

Thermografische Detektion von instationären Strömungsablösungen an Windenergieanlagen

Thermographic detection of unsteady 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

Es wird eine thermografische Detektion instationärer Strömungsablösung an einer in Betrieb befindlichen Windenergieanlage (WEA) des Typs GE1.5sl vorgestellt und mit Hilfe von Strömungsfäden verifiziert. Instationäre Strömungsablösungsphänomene, wie Dynamic Stall, verursachen frühzeitige Materialermüdung, erhöhte Schallemissionen und reduzieren den Wirkungsgrad der Rotorblätter. Um die zugrundeliegenden Wirkmechanismen zu erforschen und die Effizienz von WEA zu verbessern, ist eine nicht-invasive, in-Prozessfähige Messmethode zur spatio-temporal hochaufgelösten Detektion von instationären Strömungsablösungen erforderlich. Im Vergleich zu bereits verfügbaren Methoden zur Detektion von Strömungsablösung an Windenergieanlagen, ist der vorgeschlagene thermografische Messansatz nicht-invasiv, in-Prozessfähig und bietet eine hohe räumliche Auflösung. Auf Grundlage der Auswertung des thermodynamischen Antwortverhaltens der Rotorblattoberfläche auf instationäre Anströmbedingungen wie Böen wird ein zweistufiger Signalverarbeitungsansatz vorgestellt. Anhand der transienten Auswertung mit Differenzbildern im ersten Schritt der Signalverarbeitung konnte eine räumlich gemittelte Ablöseposition mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen Auflösung von ca. 4 s lokalisiert werden. Im zweiten Schritt ist es durch die Anwendung einer PCA gelungen, den Kontrast zwischen dem angelegten und dem abgelösten Strömungsbereich zu erhöhen, und so eine Lokalisierung der zeitlich gemittelten Ablöselinie mit der maximalen Bildauflösung von 5 mm zu erreichen. Im Ergebnis konnte erstmals die thermographische Detektion einer instationären Strömungsablösung an einer in Betrieb befindlichen WEA mit einer hohen spatio-temporalen Auflösung demonstriert werden.

Einleitung

Die Strömungsablösung an pitch-geregelten Windenergieanlagen (WEA) reduziert die aerodynamische Leistungsfähigkeit der Rotorblätter bei gleichzeitiger Erhöhung der Materialbelastungen und Schallemissionen und ist deshalb an WEA ein unerwünschter aerodynamischer Effekt (Melius et al. 2016).

Um Strömungsablösung zukünftig zu verhindern, wird eine in-Prozessfähige Messmethode zur eindeutigen Detektion von turbulenter Strömungsablösung an in Betrieb befindlichen WEA benötigt. Darüber hinaus sollte der Messansatz nicht-invasiv sein sowie eine hohe spatio-

temporale Auflösung aufweisen, um eine Identifizierung des Ursprungs instationärer Strömungsablösungen zu ermöglichen.

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

Eine Methode zur Strömungsvisualisierung mit dem Potenzial 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 der laminar-turbulenter 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 bzw. Auflösung instationärer Strömungsphänomene 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 zwischen turbulenten und abgelösten Strömungsbereichen bei den Messbedingungen an WEA zu erhöhen, veröffentlichten Dollinger et al. 2018a und Oehme et al. 2021 den Ansatz, das Antwortverhalten der Oberflächentemperatur auf fluktuierende Anströmtemperaturen in Windkanaluntersuchungen mit auszuwerten. Während Dollinger et al. 2018a den thermischen Kontrast zwischen turbulenten und abgelösten Strömungsbereichen erhöhen konnten, präsentierten Oehme et al. 2021 eine eindeutige Detektion der turbulenten Strömungsablösung anhand von charakteristischen thermischen Ablösemerkmalen. Kürzlich gelang anhand der Auswertung der thermodynamischen Antwortverhaltens auf instationäre Anströmbedingungen zum ersten Mal eine IRT-basierte Detektion und Lokalisierung im Bereich der Rotorblattwurzel an einer in Betrieb befindlichen WEA (Oehme et al. 2022). Da die vorgeschlagenen Signalverarbeitungsansätze jedoch auf einer zeitlich gemittelten Auswertung der Oberflächentemperatur basieren, eignen sie sich nicht für eine zeitaufgelöste Detektion von Strömungsablösungen.

Zur Realisierung einer zeitaufgelösten Detektion instationärer Strömungsablösung bei Windkanalexperimenten an einem stark beheizten und schnell bewegten Hubschrauberprofil, veröffentlichten Gardner et al. 2016 den Ansatz die räumliche Standardabweichung von differentiellen Thermogrammen auszuwerten. Während der vorgestellte Ansatz nur eine geringe räumliche Auflösung bietet, wurde eine zeitaufgelöste Erkennung des dynamischen Strömungsabrisses gezeigt.

