

Christoph Dollinger*, Michael Sorg, Nicholas Balaesque und Andreas Fischer

Hochauflösende thermografische Strömungsvisualisierung bei Windenergieanlagen im Betrieb

High-resolution IR thermographic flow visualisation on wind turbines in operation

DOI 10.1515/teme-2017-0032

Zusammenfassung: Der Einsatz der thermografischen Strömungsvisualisierung bei Windenergieanlagen im Betrieb unterscheidet sich erheblich von dem etablierten Einsatz in Windkanalversuchen. Der große Abstand von bis zu 400 m zwischen Rotorblatt und Thermografiekamera führt zu geringen geometrischen Auflösungen und kleinen numerischen Aperturen. Darüber hinaus beruht die erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Messobjekt und Strömung nur auf der absorbierten solaren Einstrahlung, was sich durch niedrige Signalrauschabstände äußert. Die grundlegenden Einflüsse auf die Messunsicherheit zur Positionsbestimmung einer laminar-turbulenten Transition werden dargelegt und am Beispiel einer Freifeldmessung an einer 1,5 MW Windenergieanlage validiert. Als Ergebnis ergibt sich die Standardunsicherheit zu $\pm 0,21$ Pixeln, was in den Messungen etwa $\pm 0,3\%$ der Sehnenlänge entspricht. Die Messunsicherheit ist derzeit nicht durch das Messsystem, sondern durch strömungsinduzierte Temperaturfluktuationen limitiert.

Schlüsselwörter: Thermografie, thermografische Strömungsvisualisierung, Windenergieanlagen, Messunsicherheit.

Abstract: The application of thermographic flow visualization on wind turbines in operation differs from the well-established application in wind tunnel experiments. The large distance of up to 400 m between the rotor blade and the thermographic camera, mainly due to the height of the wind turbine, results in a poor spatial resolution

and a small numerical aperture. Furthermore, the required temperature difference between the rotor blade and the flow only relies on the absorbed solar radiation, which often leads to a low signal-to-noise ratio. The fundamental effects on the measurement uncertainty for the localisation of a laminar-turbulent transition are presented and validated for a measurement on a 1.5 MW wind turbine. As a result, the standard uncertainty of the flow transition position amounts to ± 0.21 pixel, which corresponds to $\pm 0.3\%$ chord length. The measurement uncertainty is currently not limited by the measurement system, but by flow induced temperature fluctuations.

Keywords: IR thermography, thermographic flow visualization, wind turbines, measurement uncertainty.

1 Einleitung

Für die Entwicklung und aerodynamische Optimierung von Rotorblättern für Windenergieanlagen sind, neben Strömungssimulationen und Messungen an Modellen im Windkanal, Strömungsmessungen an der realen Anlage unverzichtbar. Hierfür wird eine berührungslose und nicht-invasive Messtechnik benötigt, um die Strömungszustände an den Rotorblättern untersuchen zu können. Die konventionellen Messverfahren zur flächenhaften Strömungsvisualisierung an laufenden Windenergieanlagen beruhen auf der Anbringung von Wollfäden [17] oder der Präparation mit einem Öl-Partikel-Gemisch [12]. Zur Erkennung von abgelösten Strömungen werden darüber hinaus sogenannte Stall Flags eingesetzt [1]. Die Anbringung der Hilfsmittel für die Verfahren ist zeit- und kostenintensiv. Zudem sind sie invasiv und verändern die zu charakterisierende Strömung. Der Störeinfluss führt z. B. zu einem verfrühten laminar-turbulenten Grenzschichtübergang (Transition) oder resultiert in einer lokalen Strömungsablösung. Gerade in der genauen Position oder der Präsenz dieser Strömungsbereiche liegen jedoch die für eine aerodynamische Optimierung relevanten Informationen. So resul-

*Korrespondenzautor: Christoph Dollinger, University of Bremen, Bremen Institute for Metrology, Automation and Quality Science - BIMAQ, Bremen, e-mail: c.dollinger@bimaq.de

