ$ (ausgeprägte Ablöseeffekte) und dann mit den Windkanalexperimenten verglichen.

Tabelle 1: Numerische Randbedingungen der CFD Simulationen

Randbedingung	Wert	Beschreibung
Fernfeld	$u_\infty = 40 \text{ m/s}$, $p_\infty = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	Inkompressibles Fernfeld mit geometrischem Anstellwinkel (Profil selbst gedreht bei rein axialer Strömung)
Profil	No-slip, $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$	Klassische no-slip Bedingung an der Wand
Periodische Randbedingung	Profilbreite $W = 0,2 \text{ m}$	Periodische Randbedingungen in tangentialer Richtung (<i>cyclicAMI</i>)

Die numerischen Randbedingungen der CFD Simulation sind in Tab. 1 aufgeführt. Der Open-Source solver OpenFOAM (im speziellen der inkompressible solver *pimpleFoam*) wurde verwendet und die Rechnungen auf 512 Kernen bei etwa 20 Millionen Zellen für einen Simulationszeitraum von 0,1 s durchgeführt.

2.2. Experimenteller Ansatz

2.2.1. Windkanal

Der für das Experiment verwendete Windkanal ist ein Göttinger Kanal mit offener Messstrecke. Die Reynoldszahl bezogen auf die Sehnenlänge der Profile von $L = 0,35\text{m}$ beträgt $Re = 800000$. Das Profil ist mit kreisförmigen Seitenscheiben ausgestattet und auftretende Windkanalinterferenzen werden nach Garner 1966 korrigiert. Der im Windkanal eingestellte Anstellwinkel ist zunächst unkorrigiert. Der Anstellwinkel in der Simulation ist durch die Abwesenheit von Windkanalinterferenzen korrekt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird im Folgenden jeder unkorrigierte Anstellwinkel aus den Experimenten korrigiert dargestellt. Zu Validierungszwecken wurden die aerodynamischen Kräfte von Profilmodellen dieser Art mehrfach in Referenzwindkanälen vermessen, siehe Meyer 2021.

2.2.2. Strömungsvisualisierung

Zur Visualisierung der Strömung im Bereich der Vorderkante und auf der Oberseite des Profils werden drei verschiedene Verfahren im Windkanal eingesetzt. Es wird die Particle Image Velocimetry (PIV) verwendet, um die Strömung an der Vorderkante und die vermutete Ablöseblase zu visualisieren und zu vermessen. Weiterhin wird ein Anstrich mit UV-Kontrastflüssigkeit sowie ein Aufbau mit einer Thermografiekamera verwendet, um die gesamte Strömung auf der Oberseite des Profils charakterisieren zu können.



Abbildung 2: Aufbau und Betrieb der PIV Messtechnik

2.2.3. PIV

Der Aufbau für die PIV ist in Abb. 2 zu sehen. Es wird ein doppeltgepulster Nd:YAG Laser verwendet, dessen aus zwei sphärischen und einer zylindrischen Linse erzeugte Lichtschnitt über einen Spiegel von unten auf die Vorderkante gelenkt wird. Da das Profilmodell im Windkanal aus messtechnischen Gründen mit der Oberseite nach unten eingebaut ist, wird durch das Beleuchten von unten die Vorderkante an der Oberseite untersucht. Die PIV-Rohbilder werden durch die transparente Seitenplatte am Profil mit einer traversengeführten CMOS-Kamera aufgenommen. Die Partikel mit einem mittleren Durchmesser von ca. $0,4 \mu\text{m}$ werden mittels eines PIVTEC Seeding Generators erzeugt und dem Kanal im Diffusor hinter der Messstrecke zugefügt. Für jeden zu untersuchenden Anstellwinkel werden 1000 Doppelbilder aufgenommen. Der Zeitabstand zwischen den beiden Bildern beträgt $\Delta t = 0,9 \mu\text{s}$. Die PIV Auswertung erfolgt mit einem Multipass-Algorithmus mit einer finalen Abfragefenstergröße von 24×24 Pixeln (soweit nicht anders erwähnt) in der Software DAVIS von LaVision. Auch die statistischen Größen werden mit dieser Software berechnet.

