

Parametrische Untersuchung der Hinterkante einer Einzeltragfläche

Parametric study on a single airfoil trailing edge

Dr.-Ing. J. Grilliat, K. Arnold, Prof. Dr.-Ing. habil. A. Delgado

LSTM, FAU Erlangen-Nürnberg, Cauerstr. 4, 91058 Erlangen, Germany.

Dr.-Ing. habil. M.C. Jacob

Centre Acoustique – LMFA UMR CNRS 5509, Ecole Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Colongues, Lyon, F-69134 Ecully CEDEX, France.

Prof. R. Camussi

Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Roma Tre, Via della Vasca Navale 79, Rome, I-00146, Italy.

Schlagworte: Hinterkanteströmung, Wirbel detektion, 2D-PIV, Wanddruck

Key words: Trailing edge flow, Vortex detection, 2D-PIV, wall pressure

Zusammenfassung

Die instationäre Strömung an der Hinterkante eines einzelnen Tragflächenprofils eingespannt zwischen zwei Platten wurde mittels 2D-PIV- und Wanddruckmessungen untersucht. Die Messungen wurden bei vier verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Zwei Phänomene wurden hierbei beobachtet. Zum einen trat eine Ablösung an der Saugseite auf. Zum anderen wurden auf Basis des Γ_2 -Kriteriums Wirbel im Nachlauf des Tragflächenprofils detektiert. Diese Wirbel weisen eine Struktur ähnlich einer Wirbelstraße auf. Strouhalzahlen wurden ermittelt und mit Wanddruckspektren verglichen. Ein qualitativer Ansatz zur Erklärung der beobachteten Phänomene wurde vorgeschlagen. Wavelet-conditioning wurde auf die Drucksignale angewendet. Die hieraus gewonnenen Daten deuten auf Modulationseffekte der in der Strömung auftretenden Instabilitäten hin.

Einleitung

Hinterkantenschall ist der Hauptschallmechanismus bei kleiner Geschwindigkeit, und wurde intensiv in den letzten Jahrzehnten untersucht. Semi-analytische Modelle können eine zuverlässige Schallprognose liefern, vorausgesetzt dass die instationäre Strömung an der Hinterkante bekannt ist (s. bspw. Roger und Moreau 2005). Diese instationäre Informationen können trotz neuer Entwicklungen (s. Rozenberg 2010) nur aus zeitaufgelösten Simulationen oder Messungen erfasst werden. Konventionelle Prüfstände zur Messung einer Hinterkanteströmung bestehen aus einem Tragflächenprofil, das im Kern eines Windkanalstrahles gesetzt wird. Meistens wird hierzu das Tragflächenprofil auf zwei Platten montiert, die an zwei Seiten des Windkanalsaustritts fixiert sind. Diese einfache Bauart birgt den Vorteil, dass simultane Nah- und Fernfeldmessungen leicht durchführbar sind. Allerdings entstehen starke Schwankungen bei niedrigen Frequenzen, die möglicherweise die Strömung um die Tragfläche lokal beeinflussen könnten.

Die vorliegende Studie wird wie folgt aufgeteilt: Zuerst werden kurz der Prüfstand und die Messtechniken beschrieben. Anschließend werden Ergebnisse aus zeitlich nicht aufgelösten

2D Particle Image Velocimetry-Messungen vorgestellt und diskutiert. Danach folgt eine Präsentation Diskussion der Ergebnisse der Wanddruckmessungen.

Prüfstand und Messverfahren

Ein dickes, gewölbtes Tragflächenprofil (NACA5510-Profil mit 200 mm Sehnenlänge und 200 mm Spanweite) wurde im Kern eines Eiffelwindkanals gesetzt und mittels zwei Holzplatten montiert. Die Holzplatten wurden hierbei an den oberen und unteren Seiten des Windkanalaustritts fixiert. Zusätzlich wurden Mikrofone am Kopf des Tragflächenprofils montiert, und mittels kapillaren Röhrchen mit den an der Saugseite gebohrten Löchern verbunden. Die untere Holzplatte wurde mit einem Ausschnitt versehen und in diesen wurde eine Glasplatte eingefasst. Eine Kamera wurde anschließend unter dieser Glasplatte montiert. Der für die PIV-Messung notwendige senkrechte Laserschnitt wurde hierbei in der mittleren Ebene des Prüfstandes generiert. Die Abtastfrequenz der PIV-Aufnahme entsprach 1 Hz. Durch diese Abtastfrequenz können die aufgenommen Geschwindigkeitsfelder als statistisch unabhängig voneinander betrachtet werden. Die Auflösung der PIV-Ergebnisse betrug $1.6 \times 1.6 \text{ mm}^2$. Drei Anströmgeschwindigkeiten wurden untersucht (40, 70 und 90 m/s). Eine vierte Messung (20 m/s) wurde für die Wanddruckmessungen hinzugefügt. Eine ausführliche Beschreibung des Prüfstands und der Messverfahren kann bei Grilliat 2009 (auf Französisch) und Camussi & al 2010 gefunden werden.

