Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"
7.–9. September 2021, Bremen

Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mittels thermografischer Strömungsvisualisierung und Hauptkomponentenanalyse

Laminar-turbulent transition localization in thermographic flow visualization by means of principal component analysis

Daniel Gleichauf, Michael Sorg, Andreas Fischer
Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Straße 13, 28359 Bremen

Thermografische Strömungsvisualisierung; Bildverarbeitung; Hauptkomponentenanalyse; Messfehler
thermographic flow visualization; image processing; principal component analysis; measurement error

Zusammenfassung

Die thermografische Strömungsvisualisierung ist eine berührungslose, nicht-invasive Technik zur Visualisierung der Grenzschichtströmung an Rotorblättern von Windenergieanlage, um den aerodynamischen Zustand und damit die Effizienz der gesamten Windkraftanlage zu beurteilen. Bei Anwendungen an Windenergieanlagen im Betrieb ist die Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und der turbulenten Strömung zunächst durch die verfügbare Sonneneinstrahlung limitiert, da ein initialer Temperaturunterschied zwischen Fluid und Oberfläche für den thermischen Effekt erforderlich ist. Zwar sind neuere Bildverarbeitungsmethoden in der Lage, ein Bild mit geringfügig erhöhtem Kontrast zu erzeugen, aber es verbleiben systematische Helligkeitsgradienten im Bild und es wird verstärkt Vorwissen benötigt. Um bei kontrastarmen Messbedingung die Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsregimen zu maximieren, wird deshalb eine erweiterte Bildverarbeitung mit Hilfe der Merkmalsextraktionsmethode Hauptkomponentenanalyse eingeführt. Diese erweiterte Bildverarbeitung wird auf eine Bildserie von thermographischen Strömungsvisualisierungen einer stationären Strömungssituation in einem Windkanalexperiment an einem DU96W180 Profil angewendet, ohne eine übliche kontraststeigernde Heizung. Die resultierenden Merkmalsbilder werden hinsichtlich der globalen Unterscheidbarkeit zwischen laminarem und turbulentem Strömungsregime sowie der erreichbaren Messabweichung bei der Lokalisierung des lokalen Strömungsübergangs zwischen den Strömungsregimen bewertet. Durch die Anwendung der Hauptkomponentenanalyse wird das Kontrast-Rausch-Verhältnis um den Faktor 7,5 gesteigert. Zusätzlich wird der Gradient zwischen dem laminaren und dem turbulenten Strömungsregime erhöht, was zu einer minimalen Messabweichung bei der Lokalisierung des laminar-turbulenten Übergangs führt. Die verbliebenen Messabweichungen wurden um eine Größenordnung auf 0,3 % der Sehnenlänge reduziert. Im Ergebnis stellt die Hauptkomponentenanalyse bei der thermographischen Strömungsvisualisierung mit kleinen Kontrast-Rausch-Verhältnissen eine vorteilhafte Ergänzung der klassischen Bildverarbeitung dar.

Einleitung

Um den aerodynamischen Zustand eines umströmten Rotorblattes einer Windenergieanlage (WEA) in Betrieb bewerten zu können, ist eine Strömungsvisualisierung erforderlich, welche

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

eine Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche ermöglicht, siehe Gartenberg et al. 1992. Ein Verfahren, dass sich durch das berührungslose Verfahren besonders für den Einsatz an sich in Betrieb befindlichen Anlagen eignet, ist die thermografische Strömungsvisualisierung, siehe Dollinger 2018a. Neben geeigneter Hardware (insbesondere einer Infrarotkamera) ist hierzu eine Bildverarbeitung erforderlich, welche die Unterscheidbarkeit des laminaren und turbulenten Strömungsbereiches maximiert und eine Lokalisierung des Strömungsübergangs mit minimaler Messunsicherheit ermöglicht.

Zur Maximierung der Unterscheidbarkeit wird in der Regel der thermische Kontrast zwischen der Strömung und der Oberfläche durch eine künstlich eingebrachte Heizung von Fluid oder Struktur erhöht, siehe Joseph et al. 2016, Luca et al. 1990, Bæk und Fuglsang 2009, Luca et al. 1995, Gartenberg et al. 1992. In der Anwendung an sich in Betrieb befindlichen WEA ist eine derartige Maximierung der Temperaturdifferenz jedoch nicht mit akzeptablem Aufwand möglich. Daher ist ein erhöhter Anspruch an die Bildverarbeitung gegeben, mit thermografischen Rohbildern mit einem geringen Kontrast zwischen den Strömungsbereichen umgehen zu können.