Im Ergebnis ermöglicht die zeitlich gemittelte Auswertung der Oberflächentemperatur der Rotorblätter eine Detektion von Strömungsablösungen an WEA mit einer hohen räumlichen Auflösung, während der Einsatz differentieller IRT eine zeitaufgelöste Auswertung von instationären Strömungsablösungen in idealisierten Windkanalexperimenten ermöglicht. Doch

wie können beide IRT-Signalverarbeitungsansätze kombiniert werden, um instationäre Strömungsablösungsphänomene an in Betrieb befindlichen Windkraftanlagen mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung ermöglichen?

Lösungsansatz

Unser Ziel ist es, eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Detektion des Auftretens instationärer Strömungsablösung während einer Böe im spitzennahen Rotorblattbereich mittels Infrarot-Thermographie zu realisieren. Dazu wird das durch Böen induzierte thermische Antwortverhalten der Rotorblattoberfläche mit einem zweistufiger Signalverarbeitungsansatz ausgewertet. Im ersten Schritt erfolgt für den Zeitbereich während des Auftretens einer Böe eine transiente Auswertung von Differenzbildern (DIT-Ansatz), um eine maximale zeitliche Auflösung zu erreichen. Das Ziel der Anwendung einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) auf eine Bildserie im zweiten Schritt ist es, die zeitlich gemittelte Ablöseposition mit der maximalen räumlichen Auflösung zu lokalisieren.

Beim Auftreten von Böen nimmt die Windgeschwindigkeit U_w , und damit die effektive Anströmgeschwindigkeit U_{eff} sowie der Anstellwinkel α , zu, siehe Abb. 1. Wenn sich die Windgeschwindigkeit im Vergleich zur Rotorblattgeschwindigkeit U_r ausreichend schnell erhöht, überschreitet der Anstellwinkel den statischen Stall-Winkel und es resultiert eine

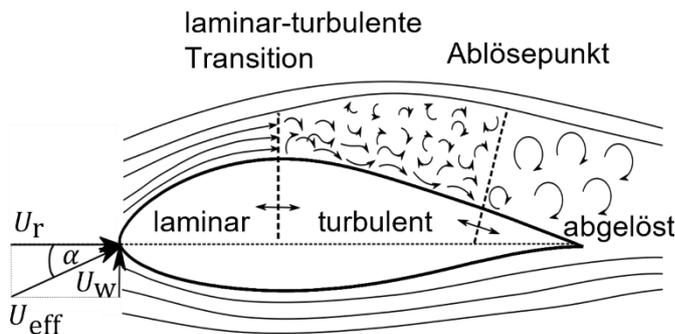


Abb. 1: Schematische Darstellung der verschiedenen Strömungsbereiche auf der Saugseite eines Rotorblattes. In Abhängigkeit der Wind- und Rotorgeschwindigkeit ändert sich der Anstellwinkel α und die effektive Anströmgeschwindigkeit U_{eff} . Abbildung basiert auf Oehme et al. 2022.

beginnende Strömungsablösung an der Hinterkante des Rotorblatts. Darüber hinaus verschiebt sich die Position der laminar-turbulenten Transition in Richtung der Vorderkante. Die räumliche Verschiebung der Grenzen der verschiedenen Strömungsbereiche und die nicht konstanten Strömungsgeschwindigkeiten führen zu einem transienten Verhalten der adiabaten Wandtemperatur T_{ad} und des instationären Teils \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten, so dass eine zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur T_s auftritt. Im Ergebnis induzieren Böen strömungsabhängige und

interpretierbare zeitliche Veränderungen der Oberflächentemperatur T_s , anhand dessen thermografisch eine eindeutige Identifikation von Strömungsregimen erreicht werden kann. Die Auswertung von Bilddifferenzen (DIT-Ansatz) im ersten Signalverarbeitungsschritt zielt darauf ab, instationäre Strömungsablösung mit der höchstmöglichen zeitlichen Auflösung anhand interpretierbarer thermischer Merkmale zu erkennen. Im Detail stehen die folgenden thermischen Merkmale bei der Auswertung der zeitlichen Temperaturdifferenz dT_s zur Verfügung, um Regionen des laminar-turbulenten Übergangs und Strömungsablösung zu identifizieren:

- (i) Bereich des laminar-turbulenten Übergangs: Minimum der zeitlichen Temperaturdifferenz dT_s , verursacht durch eine zunehmende konvektive Abkühlung.
- (ii) Abgelöstes Strömungsgebiet: Minimum der zeitlichen Temperaturdifferenz dT_s für einen dominanten Einfluss der adiabaten Erwärmung. Ansonsten: Maximum des zeitlichen Temperaturgradienten dT_s aufgrund abnehmender konvektiver Kühlung.

