Instationäre thermografische Strömungsvisualisierung zur Detektion von Strömungsablösung an Windenergieanlagen

Unsteady thermographic flow visualization for the detection of flow separation on wind turbines

Felix Oehme, Michael Sorg, Andreas Fischer

Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik Automatisierung und Qualitätswissenschaften (BIMAQ), Linzer Straße 13, 28359 Bremen, E-Mail: f.oehme@bimaq.de

Thermografie, Thermografische Strömungsvisualisierung, turbulente Strömungsablösung IR thermography, Thermographic flow visualization, Turbulent separated flow

Zusammenfassung

Mit dem Ziel, Strömungsablösung an Windenergieanlagen eindeutig zu detektieren, wird das thermodynamische Antwortverhalten von Rotorblättern auf instationären Anströmbedingungen mit Hilfe von Thermografie ausgewertet. Strömungsablösung an Rotorblättern von Windkraftanlagen verursacht Leistungsverluste, strukturelle Belastungen und erhöhte Schallemissionen. Aufgrund des geringen thermischen Kontrasts zwischen turbulenten und abgelösten Strömungsbereichen ist die Detektierbarkeit von Strömungsablösung bisher auf Windkanalmessungen limitiert. Im Gegensatz zu Windkanalmessungen sind Messungen an Windenergieanlagen durch ein geringes Signal-zu-Rausch Verhältnis charakterisiert. Eine geeignete Methode, um trotzt limitierter Messbedingungen Strömungszustände anhand eindeutiger identifizieren. die Merkmale zu ist Auswertung von zeitlichen Temperaturfluktuationen. Inwieweit dieser Messansatz auf die Messund Anströmbedingungen an Windenergieanlagen übertragbar ist, ist jedoch eine offene Forschungsfrage. Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden bei Windkanaluntersuchungen freifeldähnliche instationäre Anströmbedingungen simuliert und die resultierenden Temperaturfluktuation thermografisch ausgewertet. Die Auswertung des Antwortverhaltens zeigt thermodynamischen eine hohe Sensitivität gegenüber strömungsabhängigen Wärmeübertragungsmechanismen, wodurch in Verbindung mit theoretischen Vorbetrachtungen eine eindeutige Identifizierbarkeit von unterschiedlichen Strömungsbereichen realisiert werden kann. Im Ergebnis kann der Messansatz für die Anwendung an Windenergieanlagen verifiziert werden.

Einleitung

Strömungsablösung an pitch-geregelten Windenergieanlagen (WEA) reduziert die aerodynamische Leistungsfähigkeit der Rotorblätter bei gleichzeitiger Erhöhung der Materialbelastungen und Schallemissionen und ist deshalb ein unerwünschter aerodynamischer Effekt an WEA (Dollinger et al. 2018a).

Um Strömungsablösung zukünftig zu verhindern wird eine in-Prozess-fähige Messmethode zur eindeutigen Detektion von turbulenter Strömungsablösung an in Betrieb befindlichen WEA benötigt. Darüber hinaus sollte der Messansatz nicht-invasiv und bildgebend sein sowie eine hohe räumliche Auflösung aufweisen, um eine Identifizierung des Ursprungs der Strömungsablösung zu ermöglichen.

Bereits verfügbare und etablierte Messmethoden zur Erkennung und Lokalisierung von turbulenter Strömungsablösung an Rotorblättern (Vey et al. 2014; Corten und Veldkamp 2001; Medina et al. 2011; Reichstein et al. 2019; Schaffarczyk et al. 2017; Costantini et al. 2019) erfordern eine zeitaufwendige Montage der Messmittel während eines Stillstandes der WEA. Außerdem sind die Methoden invasiv und liefern nur eine schlechte räumliche Auflösung auf der Rotorblattfläche.