Eine klassische Bildverarbeitungsmethode ist das Mitteln einer Bildserie, da so das Bildrauschen verringert und das Kontrast-Rausch-Verhältnis zwischen den Strömungsbereichen entsprechend erhöht werden kann. Andere Arbeiten beschäftigen sich mit Methoden, die die gewünschten Informationen aus einer Bildserie extrahieren und dabei über die klassischen Verfahren hinausgehen. Dollinger et al. 2018b wertet zeitliche Fluktuationen in einer Bildserie von thermografischen Strömungsvisualisierungen mit Hilfe einer Fourier-Analyse aus und konnte dabei eine Steigerung der Unterscheidbarkeit erreichen. Gleichauf et al. 2020a wertete ebenfalls Fluktuationen aus, aber legte keine harmonischen Schwingungen zu Grunde, sondern verwendete die nicht-negative Matrixfaktorisierung, um zeitliche und räumliche Bildinformationen auszuwerten und Bilder mit erhöhter Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen zu erzeugen. Das Ergebnis des Algorithmus ist jedoch nur eingeschränkt reproduzierbar und erfordert deshalb eine aufwendige Nachauswertung. Ein weiteres Verfahren der Merkmalsextraktion, welches streng deterministisch arbeitet, ist die Hauptkomponentenanalyse (engl.: Principal component analysis, PCA). Das Verfahren wird für die thermografische Strukturanalyse bereits eingesetzt, siehe Rajic 2002. Die Fragestellung, inwiefern die PCA auf einer Bildserie von Strömungsvisualisierungen angewandt werden kann, um eine Strömungsvisualisierung mit maximaler Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen zu erreichen, wurde bisher nicht untersucht.

Eine wichtige Messaufgabe, die sich an eine Strömungsvisualisierungen anschließt, ist die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition. Die klassische Methode für die Lokalisierung ist die Auswertung des Temperaturgradienten in Hauptströmungsrichtung und die Lokalisierung des maximalen Gradienten, siehe Joseph et al. 2016, Traphan et al. 2015, Heineck et al. 2014, Gleichauf et al. 2020b. Ein anderer Ansatz verfolgt ein Verfahren der Kantenerkennung, siehe Crawford et al. 2015. Die erreichbare Messunsicherheit der Lokalisierung der Transition wurde erstmals von Dollinger et al. 2018c geklärt. Zusätzlich wurde von Dollinger et al. 2018c vorgeführt, dass eine Lokalisierung der Transition mit Subpixelauflösung möglich ist, indem das Temperaturprofil in Strömungsrichtung mit einer Gauß'schen Fehlerfunktion approximiert wird. Alternativ kann auch der Gradient des Temperaturprofils mit einer Gaußfunktion approximiert werden. Voraussetzung für die Lokalisierung mit minimaler Messunsicherheit ist dabei, dass das Temperatur- und Gradientenprofil die erwartete Form der jeweiligen Approximationsfunktionen hat. Auf Grund von zufälligen und systematischen Inhomogenitäten innerhalb der Strömungsbereiche können die Verläufe jedoch davon abweichen und damit zu einer

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Messabweichung führen. Eine Bildverarbeitung, welche diese negativen Einflüsse auf den idealen Verlauf reduzieren, hat daher das Potential, die Messabweichung bei der Lokalisierung zu minimieren. Inhalt dieser Arbeit ist daher, die Untersuchung des Merkmalsextraktionsverfahrens PCA bezüglich des Potentials für die Strömungsvisualisierung, einerseits eine maximale Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche und andererseits eine minimale Messunsicherheit bei der Lokalisierung des Strömungsüberganges zu erreichen.

Im Abschnitt Messansatz wird neben einer Einführung in die PCA die Quantifizierung der Unterscheidbarkeit von Strömungsbereichen beschrieben. Außerdem wird das Lokalisierungsverfahren der laminar-turbulenten Transition vorgestellt. Abschnitt Messaufbau beschreibt den Versuchsaufbau der in dieser Arbeit verwendeten Windkanalmessung. Abschnitt Ergebnisse stellt die Ergebnisse der eingeführten Bildverarbeitung sowie die Bewertung der Unterscheidbarkeit und Lokalisierung des Strömungsüberganges vor. Der Artikel schließt mit einer Zusammenfassung und Ausblick.