2.2.4. UV Anstrich

Die Präsenz der Ablöseblase an der Vorderkante wird neben den PIV-Messungen mit einem Anstrich von UV-Kontrastflüssigkeit nachgewiesen. Hierzu wird das Profil mit der Oberseite nach oben aufgehängt und von der Vorderkante stromab bestrichen. Durch eine UV-Lampe oberhalb der Messstrecke wird die Fluoreszenz der Flüssigkeit angeregt. Das Verhalten der Flüssigkeit bei Anströmung gibt Aufschluss über lokale Effekte wie der Ablösung an der Vorderkante, einer möglichen Ablöseblase auf der Oberseite sowie Transition.

2.2.5. Thermografie

Weiterhin wird die Umströmung des Windkanalmodells mit einer Thermografiekamera untersucht. Hierbei wird die Kamera unterhalb des Modells positioniert und das Temperaturfeld der Profiloberseite für jeden Anstellwinkel aufgenommen. Die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche gibt ebenfalls Aufschluss über die Grenzschichtentwicklung bzw. Effekte wie Ablösungen und Grenzschichtbeschaffenheit (laminar/turbulent) auf der Oberseite. Die anströmende Luft im Windkanal hat eine höhere Temperatur als das Modell. Es kommt also zu einem Wärmestrom durch das Erwärmen des Profilmodells. Der stärkere Wärmeaustausch an der Wand bei turbulenter Strömung zeigt sich in der Auswertung als Temperaturanstieg gegenüber laminarer Strömung. Das für diesen Versuch verwendete Modell ist ein nur zur Spannweithälfte modifiziertes Profilmodell. So lässt sich unterscheiden, ob bzw. bei welchem Anstellwinkel sich die Modifikation an der Vorderkante auf die gesamte Profilmströmung auswirkt.

2.3. Validierung der Messergebnisse

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Experimente dienen neben dem Gewinn von strömungsmechanischen Erkenntnissen auch der gegenseitigen Validierung. So wird mit der PIV die CFD-Simulation an der Vorderkante validiert. Zudem kann mit dem UV-Anstrich die Strömungscharakteristik an der Vorderkante überprüft und Aufschluss über die Strömung auf der Oberseite des Modells gewonnen werden. Dies wiederum wird durch die Aufnahmen aus der Thermografie unterstützt.

Bei der Auswertung der PIV Messungen kann die Wahl der Auswertefenstergröße das Ergebnis beeinflussen. Zu kleine Auswertefenster bringen eine geringere Robustheit und einen erhöhten zufälligen Messfehler mit sich, während bei größeren Abfragefenstern ein Informationsverlust durch den größeren Mittelungsbereich entsteht. Um die gewählte Auswertefenstergröße von

24x24 Pixeln zu validieren, wird die Messung mit der größten Geschwindigkeitsvarianz bei $\alpha = 16,6^\circ$ mit drei verschiedenen Auswertefenstergrößen berechnet.

Zudem wird in der Auswertesoftware das mittlere Geschwindigkeitsfeld über die Summierung der Korrelationsebenen (Sum of Correlation SOC) berechnet. Hierbei kann die finale Auswertefenstergröße kleiner gewählt werden, da durch die Summierung der Korrelationsebenen eine ausreichend große Partikelbildanzahl zur Verfügung steht. Zur Bewertung der Validität und Konsistenz der PIV Ergebnisse werden die Lösungen der verschiedenen Auswertefenstergrößen und dem SOC-Ergebnis entlang einer Linie normal zur Wand im Bereich der Vorderkante dargestellt. Zur Validierung der ermittelten Schwankungsgrößen wird die turbulente kinetische Energie ebenfalls entlang der Linie dargestellt.

3. Ergebnisse

In Abb. 5 (rechts) werden die normierten mittleren Geschwindigkeiten $|\bar{u}|/u_\infty$ und die normierte turbulente kinetische Energie TKE/u_∞^2 entlang einer Linie s normal zur Profilwand (siehe Abb. 4) bei $\alpha = 16,6^\circ$ dargestellt. Zu erkennen sind die verschiedenen Lösungen der PIV-Auswertefenstergrößen. Nahe der Wand bei $s < 1,5$ mm ist durch die Ablösung und die damit verbundenen Geschwindigkeitsschwankungen ein Anstieg der turbulenten kinetischen Energie zu verzeichnen. Diese variiert mit den Fenstergrößen, was sich durch die Fähigkeit kleinerer Fenster, auch kleinere Strukturen zu erkennen, erklären lässt. Die Daten der mittleren Geschwindigkeiten liegen hingegen übereinander und unterscheiden sich lediglich leicht im Bereich der Ablösung von konventioneller PIV-Auswertung zur SOC.