Eine Methode zur in-Prozess Strömungsvisualisierung, die das Potenzial hat, die genannten Anforderungen bei der Messung an Rotorblättern von WEA zu erfüllen, ist die Infrarot-Thermografie (IRT) (Gartenberg und Roberts 1992). Unter der Bedingung einer Temperaturdifferenz zwischen der Anströmung und der Rotorblattoberfläche entstehen auf der Rotorblattoberfläche strömungsabhängige und thermografisch messbare Temperaturgradienten. IRT wird üblicherweise bei Windkanalmessungen eingesetzt, wobei die Testobjekte aktiv erwärmt werden, um den thermischen Kontrast zwischen den Strömungsbereichen zu erhöhen (Simon et al. 2016; Dollinger et al. 2018a). Bei Freifeldmessungen an Windkraftanlagen ist eine aktive Erwärmung der Rotorblätter jedoch ausgeschlossen wodurch die vorhandene Temperaturdifferenz einzig auf der absorbierten Sonnenstrahlung basiert. Zusätzlich limitiert der große Messabstand von >150m das erreichbare Signal-zu-Rausch Verhältnis.

Trotz der limitierten Messbedingungen, konnte IRT zur Detektion und Lokalisierung laminarturbulenter Strömungstransition anhand der Auswertung einzelner Thermogramme bereits erfolgreich an WEA angewendet werden (Dollinger et al. 2018a; Dollinger et al. 2018b; Reichstein et al. 2019). Zur eindeutigen Detektion von Strömungsablösung an WEA ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet, da die thermische Trägheit der Oberfläche sowie laterale Wärmeleitung den thermischen Kontrast zwischen Regionen mit unterschiedlichen Strömungszustand reduzieren und strömungsabhängige Merkmale innerhalb der einzelnen Strömungsregionen abschwächen.

Mit dem Ziel, die Unterscheidbarkeit turbulenter und abgelöster Strömungsbereiche für Messbedingungen mit geringem thermischem Kontrast zu erhöhen, veröffentlichten Dollinger et at. 2019a einen alternativen Messansatz. Anhand der Auswertung von Oberflächentemperaturfluktuationen mittels der Standardabweichung bzw. Fourier Koeffizienten wurde der Kontrast zwischen turbulenten und abgelösten Strömungsbereichen bei Windkanalmessungen erhöht. Allerdings wurde dabei die Ursache des instationären Verhaltens der Oberflächentemperatur nicht untersucht, so dass eine eindeutige und merkmalsbasierte Detektion von Strömungsablösung noch nicht realisiert werden konnte. Gardner et al. 2016 veröffentlichten einen weiteren IRT-basierten Messansatz für eine eindeutiae Detektion von Strömungsablösung basierend auf charakteristischen Strömungsturbulenzen in abgelösten Strömungsbereichen, gemessen an einem intensiv beheizten und schnell bewegten Hubschrauber-Tragflächenprofil. Die vorgeschlagene Methode basiert auf einer Auswertung der räumlichen oder zeitlichen Standardabweichung von differentiellen Thermogrammen (σ DIT). Demnach ermöglicht die Auswertung des instationären Oberflächentemperaturverhaltens mit IRT eine eindeutige Detektion der Strömungsablösung bei idealisierten Windkanalmessungen mit instationären Anströmbedingungen. Ob und wie sich die vorgestellten Auswertungen des instationären Oberflächentemperaturverhaltens in Folge instationäre Anströmbedingungen auf die Messund Anströmbedingungen an Windenergieanlagen übertragen lassen, ist jedoch eine offene Forschungsfrage.

Lösungsansatz

In Weiterentwicklung zu Dollinger et al. 2019a und Gardner et al. 2016 ist es das Ziel, das Antwortverhalten der Oberflächentemperatur für freifeldähnliche instationäre Anströmbedingungen mit einem instationären IRT Ansatz auszuwerten und Strömungsablösung anhand charakteristischer Merkmale eindeutig zu detektieren.