Michael Sorg, Andreas Fischer, University of Bremen, Bremen Institute for Metrology, Automation and Quality Science - BIMAQ, Bremen, e-mail: m.sorg@bimaq.de, andreas.fischer@bimaq.de

Nicholas Balaesque, Deutsche WindGuard Engineering GmbH, Bremerhaven, e-mail: n.balaesque@windguard.de

tiert eine verfrühte laminar-turbulente Transition in einer Erhöhung des aerodynamischen Widerstands. Eine ungewollte Strömungsablösung führt ebenfalls zu einem erhöhten Widerstand und einem verringerten Auftrieb [7, 15]. Beides führt in letzter Konsequenz zu Leistungs- und damit Ertragsminderungen. Darüber hinaus resultieren Strömungsablösungen in einer Erhöhung unstatistischer Lasten und Vibrationen [13], welche die Lebensdauer der gesamten Windenergieanlage negativ beeinflussen und zu vibrationsinduzierten akustischen Emissionen führen können. Mit einer thermografischen Messung lassen sich potenziell vergleichbare Erkenntnisse ohne die genannten Nachteile der konventionellen Verfahren zur Strömungsvisualisierung gewinnen. Im Gegensatz zu Messungen im Windkanal unter kontrollierten Laborbedingungen müssen bei Freifeldmessungen jedoch ein wesentlich größerer Messabstand von typischerweise 100 bis 400 m sowie ein auf die absorbierte solare Einstrahlung limitierter thermischer Kontrast berücksichtigt werden. Im folgenden Kapitel 2 werden die Grundlagen der thermografischen Strömungsvisualisierung gefolgt von einer Abschätzung der Messunsicherheit in Bezug auf die Position der laminar-turbulenten Transition dargelegt. Nach der Beschreibung des Versuchsaufbaus zur Validierung der Abschätzung in Kapitel 3 folgen Messergebnisse an einer 1,5 MW Windenergieanlage im Betrieb. Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Arbeit in Kapitel 5 zusammengefasst sowie ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten gegeben.

2 Lösungsansatz

Zur Visualisierung von Bereichen mit unterschiedlichen Strömungszuständen wird in den vorgestellten Arbeiten ein thermografischer Ansatz gewählt. Dieser bietet die Möglichkeit auch aus größerer Entfernung berührungslos und ohne eine Besteigung der Windenergieanlage einige Eigenschaften der Strömung am Rotorblatt zu visualisieren und die Ausdehnung bestimmter Bereiche zur Quantifizieren.

2.1 Thermografische Strömungsvisualisierung

Die thermografische Strömungsvisualisierung ist eine in Windkanälen bereits lange eingesetzte Technik zur Unterscheidung von unterschiedlichen Strömungsbereichen [3, 8, 14]. Basierend auf einer Temperaturdifferenz zwischen dem Messobjekt und der Strömung, lassen sich

Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen aufgrund anderer Oberflächenreibungen und damit einhergehenden Wärmeübergängen thermografisch voneinander differenzieren. In Abb. 1 ist ein Beispiel für eine Thermografieaufnahme zur Strömungsvisualisierung an einem Rotorblattsegment aus dem aeroakustischen Windkanal der Deutsche WindGuard in Bremerhaven gegeben. Zu sehen

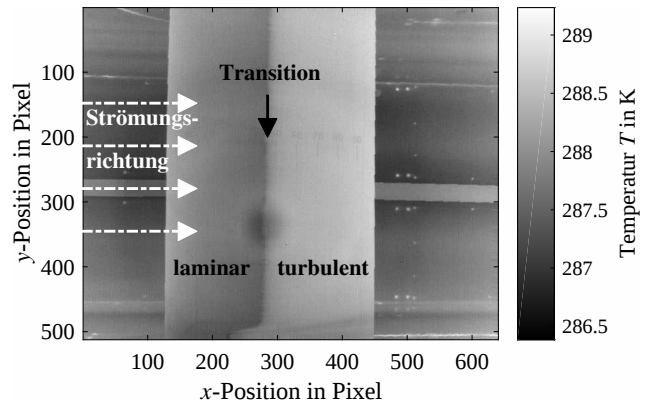


Abb. 1: Thermografieaufnahme eines Rotorblattsegmentes aus dem aeroakustischen Windkanal der Deutsche WindGuard. Zu sehen sind der laminare und turbulente Strömungsbereich sowie die laminar-turbulente Transition dazwischen. Das Rotorblattsegment wird von links mit wärmerer Strömung angeströmt.

