

Thermografische Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Aspektverhältnisse auf den Strömungsnachlauf von Kavitäten an Tragflächenprofilen

Thermographic investigation of the influence of different aspect ratios on the flow wake of cavities on airfoils

Friederike Jensen¹, Axel von Freyberg¹, Marc Avila², Andreas Fischer¹

¹Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik Automatisierung und Qualitätswissenschaften (BIMAQ), Linzer Straße 13, 28359 Bremen, E-Mail: f.jensen@bimaq.de

²Universität Bremen, Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM), Am Fallturm 2, 28359 Bremen

Thermografische Strömungsvisualisierung, Rotorblatt, Kavität, Strömungsnachlauf
thermographic flow visualization, rotor blade, cavity, wake flow

Zusammenfassung

Um eine indirekte Defektdetektion kavitätsartiger Defekte aus großer Entfernung, berührungslos und in-prozess zu ermöglichen, wird die thermografische Strömungsvisualisierung als Messmethode untersucht. Experimentelle Untersuchungen des Strömungsnachlaufes von Kavitäten und ergänzende Strömungssimulationen an einem typischen Tragflächenprofil zeigen, dass die Detektion oberhalb einer kritischen Reynoldszahl möglich ist und die Nachlaufströmung bei konstanter Defekttiefe und Sehnenposition unter anderem vom Aspektverhältnis der Kavität sowie der Anströmgeschwindigkeit abhängt. Mit zunehmendem Aspektverhältnis sowie zunehmender Strömungsgeschwindigkeit steigt die Turbulenz der Nachlaufströmung und damit die Sichtbarkeit der Nachlaufströmung im Thermogramm. Selbst wenn die Nachlaufströmung von der Kavität bis zur Transitionslinie nicht durchgehend sichtbar ist, kann dennoch eine Veränderung der natürlichen Transition beobachtet werden. Folglich ermöglicht die thermografische Strömungsvisualisierung die indirekte Detektion von kavitätsartigen Defekten an Tragflächen und kann weitere Informationen über die Eigenschaften der Kavität liefern.

Einleitung

Durch Umwelteinflüsse herbeigeführte Verschmutzungen und Erosionsschäden beeinflussen das aerodynamische Profil der Tragflächen von Windenergieanlagen, was sich negativ auf den Auftriebs- und Widerstandsbeiwert des Rotorblattes und damit auf seine Effizienz auswirkt (Gaudern 2014). Die Grenzschichtströmung wird dahingehend beeinflusst, dass die laminare Strömung vorzeitig in eine turbulente Strömung übergeht, was den Wirkungsgrad und damit die Energieproduktion einer Windenergieanlage verringert. Diese turbulenten Bereiche sind unerwünscht und sollten möglichst selten auftreten oder schnell beseitigt werden (Timmer und Schaffarczyk 2004), Daher ist eine Messtechnik erforderlich, die diese Defekte oder ihre Auswirkungen auf die Grenzschichtströmung erkennen kann, um den Zustand des Rotorblatts abzuschätzen.

Konventionell wird der Zustand der Tragflächenvorderkante mit Kameras im sichtbaren Bereich aus geringer Entfernung aufgenommen. Aus großen Entfernungen >100 m ist es jedoch nicht möglich, kleine Defekte im einstelligen Zentimeter- oder Millimeterbereich aufzulösen. Defekte dieser Größe beeinflussen die Grenzschichtströmung jedoch bereits erheblich.

lich, was mit der thermografischen Strömungsvisualisierung gezeigt werden kann (Dollinger et al. 2018). Der frühe Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung ist im Thermogramm als sogenannter Turbulenzkeil sichtbar (Parrey et al. 2021). Die Auswirkung der Defekte auf die Strömungscharakteristik wird mit Hilfe von thermografischer Strömungsvisualisierung, also einer indirekten Defektdetektion, erkannt (Abb. 1). Im Gegensatz zu direkten Defekterkennungsmethoden wie der manuellen Inspektion durch Kletterer, der Auswertung von Nahkamerabildern oder taktilem bzw. optischen Oberflächengeometriemessungen kann die thermografische Strömungsvisualisierung aus großer Entfernung >100 m und bei Windenergieanlagen z.B. während des Betriebs durchgeführt werden (García Márquez und Peco Chacón 2020).

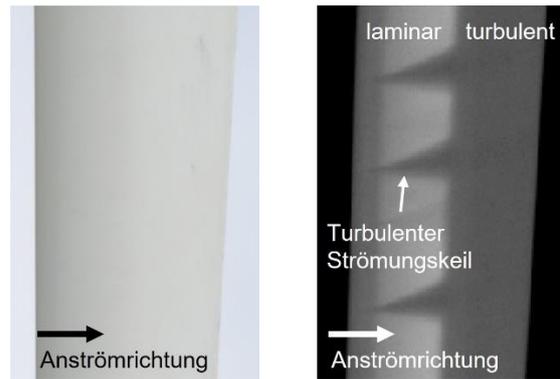


Abb. 2: links: visuelles Bild; rechts: thermografisches Bild eines Rotorblattabschnitts während des Betriebs einer Windenergieanlage; innerhalb des Thermogramms sind die laminaren (hellen) und turbulenten (dunklen) Strömungsverhältnisse am Rotorblatt sichtbar.