Instationäre Anströmbedingungen an Rotorblättern von Windkraftanlagen treten naturgemäß durch folgende Effekte auf (Dollinger et al. 2018b; Veers et al. 2019):

- Änderungen der Fluidtemperaturen
- Änderungen von Wind v_w und Rotorgeschwindigkeit v_{rb}
- pitchende Rotorblätter
- Vibrationen des Turms oder der Rotorblätter.

Für die Untersuchungen im vorliegenden Beitrag werden fluktuierende Fluidtemperaturen sowie Änderungen der Wind- und Rotorgeschwindigkeit als dominierende Ursachen für instationäre Anströmbedingungen angenommen.

Veränderliche Fluidtemperaturen zeitlich führen proportional zum gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten \overline{h} zu veränderlichen Oberflächentemperaturen. Änderungen Rotorgeschwindigkeit der Windund wiederum induzieren veränderliche Anströmgeschwindigkeiten v_{∞} und Anströmwinkel α . Die daraus resultierende räumliche Veränderung der Strömungsbereiche und die nicht konstanten Strömungsgeschwindigkeiten führen zu einem zeitlich instationären Anteil \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten und in der Folge zu zeitlich veränderlichen Oberflächentemperaturen. Aufgrund dessen ist die zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur für instationäre Anströmbedingungen, zusätzlich zu h, von der zeitlichen Standardabweichung σĥ des nicht-stationären Teils des Wärmeübergangskoeffizienten abhängig. Im Ergebnis induzieren instationäre Anströmbedingungen strömungsabhängige und interpretierbare Veränderungen der Oberflächentemperatur, anhand dessen thermografisch eine eindeutige Identifikation von Strömungsregimen realisiert werden kann. Zur Bewertung des thermischen Antwortverhaltens auf instationäre Anströmbedingungen, wird die zeitliche Standardabweichung σ_{SIAE} der Oberflächentemperatur als Zielgröße verwendet.

Abb. 1 zeigt den erwarteten Verlauf von \overline{h} und $\sigma \tilde{h}$ über die bezüglich der Sehnenlänge c



Abb. 1: Erwarteter Verlauf des Mittelwertes \overline{h} und der zeitlichen Standardabweichung des nicht-stationären Anteils $\sigma \tilde{h}$ des Wärmeübergangskoeffizienten sowie der zeitlichen Standardabweichung der Oberflächentemperatur $\sigma_{s,IAE}$ über die normierte Sehnenposition χ/c .

normierte Sehnenposition x. Die dargestellten Verläufe basieren auf XFoil-Simulationen und der Anwendung der Reynolds Analogie für nicht-abgelöste Strömungsbereiche bzw. auf experimentellen Untersuchungen für abgelöste Strömungsbereiche (Rivir et al. 1994; Ladisch et al. 2009).

UmdieverschiedenenStrömungsbereicheinsequentiellerReihenfolgezuidentifizieren,stehenunterBerücksichtigungderSuperposition von \overline{h} und $\sigma \tilde{h}$ diefolgendenmodellbasierten

Merkmale für die Standardabweichung der Oberflächentemperaturschwankung $\sigma T_{s,IAE}$ bei den genannten instationären Anströmbedingungen zur Verfügung:

- (i) Laminare Grenzschichtströmung: $\sigma T_{s,IAE}$ nimmt in Folge einer zunehmenden Grenzschichtdicke kontinuierlich ab.
- (ii) Laminar-turbulente Strömungstransition: $\sigma T_{s,IAE}$ zeigt ein globales Maximum aufgrund des nicht-monotonen Verhalten von \overline{h} im Transitionsbereich und der Verschiebung der Strömungsbereiche.
- (iii) Turbulente Grenzschichtströmung: $\sigma T_{s,IAE}$ nimmt in Folge einer zunehmenden Grenzschichtdicke kontinuierlich ab.
- (iv) Turbulent-abgelöste Strömungstransition: $\sigma T_{s,IAE}$ hat analog zu (ii) ein lokales Maximum.
- (v) Turbulente abgelöste Strömung: $\sigma T_{s,IAE}$ nimmt aufgrund der ansteigenden Wirbelgröße zu.

