

Strömungsvisualisierung mittels Thermografie-Zeitreihenanalysen zur Identifikation von Strömungsablösungen an Windenergieanlagen

Flow visualization by means of thermographic time series analysis for the identification of flow separations on wind turbine rotor blades

Christoph Dollinger¹, Nicholas Balaesque², Michael Sorg¹, Andreas Fischer¹

¹ Universität Bremen, BIMAQ, Linzer Str. 13, 28359 Bremen

² Deutsche WindGuard Engineering GmbH, Überseering 7, 27580 Bremerhaven

Thermografie, Thermografische Strömungsvisualisierung, Strömungsablösung
IR thermography, Thermographic flow visualization, Separated flow

Zusammenfassung

Thermografische Messungen zur Strömungsvisualisierung bieten die Möglichkeit zur nicht-invasiven Identifikation unterschiedlicher Strömungszustände einer Grenzschichtströmung. Jedoch liegt ohne eine zusätzliche Heizung oder Kühlung des Messobjektes oft ein geringes Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis vor, weshalb Bereiche mit einer abgelösten Strömung nicht identifiziert werden können. Aus diesem Grund wird ein Ansatz zur Auswertung von zeitlichen Temperaturfluktuationen vorgestellt, wodurch eine signifikante Steigerung des Kontrastes zwischen den Bereichen mit unterschiedlichen Strömungszuständen erreicht wird. Hierfür werden zwei alternative Auswertemethoden im Zeit- und Frequenzbereich vorgeschlagen und durch Windkanalmessungen validiert. Die Validierung erfolgt unter Randbedingungen wie sie an einer Windenergieanlage vorherrschen, d.h. ohne aktive Heizung und bei vergleichbarer Reynoldszahl. Als Messobjekt dienen ein kreisrunder Zylinder und ein sechsstelliges NACA-Tragflächenprofil. Im Ergebnis lassen sich die Bereiche unterschiedlicher Strömungszustände inklusive der Strömungsablösung trotz des geringen thermischen Kontrastes identifizieren. Darüber hinaus zeigt die Auswertung der zeitlichen Temperaturfluktuationen anhand einer Fourieranalyse eine zusätzliche Steigerung des Kontrastes zwischen turbulenter Grenzschicht und Grenzschichtablösung von mehr als 10 % im Vergleich zur Auswertung der Standardabweichung der Zeitreihe.

Einleitung

Für die Entwicklung und Optimierung von Rotorblättern für Windenergieanlagen (WEA) sind, neben Simulationen und Messungen an Modellen im Windkanal, Strömungsmessungen an der realen Anlage unverzichtbar. Von besonderem Interesse ist die Identifikation möglicher Strömungsablösungen an den Rotorblättern, da diese zu einem plötzlichen Anstieg des Widerstands bei gleichzeitigem Abfall des Auftriebs führen (Pellegrino and Meskell 2013). Die Folge sind Leistungs- und Ertragsminderungen. Darüber hinaus resultiert aus Strömungsablösungen eine Erhöhung unstetiger Lasten und Vibrationen und Schallemissionen. Aktuell zur Identifikation von Ablösungen eingesetzte visualisierende Verfahren mit Wollfäden (Vey et al. 2014), Ölfilm-Visualisierung (Medina et al. 2011) oder Stall-Flags (Corten 2001) sind

invasiv und beeinflussen die zu messende Strömung. Neuere Entwicklungen zeigen das Potential einer rückwirkungsfreien thermografischen Strömungsvisualisierung. Basierend auf einer Temperaturdifferenz zwischen dem Messobjekt und der Strömung, lassen sich Strömungszustände anhand ihrer unterschiedlichen Oberflächenreibungen und damit einhergehenden Wärmeübergängen thermografisch voneinander unterscheiden (Quast 1987; Luca et al. 1990; Gartenberg and Roberts 1991). Dieses Verfahren wird bereits erfolgreich zur Lokalisierung des laminar-turbulenten Strömungsübergangs an WEA eingesetzt (Dollinger et al. 2014). Jedoch sind, aufgrund fehlender Möglichkeiten zur aktiven Beheizung der Rotorblätter von WEA die messbaren Temperaturdifferenzen zu gering und Strömungsablösungen somit bis dato nicht messbar. Für die thermografische Visualisierung von Strömungsablösungen sind Heizleistungen zwischen mehreren hundert (Joseph et al. 2016) und einigen kilo Watt (Lang et al. 2015; Simon et al. 2016) dokumentiert. Folglich besteht die Herausforderung für Messungen an laufenden WEA darin, neue Mess- und Auswertemethoden zu erarbeiten, die den Kontrast der thermografischen Strömungsvisualisierung signifikant erhöhen und somit eine Visualisierung von Strömungsablösungen auch bei geringer Temperaturdifferenz zwischen Messobjekt und Strömung ermöglichen.