Messansatz

Die Hauptkomponentenanalyse (PCA), siehe Hotelling 1933, ist ein multivariantes statistisches Verfahren, welches die wichtigsten Informationen in einem Datenset extrahiert, siehe Abdi und Williams 2010. Entsprechend der Varianz werden orthogonale, unkorrelierte Variablen berechnet, die so genannten Hauptkomponenten des Datensatzes. Berechnet werden die Hauptkomponenten durch die Singulärwertzerlegung des Datensatzes X:

$$X = P\Delta Q^T.$$

Die Spalten von P sind die *linken Singulärvektoren* von X und auch die Eigenvektoren der Matrix XX^T. Die Spalten von Q sind die *rechten Singulärvektoren* von X und die Eigenvektoren der Matrix X^TX. Δ ist die Diagonalmatrix der *Singulärwerte*, die auch die Diagonalmatrix der Eigenwerte der Matrix XX^T ist.

Eine weit verbreitete Anwendung findet die PCA im Bereich der Objekterkennung, speziell der Gesichtserkennung. Die PCA hat das Potential die wesentlichen Merkmale von Gesichtern aus einem Datensatz an Gesichtsbildern zu extrahieren. Die Projektion von vielen Bildern auf wenige Merkmalsbilder, welche den größten Teil der relevanten Informationen des gesamten Datenbestandes beinhalten, ermöglicht vielseitige Anwendungen im Bereich der Datenminimierung oder Machine Learning. Das Extrahieren der wesentlichen Informationen begründet die Hypothese, dass, angewandt auf eine Bildserie von thermografischen Aufnahmen eines umströmten Profils, die PCA die wesentlichen Informationen extrahiert, die eine Unterscheidung der Strömungsbereiche ermöglichen. Als Resultat entstehen Strömungsvisualisierungen mit erhöhter Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen.

Um die Leistungsfähigkeit der PCA-Strömungsvisualisierungen mit gesteigerter Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen zu quantifizieren, wird das in der Bildverarbeitung weit verbreitete Kontrast-Rausch Verhältnis (engl.: contrast-to-noise ratio (CNR)) gemäß der folgenden Definition verwendet:

$$\mathrm{CNR} = \frac{|\bar{I}_{\mathrm{lam}} - \bar{I}_{\mathrm{turb}}|}{\sqrt{s_{\mathrm{lam}}^2 + s_{\mathrm{turb}}^2}}.$$

Dabei ist $\bar{I}$ die mittlere Pixelintensität und s die räumliche Standardabweichung der Pixelintensität im jeweiligen Strömungsbereich.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

In Abbildung 1a ist eine thermografische Strömungsvisualisierung dargestellt und die Bereiche laminarer und turbulenter Strömung sind gekennzeichnet. Da die absolute Temperatur der Oberfläche nicht relevant für die Auswertung ist, werden die gemessenen Strahlungsintensitäten bzw. Grauwerte der einzelnen Pixel im gesamten Beitrag zwischen 0 und 1 normiert. Die beiden Bereiche unterschiedlicher Strömung können an Hand der unterschiedlichen Intensität in der Thermografieaufnahme unterschieden werden. Der Unterschied resultiert aus unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen der Umströmung und der Oberfläche. Abbildung 1b zeigt den Intensitäts- und zugehörigen Gradientenverlauf in Hauptströmungsrichtung für das Beispiel der mittleren Bildzeile des Strömungsbilds aus Abbildung 1a. Der Übergang zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich kann in beiden Verläufen an Hand deutlicher Merkmale erkannt werden. Der Intensitätsverlauf weißt zwei unterscheidbare Intensitätsplateaus und einen steilen Übergang zwischen den Plateaus auf. Der Gradientenverlauf weißt dementsprechend ein nahezu konstantes Niveau und ein einzelnes Maximum auf.