Ergebnis ermöglichen die genannten modellbasierten Im Eigenschaften des thermodynamischen Antwortverhaltens für instationäre Anströmbedingungen die Identifizierung verschiedener Strömungszustände und insbesondere die eindeutige Detektion von turbulenter Strömungsablösung.

Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des vorgestellten Messansatzes werden Messungen im aeroakustisch optimierten Windkanal (DWAA) der Deutschen WindGuard in Bremerhaven durchgeführt. Der Windkanal ist vom Typ Göttinger Bauart und wird mit Turbulenzintensitäten von unter 0,3 % bei Windgeschwindigkeiten bis 100 ms⁻¹ betrieben. In der Mitte der Teststrecke befinden sich zwei Drehtische zwischen denen Testprofile mit einer Größe bis zu 600 mm montiert werden können. Für Messungen mit einer IR-Kamera ist an der Seite der geschlossenen Teststrecke mit einem Fenster aus Kalziumfluorid ein optischer Zugang gegeben. Zusätzlich sind vor dem Testmodell dynamische Strömungsdeflektoren (DFD) angebracht, um Messungen mit instationärem Anstellwinkel und statischer geometrischen Ausrichtung zwischen Testmodell und IR-Kamera zu realisieren zu realisieren. Analog zu Freifeldmessung wird auf eine künstliche Erhöhung des thermischen Kontrasts durch Halogenstrahler verzichtet. Stattdessen basiert die verfügbare Temperaturdifferenz zwischen Testprofil und Fluid einzig auf der steigenden Fluidtemperatur durch die Wärmeabgabe des Windkanalantriebs während des Windkanalbetriebs. In Abb. 2 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.





Als Testprofil wird ein Profil des Typs DU00W2401 mit einer Sehnenlänge von 550 mm und einer Polyurethan-Deckschicht verwendet. Als Referenzmethode sind Wollfäden und Oberflächendrucksensoren an der Profiloberfläche angebracht.

Anhand von zwei Experimenten, mit und ohne Strömungsablösung, wird die Sensitivität des vorgestellten instationären IRT Messansatzes zur eindeutigen Detektion von Strömungsablösung untersucht. Zu diesem Zweck wird der Anstellwinkel von $\alpha = 12^{\circ}$ im ersten Experiment auf $\alpha = -2^{\circ}$ im zweiten Experiment geändert. Bei beiden Experimenten beträgt die Strömungsgeschwindigkeit 58 ms⁻¹, woraus sich die Reynoldszahl $Re = 2 \cdot 10^6$ ergibt. Zusätzlich zu natürlichen Temperaturschwankungen im Windkanal werden instationäre Eigenschaften der Anströmung durch veränderte Anströmwinkel ($\pm 1^{\circ}$) mit Hilfe der Bewegung des DFD mit einer Frequenz von 0,5 Hz realisiert.

Für die Bildaufnahme wird eine IR-Kamera vom Typ IR8800 des Herstellers InfraTec mit einem aktiv gekühlten MCT-Detektor verwendet. Der Detektor ist für Wellenlängen zwischen (7,7-10,2) µm empfindlich und weist eine rauschäquivalente Temperaturdifferenz von weniger als 25 mK bei 30 °C auf. Für die Messung wird ein 25 mm Objektiv verwendet. Das resultierende Sichtfeld hat eine Größe von 0,48 m x 0,38 m und wird durch 640 x 512 Pixel² abgebildet. Die Aufnahmeparameter werden bei beiden Experimenten auf eine Versuchsdauer von 20 s, auf eine Abtastrate von 100 Hz und auf eine Kamera-Integrationszeit von 449 µs eingestellt. Für das Testprofil ist der Einfluss einer Oberflächentemperaturverteilung, verursacht durch eine winkelabhängige. Emissionsgradverteilung, vernachlässighar. Im Weiteren wird eine

eine winkelabhängige Emissionsgradverteilung, vernachlässigbar. Im Weiteren wird eine lineare geometrische Zuordnung der Pixel zur Oberfläche des Testmodells angenommen.