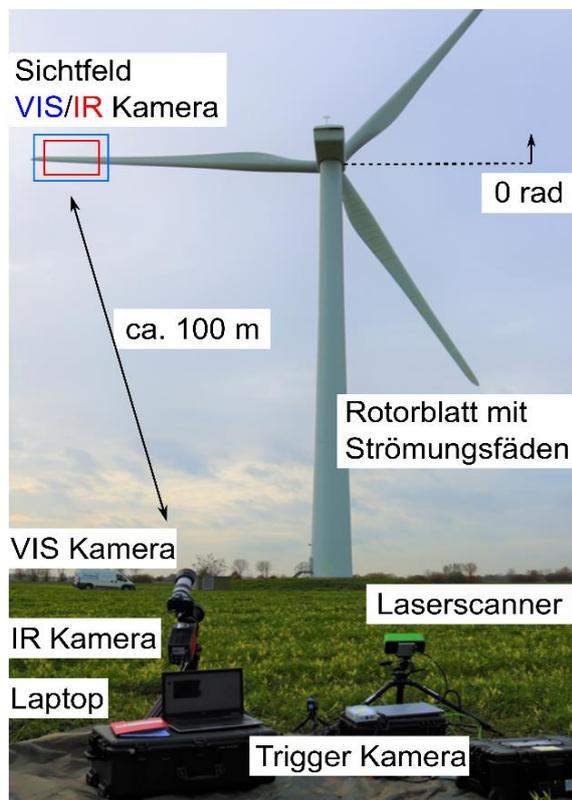
Während der DIT-Ansatz eine geringe Empfindlichkeit gegenüber strömungsunabhängigen Einflüssen aufweist, führt der geringe Temperaturunterschied zwischen zwei Bildern zu einem geringen Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Um dem geringen SNR gerecht zu werden, ist eine

räumliche Mittelung über mehrere Pixel erforderlich, wodurch die räumliche Auflösung reduziert wird. Infolgedessen ermöglicht die Auswertung von Differenzbildern eine merkmalsbasierte Detektion der instationären Strömungsablösung mit der höchstmöglichen zeitlichen Auflösung, während die räumliche Auflösung durch das geringe SNR begrenzt ist.

Schließlich erfolgt eine PCA für eine Serie von Thermogrammen während des Auftretens einer Böe. Wie bereits von Gleichauf et al. 2021 im Kontext der thermographischen Strömungsvisualisierung an Windkraftanlagen gezeigt, ermöglicht die Anwendung einer PCA die Extraktion von zeitlich veränderlichen Bildinformationen, wie z.B. die Position des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung, in Form von unkorrelierten Hauptkomponenten (PC). Im Ergebnis wird durch die Auswertung der räumlichen Intensitätsverteilung $I(\vec{x})$ eine Kontraststeigerung zwischen verschiedenen Strömungsbereichen erreicht. Im Vergleich zum DIT-Ansatz führt die Anwendung einer PCA zu einer erhöhten räumlichen Auflösung bei der Lokalisierung der instationären Strömungsablösung, aufgrund des verbesserten Kontrasts zwischen verschiedenen Strömungsregionen. Die zeitliche Auflösung ist dagegen limitiert, da die PCA auf der Auswertung einer Bildserie basiert. Daher ist die Kombination des DIT-Ansatzes mit einer PCA-basierten Auswertung vielversprechend, um eine IRT-basierte Detektion instationärer Strömungsablösungen an Rotorblättern von Windkraftanlagen mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung zu realisieren.

Versuchsaufbau

Zur IRT-basierten Detektion instationärer Strömungsablösungen werden Messungen an einer



in Betrieb befindlichen WEA vom Typ GE1.5sl durchgeführt. Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau der Feldmessung. Die WEA hat eine Nennleistung von 1,5 mW, eine Nabhöhe von 62 m und Rotorblätter mit einer Länge von 37,3 m. Als Referenzmethode werden Klebestreifen mit Strömungsfäden auf der Saugseite eines Rotorblatts angebracht. Die Strömungsvisualisierung mit Strömungsfäden ermöglicht die Detektion von Strömungsablösungen auf der Grundlage der räumlichen Orientierung und Dynamik der einzelnen Fäden. In der vorliegenden Studie wird die Ablöseposition durch eine verschwindende Ausrichtungskomponente in Richtung der Rotorblattsehne identifiziert. Da die Strömungsfäden die Strömung beeinflussen, wird nur eines der Rotorblätter mit Strömungsfäden instrumentiert. Die übrigen beiden Rotorblätter werden zur Messung mit IRT verwendet.

Die optische Messausrüstung besteht aus einer Infrarot-Kamera (IR), für die thermografische Bildaufnahme, zwei Kameras im sichtbaren Lichtbereich (VIS), die zur Aufnahme der Strömungsfäden bzw. als Triggerquelle verwendet werden, sowie einem Laserscanner

Abb. 2: Übersicht des Messsystems für die Messung an der Saugseite einer im Betrieb befindlichen Windenergieanlage. Die Messung fand am 14. November 2021 in Thedinghausen, Deutschland statt.

zur Messung der Gierbewegungen des Rotors. Für die thermografische Bildaufnahme wird eine IR-Kamera vom Typ IR8800 des Herstellers InfraTec mit einem aktiv gekühlten Detektor verwendet. Der Detektor ist für Wellenlängen zwischen $(7,7-10,2) \mu\text{m}$ empfindlich und weist eine rauschäquivalente Temperaturdifferenz von weniger als 25 mK bei 30 °C auf. Für die Messung wird ein 200 mm Objektiv verwendet. Für einen Messabstand von 100 m zwischen der Windradnabe und der IR-Kamera hat das Sichtfeld eine Größe von 5,28 m x 4,28 m und wird durch 640 x 512 Pixel² abgebildet.