Einige Arbeiten haben sich bereits mit dem Verhalten einer beeinflussten Grenzschichtströmung befasst. In numerischen Studien zur Erosion von Rotorblättern konnten Gharali und Johnson (2012) zeigen, dass die Defektfläche eines Erosionsschadens einen größeren Einfluss auf die Strömung hat als die Tiefe der Erosion. Die Auswirkungen von isolierten Oberflächenrauheitselementen auf die Struktur von Turbulenzkeilen wurden von Kuester und White (2016) in Windkanalversuchen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Nachlaufströmung vom Rauheitselement keilförmig ausbreitet, wobei sich der Keil für verschiedene Zylinderformen unterscheidet. Ähnliche Experimente, wurden von Avallone et al. (2016) durchgeführt. Die thermografisch aufgezeichneten Ergebnisse zeigen, dass sich auch im Nachlauf der Rauheitselemente turbulente Strömungen ausbilden, wobei die Turbulenzkeile nahe der Hinterkante des Rauheitselements zunächst eher schlauchförmig sind und sich der Keil erst weiter hinten verbreitert. Traphan et al. (2018) untersuchten in Windkanalexperimenten und CFD-Simulationen isolierte Oberflächenrauheitselemente, die auf ein Rotorblattprofil geklebt wurden. Mittels Particle Image Velocimetry und Thermografie wurden die Auswirkungen von Rotorblattschäden auf die Grenzschichtströmung untersucht. Auch hier bildete sich eine keilförmige turbulente Nachlaufströmung. Die Aufweitung des Keils wird mit zunehmender Reynoldszahl sowie mit zunehmendem Durchmesser der isolierten Rauheitselemente stärker. Experimente und numerische Simulationen bestätigen, dass sowohl Materialabtrag als auch Materialanhäufung, insbesondere in Form von Verunreinigungen, die durch aufgeklebte isolierte Oberflächenrauheitselemente imitiert werden, die Strömung innerhalb der Grenzschicht beeinflussen und zu einem vorzeitigen Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung an Tragflächen führen. Die Detektion von isolierten Kavitäten mittels thermografischer Strömungsvisualisierung unter Berücksichtigung des Aspektverhältnisses ist jedoch noch zu untersuchen.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist eine experimentelle Parameterstudie zur Untersuchung der Machbarkeit der indirekten thermografischen Detektion einer einzelnen Kavität (Defekt) an Modell-Tragflächen in einem Windkanal. Die Auswirkung von Einflussgrößen wie dem Aspektverhältnis der Kavität und der Anströmgeschwindigkeit sollen für ein typisches Tragflächenprofil einer Windenergieanlage untersucht und diskutiert werden. Zusätzlich werden Strömungssimulationen der Reynolds-gemittelten Gleichungen (RANS) durchgeführt, um die experimentellen Ergebnisse und Erkenntnisse zu unterstützen.

Thermografische Strömungsvisualisierung als Methode zur indirekten Detektion

Das Prinzip der thermografischen Strömungsvisualisierung basiert auf dem unterschiedlichen konvektiven Wärmeübergang entsprechend den verschiedenen Strömungsregimen der Grenzschichtströmung an einem Tragflügel. Der Wärmeübergangskoeffizient α_{lam} der laminaren Strömung ist kleiner als der Wärmeübergangskoeffizient α_{turb} der turbulenten Strömung. Entsprechend den unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten wird die Wärme des Messobjekts, in diesem Fall die Oberfläche des Tragflügels, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten an den Luftstrom übertragen. Unter der Annahme, dass die Temperatur der einströmenden Luft T_{luft} niedriger ist als die anfängliche Temperatur der Tragfläche T_{profil} , wirkt die laminare Strömung wie eine wärmeisolierende Schicht, während in der turbulenten Strömung die Wärme der Tragfläche schneller an die Luft übertragen wird. Im Labor kann dies z. B. durch aktive Anregung der Tragfläche erreicht werden. Im Freifeld dient die Sonne als aktive Anregung des Rotorblattes. Infolgedessen ist die stationäre Oberflächentemperatur T_{lam} im laminaren Bereich in diesem Fall höher als die stationäre Oberflächentemperatur T_{turb} im turbulenten Bereich. Um die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen sichtbar zu machen, wird eine Infrarotkamera verwendet, welche die Wärmestrahlung beobachtet, die von der Tragflügeloberfläche emittiert wird (Bergmann et al. 2011).