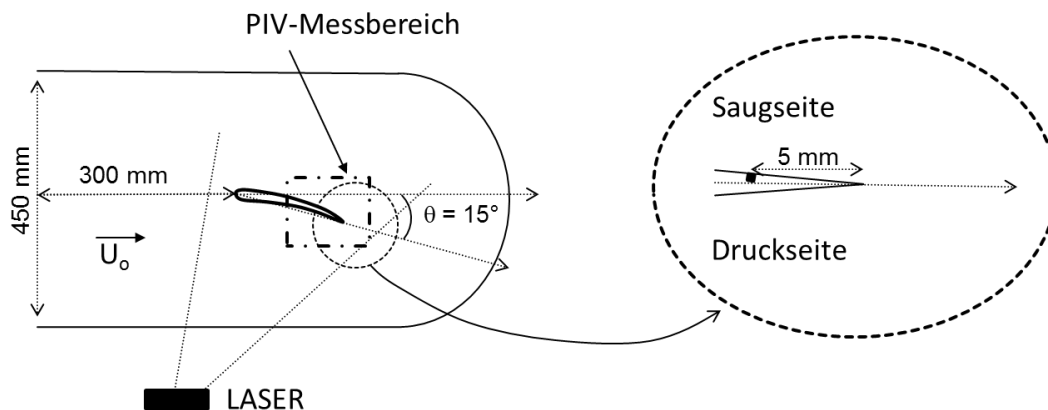


Abb. 1: Skizze des Prüfstands (Draufsicht). Das schwarze Quadrat stellt eine Druckmessstelle dar.

Wirbeldetektion mittels des Γ_2 -Kriteriums

Die instationäre Geschwindigkeitsfelder aus der 2D-PIV Messungen wurden nach der Methode von Michard und Favelier (2004) untersucht. Die Rechnung des sogenannten Γ_2 -Kriteriums erfolgt in zwei Stufen. Die Strömung in einem Interrogationsfenster S wird zunächst gemittelt und die Abweichungen der Geschwindigkeitskomponenten zur Mittelwert werden gerechnet. Der Rotationstensor mit Respekt auf dem Fensterzentrum wird dann berechnet und integriert. Mathematisch erfolgt dies nach folgender Formel:

$$\Gamma_2(\vec{x}) = \frac{1}{S} \int_{\vec{x}' \in S} \frac{(\vec{x}' - \vec{x}) \wedge (\vec{u}(\vec{x}') - \vec{u}(\vec{x}'))}{|\vec{x}' - \vec{x}| |\vec{u}(\vec{x}') - \vec{u}(\vec{x}')|} d\vec{x}'$$

Für ein sehr kleines Interrogationsfenster, nähert sich $\Gamma_2(\vec{x})$ an seinen Grenzwert $\gamma_2(\vec{x})$. Die Funktion $\gamma_2(\vec{x})$ nimmt absolute Werte höher als $\frac{2}{\pi}$ an, wenn \vec{x} innerhalb einer Wirbelstruktur liegt. Das Vorzeichen von $\gamma_2(\vec{x})$ ergibt den Drehsinn der Struktur. Isokontouren aus $\Gamma_2(\vec{x})$ ermöglichen somit die Detektion von Wirbeln. Tests mit Hilfe von Potentialwirbeln in einer mit

weißem Geräusch überlagerten Strömung haben gezeigt, dass das Γ_2 -Kriterium Fehldetektionen bei der Schwelle $\frac{2}{\pi}$ ergeben können. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Studie die Schwelle um 5% erhöht. Die Abbildung 2 zeigt einen Isokontour des Γ_2 -Kriteriums bei $1.05 \frac{2}{\pi}$. Somit wurde eine Wirbelstruktur mit positivem Drehsinn detektiert. Das Zentrum des detektierten Wirbels wurde mit dem Schwerpunkt des Isokontours angenähert. Der Wirbelradius wurde mit Hilfe der auf der Abb.2 dargestellten Formel berechnet.