Um instationäre Strömungsablösung an einer für den Wirkungsgrad der WEA relevanten Rotorblattposition zu detektieren wird der spitzennahe Bereich um den Rotorradius von 28,7 m an der Rotorposition π rad als Sichtfeld gewählt. Die für die Anwendung des Signalverarbeitungsansatzes benötigten Bildserien werden durch das gleichzeitige Auslösen der Kameras bei jeder Rotorblattumdrehung aufgenommen. Während der Messdauer von 10 min betrug die gemessene mittlerer Drehzahl der WEA etwa $16,5 \text{ min}^{-1}$. Die resultierende Bildserie besteht somit aus 165 Bildern für jedes Rotorblatt mit einer akzeptablen Bewegungsunschärfe von 2,5 Pixel. Die Bild- und Signalverarbeitung wird mit der Software Python durchgeführt. Zunächst werden die Bilder mit Hilfe eines Kreuzkorrelationsalgorithmus (ECC-Algorithmus aus OpenCV) ausgerichtet, um Unsicherheiten bezüglich der Triggerposition zu korrigieren und eine pixelweise Signalverarbeitung zu ermöglichen (Evangelidis und Psarakis 2008). Die Implementierung der PCA basiert auf dem Algorithmus des Python-Pakets scikit-learn.

Messergebnisse der Referenzmessung - Verifizierung des Auftretens von Strömungsablösung

Zunächst soll das Auftreten sowie die Position der Strömungsablösung während der Messdauer verifiziert werden. Abb. 3 zeigt die Drehzahl der WEA über die Messdauer. Da die WEA bei den gegebenen Messbedingungen im Teillastbetrieb betrieben wird, kann ein direkter Zusammenhang zwischen der Drehzahl der Anlage und der Windgeschwindigkeit angenommen werden. Demnach ist der steile Anstieg der Drehzahl bei $t = 300$ s ein Indikator für das Auftreten einer starken Böe bzw. für das Auftreten von Strömungsablösung.

Tatsächlich bestätigt die Ausrichtung der angebrachten Strömungsfäden in Abb. 4 das

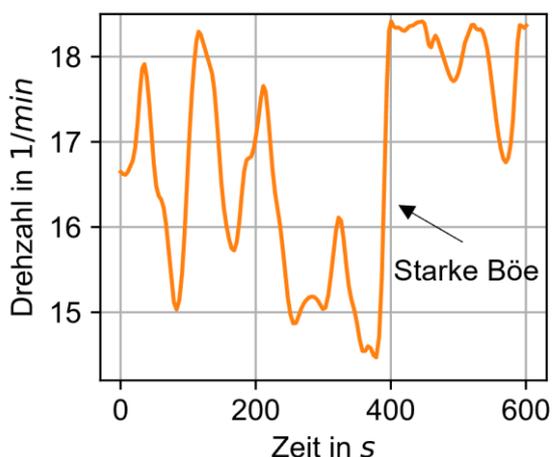


Abb. 3: Drehzahl der WEA über die Messdauer. Der steile Anstieg der Drehzahl bei $t = 390$ s deutet das Auftreten einer starken Böe und damit auf einen potenziellen Zeitpunkt mit instationäres Strömungsablösung hin.

Auftreten einer Strömungsablösung bei $t = 300$ s. Die markierten Ablösepositionen (durchgezogene Linien) sind anhand der fehlenden Ausrichtungskomponente der Strömungsfäden in Richtung der Sehne erkennbar und belegen die Existenz eines breiten abgelösten Strömungsbereichs. Zum Beispiel ist die Ablöseposition zum Zeitpunkt $t = 300$ s bereits bei der normierten Sehnenposition $x/c = 0,66$ erkennbar. Im Ergebnis wird die Hypothese bestätigt, wonach Strömungsablösung während des steilen Anstiegs der Rotordrehzahl bei $t = 300$ s vorliegt. Im Vergleich dazu tritt bei näherungsweise stationären Strömungsbedingungen, wie z.B. bei $t = 500$ s, keine oder keine nennenswerte Ablösung auf,

was dem gewünschten Strömungsverhalten im Bereich der Rotorblattspitze entspricht. Daraus folgt, dass die Strömungsvisualisierung durch Strömungsfäden die Existenz und den Zeitpunkt des Auftretens instationärer Strömungsablösung während des Experiments verifiziert.