Die indirekte thermografische Visualisierung und Erkennung einer Kavität durch ihre Wirkung auf die Grenzschichtströmung ist nur möglich, wenn die Wirkung der Kavität auf die Strömung zu einer Turbulenz führt, die stark genug ist, um durch einen Intensitätsunterschied im Thermogramm von der laminaren Grenzschichtströmung unterschieden zu werden. Insbesondere geht die Grenzschichtströmung erst bei Überschreiten der kritischen Reynoldszahl von laminar in turbulent über.

Für aufgesetzte Rauheitselemente wird die Rauheits-Reynoldszahl

$$\text{Re}_k = \frac{u_k \cdot k}{\nu_\infty} \quad (1)$$

verwendet (Klebanoff et al. 1992). u_k beschreibt die ungestörte Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung an der Position x_k im Zentrum des Rauheitselementes in der Höhe $y = k$, $\nu_\infty = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ die kinematische Viskosität des Strömungsmediums (Luft) bei einer Temperatur von 20°C und k die Höhe des Rauheitselements als charakteristische Länge. Zusätzlich zur Rauheits-Reynoldszahl ist die Form bzw. das Aspektverhältnis $\Gamma_k = k/d$ zu beachten, wobei d den Durchmesser des Rauheitselements beschreibt. Dabei zeigen unterschiedliche Arbeiten verschiedene $\text{Re}_{k,\text{crit}}$ auf, oberhalb derer eine turbulente Nachlaufströmung zu erwarten ist (Klebanoff et al. 1992, Loiseau et al. 2014, Fransson and Brandt 2005).

Für eine Kavität, und speziell eine zylindrische Kavität, sind bisher keine Ähnlichkeitsparameter definiert, weshalb zunächst die Beschreibung analog zu aufgeklebten Rauheitselementen angewendet wird. Für die Kavität wird die Strömungsgeschwindigkeit u_∞ gemäß des ungestörten Falls definiert, sodass u_∞ an der Position x_k im Zentrum der Kavität zu bestimmen ist (Xu et al. 2017). Jedoch ist für Kavitäten die kritische Rauheits-Reynoldszahl noch zu klären.

Experimenteller und simulativer Aufbau

Für die Windkanaluntersuchungen werden mehrere Modelle eines Tragflächenprofils des Typs NACA 63-215 hergestellt, welches im Rotorblattspitzenbereich einer Windenergieanlage angeordnet ist. Die Modelltragflächen sind für den Windkanal skaliert und besitzen eine Sehnenlänge von $c_s = 60 \text{ mm}$ und eine Höhe von 130 mm . Die Tragflächenprofile werden auf der Saugseite mit jeweils drei Kavitäten unterschiedlichen Aspektverhältnis Γ_k versehen. Tab. 1 zeigt eine Zusammenfassung aller untersuchten Kavitäts- und Anströmparameter. Abb. 1 zeigt den für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung stehenden Windkanal Göttinger Bauart. In der Mitte der Messstrecke befindet sich eine Einspannvorrichtung für das Messobjekt, mit der ein Anstellwinkel α_k eingestellt werden kann. Die Anströmbedingungen bleiben während der Beobachtung der Tragflächen konstant bei einer Sehnen-Reynoldszahl von $\text{Re}_c \approx 9,9 \cdot 10^4$, was bei einer Sehnenlänge von $c = 60 \text{ mm}$ einer Anströmgeschwindigkeit von $u_1 = 25 \text{ m/s}$ entspricht. Für die thermografischen Untersuchungen steht ein aktives thermografisches Messsystem zur Verfügung mit zwei Halogenstrahlern (je 1 kW Strahlungsleistung) als

Anregung. Als Infrarotkamera wird die VarioCam hr head der Firma InfraTec verwendet, die eine Sensitivität im langwelligen Spektrum von 7 μm bis 14 μm besitzt. Bei der Aufnahme wird das Messobjekt sowohl während der Anregungszeit von $t_{\text{exc}} = 30 \text{ s}$ als auch während der Abkühlzeit aufgenommen, was einer Gesamterfassungszeit von $t_{\text{rec}} = 60 \text{ s}$ entspricht. Für den Vergleich von Bildern aus verschiedenen Messreihen wird für jede Messreihe das Bild mit dem höchsten berechneten CNR (Rodriguez-Molares et al. 2020) ausgewählt und normiert.

Tab. 1: Übersicht über die Windkanal- und Simulationsparameter Kavitätsposition x_k , Aspektverhältnis Γ_k , Anstellwinkel α_k und Strömungsgeschwindigkeit u .