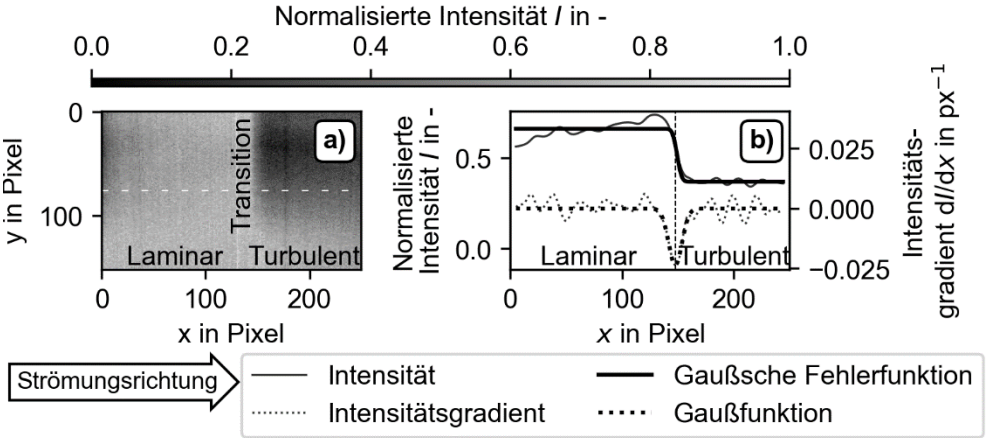

Abbildung 1: a) Thermografische Strömungsvisualisierung mit deutlich unterscheidbarem laminaren und turbulenten Strömungsbereich. b) Intensitätsverlauf und zugehöriger Gradientenverlauf entlang der mittleren Bildzeile in a). Zwei deutliche Plateaus in der Intensität und ein deutliches Maximum des Gradienten an der Stelle der Transition können erkannt werden. Die Approximation des Intensitätsverlaufes und Intensitätsgradienten ermöglichen eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit Subpixelauflösung

Um eine Lokalisierung des Überganges mit Subpixelauflösung zu erreichen, können beide Verläufe mit einer Funktion approximiert werden. Entsprechend ihrer qualitativen Form, wird hierfür eine Gauß'sche Fehlerfunktion für den Intensitätsverlauf und eine Gaußfunktion für den Gradientenverlauf verwendet. Die Gaußfunktion ist definiert durch

$$\phi(a_1, a_2, a_3, a_4) = a_3 \cdot \exp\left(-\frac{(x - a_1)^2}{2a_2^2}\right) + a_4. \tag{1}$$

Die Gauß'sche Fehlerfunktion ist definiert durch

$$\Phi(b_1, b_2, b_3, b_4) = b_3 \cdot \mathrm{erf}\left(\frac{x - b_1}{\sqrt{2}b_2}\right) + b_4. \tag{2}$$

Die Position des Strömungsübergangs kann nach der Approximation der jeweiligen Verläufe mit der jeweiligen Funktion direkt an den Parametern $\hat{a}_1$ und $\hat{b}_1$ abgelesen werden, da diese den Ort des Wendepunktes der Gauß'schen Fehlerfunktion bzw. des Maximums der

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Gaußfunktion angeben. Um eine Lokalisierung mit minimalen, systematischen und zufälligen Messabweichungen zu erhalten, müssen die tatsächlichen Kurvenverläufe der Form der Modellfunktion entsprechen. Nur dann kann sich die Modellfunktion automatisch um den Strömungsübergang zentrieren, ohne systematische Messabweichungen bei der Lokalisierung zu erhalten. Die zufällige Messabweichung wird zudem minimal, wenn dabeider Gradient zwischen den Strömungsbereichen maximal wird, siehe Dollinger et al. 2018c.

Messaufbau

Die Versuche zu den in diesem Beitrag vorgestellten thermografischen Strömungsvisualisierungen wurden im aeroakustisch optimierten Windkanal (DWAA) der Deutschen WindGuard in Bremerhaven durchgeführt. Als Messobjekt wird ein DU96W180-Tragflächenmodell verwendet und in der geschlossenen Messstrecke des Windkanals bei einer Reynoldszahl von $\mathrm{Re} = 2 \cdot 10^6$ umströmt, siehe Abbildung 2. Bei dieser für den Windkanal geringen, aber für den Vergleich mit Freifeldmessungen ausreichende Strömungsgeschwindigkeit ist die Temperatur des Fluids nahezu unveränderlich. In Kombination mit dem gezielten Weglassen einer Oberflächenheizung herrscht deshalb nur eine minimale Temperaturdifferenz zwischen Umströmung und Oberfläche. Dies führt zu realitätsnahen Thermogrammen mit einem sehr geringen Kontrast zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich.

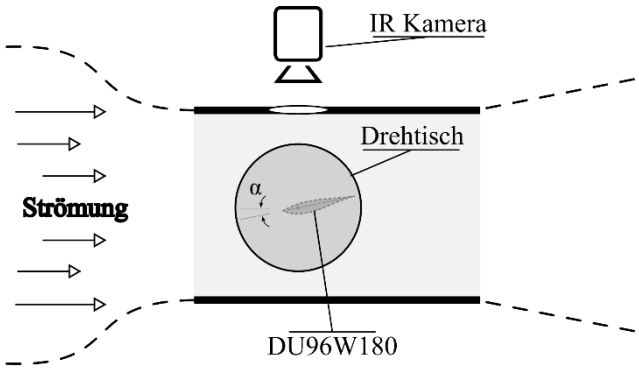

Abbildung 2: Messaufbau im geschlossenen Windkanal mit einem DU96W180 Profil in Querströmung und $\mathrm{Re} = 2 \cdot 10^6$. Eine IR-Kamera betrachten die Grenzschichtströmung auf dem Profil.