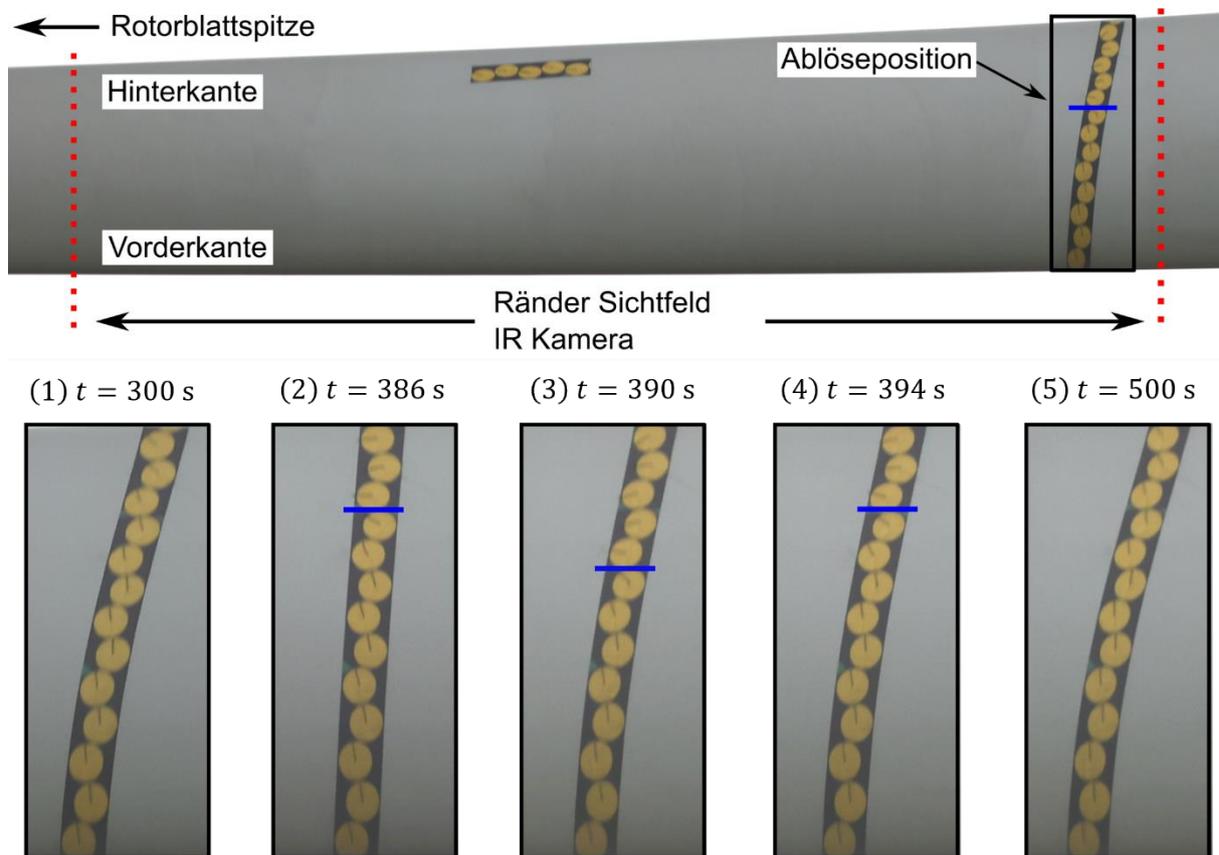


Abb. 4: Verifizierung des Auftretens und der Position instationärer Strömungsablösung für das Sichtfeld der IR-Kamera. Die blauen durchgezogenen Linien über den Klebestreifen mit Strömungsfäden zeigen die Ablöseposition zu verschiedenen Zeitpunkten.

Messergebnisse der IR-Thermografie

DIT-Ansatz

Im ersten Schritt der IRT-Auswertung wird der DIT-Ansatz angewendet, um eine zeitaufgelöste Detektion der instationären Strömungsablösung zu realisieren. Das Kriterium der nachfolgenden Auswertung ist die merkmalsbasierte Identifizierbarkeit von Strömungsablösung auf Grundlage der im Abschnitt „Lösungsansatz“ benannten, thermischen Antwortmerkmale. Die Ergebnisse des DIT-Ansatzes für die verifizierte Dauer des Auftretens instationärer Strömungsablösung sind in Abb. 5 dargestellt. Abb. 5a.1 - Abb. 5c.1 (links) zeigen die jeweilig resultierenden Differenzbilder für die Zeitpunkte $t = [386, 390, 394]$ s. Darüber hinaus sind in Abb. 5a.2 - Abb. 5c.2 (rechts) die gemittelten Verläufe der Auswertegröße dT_s über die normierte Sehnenposition dargestellt. Hierbei wird jede Bildspalte normiert und die Berechnung des Mittelwerts in radialer Richtung durchgeführt.

In Abb. 5a.1 und Abb. 5a.2 wird zunächst die zeitaufgelöste Detektierbarkeit von verschiedenen Strömungsbereichen während des Einsetzens einer Böe, und somit einem vernachlässigbaren Einfluss adiabater Erwärmung, untersucht. In Abb. 5a.1 ist die räumliche Verschiebung der laminar-turbulenten Transition im Bereich der Vorderkante durch negative

zeitliche Temperaturdifferenzen erkennbar. Infolge der erhöhten Turbulenzintensität sowie des erhöhten Anstellwinkels während der Böe, verschiebt sich die Transitionsposition von der initialen Position (gestrichelte Linie) in Richtung der Vorderkante. Die daraus resultierende erhöhte konvektive Abkühlung im Transitionsbereich erklärt die negativen zeitlichen Temperaturdifferenzen. Für Rotorradien kleiner 30 m ist dieser Effekt nicht sichtbar, da