$x_k = x/c_s$ [%]	5,7
$\Gamma_k = k/d$	1,5 / 1 / 0,75 / 0,6 / 0,5 / 0,43 / 0,38 / 0,33 / 0,3
d [mm]	1 / 1,5 / 2 / 2,5 / 3 / 3,5 / 4 / 4,5 / 5
k [mm]	1,5
α_k [°]	0
u_1 [m/s]	25
u_2 [m/s]	100

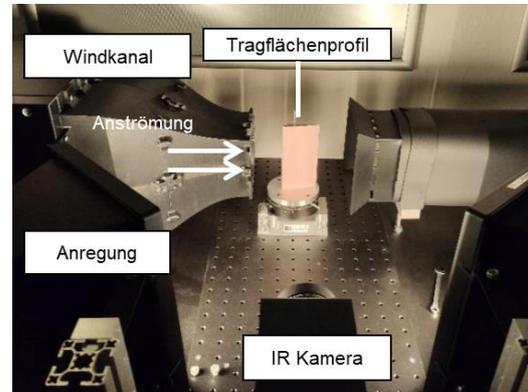


Abb. 2: Bild des Versuchsaufbaus: Windkanal mit einer Strömungsrichtung von links nach rechts, Modellprofil in der Messstrecke, IR-Kamera und Anregungseinheit.

Zur Verifizierung der experimentellen Untersuchungen und zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Strömungsphänomene werden entsprechende numerische Strömungssimulationen mit der Software Ansys Fluent 2021 bei Anströmgeschwindigkeiten von $u_1 = 25 \text{ m/s}$ ($Re_c \approx 9,9 \cdot 10^4$) durchgeführt. Um den Strömungsverhältnissen an laufenden Windenergieanlagen näher zu kommen, werden zusätzlich Simulationen bei einer Anströmgeschwindigkeit von $u_2 = 100 \text{ m/s}$ ($Re_c \approx 4 \cdot 10^5$) durchgeführt. Als Geometrie dient auch hier der Profiltyp NACA 63-215, einschließlich der eingefügten Kavitäten. Die Vernetzung des Modells erfolgt mittels eines polyedrischen numerischen Gitters und einer prismatischen Schichtvernetzung für den Grenzschichtbereich. Für die Strömungssimulation wird das Langtry-Menter Transitional SST Model als Turbulenzmodell verwendet (Menter et al. 2006). Die allgemeinen Simulationseinstellungen sind in Tab. 2 aufgeführt.

Tab. 2: Allgemeine Simulationsparameter

Parameter	Wert
Grad der Turbulenz der Anströmung	5 %
Rauheitshöhe der Oberfläche	0 mm
Dicke der ersten prismatischen Schicht	1,4 μm
Wachstumsrate der prismatischen Schicht	1,3
Anzahl der prismatischen Schichten	15
Anzahl der Knoten	$\approx 1,8 \text{ Mio}$
Anzahl der Elemente	$\approx 4,4 \text{ Mio}$

Für die Ergebnisse wird der Wandreibungskoeffizient c_f an der Profiloberfläche als Darstellung gewählt, der durch den herrschenden Druckgradienten am Profil bestimmt wird. Nach der Reynolds-Analogie $\frac{2 \cdot St}{c_f} \approx \frac{1}{Pr}$ ist der Reibungskoeffizient proportional zur Stanton-Zahl St und der Prandtl-Zahl Pr . Die Stanton-Zahl $St = \frac{\alpha}{u \cdot \rho \cdot c}$ ist ein Maß für die relative Abkühlungsintensität bei der Wärmeübertragung mittels einer Strömung auf ein Objekt und setzt sich zusammen aus dem Verhältnis des Wärmeübergangskoeffizienten α zum Produkt aus der Strömungsgeschwindigkeit u der strömenden Flüssigkeit, ihrer Dichte ρ und ihrer spezifischen Wärmekapazität c . Eine große Stanton-Zahl bedeutet einen schnelleren Wärmeübergang, was zu einer

niedrigeren Temperatur in der Nähe der Wand und somit zu einer geringen Pixelintensität im Thermogramm führt.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen die thermographischen und simulativen Ergebnisse bei der Anströmgeschwindigkeit von $u_1 = 25$ m/s und die simulativen Ergebnisse bei $u_2 = 100$ m/s für alle gewählten Aspektverhältnisse Γ_k . Während die Thermogramme die Strahlungsintensität der Aufnahme mit dem höchsten Kontrast (Rodriguez-Molares et al. 2020) darstellen, zeigen die Simulationen den Wandreibungskoeffizienten c_f . Die umgekehrte proportionale Beziehung zwischen c_f und der im Experiment gemessenen Intensität ermöglicht einen Vergleich zwischen den beiden Darstellungsformen. Um die Rauheits-Reynoldszahl Re_k zu berechnen, wird zusätzlich mit Hilfe des interaktiven Tools XFOIL die Strömungsgeschwindigkeit u_x bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass im Bereich der Vorderkante des Tragflächenprofils die laminare Grenzschichtströmung nach Blasius vorliegt. Man beachte, dass die Rauheits-Reynoldszahl von der Geometrie der Kavität, also dem Aspektverhältnis aus Kavitätstiefe und -durchmesser, der Position der Kavität auf der Tragfläche und der Sehnen-Reynoldszahl, hier stellvertretend durch die Anströmgeschwindigkeit dargestellt, abhängt. Außerdem ist die Rauheits-Reynoldszahl nur begrenzt auf ein Rotorblatt anwendbar, da sie für eine ebene Platte definiert ist.