sind der laminare (kältere) und der turbulente (wärmere) Strömungsbereich sowie die laminar-turbulente Transition in Form eines räumlich begrenzten großen Temperaturgradienten zwischen den beiden Bereichen. Die erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Messobjekt und Strömung resultiert in diesem Falle aus Reibung im geschlossenen Windkanalsystem und der damit einhergehenden kontinuierlichen Erwärmung der Strömung. Neuere Entwicklungen zielen auf die Übertragung dieser Messtechnik ausgehend vom Einsatz im Windkanal hin zur tatsächlichen Anwendung ab, z. B. bei Flugzeugtragflügeln [2], Hubschrauberrotorblättern [10] und, wie in diesem Fall, bei Rotorblättern von Windenergieanlagen [4].

Zur Erhöhung des thermischen Kontrastes ist es üblich in Windkanalversuchen mit Leistungen von mehreren hundert bis hin zu einigen tausend Watt pro Quadratmeter zu heizen [11, 16]. Zur Visualisierung der Strömungszustände an dem Rotorblatt einer Windenergieanlage ist jedoch keine Möglichkeit zu einer aktiven und räumlich gleichförmigen Heizung der Rotorblattoberfläche vorhanden. Aus diesem Grund resultiert der verfügbare Kontrast für eine Differenzierung unterschiedlicher Strömungsberei-

che lediglich aus der Erwärmung des Rotorblattes durch die solare Einstrahlung [5]. Darüber hinaus bewegt sich das Rotorblatt an den Blattspitzen mit bis zu 90 m/s [9] durch das Sichtfeld der Thermografiekamera, was zu einer Bewegungsunschärfe führt. Diese beispielhaft genannten Einflussfaktoren sowie die stets auftretenden Rauschprozesse bei der Photodetektion tragen zur Messunsicherheit in Bezug auf die Positionsbestimmung der Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen bei. Das grundlegende Potential des thermografischen Messansatzes, beschrieben durch die minimal erreichbare Messunsicherheit resultierend aus physikalischen und technologischen Limitierungen, ist jedoch nicht bekannt und steht im Zentrum dieser Arbeiten.

2.2 Unsicherheitsabschätzung

Abbildung 2a zeigt ein Beispielaufnahme für die Messung an einer laufenden Windenergieanlage mit den beiden Bereichen unterschiedlicher Strömung und der laminar-turbulenten Transition.