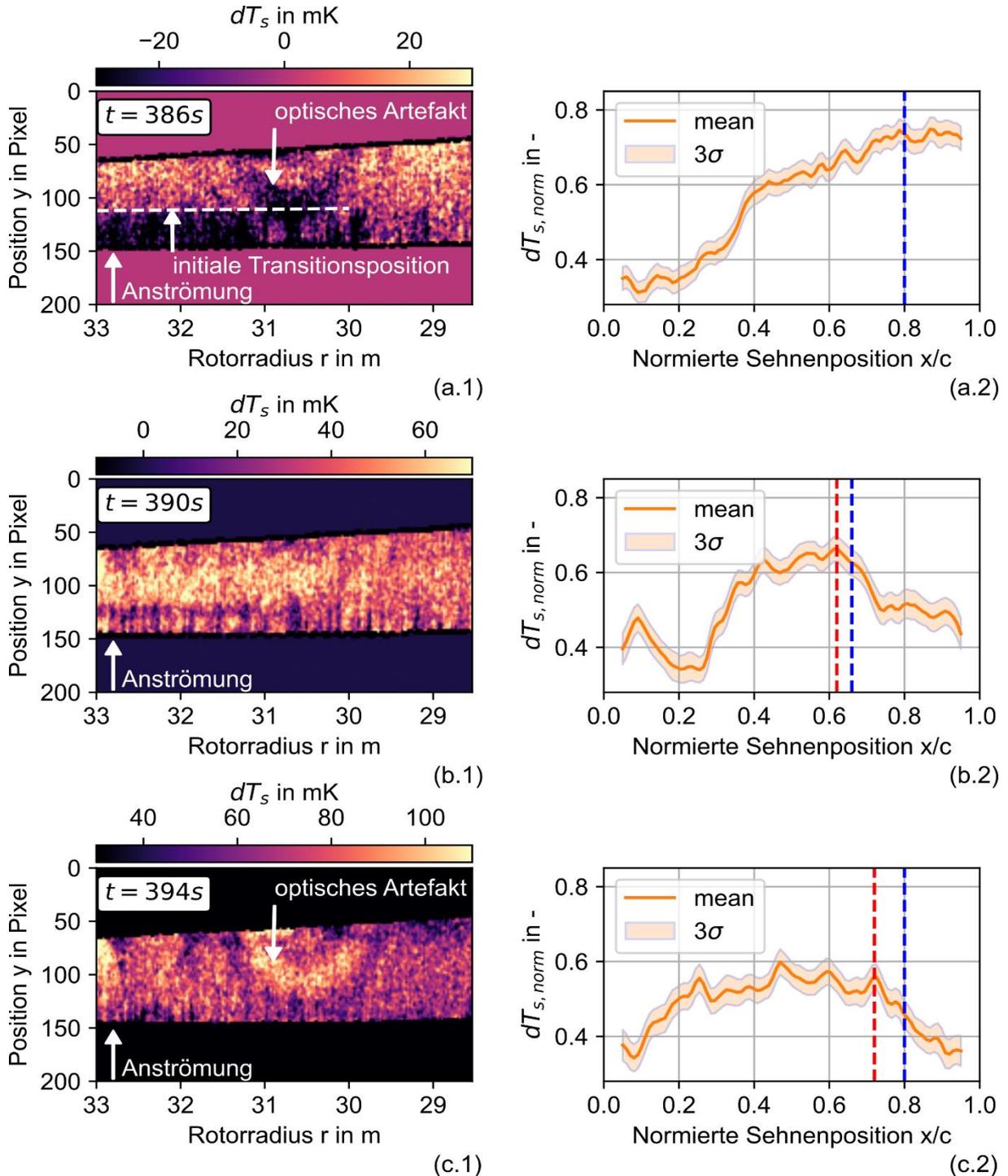


Abb. 5: Auswertung der IRT-Aufnahmen mit dem DIT-Ansatz für einen Zeitbereich mit instationärer Strömungsablösung. Links: verarbeitete Differenzbilder für verschiedene Zeitpunkte, rechts: über den Rotorradius, ohne den Bereich mit dem optischen Artefakt, gemittelte Signalverläufe über die normierte Sehnenposition. Die mit IRT anhand von Merkmalen in den Signalkurven von b.2 und c.2 bei $x/c = 0,62$ bzw. $x/c = 0,72$ detektierte Ablöseposition (rote Linien) ist in guter Übereinstimmung mit der durch die Strömungsfäden angezeigten Ablöseposition.

Oberflächenstörungen im Bereich der Vorderkante die laminar-turbulente Transition unabhängig der Anströmbedingungen induzieren. Im Vergleich dazu wird im abgelösten Strömungsbereich aufgrund einer abnehmenden konvektiven Abkühlung ein Maximum der zeitlichen Temperaturdifferenzen erwartet. In der Tat ist die Auswertegröße dT_s im Bereich der Hinterkante maximal. Allerdings erlaubt weder der Bildkontrast in Abb. 5a.1, noch der Signalverlauf in Abb. 5a.2 eine klare Unterscheidung zwischen dem angelegten und dem abgelösten Strömungsbereich.