Um die Auswirkung verschiedener Aspektverhältnisse auf die Nachlaufströmung zu untersuchen, wird der Kavitätsthroughmesser variiert und mit konstanter Tiefe $k = 1,5$ mm an der gleichen Sehnenposition $x_k = 5,7$ % eingebracht. Bei der verwendeten Anströmgeschwindigkeit von $u_1 = 25$ m/s liegt die geschätzte Rauheits-Reynoldszahl für die untersuchten Kavitätspareparameter bei $Re_k = 2869$. Abb. 3 zeigt die experimentellen und simulativen Ergebnisse für die NACA 63-215 Tragflächenprofile.

In Abb. 3a, 3b und 3c sind im Thermogramm für die Aspektverhältnisse $\Gamma_k = 1,5$, $\Gamma_k = 1$ und $\Gamma_k = 0,75$ direkt hinter der Kavität schwach sichtbare Nachlaufströmungen zu beobachten, die sich im laminaren Strömungsbereich verlaufen. Die natürliche Transitionslinie verläuft erwartungsgemäß vertikal geradlinig, annähernd parallel zur Hinterkante. Es demnach keine Einflüsse der schwachen, turbulenten Nachlaufströmung auf die Transitionslinie zu beobachten. Die Simulationen bei gleicher Anströmgeschwindigkeit zeigen ein ähnliches Verhalten, wobei jedoch in Höhe der Kavitäten minimale Abweichungen der natürlichen Transitionslinie zu erkennen sind. In den Simulationen sind bei einer höheren Anströmgeschwindigkeit die Einflüsse der Nachlaufströmung der Kavitäten auf die Transition deutlicher zu erkennen. Außerdem wird eine kontinuierlich sichtbare Nachlaufströmung für die Kavitäten mit Aspektverhältnissen von $\Gamma_k = 1$ und $\Gamma_k = 0,75$ beobachtet, wobei die aus Freifeldmessungen bekannten, typische Keilform der turbulenten Nachlaufströmung erst bei einem Aspektverhältnis von $\Gamma_k = 0,75$ auftritt. Bei einem Aspektverhältnis von $\Gamma_k = 1,5$ ist die Nachlaufströmung im laminaren Strömungsbereich kaum wahrnehmbar.

In Abb. 3d, 3e und 3f sind für die Aspektverhältnisse $\Gamma_k = 0,6$ und $\Gamma_k = 0,5$ direkt nach der Kavität schwach sichtbare Nachlaufströmungen im Thermogramm erkennbar, die sich wie bei höheren Aspektverhältnissen im laminaren Strömungsbereich verlaufen. Die erste durchgängige Nachlaufströmung im Thermogramm ist bei $\Gamma_k = 0,43$ erkennbar. Sie bildet sich von der Kavität aus schlauchförmig über den laminaren Bereich aus und endet an der Transitionslinie. Die Transitionslinie ist auf Höhe der Kavität in Richtung der Vorderkante verschoben, sodass die Nachlaufströmung keilförmig zur theoretischen natürlichen Transitionslinie in den turbulenten Strömungsbereich übergeht, gemäß der Erwartung nach Xu et al. (2017). Bei den Aspektverhältnissen $\Gamma_k = 0,6$ und $\Gamma_k = 0,5$ ist ebenfalls ein Einfluss auf die Transitionslinie in Form einer Ausbuchtung in horizontaler Ausrichtung hin zur Vorderkante sichtbar. Die Simulations-

ergebnisse bei gleicher Anströmgeschwindigkeit zeigen eine kontinuierliche Nachlaufströmung ab $\Gamma_k = 0,43$, wie bei den experimentellen Ergebnissen. Jedoch hebt sich im Vergleich die Nachlaufströmung bei größeren Aspektverhältnissen deutlicher vom laminaren Strömungsbereich ab und ist somit annähernd bis zur Transitionslinie sichtbar. Bei erhöhter Anströmgeschwindigkeit sind alle Nachlaufströmungen von der Kavität bis hin zur Transitionslinie durchgehend, wobei sich die typische keilförmige Aufweitung der Nachlaufströmung einstellt. Abb. 3g, 3h und 3i zeigen die Ergebnisse für Aspektverhältnisse von $\Gamma_k = 0,38$, $\Gamma_k = 0,33$ und $\Gamma_k = 0,3$. Sowohl im Thermogramm als auch in den Simulationen kann eine kontinuierliche Nachlaufströmung für alle Kavitäten erfasst werden. Bei einer Anströmgeschwindigkeit von $u_1 = 25$ m/s sind die Nachlaufströmungen schlauchförmig, während sich bei einer Anströmgeschwindigkeit von $u_2 = 100$ m/s die typische Keilform ausbildet.