3.1. Vergleich PIV und Simulation

In Abb. 3 werden die normierten mittleren Geschwindigkeitsfelder im Bereich der Vorderkante der PIV-Messung (links) und aus der LES CFD-Simulation (rechts) für den Anstellwinkel $\alpha = 14,4^\circ$ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein lokaler Ablöseeffekt im Bereich der Vorderkante bei beiden Ergebnissen auftritt. Zudem gibt es eine große Übereinstimmung in den dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten.

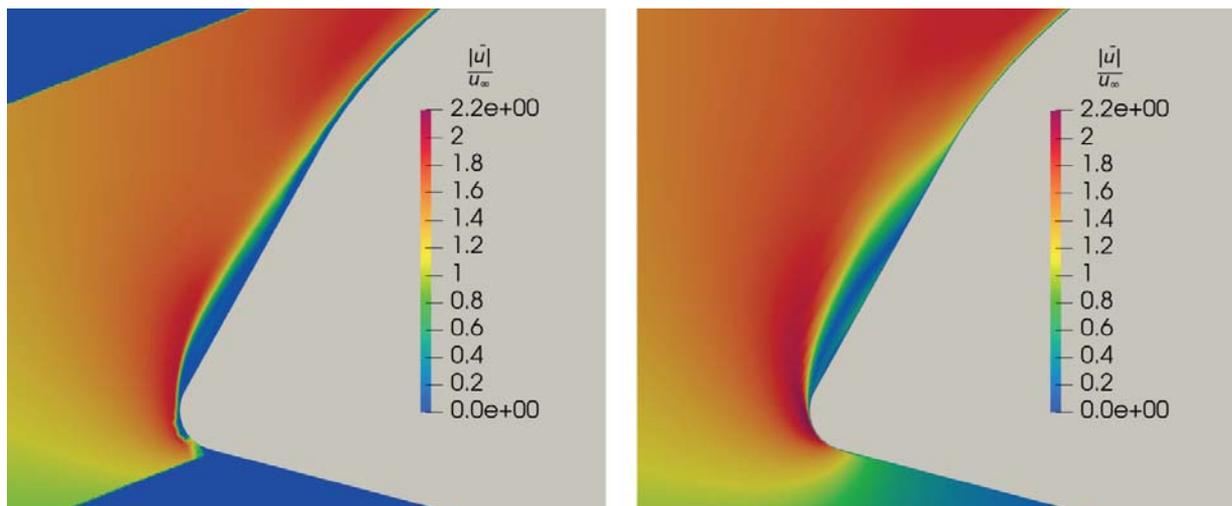


Abbildung 3: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten aus PIV (links) und CFD (rechts)

Abb. 4 zeigt die Stromlinien aus der PIV (links) und der Simulation (rechts). Im Bereich der Ablösung wird bei beiden Lösungen eine Rückströmung erkannt. Das Wirbelzentrum liegt dabei nahezu an der selben Stelle, was durch die Darstellung der Plotlinie sichtbar wird. Diese Linie befindet sich bei beiden Darstellungen auf der gleichen Position.