Lösungsansatz

Auf die Messung an laufenden WEA zielend, beruht der Lösungsansatz auf einer Steigerung des Kontrastes, um unterschiedliche Strömungszustände voneinander unterscheiden zu können. Dies sollte auch ohne eine Heizung der Rotorblattoberfläche oder eine thermische Isolierung dieser möglich sein. Durch die Aufnahme einer Bilderreihe anstatt eines Einzelbildes sollen kleine zeitliche Temperaturänderungen erfasst und über Bildverarbeitung hervorgehoben werden. Die zu Grunde liegende Hypothese ist dabei, dass sich die gemessenen Temperaturfluktuationen aufgrund des unterschiedlichen Strömungsverhaltens in den verschiedenen Bereichen voneinander unterscheiden.

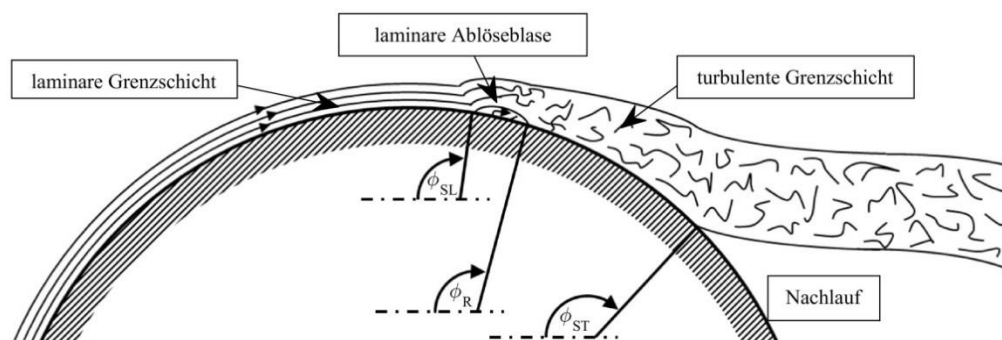


Abb. 1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strömungszustände in der Grenzschicht eines kreisrunden Zylinders in überkritischen Bereich oberhalb der kritischen Reynoldszahl $Re_{krit} = 4 \cdot 10^5$, mit den Winkelpositionen für eine laminare Ablösung ϕ_{SL} , eine Wiederanlegung der Strömung ϕ_R und eine turbulente Ablösung ϕ_{ST} .

In Abb. 1 sind die unterschiedlichen Strömungszustände in der Grenzschicht eines kreisrunden Zylinders in überkritischen Bereich oberhalb der kritischen Reynoldszahl $Re_{krit} = 4 \cdot 10^5$ skizziert. Die Winkelpositionen sind über den Winkel ϕ um den Zylinder startend am Stau- punkt bei $\phi = 0^\circ$ angegeben. Im Bereich von laminarer Strömung sind die Bedingungen in der Grenzschicht relativ stabil und die Strömungslinien verlaufen geordnet. Innerhalb des überkritischen Reynoldszahlenbereichs erfolgt die laminar-turbulente Transition über eine laminare Ablöseblase. Laut (Ricci and Montelpare 2005) ist für diesen Bereich ein niedrigerer Wärmeübergang aufgrund der in sich abgeschlossenen Blase charakteristisch. Im Gegen-

satz zum Bereich mit laminarer Strömung ist die Strömung in der turbulenten Grenzschicht ungeordnet und die Strömungsrichtung variiert mit einer zeitlich abhängigen Komponente, die quer zur Strömungsrichtung verläuft (Hucho 2013). In Oberflächennähe nimmt die Geschwindigkeit zu. Damit einher geht ein signifikanter Anstieg der Oberflächenreibung und damit des Wärmeübergangs zwischen der Strömung und der Oberfläche. Bei ausreichend hohem Druckgradienten löst sich die Strömung schlussendlich von der Oberfläche des Zylinders im Punkt der turbulenten Ablösung (Schlichting 1979). Hinter der turbulenten Ablösung verhalten sich die Oberflächenreibung und der damit einhergehende Wärmeübergang nahezu konstant (Luca et al. 1990). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen sowohl in der Ausprägung des Wärmeübergangs, als auch in der Art der vorherrschenden geordneten oder ungeordneten Strömungen unterscheiden lassen. Die Kombination beider Strömungs-Charakteristika resultiert in zeitlich verschiedenen variierenden Wärmeübergängen und somit in Temperaturfluktuationen.