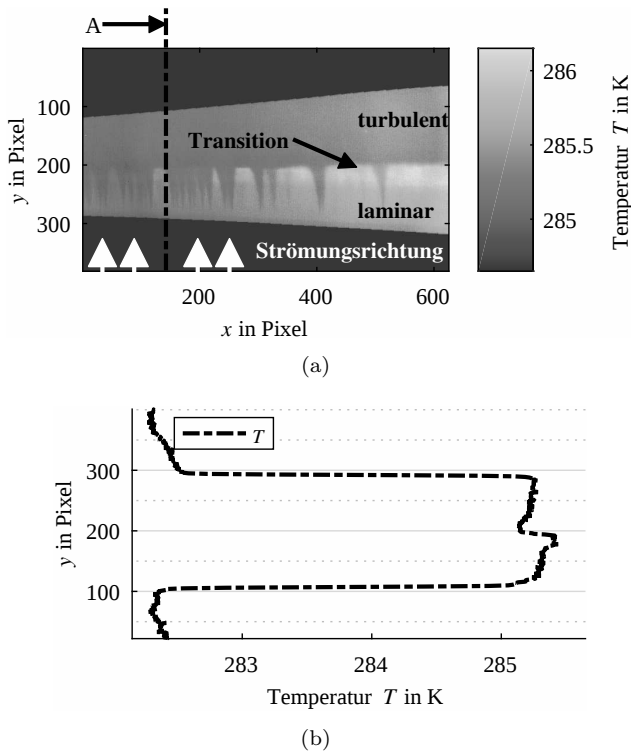


Abb. 2: Thermografieaufnahme eines Rotorblattes im Betrieb an der Windenergieanlage. a) Flächenhaftes Thermografiebild mit den sichtbaren Bereichen unterschiedlicher Strömungszustände und b) Temperaturprofil für den Schnitt A.

Neben der, von der Profilgeometrie beeinflussten, natürlichen Transition sind sogenannte Turbulenzkeile zu erkennen. An den Spitzen dieser Keile findet eine verfrühte laminar-turbulente Transition aufgrund von Verschmutzungen oder Beschädigungen der Rotorblattoberfläche statt. In Fig 2b ist das Temperaturprofil für den Schnitt A aus Abb. 2a zu sehen. Der Bereich der Transition ist eindeutig als Übergang mit einem großen Temperaturgradienten zu identifizieren.

Die Bestimmung der Position der laminar-turbulenten Transition $x_{threshold}$ kann mit einer linearen Regression und der Auswertung über eine Schwellwerttemperatur $T_{threshold}$ in der näheren örtlichen Umgebung der Transition mit den einzelnen Temperaturmesswerten T_i erfolgen.

$$x_{threshold} = \frac{T_{threshold} - n}{m} \quad (1)$$

Nach der Unsicherheitsfortpflanzung über die Parameter der Regressionsanalyse m und n ergibt sich die Unsicherheit der Position $\sigma_{x_{threshold}}$ zu:

$$\sigma_{x_{threshold}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial x_{threshold}}{\partial T_i} \right)^2 \sigma_{T_i}^2} \quad (2)$$

Bei der Unsicherheit der einzelnen Temperaturmesswerte wurde das Photonenschrotrauschen $\sigma_{T_{i,shot}}$ sowie das allgemeine thermische Rauschen der Kamera und des Objektivs $\sigma_{T_{thermal}}$ berücksichtigt. Das Photonenschrotrauschen wurde dabei unter Berücksichtigung der Kamera-Parameter sowie den Messbedingungen über das Plancksche Strahlungsgesetz ermittelt. Das thermische Rauschen der Kamera und des Objektivs wurde mit einer Messung über 500 Einzelmessungen bei verschlossenem Objektiv ermittelt. Die Unsicherheit der Temperatur ergibt sich dementsprechend zu $\sigma_{T_i} = \sqrt{\sigma_{T_{i,shot}}^2 + \sigma_{T_{thermal}}^2}$. Das Unsicherheitsbudget dieser beiden Terme ist in Tab. 1 dargestellt. Die für das Photonenschrotrauschen angegebene

Tab. 1: Messunsicherheitsbudget für die Unsicherheit einzelner Temperaturmesswerte T_i .

Typ	Abhängigkeit	Einfluss	Unsicherheit in K
$\sigma_{T_{i,shot}}$	temperaturabhängig	variable	0,0056-0,0112
$\sigma_{T_{thermal}}$	temperaturabhängig	konstant	0,0265

ne Unsicherheitsspanne gilt für einen Temperaturbereich zwischen 273,15 K und 333,15 K und das thermische Rauschen der Kamera und des Objektivs wird als konstant bei gleichbleibender Kamertemperatur angenommen.