Datenauswertung

Um Temperaturfluktuationen in Folge instationärer Anströmbedingungen anhand der aus JBildern bestehenden Bildserien zu untersuchen, werden der zeitliche Mittelwert sowie der zeitliche Gradient mit Hilfe einer linearer Regression Pixelweise subtrahiert. Im nächsten Schritt erfolgt eine räumliche Tiefpassfilterung für jedes Bild unter Anwendung eines Gauß-Filters mit einer gewählten Standardabweichung von einem Pixel. Ziel der Tiefpassfilterung ist es, den Einfluss von turbulenten Strömungseffekten sowie Rauschen zu minimieren. Im letzten Schritt wird die zeitliche Standardabweichung der tiefpassgefilterten Oberflächentemperaturen $T_{s,tf}$ mit den Bildrichtungen \vec{x} und dem Zeitstempel j pixelweise wie folgt berechnet:

$$\sigma T_{s,IAE} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{J} (T_{s,tf}(\vec{x},j) - \bar{T}_{s,tf}(\vec{x},j))^2}{J-1}}.$$

Zusätzlich zu den Temperaturfluktuationen wird der zeitliche Mittelwert der Oberflächentemperaturen,

$$\bar{T}_s(\vec{x}) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J T_s(\vec{x}, j),$$

berechnet und stellt als klassischer Auswerteansatz eine Vergleichsmethode dar. Die Ergebnisse der beiden Auswertungen werden im folgenden Abschnitt hinsichtlich der Eignung zur eindeutigen und merkmalsbasierten Detektion von Strömungsablösung untersucht.

Messergebnisse

Um die Messansätze hinsichtlich der eindeutigen Detektierbarkeit von Strömungsablösung auszuwerten, werden zunächst die Positionen der unterschiedlichen Strömungsbereiche für beide Experimente validiert. Abb. 3 zeigt den Verlauf der experimentellen Daten des dimensionslosen Druckkoeffizienten c_p sowie des zugehörigen 99 % Konfidenzintervalls über die normierte Sehnenposition. Im ersten Experiment mit einem Anströmwinkel von $\alpha = 12 \mp 1^{\circ}$ ist die Position der laminar-turbulenten Strömungstransition bei x/c = 0.25 anhand eines Sattelpunkts im c_p -Verlauf, sowie eines lokalen Maximums der Breite des Konfidenzintervalls erkennbar. Die turbulente Strömungsablösung wird ab x/c = 0.5 anhand konstanter Werte des Druckkoeffizienten sowie durch die angebrachten Baumwollbindfäden detektiert. Im Vergleich

dazu erfolgt die laminar-turbulente Strömungstransition im zweiten Experiment mit einem Anströmwinkel von $\alpha = -2 \mp 1$ erst bei x/c = 0.4, während die Strömung im Bereich der Hinterkante nicht ablöst. Das Kriterium des nachfolgenden Vergleichs der beiden Messansätze ist die eindeutige und merkmalsbasierte Identifizierbarkeit von Strömungszuständen auf Grundlage der in Abb. 3 dargestellten Verläufe.



Abb. 3: Verlauf der experimentell bestimmten dimensionslosen Druckkoeffizienten c_p für die Saugseite des Flügelprofils.