In Bezug auf die zukünftige Messung an laufenden WEA werden im Freifeld auftretende Limitierungen bereits in die Windkanaluntersuchungen einbezogen. Zum Beispiel ist es im Freifeld nicht möglich, eine geometrisch gleichmäßige Beheizung der Rotorblattoberfläche zu realisieren. Der verfügbare thermische Kontrast zwischen Rotorblatt und der anströmenden Luft resultiert nur aus der Sonneneinstrahlung auf das Rotorblatt. Eine vereinfachte Abschätzung liefert unter optimalen klaren Bedingungen eine solare absorbierte Heizleistung von 175 W m^{-2} . Somit liegt die verfügbare Heizleistung im Freifeld mindestens eine Größenordnung unter den dokumentierten Heizleistungen zur thermografischen Strömungsvisualisierung (Lang et al. 2015; Joseph et al. 2016; Simon et al. 2016). Um dieser Schwierigkeit bereits in den Windkanaluntersuchungen gerecht zu werden, wird auf eine Beheizung des Messobjektes verzichtet und nur mit der vergleichsweise geringen Lufttemperaturerhöhung gearbeitet, die aus der Reibung im Windkanalsystem resultiert.

Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Rotationsbewegung des WEA-Rotors. Für eine zeitliche Auswertung einer Bilderreihe muss das thermografische Bild des Rotorblattes immer an der gleichen Drehposition des Rotors aufgenommen werden. Dies führt bei einer Drehzahl des Rotors von 10 1/min zu einer Aufnahmefrequenz von $1/6 \text{ Hz}$. Unter der Annahme alle drei Blätter seien gleich, lässt sich bei einer WEA mit drei Rotorblättern die Aufnahmefrequenz durch Triggerung bei jedem aufeinanderfolgenden Blattdurchgang und gemeinsamer Auswertung auf $1/2 \text{ Hz}$ erhöhen. In Anlehnung an diese Limitierung werden die Bilder in den Windkanalmessungen ebenfalls mit $1/2 \text{ Hz}$ akquiriert.

Versuchsaufbau

Zur Validierung wurden thermografische Messungen im Windkanal sowohl an einem ungeheizten, quer angeströmten Kreiszyylinder, als auch an einem ungeheizten NACA-Rotorblattprofil durchgeführt. Die Messungen wurden im aeroakustischen Windkanal der Deutsche WindGuard Engineering in Bremerhaven durchgeführt.

Für die Referenzmessungen wurde ein kreisförmiger Zylinder aus Polyoxymethylen mit einem Durchmesser von 160 mm eingesetzt. Für einen direkten Vergleich mit den thermografischen Messergebnissen dient eine Ölfilm-Strömungsvisualisierung. Der Zylinder wurde zusätzlich mit Referenzmesstechnik für statische und dynamische Oberflächendruckmessungen ausgestattet, um die thermografischen Messergebnisse zu validieren. Über die Zylindermessungen hinaus wurden Messungen an einem sechsstelligen NACA-Tragflächenprofil durchgeführt, welches eine Sehnenlänge von 600 mm und eine relative Profildicke von 18% besitzt. Dieses Tragflächenprofil ist typisch für WEA-Rotorblätter aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit einer Oberflächenbeschichtung aus Polyurethan gefertigt.

Die Aufnahme der zeitlichen Temperaturfluktuationen erfolgte durch eine gekühlte Thermografiekamera mit einem Indiumantimonid-Detektor-Array. Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera liegt zwischen 2 und 5 μm und der Hersteller weist eine minimale rauschäquivalente Temperaturdifferenz NETD von $< 25 \text{ mK}$ aus (bei $30 \text{ }^\circ\text{C}$). Die Kamera hat eine geometrische Auflösung von 640×512 Pixel, wobei die Größe der auf 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. Eine Calciumfluorid-Scheibe mit einer Transmission von $> 90 \%$ im Wellenlängenbereichen zwischen 2 und $5 \mu\text{m}$ ermöglicht die Aufnahme von Bildern von außerhalb der Messstrecke Windkanals. Mit Hilfe einer Spiegelreflexkamera werden die Fotos zur Ölfilm-Visualisierung mit einem Öl-Pigment-Gemisch aufgenommen. Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau für die Messungen am Zylinder.