Das Temperaturfeld der Oberfläche des Tragflächenprofils wird mit einer IR-Kamera des Typs imageIR des Herstellers InfraTec gemessen. Die Kamera ist in einem Wellenlängenbereich von 2 - 5 µm empfindlich und hat eine Auflösung von 640 x 512 Pixel. Es wurden 10.000 Bilder mit einer Frequenz von 100 Hz aufgenommen. Die Auswertung der Aufnahmen wird mit der Skriptsprache Python verwirklicht.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Windkanalversuchs und die eingeführte Auswertung mit der PCA vorgestellt. Neben der PCA wird die aufgenommene Bildserie von thermografischen Strömungsvisualisierungen durch eine Mittelwertbildung ausgewertet (Referenz). Diese klassische Methode ist geeignet, zufälliges Rauschen effektiv zu filtern und so die Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen zu steigern. Die sich aus den Bildverarbeitungsmethoden ergebenden Strömungsvisualisierungen werden bzgl. des CNR zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich bewertet. Anschließend werden die laminar-turbulente Transition unter Anwendung der beiden Modellfunktionen (1) und (2) lokalisiert und die zufällige, sowie die systematische Messabweichung quantifiziert.

Abbildung 3 zeigt das Mittelwert- und PCA-Ergebnisbild des Windkanalexperiments. Im Mittelwertbild ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Strömungsbereiche an Hand ihrer Intensität

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

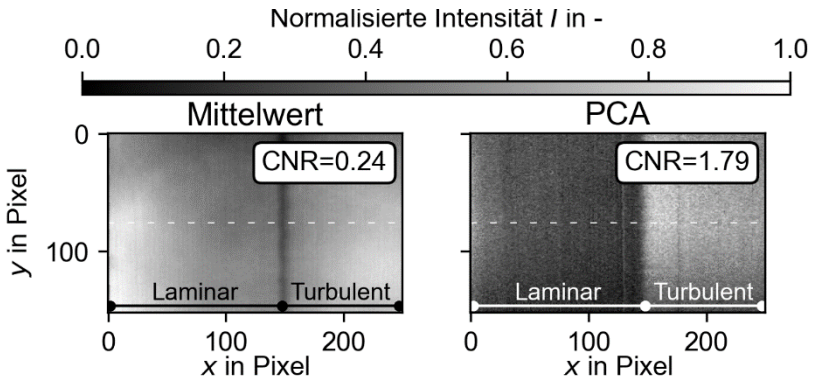

Abbildung 3: Strömungsvisualisierung anhand des Mittelwert- und PCA-Ergebnisses. Mit der PCA wurde eine verbesserte Unterscheidbarkeit der beiden Strömungsbereiche erzielt.

kaum zu unterscheiden sind. Der dunkle, vertikale Streifen zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich weist auf eine laminare Ablöseblase hin und wird hier nicht weiter betrachtet. Das CNR hat einen Wert von 0,24. Das PCA-Ergebnisbild weißt hingegen zwei deutlich voneinander zu unterschiedene Intensitätsplateaus mit einer klaren Abtrennung zwischen den Bereichen auf. Mit einem CNR von 1,79 kann eine Steigerung des CNR um den Faktor 7,5 verzeichnet werden.

Abbildung 4 zeigt den Intensitätsverlauf und den zugehörigen Gradientenverlauf (gepunktet) der mittleren Bildzeile der jeweiligen Strömungsvisualisierungen aus Abbildung 3. Die Ergebnisse der Approximation sind in der entsprechenden Art in fett dargestellt. Das jeweilige Ergebnis der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition ist als vertikale Linie eingezeichnet.
Wie zuvor bereits ausgewertet, existieren im Mittelwertbild keine klar voneinander zu trennenden Bereiche. Damit verfehlt die Approximation der Intensität eine automatische Zentrierung im Bereich der Transition und die Lokalisierung weißt eine starke systematische