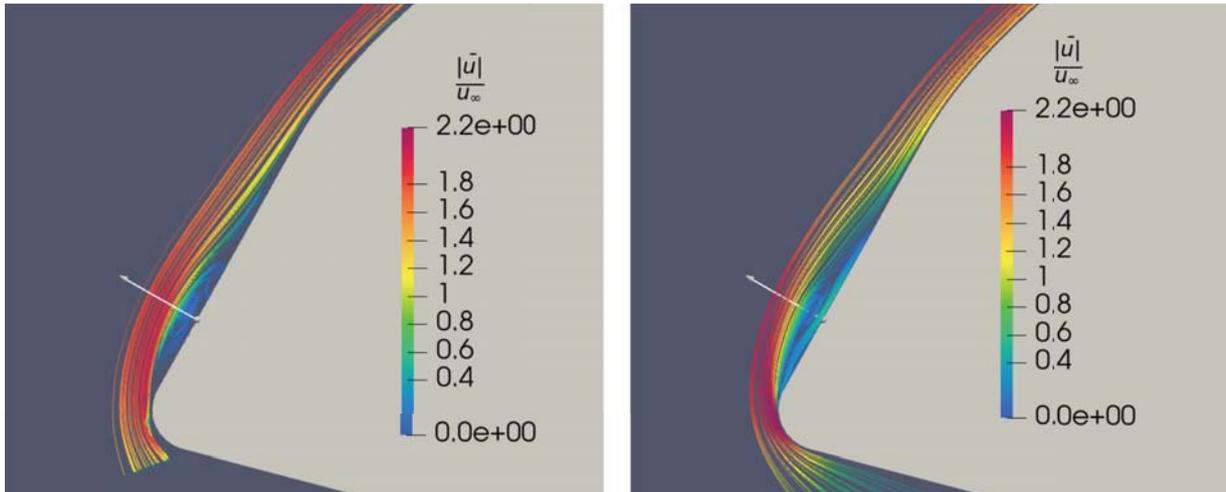


Abbildung 4: Vergleich der Stromlinien aus der PIV (links) und der CFD (rechts)

In Abb. 5 (links) werden die normierten mittleren Geschwindigkeiten $|\bar{u}|/u_\infty$ entlang einer Linie s normal zur Profilwand bei $\alpha = 14,4^\circ$ dargestellt. Hier werden die Daten aus der PIV Auswertung sowie der PIV-Sum of Correlation (SOC) verwendet. Zudem wird eine Mittelung der Geschwindigkeitsfelder der Simulationsergebnisse für die erste und zweite Zeithälfte der Daten und eine Mittelung über die gesamten Daten durchgeführt. Dies dient der Überprüfung, ob alle instationären Strömungseffekte innerhalb der Zeitmittelung abgebildet werden. Zunächst ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit in der Nähe der Wand in der Simulation stärker ausgeprägt ist. Hierbei handelt es sich um die Rückströmung in der Ablösung. Diese kann per PIV nicht aufgelöst werden, da durch den Lichtschnitt ein nicht messbarer Bereich von ca. 0,3 mm entsteht. Das Minimum bei $s = 0,55$ mm liegt bei allen Ergebnissen übereinander und zeigt die Position des Wirbelzentrums. Der Gradient der Geschwindigkeit ab $s = 0,55$ mm unterscheidet sich voneinander, was auf die Netzfeinheit der CFD zurückzuführen ist.

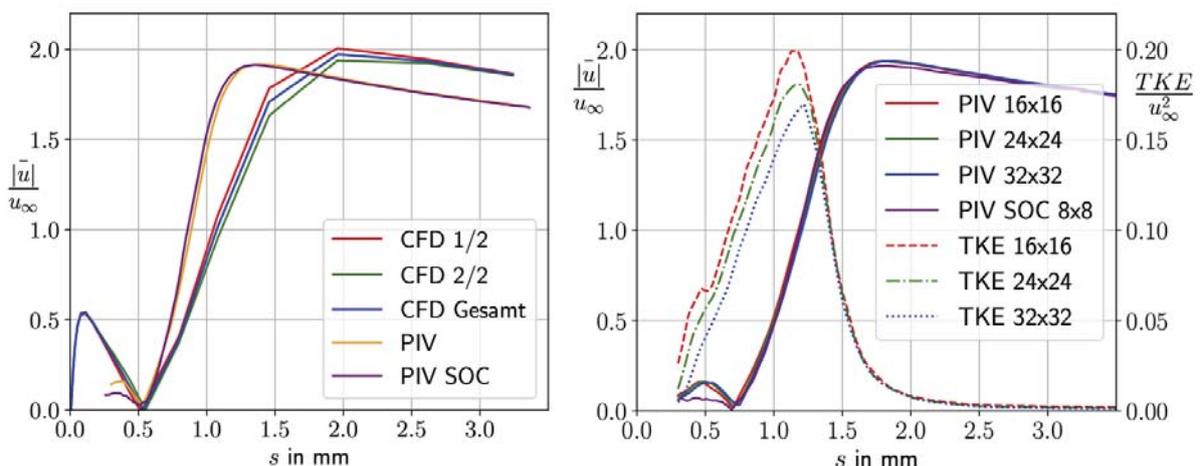


Abbildung 5: Daten entlang der in Abb. 4 gezeigten Linie normal zur Wand, links $\alpha = 14,4^\circ$ rechts $\alpha = 16,6^\circ$