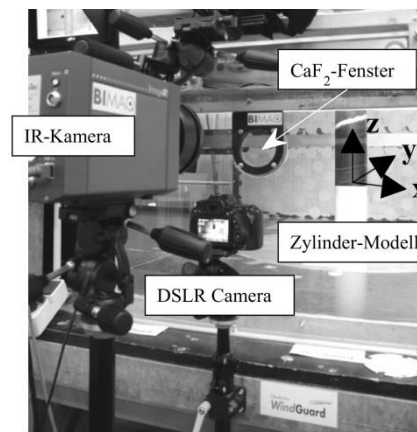


Abb. 2: Versuchsaufbau mit montiertem Zylinder in der Teststrecke des Windkanals mit Wind in x-Richtung sowie der darauf gerichteten Thermografiekamera und einer Spiegelreflexkamera (DSLR).

Eine Temperaturdifferenz ist dementsprechend nach wie vor erforderlich, jedoch kann diese mit der Auswertung über zeitliche Fluktuationen kleiner ausfallen als bei der herkömmlichen thermografischen Strömungsvisualisierung. Für beide Messreihen wurden die Untersuchungen bei einer Windgeschwindigkeit von 50 m s^{-1} durchgeführt, was am Zylinder einer Reynoldszahl von $\text{Re} = 5,2 \cdot 10^5$ und am NACA-Profil von $\text{Re} = 2 \cdot 10^6$ entspricht.

Datenauswertung

Die Thermografiebilder werden über ein vom Kamerahersteller zur Verfügung gestelltes Software-Entwicklungs-Paket SDK direkt in MATLAB aufgenommen und mit Hilfe von MATLAB ausgewertet. Für eine genaue Zuordnung der Pixel zu der entsprechenden Position auf der Messobjektoberfläche werden die Bilder mit den Informationen aus Blickrichtung und Objektivöffnungswinkel auf die Geometrie des Messobjektes transformiert.

Jede thermografische Bilderreihe umfasst $J = 30$ Bilder, wobei jedes Bild aus $M \times N$ Pixeln besteht. Die Auswertung der Temperaturfluktuationen erfolgt über zwei verschiedene Ansätze. Der erste Ansatz beruht auf der Auswertung der zeitlichen Standardabweichung σ_{mn} für jede Temperaturreihe in $T_{mn}[j], j = 1, \dots, J$ innerhalb der Bildreihe $m = 1, \dots, M$ und der Bildzeile $n = 1, \dots, N$:

$$\sigma_{mn} = \sqrt{\frac{1}{J-1} \cdot \sum_{j=1}^J (T_{mn}[j] - \bar{T}_{mn})^2} \quad (1)$$

Das Symbol \bar{T}_{mn} kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert $\bar{T}_{mn} = 1/J \sum_{j=1}^J T_{mn}[j]$.

Der zweite Auswertansatz ist eine Fourieranalyse der Temperaturzeitreihen jedes Pixels in der zeitlichen Dimension. Die Fourierkoeffizienten der diskreten Fouriertransformation (DFT) \hat{T}_{mn} der Temperaturreihen $T_{mn}[j], j = 1, \dots, J$ sind durch folgende Gleichung gegeben:

$$T_{mn}[k] = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} e^{-2\pi i \cdot \frac{jk}{J}} \cdot T_{mn}[j], \quad k = 0, 1, \dots, J - 1. \quad (2)$$

In dem Fall der Fourieranalyse werden die beiden Fourierkoeffizienten $k = 1$ und $k = 2$ aufgrund der größten Dynamik innerhalb aller Koeffizienten und den zu erwartenden niedrigen Frequenzen der Fluktuationen ausgewählt. Die schlussendliche Auswertgröße entspricht dem Mittelwert des zweifachen absoluten Wertes der beiden Fourierkoeffizienten. Dies entspricht der mittleren Amplitude der Temperaturfluktuationen $P_{mn} = 0,5 \cdot (2 \cdot |\hat{T}_{mn}[1]| + 2 \cdot |\hat{T}_{mn}[2]|)$.