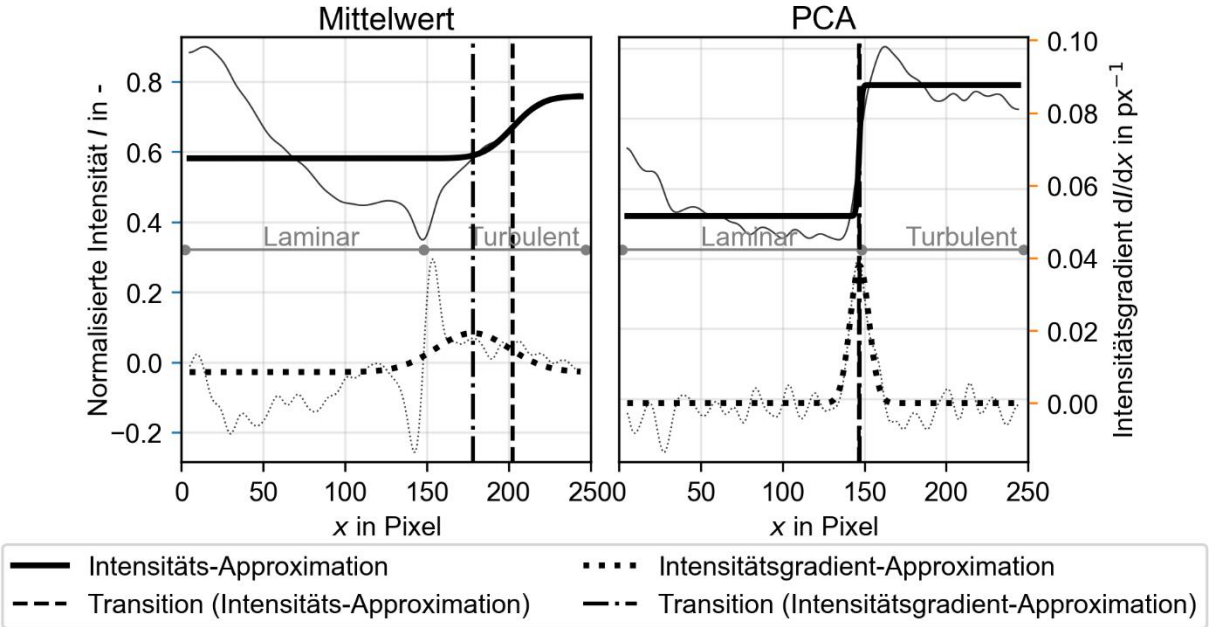

Abbildung 4: Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition durch eine Approximation des Intensitätsverlaufs und des zugehörigen Gradientenverlaufs. Intensität der jeweils mittleren Bildzeile im Mittelwertbild und PCA-Ergebnis aus Abbildung 3.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Messabweichung auf, so dass die Transition weit innerhalb des turbulenten Strömungsbereiches lokalisiert wird. Der Verlauf des Gradienten weißt ebenfalls nicht den für die Approximation mit einer Gaußfunktion idealen Verlauf auf und beinhaltet mehrere Extrema, anstatt eines einzelnen Maximums. Auch hier schlägt die Lokalisierung fehl.
Im PCA Ergebnis entsprechen sowohl der Verlauf der Intensität als auch der Verlauf des Gradienten der gewünschten Form. Beide Approximationen zentrieren sich daher automatisch an der Stelle des laminar-turbulenten Überganges und lokalisieren diesen erfolgreich. Ein Vergleich zwischen den beiden Ergebnissen zeigt, dass, für das hier betrachtete geringe Kontrast-Rausch-Verhältnis der Thermogramme, lediglich die PCA eine Strömungsvisualisierung mit hinreichender Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche ermöglicht.

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der beiden Lokalisierungsmethoden der laminar-turbulenten Transition vor einem thermografischen Rohbild der Messung visualisiert. Die Transition ist für jede Bildzeile des Mittelwertbildes und des PCA-Ergebnisses eingezeichnet. Die Lokalisierung basierend auf dem PCA-Ergebnis führt in beiden Methoden zu einer geradlinigen Transitionslinie mit minimaler systematischer und zufälliger Messabweichung. Die Lokalisierung basierend auf dem Mittelwertbild weißt hingegen starke Unterschiede zwischen den einzelnen Bildzeilen auf und hat damit höhere zufällige Messabweichungen. Auch im Mittel liegt die Transition tendenziell im turbulenten Strömungsbereich, wenn das Mittelwertbild ausgewertet wird. Daher existiert hier auch eine größere systematische Messabweichung gegenüber der wahren Transitionsposition, welche von der Position der laminaren Ablöseblase abgeleitet werden kann. Die Werte für die zufällige und systematische Messabweichung, normiert auf die Profilsehnenlänge c, sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