In Abb. 3 ist die resultierende Unsicherheit der Position in Pixel in Abhängigkeit von dem verfügbaren thermi-

schen Kontrast für drei unterschiedliche mittlere Temperaturen $\bar{T}$ des Rotorblattes zu sehen. Die Randbedingungen,

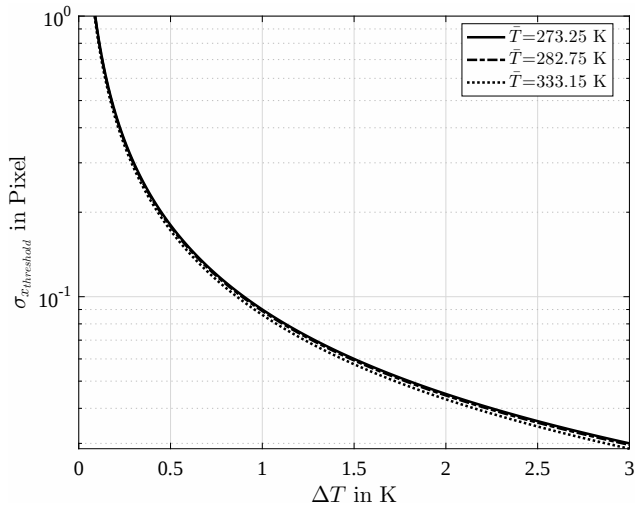


Abb. 3: Messunsicherheit der Position der laminar-turbulenten Transition $\sigma_{x_{threshold}}$ in Abhängigkeit von dem verfügbaren thermischen Kontrast ΔT zwischen dem laminaren und dem turbulenten Strömungszustand für drei unterschiedliche mittlere Temperaturen $\bar{T}$ des Rotorblattes.

wie z. B. der Messabstand, die numerische Apertur und der Wellenlängenbereich der Kamera, stimmen für diese Messunsicherheitsabschätzung mit denen aus dem im folgenden Kapitel beschriebenen Versuchsaufbau überein. Es wird deutlich, dass die Messunsicherheit der Position $\sigma_{x_{threshold}}$ im Wesentlichen durch die gemessene Temperaturdifferenz ΔT zwischen dem laminaren und dem turbulenten Strömungszustand und nur unwesentlich durch die absolute Temperatur der Messobjektoberfläche beeinflusst wird.

3 Versuchsaufbau

Die Thermografieaufnahmen an der sich im Betrieb befindlichen Windenergieanlage erfolgten mit einer gekühlten Thermografiekamera mit einem Indiumantimonid-Detektor-Array des Herstellers InfraTec aus Dresden. Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera liegt zwischen $2\mu\text{m}$ und $5\mu\text{m}$ und der Hersteller weist eine minimale rauschäquivalente Temperaturdifferenz NETD von $< 25\text{ mK}$ auf (bei 30°C). Die Kamera hat eine geometrische Auflösung von 640×512 Pixel, wobei die Pixelgröße auf der Sensorebene $15\mu\text{m}$ beträgt. Im Vollbildmodus lassen sich Bilder mit einer Bildrate von 100 Hz in einem Dynamikbereich

von 14 Bit aufzeichnen. Die Integrationszeit kann dabei auf Werte zwischen $1\mu\text{s}$ und $20.000\mu\text{s}$ eingestellt werden. Für die Aufnahmen aus einer Entfernung von typischerweise zwischen 100 m und 400 m wurde ein 200 mm Infrarot-Teleobjektiv verwendet. Dieses bietet ein augenblickliches Gesichtsfeld (IFOV, Instantaneous Field of View) von $0,08\text{ mrad}$. Für die angegebenen typischen Messentfernungen ergeben sich daraus Einzelmesspunkte pro Pixel von 8 mm bis 32 mm . Die Kamera wird mit einem externen optischen getriggert, somit lässt sich mit jedem Blattdurchgang eine Aufnahme an der gewünschten Rotorposition akquirieren. Die Aufnahme der Thermografiedaten erfolgt auf einem Laptop, die Auswertung findet offline statt. In Abb. 4 ist der Versuchsaufbau an der Windenergieanlage dargestellt.



Abb. 4: Versuchsaufbau an der Windenergieanlage mit Thermografiekamera, optischem Trigger und Auswerterechner im Vordergrund und der Windenergieanlage GE 1.5 sl mit einem Abstand von 169 m im Hintergrund.