Die Ergebnisse der beiden Auswertungen werden im folgenden Kapitel bezogen auf ihre Signifikanz und ihr Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) gegenübergestellt.

Messergebnisse

Die Ölfilm-Visualisierung am Zylinder anhand der Winkelposition ϕ bei einer Reynoldszahl von $Re = 5,2 \cdot 10^5$ sind in Abb. 3 zu sehen. Der Zylinder wird von links angeströmt.

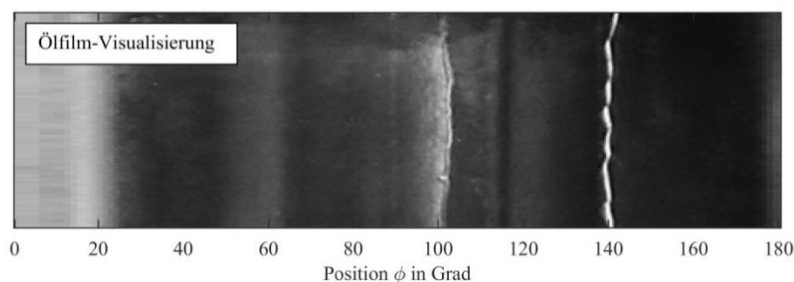


Abb. 3: Ölfilm-Visualisierung am Zylinder mit markanten hellen Linien (Ansammlung von Öl) für die laminare und die turbulente Ablösung und einer dunklen Linie für die Wiederanlegung der Strömung.

Bis zu einer Winkelposition von $\phi \leq 101^\circ$ herrscht eine laminare Strömung, welche über eine laminare Ablöseblase mit der Dimension von $102^\circ \leq \phi \leq 116^\circ$ in eine turbulente Strömung umschlägt. Die turbulente Strömung liegt im Bereich $117^\circ \leq \phi \leq 139^\circ$ vor, bevor sie sich an der Winkelposition $\phi_{SL} \approx 140^\circ$ in einer turbulenten Ablösung von der Zylinderoberfläche löst.

In Kombination mit den gemessenen Druckverläufen lassen sich die in Tab. 1 zusammengefassten Positionen für die Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen festhalten.

Tab. 1: Aus den Referenzmessungen abgeleitete Positionen ϕ für die Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen am Zylinder

laminar	lam. Ablösung	lam. Ablöseblase	Wiederanlegung	turbulent	turb. Ablösung	abgelöst
$\phi \leq 101^\circ$	$\phi_{SL} \approx 102^\circ$	$102^\circ \leq \phi \leq 116^\circ$	$\phi_R \approx 117^\circ$	$117^\circ \leq \phi \leq 139^\circ$	$\phi_{SL} \approx 140^\circ$	$140^\circ \leq \phi^\circ$

Die ermittelten Positionen dienen nachfolgend der Validierung der in Abb. 4 dargestellten Ergebnisse der thermografischen Strömungsvisualisierung. Abb. 4a zeigt das Ergebnis der herkömmlichen Strömungsvisualisierung. Um eine vergleichbare Ausgangssituation zu gewährleisten, wurden die Daten über den Mittelwert aus den 30 Einzelbildern der aufgenommenen Bilderreihe gebildet. Dies führt zu einem reduzierten Rauschen im Vergleich zu den Einzelbildern. Es ist eindeutig ein kälterer Bereich der Oberfläche zu erkennen, der aus dem

geringeren Wärmeübergang der laminaren Ablöseblase resultiert. Außerdem lassen sich die Bereiche vor und nach der Ablöseblase aufgrund ihrer unterschiedlichen Niveaus als laminare und turbulente Strömung differenzieren. Trotz der Mittelung über 30 Bilder lässt sich in dem Bild kein Übergang zwischen turbulenter und abgelöster Strömung identifizieren. Im Gegensatz dazu zeigt sich über die vorgestellten Auswertemethoden ein stärkerer Unterschied zwischen turbulenter und abgelöster Strömung. In Abb. 4b ist das Ergebnis der Standardabweichung im Zeitbereich und in Abb. 4c das Ergebnis der mittleren Amplitude von zwei ausgewählten Fourierkoeffizienten im Frequenzbereich dargestellt.