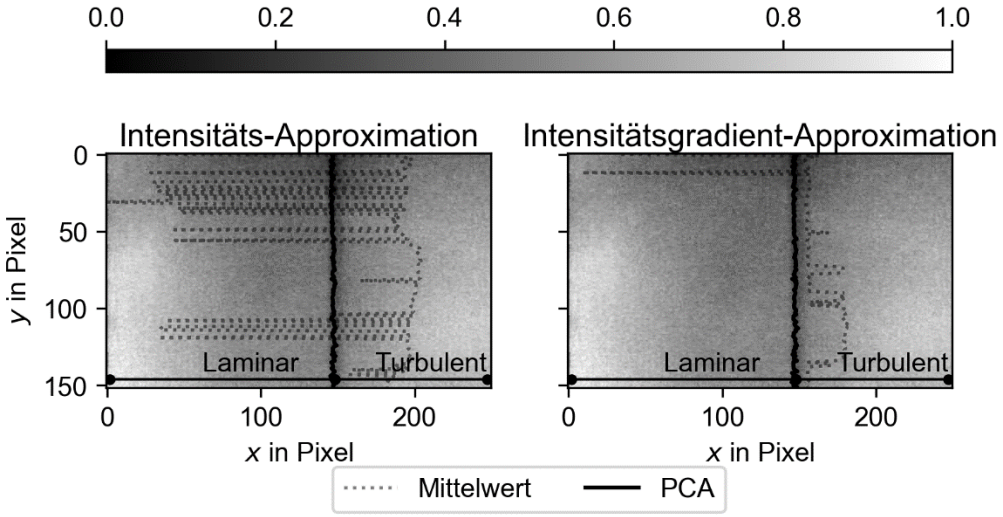

Abbildung 5: Lokalisierte laminar-turbulente Transition basierend auf dem Mittelwertbild und dem PCA Ergebnis. Eine Auswertung des PCA Ergebnisses ergibt bei beiden Methoden eine geradlinige Transitionslinie mit minimalem zufälligem und systematischem Fehler.

Tabelle 1: Zufällige und systematische Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition. Alle Werte sind auf die Profilsehnenlänge *c* normiert.

Approximation der	σ_{rand}/c in %		σ_{syst}/c in %	
	Mittelwert	PCA	Mittelwert	PCA
Intensität	17,62	0,25	6,96	0,34
Intensitätsgradienten	5,50	**0,24**	4,28	**0,30**

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Zusammenfassend ermöglicht die PCA für die hier betrachteten Randbedingungen eine Strömungsvisualisierung mit erhöhter Unterscheidbarkeit zwischen dem laminaren und dem turbulenten Strömungsbereich. Damit ist, insbesondere bei einem geringen Kontrast-Rausch-Verhältnis in den Rohbildern, eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit geringerer systematischer und zufälliger Messabweichung erreicht.

Zusammenfassung und Ausblick

Zwecks Strömungsvisualisierung führte der Artikel eine neuartige Bildverarbeitungsmethode für Thermogramm-Bildserien auf der Grundlage der Hauptkomponentenanalyse (PCA) ein. In einem Windkanalversuch mit einem quer angeströmten DU96W180-Profil wurde damit eine gesteigerte Unterscheidbarkeit des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs demonstriert. Sowohl für die mittels PCA ausgewertete Bildserie als auch für die mit einer klassischen Mittelwertbildung (Referenz) erhaltene Strömungsvisualisierung wurde das Kontrast-Rauschverhältnis (CNR) zwischen den beiden Strömungszuständen bestimmt. Anschließend wurde die laminar-turbulente Transition basierend auf der Approximation des Intensitätsverlaufes bzw. des zugehörigen Gradientenverlaufs in Hauptströmungsrichtung lokalisiert.

Die sich aus der PCA ergebene Strömungsvisualisierung hat nicht nur zu einem Anstieg des CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung um den Faktor 7,5 geführt, sondern auch zu einer Reduktion der zufälligen und systematischen Messabweichung der Lokalisierung der Transition auf 0,3 % der Profilsehnenlänge.

Die Möglichkeit einer Kontraststeigerung in Aufnahmen mit geringem Initialkontrast zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich erhöht die Robustheit der thermografischen Strömungsvisualisierung in Bezug auf die erforderliche solare Energiezufuhr. Ohne die Notwendigkeit einer starken direkten Erwärmung durch die Sonne kann das Messverfahren auch bei bewölktem Wetter, früh am Morgen oder spät am Abend eingesetzt werden, wenn die Sonneneinstrahlung geringer ist. Die verringerte Messunsicherheit bei der Lokalisierung der Transition ermöglicht zudem eine präzisere Bewertung des aerodynamischen Zustandes eines Rotorblattes und eine Bewertung im Hinblick auf durchzuführende Wartungsarbeiten.