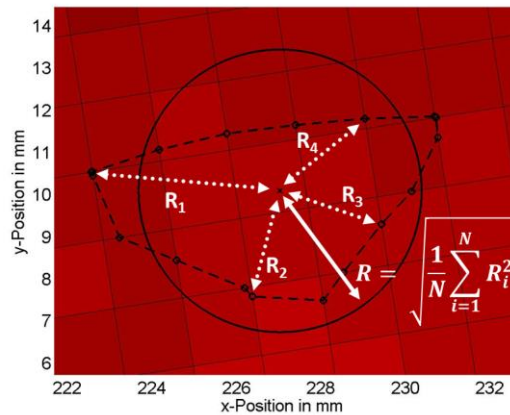


Abb. 2: Isokontour des Γ_2 -Kriteriums bei $1.05 \frac{2}{\pi}$ (schwarze, gestrichelte Linie). Das Wirbelzentrum und der Wirbelradius werden jeweils mit schwarzem Kreuz und Linie dargestellt.

Statistische Ergebnisse werden auf der Abbildung 3 veranschaulicht. Die gemittelten Geschwindigkeitsfelder weisen bei allen drei Anströmgeschwindigkeiten dieselbe Struktur auf und wurden mit der Anströmgeschwindigkeit normiert. Identische Felder für die 2D-Turbulenzrate $\sqrt{u'^2 + v'^2}$ wurden in allen drei Fällen erhalten.

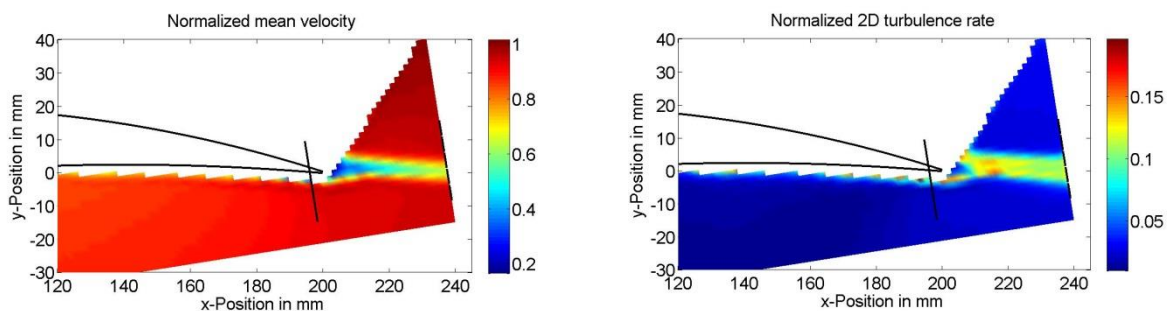


Abb. 3: 2D-PIV Ergebnisse: gemittelte Geschwindigkeit bei $U_0 = 90$ m/s (links) und 2D Turbulenzrate. Beide Größen wurden mit $U_0 = 90$ m/s normiert. Das Interrogationsfenster wurde mit schwarzen Linien dargestellt

In der Abbildung 4 sind zwei Ergebnisse der Wirbeldetektion bei $U_0 = 90$ m/s dargestellt. Die Abbildung 4(a) zeigt ein für diese Messung typisches Ergebnis: im oberen Bereich des Nachlaufs (der Saugseite entsprechend) werden positiven Wirbel detektiert, während negativen Wirbel im unteren Bereich des Nachlauf (jeweils der Druckseite entsprechend) detektiert werden. In den meisten Fällen liegen die Wirbel im Nachlauf, und weisen eine Verteilung auf, die einer Wirbelstraße ähnelt. Aus diesem Grund wurde der Abstand zwischen zwei Wirbeln (im Folgenden als Wirbelpaar genannt) selber Drehsinn ermittelt.