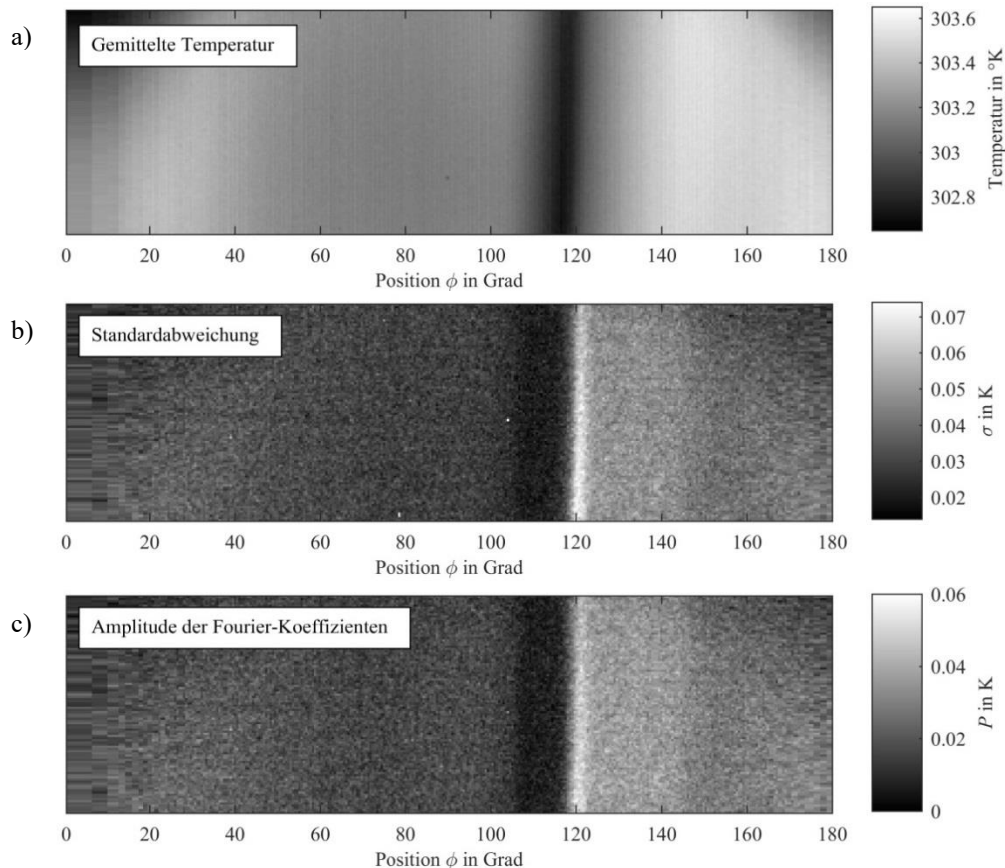


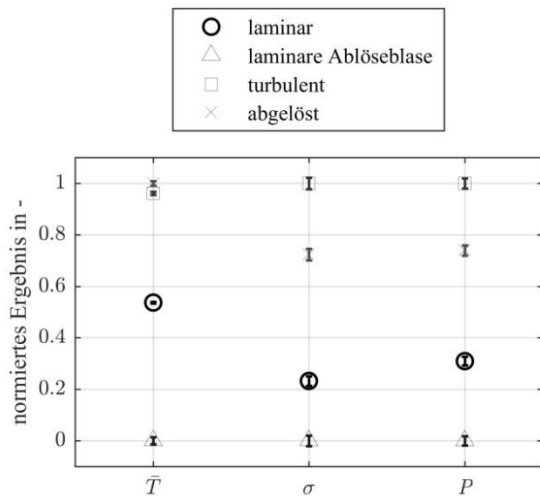
Abb. 4: Thermografische Messergebnisse am Zylinder bei $Re = 5,2 \cdot 10^5$ aus einer Bilderreihe mit 30 Einzelbildern über a) die mittlere Temperatur, b) die Standardabweichung im Zeitbereich und c) die mittlere Amplitude ausgewählter Fourierkoeffizienten im Frequenzbereich.