In den nachfolgenden Differenzbildern Abb. 5b.1 und Abb. 5b.2, ist der Wertebereich deutlich positiv, demnach steigt die Oberflächentemperatur des Rotorblatts bei zunehmender effektiver Anströmgeschwindigkeit. Weiterhin steigt die zeitliche Erwärmung der Oberfläche mit zunehmendem Rotorradius und damit mit zunehmender effektiver Anströmgeschwindigkeit an. Beide Effekte deuten auf einen starken Einfluss adiabater Erwärmung hin. Folglich wird eine Abnahme der zeitlichen Temperaturdifferenzen im Bereich mit abgelöster Strömung erwartet. Tatsächlich sind in den Differenzbildern Abb. 5b.1 und Abb. 5c.1 in der Nähe der Hinterkante minimale Werte von dT_s erkennbar. Allerdings ist aufgrund des geringen SNR kein deutlicher Kontrast zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen sichtbar. Im Gegensatz dazu führt die räumliche Mittelung in Abb. 5b.2 und Abb. 5c.2 zu einem verbesserten SNR. Im Ergebnis wird auf Grundlage der deutlichen Abnahme von dT_s in Abb. 5b.2 ab $x/c = 0,62$ und in Abb. 5c.2 ab $x/c = 0,72$, eine merkmalsbasierte Detektion der räumlich gemittelten Ablöseposition mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen Auflösung erreicht.

PCA

Die PCA-basierte Auswertung umfasst 20 aufeinanderfolgende Bilder im Zeitbereich des Auftretens und Abklingens instationärer Strömungsablösung (von $t = 387$ s bis $t = 454$ s). Die Hypothese ist, dass die PCA die mit dem DIT-Ansatz identifizierten zeitlich variierenden Informationen in Form von unkorrelierten Hauptkomponenten extrahiert und damit eine Lokalisierung der Ablöseposition mit maximaler Bildauflösung ermöglicht.

Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der PCA-basierten Strömungsvisualisierung unter Verwendung der beiden ersten Hauptkomponenten. Signifikante Merkmale der Intensitätsverteilung in der ersten Hauptkomponente sind Keile im Bereich der Vorderkante und ein starker systematischer räumlicher Gradient in radialer Richtung. Die Keile sind ein typisches Merkmal für die Ausbildung turbulenter Strukturen an der Rotorblattvorderkante, während der systematische Gradient wahrscheinlich durch die unterschiedliche konvektive Kühlung des Rotorblattes in Abhängigkeit von der radialen Position erklärt werden kann. Im Gegensatz dazu ist in der zweiten Hauptkomponente ein steiler Anstieg der Intensität über den gesamten Rotorradius in der Nähe der Hinterkante sichtbar (gestrichelte Linie). In Übereinstimmung mit der merkmalsbasierten Detektion der Ablöseposition mit dem DIT-Ansatz und dem Ergebnis der Referenzmessung wird der resultierende Bereich mit erhöhter Intensität als abgelöst identifiziert. Dies bedeutet, dass durch die PCA eine Kontraststeigerung zwischen angelegten und abgelösten Strömungsbereichen erreicht wird. Weiterhin ermöglicht die Kontraststeigerung eine Lokalisierung der Ablöseposition über das gesamte Sichtfeld mit einer maximalen Bildauflösung von 8 mm.

Fazit und Ausblick

Mit dem Ziel ein IRT-basierten Messansatz zur Detektion von instationären Strömungsablösungen an Windenergieanlagen zu etablieren, wurde ein zweistufiger Signalverarbeitungsansatz konzipiert und angewendet. Der vorgestellte Signalverarbeitungsansatz basiert zum einen auf einer transienten Auswertung von

Differenzbildern, um eine maximale zeitliche Auflösung zu erreichen, sowie der Hauptkomponentenanalyse (PCA) einer Bildserie, um eine maximale räumliche Auflösung zu realisieren.