Bei der Windenergieanlage handelt es sich um eine GE 1.5 sl des Herstellers General Electric. Die Anlage hat eine Nennleistung von $1,5\text{ MW}$ und es sind Rotorblätter des Zulieferers LM mit einer Länge von $37,3\text{ m}$ angebracht. Die Nabenhöhe der Anlage beträgt 60 m und es wurde aus einer Entfernung von 169 m hinter der Anlage die Saugseite der Rotorblätter gemessen. In Abb. 5 sind die Thermografiedaten eines ganzen Rotorblattes der Windenergieanlage GE 1.5 sl dargestellt.

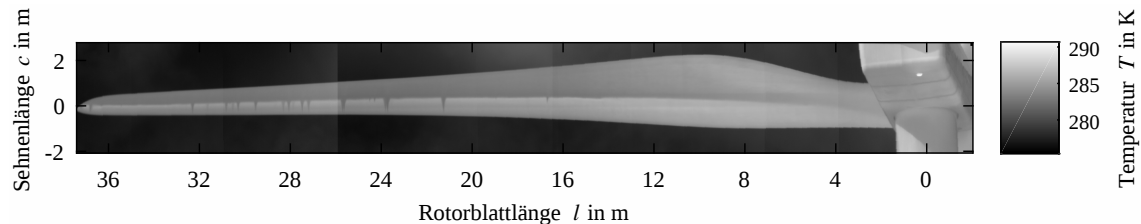


Abb. 5: Thermografische Aufnahme der Saugseite eines Rotorblattes der Windenergieanlage GE 1.5 sl. Die zusammengesetzte Gesamtaufnahme besteht aus insgesamt neun Einzelaufnahmen.

4 Messergebnisse

Die Gesamtaufnahme in Abb. 5 besteht aus insgesamt neun Einzelaufnahmen, die in horizontaler Richtung aneinandergefügt wurden. Zwischen den Einzelbildern liegen aufgrund dieser Messmethodik zeitliche Abstände in der Größenordnung der Rotationsfrequenz, jedoch lässt sich auf diese Art die geometrische Auflösung der Aufnahmen erheblich erhöhen. Die Gesamtaufnahme besteht aus 2780×340 Pixeln. Zum Zeitpunkt der Messung lief die Anlage im unteren Teillastbereich mit einer durchschnittlichen Drehzahl von 10 min^{-1} . Bei dieser Drehzahl beträgt die relative Windgeschwindigkeit an der Rotorblattspitze ca. $40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und das Rotorblatt hat einen konstanten Pitchwinkel von 2 Grad. Wenngleich dieses Rotorblatt verhältnismäßig wenige Turbulenzkeile aufgrund von Kontaminationen oder Beschädigungen aufweist, durchbrechen insbesondere im Blattaußenbereich dennoch einige die natürliche Transition. Zur Validierung der Messunsicherheitsabschätzung aus Kapitel 2.2 dient eine Einzelaufnahme des Blattaußenbereichs. Die Einzelaufnahme ist in Abb. 6 dargestellt. Auf Basis einer linearen Regressen in jeder Bildspalte um die Position der Transition wurde diese über eine Länge von 4 Metern bestimmt (gepunktete Linie). Da die Transition auf dieser Länge von einem Turbulenzkeil unterbrochen wird, erfolgt die Auswertung der Standardunsicherheit über einen kleineren Bereich (durchgezogene Linie). In diesem Bereich beträgt die Temperaturdifferenz zwischen dem laminaren und dem turbulenten Bereich 2 K und die Transition befindet sich im Mittel bei $y = 196,56$ Pixel mit einer Standardunsicherheit von $\pm 0,21$ Pixeln. Die gemessene Unsicherheit liegt um etwa einen Faktor 4 über der abgeschätzten Messunsicherheit, welche sich bei einer Temperaturdifferenz von 2 K zu 0,05 Pixeln ergibt. Eine Unsicherheitsfortpflanzung mit der Standardabweichung der Temperatur aus den Messdaten anstatt mit der analytisch ermittelten Unsicherheit der Temperatur σ_{T_i} führt zu einer Positionsunsicherheit von $\pm 0,2$ Pixeln, was in sehr guter Übereinstimmung mit den gemessenen