Zur Quantifizierung dieses visuellen Ergebnisses dient Abb. 5, das die zuvor genannten visuellen Eindrücke bestätigt. Mit einer herkömmlichen thermografischen Strömungsvisualisierung über die Temperatur ließen sich der turbulente und der abgelöste Zustand nicht eindeutig voneinander trennen. Dies wird erst über eine Auswertung von zeitlichen Temperaturschwankungen möglich. Ein Vergleich der vorgeschlagenen alternativen Auswertemethoden erfolgt über das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) zwischen den jeweiligen Paarungen von Bereichen mit unterschiedlichen Strömungszuständen. Für die beispielhafte Paarung zwischen laminar und turbulent wird das CNR in folgender Gleichung ausgedrückt:

$$CNR_{lam.-turb.} = \frac{(\bar{T}_{lam.} - \bar{T}_{turb.})^2}{s_{lam.}^2 + s_{turb.}^2}, \quad (3)$$

mit dem Mittelwert \bar{T} und der Standardabweichung s innerhalb der ausgewerteten Bereiche. Die Ergebnisse für alle Paarungen mit einer Angabe zur Steigerung des CNR durch eine Auswertung im Frequenzbereich zeigt **Tab. 2**. Im Durchschnitt lässt sich das CNR durch

eine Auswertung im Frequenzbereich um zusätzliche 10 % erhöhen, da hochfrequente Rauschanteile oberhalb der ersten beiden Koeffizienten das Ergebnis nicht beeinflussen.



Tab. 2: Vergleich der Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR) für die beiden vorgestellten Auswertemethoden im Zeit- bzw. im Frequenzbereich

Vergleich	CNR_{σ}	CNR_P	Steigerung
lam. – lam. abg.	1,27	2,84	124,4 %
lam. – turb.	12,65	12,98	2,6 %
lam. – abg.	5,25	4,66	-11,2 %
lam. abg. – abg.	11,38	13,72	20,6 %
lam. abg. – tur.	19,77	25,61	29,5 %
tur. – abg.	1,40	1,56	11,4 %

Abb. 5: Vergleich der gemittelten Temperatur \bar{T} der Bilderreihe mit den beiden vorgestellten Auswertemethoden. Dargestellt ist der normierte örtliche Mittelwert innerhalb der Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen mit der dazugehörigen Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor $k=3$).

Abschließend zeigt Abb. 6 die Messergebnisse für das sechsstellige NACA-Rotorblattprofil bei einem Anstellwinkel von 12° . Auch für den Fall des NACA-Profiles lässt sich festhalten, dass sich insbesondere Bereiche mit turbulenter und abgelöster Strömung erheblich besser differenzieren lassen. Darüber hinaus lässt sich der Einfluss von Artefakten (In Abb. 6a eine Reflektion des Detektors am IR-Fenster) reduzieren.

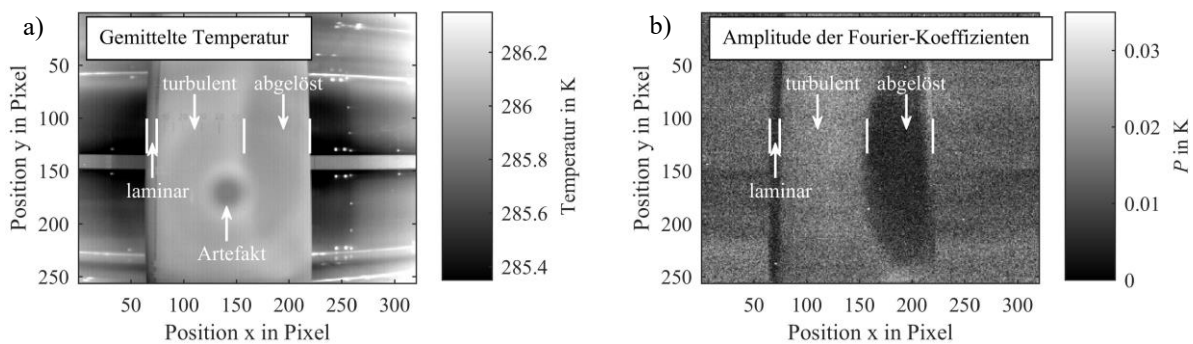


Abb. 6: Thermografische Messergebnisse am NACA-Rotorblattprofil bei $Re = 2 \cdot 10^6$ aus einer Bilderreihe mit 20 Einzelbildern über a) die gemittelte Temperatur und b) die mittlere Amplitude ausgewählter Fourierkoeffizienten im Frequenzbereich.