In Abb. 4 sind die Ergebnisse des klassischen IRT Messansatzes (linke Seite) und des instationären IRT Messansatzes (rechte Seite) gegenübergestellt. Abb. 4a und 4c zeigen die ausgewerteten Bildserien des ersten Experiments zur Bewertung der Unterscheidbarkeit verschiedenerer Strömungsgebiete anhand sichtbarer, optischer Kontraste. Um die



Abb. 4: Vergleich der ausgewerteten Bildserien mit dem klassischen IRT Messansatz (linke Seite) und dem vorgestellten instationären IRT Messansatz (rechte Seite). Oben: Darstellung der ausgewerteten Bildserie des ersten Experiments, unten: Quer zur Strömungsrichtung gemittelte Werte beider Experimente.

Identifizierbarkeit von Strömungsbereichen anhand von eindeutigen Merkmalen zu analysieren, sind in Abb. 4b und 4d die über die Profilbreite gemittelten \overline{T}_s und $\sigma T_{s,IAE}$ Verläufe für beide Experimente dargestellt.

Zunächst wird die Identifizierbarkeit von Strömungsbereichen unter Anwendung des Bei beiden klassischen IRT Messansatzes analysiert. Experimenten zeigt der Temperaturverlauf über die Sehnenposition in Abb. 4b ein nicht-monotones Verhalten im Bereich der Transitionen, wodurch die unterschiedlichen Strömungsbereiche unterscheidbar sind. Dabei wird allerdings ebenfalls sichtbar, dass die Temperaturverläufe signifikant durch laterale Wärmeleitung beeinflusst werden. In der Folge weisen die Signalverläufe beider Experimente ab einer normierten Sehnenposition von x/c = 0.7 eine hohe Ähnlichkeit auf, obwohl verschiede Strömungszustände vorliegen. Im Ergebnis ist der klassische Messansatz für Messungen mit einem geringen thermischen Kontrast zwischen turbulenten und abgelösten Strömungsgebieten nicht zur eindeutigen Detektion von Strömungsablösung geeignet.

Im Gegensatz dazu entsprechen die Signalverläufe des instationären IRT Ansatzes in Abb. 4d den qualitativen Abschätzungen aus Abb. 1. In Bereichen mit laminarer oder turbulenter Strömung nimmt $\sigma T_{s,IAE}$ in Folge steigender Grenzschichtdicken ab, während $\sigma T_{s,IAE}$ im abgelösten Bereich aufgrund steigender Wirbelgrößen zunimmt. Zusätzlich sind die Transitionsbereiche in Folge der räumlichen Dynamik der Strömungsbereiche anhand von Maxima deutlich erkennbar. Somit ermöglicht der instationäre IRT Messansatz auf Grundlage der Auswertung des thermodynamischen Antwortverhaltens für freifeldähnliche instationäre Anströmbedingungen eine eindeutige Identifizierbarkeit verschiedener Strömungsbereiche.

Fazit und Ausblick

Mit dem Ziel, ein **IRT-basierten** Messansatz eindeutigen Detektion zur von Strömungsablösung an Windenergieanlagen zu etablieren, wurde die Identifizierbarkeit unterschiedlicher Strömungsbereiche durch die Auswertung des thermodynamischen Antwortverhaltens der Rotorblattoberfläche in Folge freifeldähnlicher instationärer Anströmbedingungen untersucht.

Im Vergleich zur klassischen IRT-basierten Auswertungen, weist der instationäre IRT Ansatz eine erhöhte Sensitivität gegenüber strömungsabhängigen Wärmeübertragungsmechanismen bzw. eine reduzierte Sensitivität gegenüber strömungsunabhängigen Effekten auf. Unter Anwendung von instationärer IRT konnte bei Windkanalmessungen mit freifeldähnlichen Mess- und Anströmbedingungen gezeigt werden, dass die Signalverläufe innerhalb einzelner Strömungsbereiche dem erwarteten Verlauf des strömungsabhängigen mittleren Wärmeübergangskoeffizienten entsprechen. Weiterhin sind Übergänge zwischen verschiedenen Strömungsbereichen in Folge der räumlichen Dynamik der Strömungsbereiche anhand von Signalmaxima deutlich erkennbar. Im Ergebnis wurde die Eignung des instationären IRT Messansatz zur eindeutigen Identifizierung von Strömungszuständen nachgewiesen.