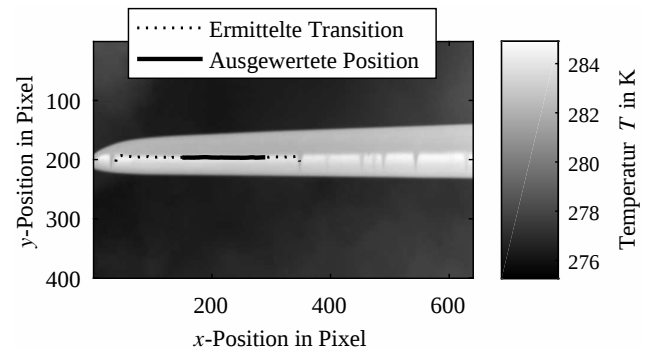


Abb. 6: Thermografische Einzelaufnahme im Außenbereich des Blattes. Die gestrichelte Linie zeigt die ermittelte Position der Transition und die durchgezogene Linie den Bereich, der zur Bestimmung der Standardunsicherheit verwendet wurde.

Daten ist. Dominierend sind demnach nicht die fundamentalen Unsicherheitseinflüsse des Messsystems, sondern strömungsinduzierte Temperaturfluktuationen (vgl. [6]).

5 Fazit und Ausblick

Für den Fall einer thermografischen Messung zur Strömungsvisualisierung bei einer Windenergieanlage im Betrieb wurde eine Auswertemethode zur Positionsbestimmung der laminar-turbulenten Transition vorgestellt. Die Methode basiert auf einer linearen Regression im Bereich des großen Temperaturgradienten aufgrund der Transition und ermöglicht eine Auswertung mit einer Unsicherheit im Subpixel-Bereich. Beispielsweise wurde für eine Messung aus 169 m Entfernung mit einer Temperaturdifferenz zwischen dem laminaren und dem turbulenten Strömungsbereich von 2 K eine Positionsunsicherheit von $\pm 0,3\%$ der Sehnenlänge des gemessenen Rotorblattabschnitts bestimmt. Die experimentell ermittelte Standardunsicherheit liegt um einen Faktor 4 über der analytisch abgeschätzten Messunsicherheit. Dies ist auf strömungsinduzierte Temperaturfluktuationen, insbesondere im turbulenten

Bereich, zurückzuführen, welche zu einem zusätzlichen Rauschen auf den Messdaten führen. In Bezug auf die durch das Messsystem beeinflusste Messunsicherheit spielt die Temperaturdifferenz, und damit die Steigung der linearen Regression, zwischen den Strömungsbereichen eine entscheidende Rolle, wohingegen die absolute Temperatur einen zu vernachlässigenden Einfluss hat. In Übereinstimmung mit den Messergebnissen wird die Messunsicherheit in Bezug auf die vorgestellte Anwendung derzeit nicht durch das Messsystem, sondern durch das Messobjekt limitiert. In einem nächsten Schritt soll eine alternative Auswertemethode über die nichtlineare Regression des differenzierten Temperaturprofils mit einer Gaußkurve in Hinsicht auf die resultierende Messunsicherheit untersucht werden. Diese Auswertemethode ermöglicht eine Selbst-Zentrierung im Bereich der Transition und es können mehr Messwerte für die Regression mit einbezogen werden, womit eine Erhöhung der Robustheit und eine weitere Reduktion der Messunsicherheit angestrebt werden. Darüber hinaus soll der Einfluss unterschiedlicher atmosphärischer Absorption und die Bewegung des Rotorblattes auf die Messunsicherheit berücksichtigt werden.