3.2. UV-Anstrich und Thermografie

Die erste Beobachtung ist, bei welcher Profilanstellung die Strömung an der Vorderkante ablöst und wieder anliegt. Dies kann charakterisiert werden, sobald UV-Flüssigkeit an der Vorderkante verbleibt und durch die Strömung nicht mitgetragen wird. Weiterhin kommt es in der Ablösung zu Geschwindigkeiten quer zur Anströmung, was ein Ausbreiten der Flüssigkeit zu den Seiten zur Folge hat. Dieses Verhalten konnte ab einem Anstellwinkel $\alpha = 8,2^\circ$ beobachtet werden. Auch in den Ergebnissen der PIV wird bei diesem Anstellwinkel erstmals eine Ablösung an der Vorderkante erkannt. In Abb. 6 werden die Ergebnisse des UV-Anstrichs der Oberseite dargestellt. Hier befindet sich die Vorderkante des Profilmodells jeweils am oberen Rand der Darstellung. Es fällt auf, dass für $\alpha \leq 6,4^\circ$ eine in Abb. 6 rot markierte laminare Ablöseblase mit turbulenter Wiederanlegung besteht. Dies wird durch die optisch stärkere Mitnahme von Flüssigkeit nach der Ablösung erkannt. Diese laminare Ablöseblase ist ab Auftreten der Ablösung an der Vorderkante nicht mehr präsent. Der Ablösebereich wird durch die stärkere grüne Einfärbung markiert. Zur Charakterisierung der Strömung nach der Ablösung an der Vorderkante wird der Messaufbau mit Thermografiekamera als weiteres Hilfsmittel herangezogen.