Zukünftige Untersuchungen zielen auf eine tiefergehende Charakterisierung der Ursachen für thermografisch messbare Temperaturfluktuationen an Windenergieanlagen. Dabei ist insbesondere die Auswertung turbulenzinduzierter Temperaturfluktuationen von Interesse. Im Anschluss an die Charakterisierung des Messansatzes wird die Übertragbarkeit auf Freifeldmessungen an in Betrieb befindlichen WEA untersucht.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG-Projektnummer FI1989/5-1) und die experimentelle Unterstützung der Deutsche WindGuard GmbH.

Literaturverzeichnis

Corten, G.P., Veldkamp, H.F. 2001: "Insects can halve wind-turbine power", Nature, Vol. 6842, pp. 41–42.

Costantini, M., Fuchs, C., Henne, U., Klein, C., Ondrus, V., Bruse, M., Loehr, M., Jacobs, M. 01072019: "Experimental Analysis of a Wind-Turbine Rotor Blade Airfoil by means of Temperature-Sensitive Paint", In: AIAA Scitech 2019 Forum.

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

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

Gardner, A.D., Wolf, C.C., Raffel, M. 2016: "A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography", Experiments in Fluids, Vol. 9.

Gartenberg, E., Roberts, A.S. 1992: "Twenty-five years of aerodynamic research with infrared imaging", Journal of Aircraft, Vol. 2, pp. 161–171.

Ladisch, H., Schulz, A., Bauer, H.-J. 2009: "Heat Transfer Measurements on a Turbine Airfoil with Pressure Side Separation", In: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009, Presented at the 2009 ASME Turbo Expo, June 8 - 12, 2009, Orlando, Florida, USA, pp. 783–793.

Medina, P., Schreck, S., Johansen, J., Fingersh, L. 06272011: "Oil-flow visualization on a SWT-2.3-101 wind turbine", In: 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference.

Reichstein, T., Schaffarczyk, A.P., Dollinger, C., Balaresque, N., Schülein, E., Jauch, C., Fischer, A. 2019: "Investigation of Laminar–Turbulent Transition on a Rotating Wind-Turbine Blade of Multimegawatt Class with Thermography and Microphone Array", Energies, Vol. 11, pp. 2102.

Rivir, R.B., Johnston, J.P., Eaton, J.K. 1994: "Heat Transfer on a Flat Surface Under a Region of Turbulent Separation", Journal of Turbomachinery, Vol. 1, pp. 57–62.

Schaffarczyk, A.P., Schwab, D., Breuer, M. 2017: "Experimental detection of laminar-turbulent transition on a rotating wind turbine blade in the free atmosphere", Wind Energy, Vol. 2, pp. 211–220.

Simon, B., Filius, A., Tropea, C., Grundmann, S. 2016: "IR thermography for dynamic detection of laminar-turbulent transition", Experiments in Fluids, Vol. 5.

Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C.L., Carlson, O., Clifton, A., Green, J., Green, P., Holttinen, H., Laird, D., Lehtomäki, V., Lundquist, J.K., Manwell, J., Marquis, M., Meneveau, C., Moriarty, P., Munduate, X., Muskulus, M., Naughton, J., Pao, L., Paquette, J., Peinke, J., Robertson, A., Sanz Rodrigo, J., Sempreviva, A.M., Smith, J.C., Tuohy, A., Wiser, R. 2019: "Grand challenges in the science of wind energy", Science (New York, N.Y.), Vol. 6464.

Vey, S., Lang, H.M., Nayeri, C.N., Paschereit, C.O., Pechlivanoglou, G. 2014: "Extracting quantitative data from tuft flow visualizations on utility scale wind turbines", Journal of Physics: Conference Series, pp. 12011.