Fazit und Ausblick

Es wurde eine Methode zur Auswertung von Thermografiebildern zur Strömungsvisualisierung vorgestellt, die über die herkömmliche Visualisierung einer laminar-turbulenten Transition an einem unbeheizten Messobjekt hinausgeht. Strömungszustände, die sich nicht nur durch ihren Wärmeübergang, sondern auch durch strömungsinduzierte Temperaturfluktuationen kennzeichnen, lassen sich über eine zeitlich aufgelöste Messung unterscheiden.

Im Gegensatz zur Visualisierung über ein Einzelbild oder eine Mittelung über eine thermografische Bilderreihe, ermöglicht die Auswertung von Temperaturfluktuationen über eine zeitliche Standardabweichung oder über eine Fourieranalyse sogar in Situationen mit geringem

thermischen Kontrast eine Unterscheidung zwischen turbulenter und abgelöster Strömung. Diese Visualisierungsmethode wurde erfolgreich an einem kreisrunden Zylinder und an einem NACA-Rotorblattprofil demonstriert. Es konnte dabei gezeigt werden, dass eine eindeutige Differenzierung in Übereinstimmung mit den eingesetzten Referenzverfahren über eine Auswertung von Temperaturfluktuationen möglich ist. Im Gegensatz zu etablierten Methoden stellt die demonstrierte Methode eine schnelle sowie nicht-invasive Alternative dar, die keinerlei Vorbereitung oder Manipulation des Messobjekts erfordert. Diese Voraussetzungen sind sowohl für Windkanalmessungen zur Auswertung von Strömungsablösungen und der von möglichen dreidimensionalen Strömungsstrukturen, als auch für Messungen an laufenden WEA zur Erfassung der realen Betriebsbedingungen vorteilhaft. Die gewonnenen Informationen könnten so zur Identifikation von Problembereichen und zur präzisen Positionierung von Strömungselementen zur Vermeidung der ungewollten Strömungsablösungen eingesetzt werden. Zukünftige Untersuchungen zielen auf eine weitere Steigerung des Kontrastes durch eine zusätzliche örtliche Auswertung innerhalb der Bereiche mit verschiedenen Strömungszuständen. Nach der erfolgreichen Erprobung in Windkanaluntersuchungen wird die Übertragbarkeit auf Freifeldmessungen an laufenden WEA in einem nächsten Schritt untersucht.

Dankesworte

Für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten gilt der Dank der Autoren der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, Förderkennzeichen: 27118) und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, Förderkennzeichen: 0325153).

Literatur

- Corten G.P., 2001:** "Flow separation on wind turbines blades", Dissertation, Utrecht University
- Dollinger C., Balaesque N., Sorg M., 2014:** "Thermographic boundary layer visualisation of wind turbine rotorblades in operation", In: EWEA Europe's Premier Wind Energy Event, Barcelona 2014.
- Gartenberg E., Roberts A.S., 1991:** "Airfoil transition and separation studies using an infrared imaging system", *Journal of Aircraft* 28:225–230.
- Hucho W.H. 2013:** "Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering", Elsevier Science.
- 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* 57:77.
- Lang W., Gardner A.D., Mariappan S., Klein C., Raffel M., 2015:** "Boundary-layer transition on a rotor blade measured by temperature-sensitive paint, thermal imaging and image derotation", *Experiments in Fluids* 56:118.
- Luca L. de, Carlomagno G.M., Buresti G., 1990:** "Boundary layer diagnostics by means of an infrared scanning radiometer", *Experiments in Fluids* 9:121–128.
- Medina P., Schreck S., Johansen J., Fingersh L. 2011:** "Oil-flow visualization on a SWT-2.3-101 wind turbine", In: 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference 2011.
- Pellegrino A., Meskell C. 2013:** "Vortex shedding from a wind turbine blade section at high angles of attack" *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 121:131–137.
- Quast A. 1987:** "Detection of Transition by Infrared Image Techniques", In: 12th international congress on instrumentation in aerospace simulation facilities (ICIASF 87), Williamsburg 1987.
- Ricci R., Montelpare S. 2005:** "A quantitative IR thermographic method to study the laminar separation bubble phenomenon", *International Journal of Thermal Sciences* 44:709–719.
- Schlichting H. 1979:** "Boundary-layer theory", 7. ed. McGraw-Hill, New York.
- Simon B., Filius A., Tropea C., Grundmann S. 2016:** "IR thermography for dynamic detection of laminar-turbulent transition", *Experiments in Fluids* 57:93.
- 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*, IOP Publishing, 2014.