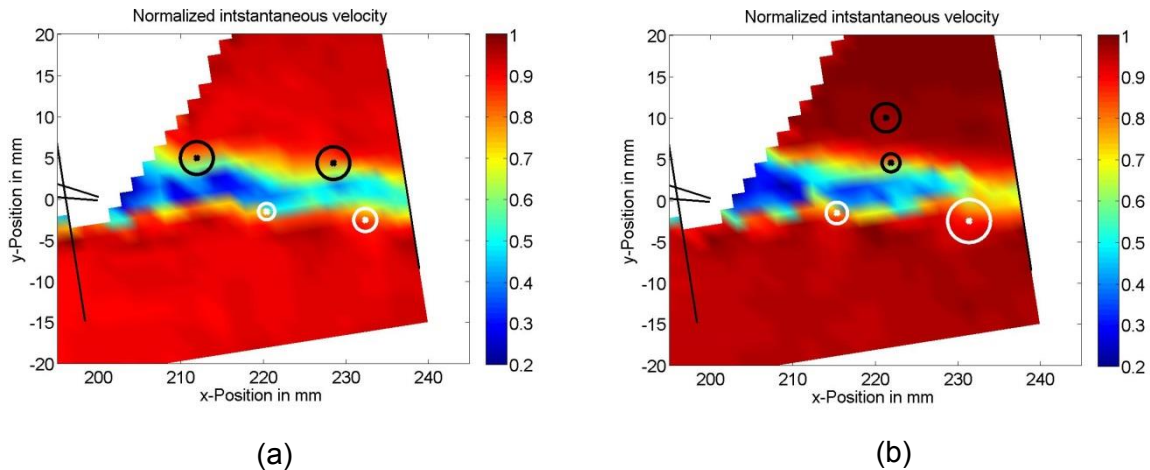


Abb. 4: instationäre Geschwindigkeitsfelder. Die positiven und negativen Wirbel wurden jeweils mit schwarzen und weißen Kreisen dargestellt.

Die Ergebnisse für den Fall $U_0 = 90$ m/s werden auf der Abbildung 5 dargestellt. Die roten Histogramme entsprechen den rohen Ergebnissen der Abstandermittlung. Festzustellen ist, dass positive und negative Wirbel eine bimodale Verteilung aufweisen, mit einem ersten Pegel um 7 mm und einen zweiten um 12 mm. Eine Erklärung zu diesem Phänomen wurde mit der Abbildung 4b) veranschaulicht: zwei Wirbel mit demselben Drehsinn können aufeinander liegen und als Wirbelpaar betrachtet werden. In dem aktuellen Stand der vorliegenden Arbeit ist es schwierig auszusagen, ob diese Wirbelpaare physikalischen Ursprungs sind oder auf numerische Effekte zurückzuführen sind. Die Berechnung wurde daher erneut durchgeführt, ohne diese Wirbelpaare mit zu berücksichtigen. Die entsprechenden Histogramme wurden in blau dargestellt und weisen keine bimodale Verteilung mehr auf. Die Maxima der Verteilungen liegen für positive sowie negative Wirbel bei etwa 12 mm.

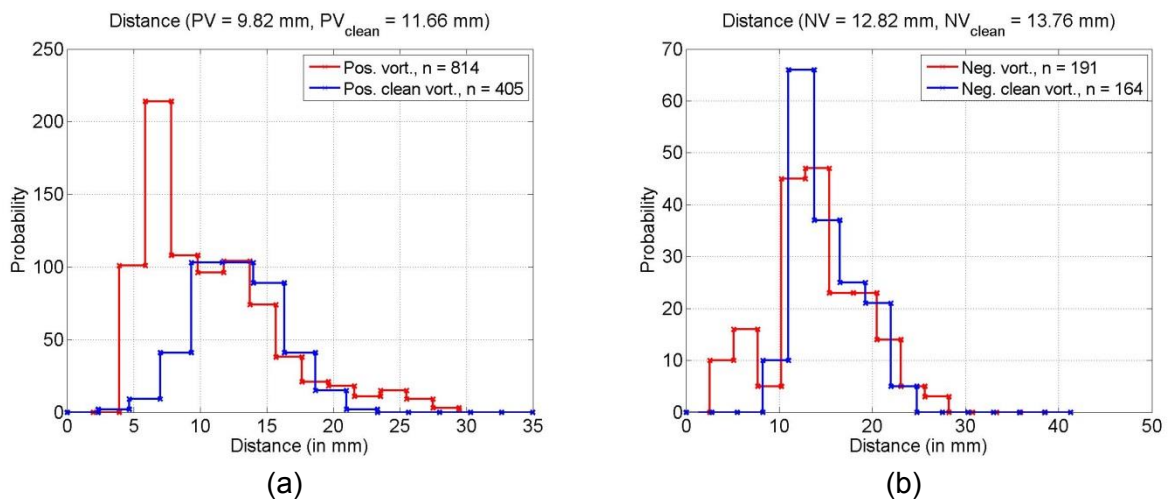


Abb. 5: Verteilung der Abstand zwischen zwei Wirbeln desselben Drehsinns mit und ohne Korrektur. Positiven (a) und negativen Wirbel (b). Oben werden die Mittelwerte mit und ohne Korrektur angegeben (PV: Positive Vortex; NV: Negative Vortex).