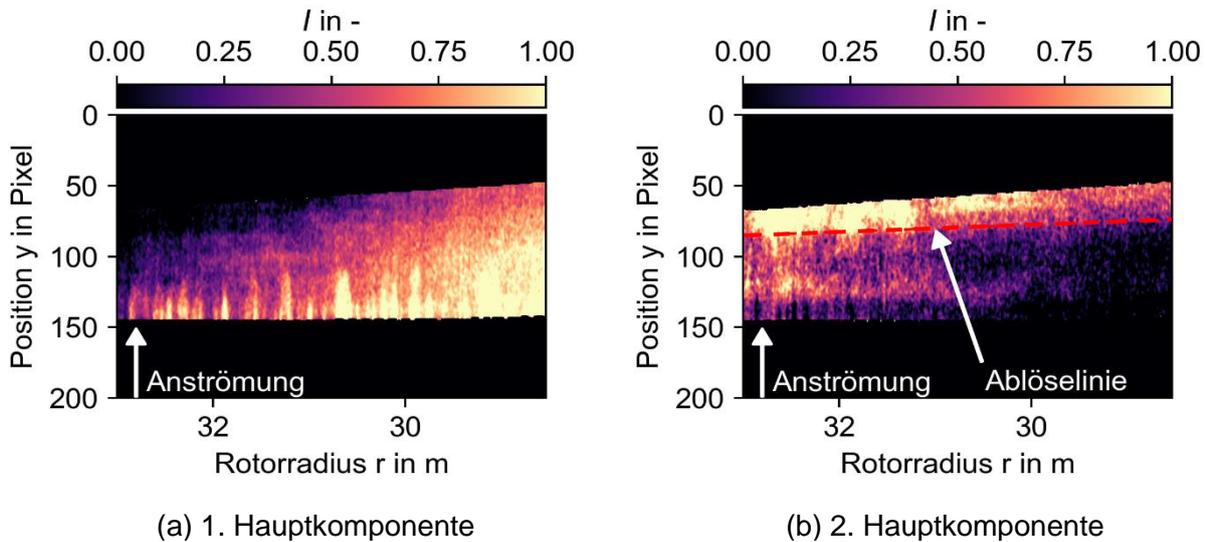


Abb. 6: PCA-basierte Auswertung von 20 zeitlich aufeinanderfolgenden Thermogrammen, welche während des Auftretens von instationärer Strömungsablösung über einen Zeitraum von 67 s aufgenommen wurden. Die PCA ermöglicht die Extraktion zeitlich variabler Strömungsinformationen. Die in der 2. Hauptkomponente eingezeichnete Ablöselinie ist anhand des Kontrasts zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen erkennbar.

Bei Messungen an einer in Betrieb befindlichen WEA wurde die thermografische Detektion einer instationären Strömungsablösung exemplarisch während des Auftretens einer Böe im Bereich der Rotorblattspitze demonstriert und mit Strömungsfäden erfolgreich validiert. Unter Anwendung der transienten Auswertung konnte die Ablöseposition mit der messsystemseitig derzeit maximalen zeitlichen Auflösung von 4 s lokalisiert werden. Bei der transienten Auswertung wird aufgrund des geringen Signal-Rausch-Verhältnisses eine räumliche Mittelung benötigt, so dass die räumliche Auflösung reduziert ist. Jedoch ist es gelungen, durch die Anwendung einer PCA den Kontrast zwischen dem angelegten und dem abgelösten Strömungsbereich zu erhöhen, und so eine Lokalisierung der zeitlich gemittelten Ablöselinie mit der maximalen Bildauflösung von 8 mm zu erreichen.

Um einen tiefergehenden Einblick in das Strömungsfeld zu erhalten und das Verständnis bezüglich der Messkette zu verbessern, zielen zukünftige Untersuchungen auf einen Vergleich der thermografischen Experimente mit CFD-Simulationen ab.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG-Projektnummer 420278089) 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.: "Experimental Analysis of a Wind-Turbine Rotor Blade Airfoil by means of Temperature-Sensitive Paint", In: AIAA Scitech 2019 Forum 2019.

- Dollinger, C., Balaesque, N., Sorg, M., Fischer, A. 2018a:** "IR thermographic visualization of flow separation in applications with low thermal contrast", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 88, pp. 254–264.
- Dollinger, C., Sorg, M., Balaesque, 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*, Vol. 97 pp. 279–289.
- Evangelidis, G.D., Psarakis, E.Z. 2008:** "Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, pp. 1858–1865.
- Gardner, A.D., Wolf, C.C., Raffel, M. 2016:** "A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography", *Experiments in Fluids* 57, 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.
- Gleichauf, D., Oehme, F., Sorg, M., Fischer, A. 2021:** "Laminar-Turbulent Transition Localization in Thermographic Flow Visualization by Means of Principal Component Analysis", *Applied Sciences*, Vol. 12, pp. 5471.
- Melius, M., Cal, R.B., Mulleners, K. 2016:** "Dynamic stall of an experimental wind turbine blade", *Physics of Fluids*, Vol. 3, pp. 34103.
- Oehme, F., Gleichauf, D., Suhr, J., Balaesque, N., Sorg, M., Fischer, A. 2022:** "Thermographic detection of turbulent flow separation on rotor blades of wind turbines in operation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 226, pp. 105025.
- Oehme, F., Suhr, J., Balaesque, N., Gleichauf, D., Sorg, M., Fischer, A. 2021:** "Thermographic Stall Detection by Model-Inspired Evaluation of the Dynamic Temperature Behaviour", *Applied Sciences*, Vol. 18, no. 18:8442.
- Reichstein, T., Schaffarczyk, A.P., Dollinger, C., Balaesque, N., Schüle, E., Jauch, C., Fischer, A. 2019:** "Investigation of Laminar–Turbulent Transition on a Rotating Wind-Turbine Blade of Megawatt Class with Thermography and Microphone Array", *Energies*, Vol. 11, pp. 2102.
- 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* 57, Vol. 5.
- 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* 524, pp. 012011.