Der nächste Schritt ist eine Anwendung des Verfahrens an WEA in Betrieb. Hierfür erforderlich ist jedoch eine präzise Bildtriggerung oder Nachverfolgung der Rotorbewegung, um Thermogramm-Serien mit hinreichender Bildanzahl aufzuzeichnen. Die Hauptkomponentenanalyse betreffend gilt es verschiedene Quereinflüsse zu untersuchen, wie z.B. Artefakte, tote Pixel und Hintergrundeffekte.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen WindGuard GmbH für die Bereitstellung der Messobjekte und des Versuchsaufbaus sowie für die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente. Zusätzlich wird Christoph Dollinger für die durchgeführten Messungen und für die Bereitstellung der Messdaten gedankt.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Literatur

Abdi, H., Williams, L.J. 2010: "Principal component analysis", Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, Vol. 4, pp. 433–459.

Bæk, P., Fuglsang, P. 2009: "Experimental detection of transition on wind turbine airfoils", In: European Wind Energy Conference & Exhibtion 2009, (EWEC 2009): Marseille, France, 16-19 March 2009, pp. 1628–1652.

Crawford, B.K., Duncan, G.T., West, D.E., Saric, W.S. 2015: "Robust, automated processing of IR thermography for quantitative boundary-layer transition measurements", Experiments in Fluids, Vol. 7, pp. 149.

Dollinger, C. 2018a: "Thermografische Strömungsvisualiserung an Rotorblättern von Windenergieanlagen", Shaker Verlag.

Dollinger, C., Balaresque, N., Sorg, M., Fischer, A. 2018b: "IR thermographic visualization of flow separation in applications with low thermal contrast", Infrared Physics & Technology, Vol. 88, pp. 254–264.

Dollinger, C., Sorg, M., Balaresque, N., Fischer, A. 2018c: "Measurement uncertainty of IR thermographic flow visualization measurements for transition detection on wind turbines in operation", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 97, pp. 279–289.

Gartenberg, E., Johnson, W.G., Wright, R.E., Carraway, D.L., Johnson, C.B. 1992: "Boundary-layer transition-detection in a cryogenic wind tunnel using infrared imaging", AIAA Journal, Vol. 2, pp. 444–446.

Gleichauf, D., Dollinger, C., Balaresque, N., Gardner, A.D., Sorg, M., Fischer, A. 2020a: "Thermographic flow visualization by means of non-negative matrix factorization", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 82, 108528.

Gleichauf, D., Sorg, M., Fischer, A. 2020b: "Contactless Localization of Premature Laminar–Turbulent Flow Transitions on Wind Turbine Rotor Blades in Operation", Applied Sciences, Vol. 18, 6552.

Heineck, J.T., Schülein, E., Raffel, M. 2014: "Boundary layer transition detection on a rotor blade using rotating mirror thermography", In: 5th decennial AHS Aeromechanics Specialists' Conference 2014, Current challenges and future directions in rotorcraft aerodynamics: San Francisco, California, USA, 22-24 January 2014.

Hotelling, H. 1933: "Analysis of a complex of statistical variables into principal components", Journal of Educational Psychology, Vol. 6, pp. 417–441.

Joseph, L.A., Borgoltz, A., Devenport, W. 2016: "Infrared thermography for detection of laminar-turbulent transition in low-speed wind tunnel testing", Experiments in Fluids, Vol. 5, pp. 77.

Luca, L. de**, Carlomagno, G.M., Buresti, G. 1990**: "Boundary layer diagnostics by means of an infrared scanning radiometer", Experiments in Fluids, Vol. 3, pp. 121–128.

Luca, L. de**, Guglieri, G., Cardone, G., Carlomagno, G.M. 1995**: "Experimental analysis of surface flow on a delta wing by infrared thermography", AIAA Journal, Vol. 8, pp. 1510–1512.

Rajic, N. 2002: "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures", Composite Structures, Vol. 4, pp. 521–528.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Traphan, D., Meinlschmidt, P., Schlüter, F., Lutz, O., Peinke, J., Gülker, G. 2015: "High-speed measurements of different laminar-turbulent transition phenomena on rotor blades by means of infrared thermography and stereoscopic PIV", In: Proceedings of the 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, pp. 207.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1