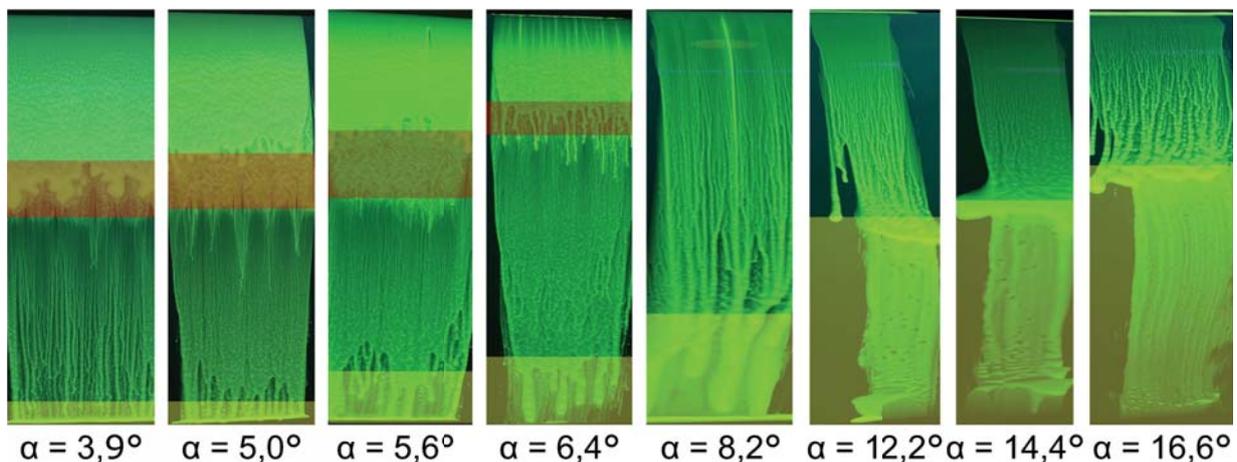


Abbildung 6: Ergebnisse aus dem UV-Anstrichversuch

Abb. 7 zeigt das Temperaturfeld auf der Oberseite des Profilmodells. Die Vorderkante befindet sich am oberen Rand der Darstellung. Gezeigt sind zwei Anstellwinkel jeweils mit und ohne Modifikation an der Vorderkante. Bei $\alpha = 3,9^\circ$ ist für beide Darstellungen ein ähnlicher Temperaturverlauf stromab zu erkennen. Zu sehen ist ein Abfall der Temperatur bis zur Ablöseblase mit anschließendem starkem Anstieg. Die Ablöseblase ist im Bereich der blau eingefärbten Fläche zu vermuten. Der Farbübergang von grün zu rot stellt den Anstieg der Temperatur und die Transition der Strömung dar. Bei $\alpha = 8,2^\circ$ differiert die Transition von Basis zu Modifikation. Durch die modifizierte Vorderkante entsteht die in PIV, CFD und UV-Anstrich erkannte Ablöseblase bereits an der Vorderkante, wodurch hier bereits die Transition erfolgt und bis zur Ablösung eine turbulente Strömung vorherrscht.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

Die für diese Arbeit primäre Fragestellung zur Präsenz und Charakteristik einer Ablöseblase an der Vorderkante eines modifizierten Profilmodells konnte beantwortet werden. Durch verschiedene Messungen und Visualisierungen der Umströmung sowie einer CFD-LES-Simulation konnte ein umfassender Datensatz zum untersuchten Profilmodell generiert werden. In einer zukünftigen Untersuchung soll die Simulation mit höheren Reynoldszahlen durchgeführt werden, um die Verwendung des modifizierten Windradprofils bei größeren Windkraftanlagen zu überprüfen. Außerdem soll der Anschluss der Modifikation an das Basisprofil krümmungsstetig ausgeführt werden, um herauszufinden, ob so die Ablöseblase an der Vorderkante weiterhin bestehen würde und welche Auswirkungen dies auf die Umströmung und die aerodynamischen Kräfte hat.

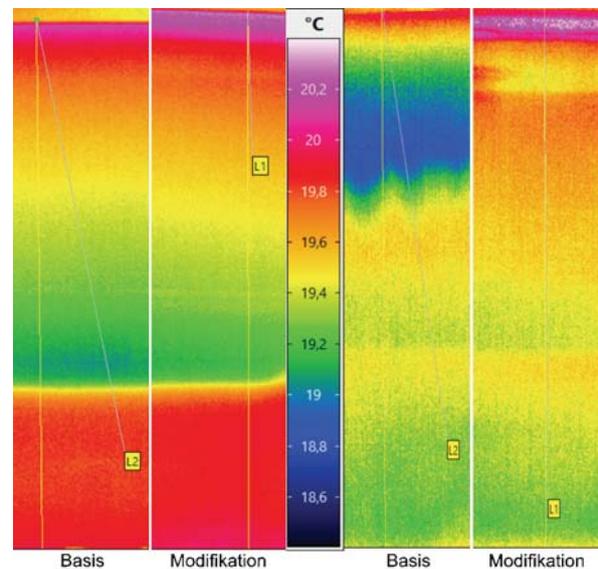


Abbildung 7: Ergebnisse aus der Thermografie, links $\alpha = 3,9^\circ$ und rechts $\alpha = 8,2^\circ$

4.1. Danksagung

Die Rechenressourcen (HPC-Cluster HSUpper) wurden durch das Projekt hpc.bw zur Verfügung gestellt, das vom dtec.bw - Forschungszentrum Digitalisierung und Technik der Bundeswehr - gefördert wird. dtec.bw wird von der Europäischen Union - NextGenerationEU - gefördert.

Literatur

Danker, M., Maigler, M., Meyer, O., Schein, J., 2022: „Experimental and Numerical Investigation of Passive Measures to Limit Aerodynamic Forces on Wind Turbine Rotor Blades“, New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XIV, (im Druck)

Nicoud, F., Ducros, F. 1999: “Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor”, Flow Turbulence and Combustion, Vol: 62, pp 183-200

Acum, W. E. A., Garner, H. C., Maskell, E. C., Rogers, E. W. E., 1966: “Subsonic wind tunnel wall corrections”, Technical Report RDP, AGARD, NATO

Meyer, O., 2021: "2D Airfoil-Testing in an Open Wind Tunnel Test Section: Test Setup, Instrumentation, Interference-Corrections, Validation ", New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XIII: Contributions to the 22nd STAB/DGLR Symposium, Vol. 152, pp.719-728