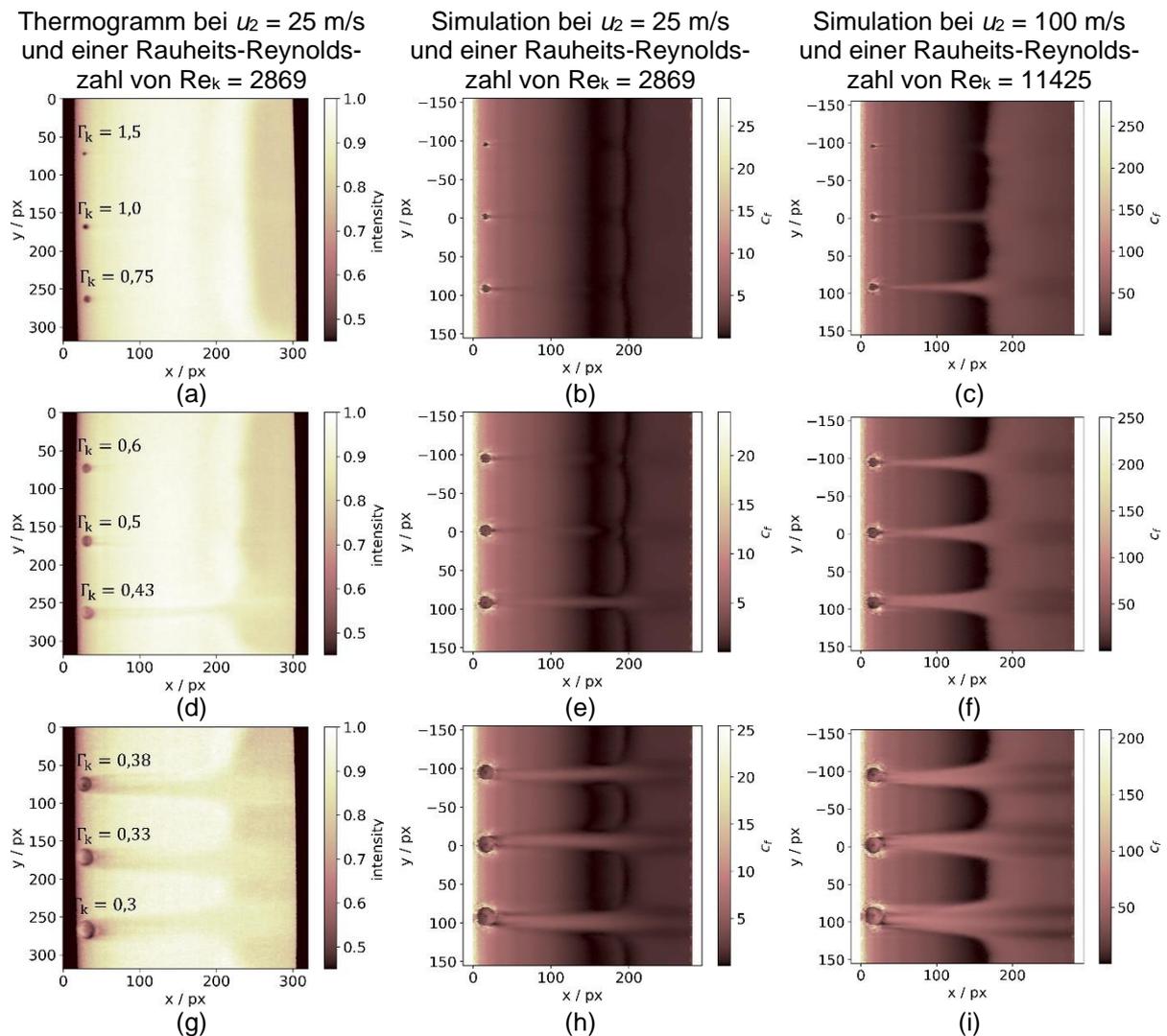


Abb. 3: Thermogramm und Simulationen der Grenzschichtströmung des NACA 63-215 mit verschiedenen Aspektverhältnissen mit konstanter Tiefe $k = 1,5$ mm an der Sehnenposition $x_k = 5,7$ %. Man beachte, dass das Thermogramm die normierte Intensität der Infrarotstrahlung darstellt, während die Strömungssimulationen den Mantelreibungskoeffizienten c_f zeigen.