Diese Auswertung wurde für alle drei Anströmgeschwindigkeiten wiederholt. Positive sowie negative Wirbelpaare weisen denselben Mittelabstand auf. Dieser Abstand liegt bei 12.5 mm. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass die Wirbel auf ein Ablösephänomen zurückführbar

sind. Ablösephänomene finden bei konstanter Strouhalzahl statt. Der Abstand zwischen zwei Wirbeln desselben Drehsinns kann als Verhältnis einer Ablösefrequenz zu einer Konvektionsgeschwindigkeit betrachtet werden. Wenn dieses Verhältnis konstant ist, sollte die Bezugslänge der entsprechenden, konstanten Strouhalzahl ebenfalls konstant sein.

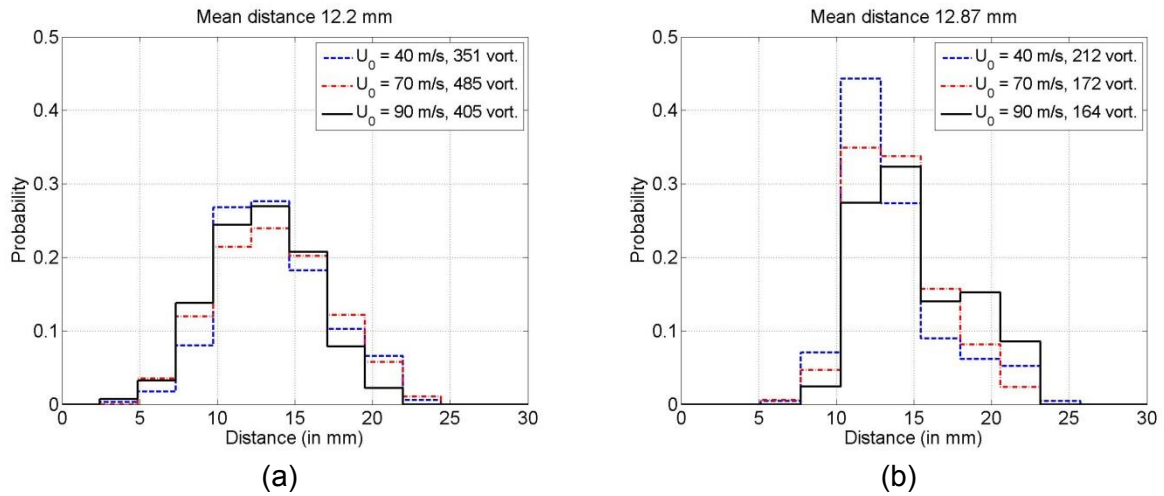


Abb. 6: Verteilung der Abstand zwischen zwei Wirbeln desselben Drehsinns: Positive (links) und negative Wirbel (rechts).

Wanddruckmessungen

Stationäre Messungen des Wanddrucks wurden in der Abbildung 7(a) dargestellt. Die Ergebnisse weisen eine gute Übereinstimmung für alle Anströmgeschwindigkeiten auf. Eine kleine Ablösung findet an der Saugseite in der Nähe der Hinterkante statt. Die Wanddruckspektren überlagern sich ebenfalls (s. Abb.7(b)), wenn die Leistungsdichte mit der dritten Potenz der Anströmgeschwindigkeit und die Frequenz mit einer auf der Sehnenlänge basierenden Strouhalzahl normiert werden. Der Druckpegel besteht aus der Integration der Leistungsdichte über den Frequenzbereich, und ist dementsprechend proportional zu U_0^2 .