Danksagung: Für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten gilt der Dank der Autoren der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, Förderkennzeichen: 27118) und der Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung (BIS mit Mitteln des Landes Bremen, Förderkennzeichen: 59203/4).

Literatur

- [1] G. P. Corten. *Flow separation on wind turbines blades*. PhD thesis, Dissertation, Utrecht University, 2001.
- [2] B. K. Crawford, G. T. Duncan, D. E. West, and W. S. Saric. Quantitative boundary-layer transition measurements using IR thermography. *AIAA SciTech*, pages 13–17, jan 2014. 10.2514/6.2014-1411.
- [3] L. de Luca, G. M. Carlomagno, and G. Buresti. Boundary layer diagnostics by means of an infrared scanning radiometer. *Experiments in Fluids*, 9(3):121–128, may 1990. ISSN 1432-1114. 10.1007/BF00187411.
- [4] C. Dollinger, N. Balaesque, and M. Sorg. Thermographic boundary layer visualisation of wind turbine rotorblades in operation. In *Europe's Premier Wind Energy Event, Barcelona*. European Wind Energy Association, EWEA, Mar. 2014.
- [5] C. Dollinger, N. Balaesque, M. Sorg, and G. Goch. Thermographic measurement method for turbulence boundary layer analysis on wind turbine airfoils. In *Wind Power Conference and Exhibition, Las Vegas*. American Wind Energy Association, AWEA, May 2014.
- [6] C. Dollinger, N. Balaesque, A. P. Schaffarczyk, and A. Fischer. Thermographic detection of separated flow. *Journal of Physics: Conference Series*, 753(7):072006, sep 2016. 10.1088/1742-6596/753/7/072006.
- [7] M. Gad-el Hak and D. M. Bushnell. Separation control: Review. *Journal of Fluids Engineering*, 113(1):5–30, 1991. 10.1115/1.2926497.
- [8] E. Gartenberg and A. S. Roberts. Airfoil transition and separation studies using an infrared imaging system. *Journal of Aircraft*, 28(4):225–230, apr 1991. 10.2514/3.46016.
- [9] R. Gasch and J. Tuele, editors. *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2011.
- [10] J. T. Heineck, E. Schüle, and M. Raffel. Boundary layer transition detection on a rotor blade using rotating mirror thermography. In *5th American Helicopter Society Decennial Specialist Meeting, Aeromechanics, San Francisco 2014*, 2014.
- [11] L. A. Joseph, A. Borgoltz, and W. Devenport. Infrared thermography for detection of laminar-turbulent transition in low-speed wind tunnel testing. *Experiments in Fluids*, 57(5): 77, apr 2016. ISSN 1432-1114. 10.1007/s00348-016-2162-4.
- [12] P. Medina, S. Schreck, J. Johansen, and L. Fingersh. Oil-flow visualization on a swt-2.3-101 wind turbine. In *29th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), jun 2011. 10.2514/6.2011-3818.
- [13] A. Pellegrino and C. Meskell. Vortex shedding from a wind turbine blade section at high angles of attack. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121:131–137, oct 2013. ISSN 0167-6105. 10.1016/j.jweia.2013.08.002.
- [14] A. Quast. Detection of transition by infrared image techniques. In *12th international congress on instrumentation in aerospace simulation facilities (ICIASF 87)*, Williamsburg 1987, 1987.
- [15] H. Schlichting and K. Gersten. *Grenzschicht-Theorie*. Springer-Verlag, 2006.
- [16] B. Simon, A. Filius, C. Tropea, and S. Grundmann. IR thermography for dynamic detection of laminar-turbulent transition. *Experiments in Fluids*, 57(5):93, may 2016. ISSN 1432-1114. 10.1007/s00348-016-2178-9.
- [17] S. Vey, H. M. Lang, C. N. Nayeri, C. O. Paschereit, and G. Pechlivanoglou. Extracting quantitative data from tuft flow visualizations on utility scale wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 524(1):012011, jun 2014. 10.1088/1742-6596/524/1/012011.