Sowohl im Thermogramm als auch in den ist zudem die Nachlaufströmung auch im turbulenten Strömungsbereich nach der Transitionslinie noch deutlich sichtbar, wobei sich die Struktur der Nachlaufströmungen in den Simulationsdaten und zum Teil auch in den Thermogrammen verändert hat. Während die Struktur in der horizontalen Mitte der Nachlaufströmung einen höheren Wandreibungskoeffizient c_f aufweist, der zu den Rändern hin abnimmt, existieren innerhalb

der Nachlaufströmung für kleine Aspektverhältnisse Bereiche mit niedrigerem α . Dies ist auch in den Intensitäten des Thermogramms zu sehen.

Für die vorliegenden untersuchten Aspektverhältnisse ist die Rauheits-Reynoldszahl Re_k für alle Kavitäten identisch, da sich nach Gleichung (1) kein Parameter verändert. Die experimentellen und simulativen Untersuchungen zeigen jedoch für abfallende Aspektverhältnisse eine ansteigende turbulente Aktivität in der Nachlaufströmung der Kavität. Dementsprechend scheint ein kritisches Aspektverhältnis für eine Rauheits-Reynoldszahl zu existieren, ab der eine Kavität eine turbulente Nachlaufströmung hervorruft. Sowohl für die experimentellen als auch die simulativen Untersuchungen liegt für beide Rauheits-Reynoldszahlen das kritische Aspektverhältnis bei $\Gamma_k < 1,5$. Das kritische Aspektverhältnis für einen durchgängig sichtbaren Strömungsnachlauf liegt für die thermografische Untersuchung bei $\Gamma_k = 0,43$ für eine Rauheits-Reynoldszahl von $Re_k = 2869$, in Übereinstimmung mit der Simulation. Für die Simulationen bei einer Rauheits-Reynoldszahl von $Re_k = 11425$ liegt das kritische Aspektverhältnis für eine durchgängig sichtbare Nachlaufströmung bei $\Gamma_k = 1$. Dies bedeutet, dass die kritische Rauheits-Reynoldszahl stark vom Aspektverhältnis bzw. das kritische Aspektverhältnis von der Rauheits-Reynoldszahl abhängt, was mit den Untersuchungen für aufgeklebte zylinderförmige Rauheitselemente von Loiseau et al. (2014) übereinstimmt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Einfluss auf die Sichtbarkeit der Kavitätsnachlaufströmung im Thermogramm mit abnehmendem Aspektverhältnis zunimmt. Während für eine $Re_k = 2869$ eine durchgängige Nachlaufströmung ab einem Aspektverhältnis von $\Gamma_k = 0,43$ detektiert werden kann, ist die Detektion einer durchgängigen Nachlaufströmung für eine $Re_k = 11425$ bereits bei einem Aspektverhältnis von $\Gamma_k = 1$ möglich.

Fazit und Ausblick

Die aktive thermografische Strömungsvisualisierung wurde eingesetzt, um die Nachlaufströmung von kavitätsartigen Defekten an der Rotorblattvorderkante von Windenergieanlagen zu untersuchen und das Potenzial einer thermografischen, indirekten Detektion der Kavitäten zu bewerten. Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass mit Hilfe der thermografischen Strömungsvisualisierung eine indirekte Detektion von Kavitäten anhand ihrer Nachlaufströmung möglich ist. Da die kritische Rauheits-Reynoldszahl stark von Einflussgrößen wie der Anströmgeschwindigkeit und dem Aspektverhältnis der Kavität abhängt, existiert für jede Rauheits-Reynoldszahl ein kritisches Aspektverhältnis, ab dem eine turbulente Nachlaufströmung entsteht. Das minimale Aspektverhältnis, bei dem eine durchgängige turbulente Nachlaufströmung detektiert werden konnte, liegt für eine $Re_k = 2869$ bei $\Gamma_k = 0,43$, und für eine $Re_k = 11425$ bei $\Gamma_k = 1$.

Darüber hinaus wurden die folgenden Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Nachlaufströmung in der Kavität beobachtet:

- Die Anströmgeschwindigkeit hat einen Einfluss auf die Lage der natürlichen Transition zwischen laminarer und turbulenter Strömung, die Sichtbarkeit der Nachlaufströmung sowie deren Form: Je höher die Sehnen-Reynoldszahl und damit die Anströmgeschwindigkeit, desto mehr verschiebt sich die Transitionslinie zur Vorderkante. Eine steigende Anströmgeschwindigkeit erhöht die durch die Kavität verursachte Turbulenz, was zu einer besseren thermografischen Detektierbarkeit führt. Darüber hinaus ändert sich die Form der Nachlaufströmung von schlauchförmig zu keilförmig.
- Das Aspektverhältnis hat einen Einfluss auf die Sichtbarkeit der Nachlaufströmung und ihre Form: Je kleiner das Aspektverhältnis, desto deutlicher hebt sich die turbulente Nachlaufströmung vom laminaren Strömungsbereich ab. Eine keilförmige Nachlaufströmung stellt sich bei einer höheren Rauheits-Reynoldszahl bereits bei größeren

Aspektverhältnissen ein, während eine keilförmige Nachlaufströmung bei einer niedrigeren Rauheits-Reynoldszahl erst bei geringeren Aspektverhältnissen auftritt.

Für zukünftige Arbeiten verbleibt die Validierung der experimentellen und simulativen Ergebnisse an Windenergieanlagen. Darüber hinaus müssen die strömungsphysikalischen Aspekte der Nachlaufströmung von Kavitäten im Detail analysiert werden. Auch die kritische Rauheits-Reynoldszahl für das Einsetzen einer turbulenten Nachlaufströmung als Funktion des Aspektverhältnisses der Kavität muss weiter untersucht werden. Das Verständnis des Quereinflusses der Anströmbedingungen wird den Weg für eine indirekte Bewertung der geometrischen Merkmale von kavitätsartigen Defekten mittels thermographischer Strömungsvisualisierung eröffnen.

Dankesworte

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimapolitik (BMWK) sowie dem Projektträger Jülich (PTJ) für die Förderung dieser Forschungsarbeit im Rahmen des Projekts AutoFlow, Förderkennzeichen 03EE3064A.

Literatur

- Avallone, F., Schrijer, F.F.J., Cardone, G., 2016:** "Infrared thermography of transition due to isolated roughness elements in hypersonic flows", *Physics of Fluids*, 28(2):24106
- Bergmann, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2011:** "Fundamentals of heat and mass transfer", John Wiley & Sons Incorporated, 7th edition
- Dollinger, C., Balaesque, N., Sorg, M., Fischer, A., 2018:** "IR thermographic visualization of flow separation in applications with low thermal contrast", *Infrared Physics & Technology*, 88, pp. 254-264
- Fransson, J.H.M., Brandt, K., 2005:** „Experimental study of the stabilization of Tollmien-Schlichting waves by finite amplitude streaks“, *Physics of Fluids* 17(5):054110
- García Márquez, F.P., Peco Chacón, A.M., 2020:** "A review of non-destructive testing on wind turbine blades", *Renewable Energy*, 161, pp. 998-1010
- Gaudern, N., 2014:** "A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion", *Journal of Physics: Conference Series* 524:12031
- Gharali, K., Johnson, D.A., 2012:** „Numerical modeling of an S809 airfoil under dynamic stall, erosion and high reduced frequencies“, *Applied Energy*, 93, pp. 45-52
- Klebanoff, P.S., Cleveland, W.G., Todstrom, K.D., 1992:** "On the evolution of a turbulent boundary layer induced by a threedimensional roughness element", *Journal of Fluid Mechanics*, 237, pp. 101-187
- Kuester, M.S., White, E.B., 2016:** "Structure of turbulent edges created by isolated surface roughness", *Experimental Fluids*, 57(4):47
- Loiseau, J.-C., Robinet, J.-C., Cherubini, S., Leriche, E., 2014:** „Investigation of the roughness-induced transition: global stability analyses and direct numerical simulations“, *Journal of Fluid Mechanics* 760, pp. 175-211
- MacDonald, M., Ooi, A., García-Mayoral, R., Hutchins, N., Chung, D., 2018:** "Direct numerical simulation of high aspect ratio spanwise-aligned bars", *Journal of Fluid Mechanics*, 838, pp. 126-155
- Menter, F.R., Langtry, R., Voelker, S., 2006:** „Transition modelling for general purpose CFD codes“, *Flow Turbulence Combust*, 77(1-4), pp. 277-303
- Parrey, A.-M., Gleichauf, D., Sorg, M., Fischer, A., 2021:** „Automated detection of premature flow transitions on wind turbine blades using model-based algorithms“, *Applied Sciences*, 11(18):8700
- Rodriguez-Molarez, A., Rindal, O.M.H., D’hooge, J., Masoy, S.-E., Austeng, A., Lediju, F., Muyinatu, A., Torp, H., 2020:** "The generalized contrast-to-noise ratio: a formal definition for lesion detectability", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 64 (4), pp. 745-759
- Timmer, W.A., Schaffarczyk, A.P., 2004:** „The effect of roughness at high Reynolds numbers on the performance of aerofoil DU 97-W-300Mod“, *Wind Energy*, 7(4), pp. 295-307
- Traphan, D., Herráez, I., Meinschmidt, P., Schlüter, F., Peinke, J., Gülker, G., 2018:** Remote surface damage detection on rotor blades of operating wind turbines by means of infrared thermography", *Wind Energy Sciences*, 3 (2), pp. 639-650
- Xu, H., Mughal, S.M., Gowree, E.R., Atkin, C.J., Sherwin, S.J., 2017:** "Destabilisation and modification of Tollmien-Schlichting disturbances by a three-dimensional surface indentation", *Journal of Fluid Mechanics* 819, pp. 592-620