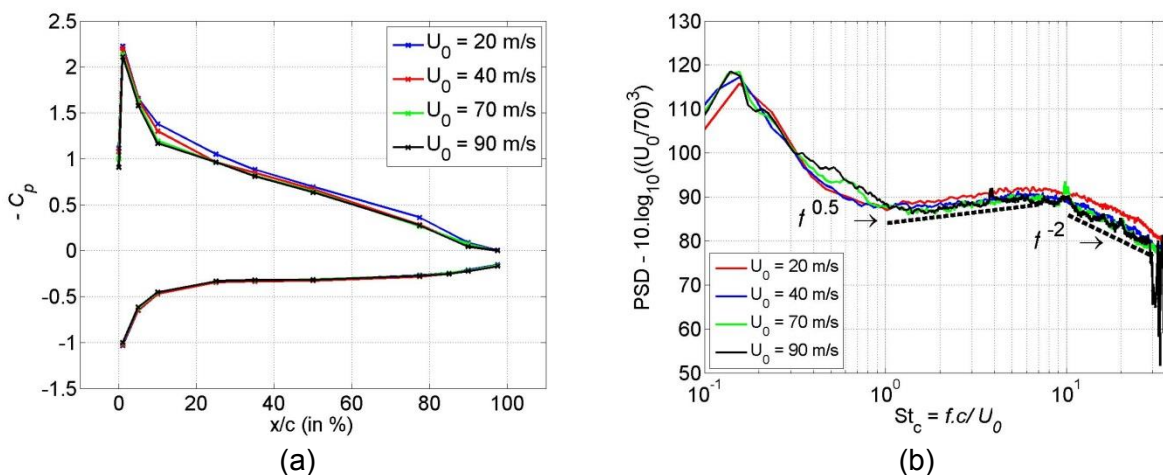


Abb. 6: Wanddruckbeiwert (a) und -spektren (b).

Die normierte Leistungsdichte ist proportional zu $St_c^{0.5}$ bei Strouhalzahlen zwischen 1 und 10, und proportional zu St_c^{-2} bei Strouhalzahlen zwischen 10 und 20. Dieses Ergebnis ist typisch für turbulente Grenzschichten mit positivem Druckgradient (s. Rozenberg & al. 2010). Wenn die Sehnenlänge weiterhin als Bezugsgröße verwendet wird, kann der an Hand der Wirbel-

detektion ermittelte Abstand d in die Strouhalzahl $S_{td} = c/d = 16$ umgerechnet werden. Bei dieser Strouhalzahl sind keine Pegel in den Wanddruckspektren vorhanden. Es ist bemerkenswert, dass das Maximum der normierten Leistungsdichte im Bereich $S_t = 1 - 20$ bei der Strouhalzahl $S_t = 8$ liegt, was genau der Hälfte von S_{td} entspricht. Ein plausibles Szenario zur Erklärung der vorliegenden Ergebnisse ist folgendes: Eine Ablösung findet an der Saugseite der Tragfläche statt, die eine Störung des Nachlaufs verursacht. Aufgrund der Kutta-Kondition entstehen Wirbelstrukturen im Nachlauf. Die in Abb.4(b) dargestellten positiven Wirbeln könnten folgendermaßen erklärt werden. Der obere positive Wirbel stellt die abgelöste Struktur dar, während der untere Wirbel sich aus dem Nachlauf des Tragflügelprofils bildete.

Einfluss der Instabilitäten auf die Strömungsdynamik

Im niedrigen Frequenzbereich wurde ein hoher Pegel beobachtet ($S_t \sim 0.15$). Die Strömungskonfiguration (reckeckiger Strahl zwischen zwei Platten) ruft einen Instabilitätsprozess hervor. Weitere Messungen sind erforderlich um herauszufinden, ob diese Instabilitäten auf die Seitenscherschichten des Strahles zurückzuführen sind, oder ob die Spitze des Strahlkerns die Ursache für die gemessenen Druckschwankungen ist. Nichtsdestotrotz kann auf Grund der Pegelhöhe (25 dB über das mittlere Schwingungsniveau) angenommen werden, dass Schwankungen bei dieser Strouhalzahl einen Einfluss auf die lokale Strömung um das Tragflächenprofil ausüben.

Die in Abb.3 dargestellten instationäre Geschwindigkeitsfelder weisen deutliche Geschwindigkeitsunterschiede außerhalb des Nachlaufs auf (c.a. 10% der Anströmgeschwindigkeit). Werden die Druckschwankungen bei $S_t = 0.15$ als Druckwellen betrachtet, die mit der Strömung konvektiert werden, so ergäbe sich eine Wellenlänge von $\lambda = 1.33 \text{ m}$. Eine solch hohe Wellenlänge hat unmittelbar zur Folge, dass diese Druckschwankungen nicht mit 2D-PIV in einer solchen Konfiguration erfasst werden können. Um den Einfluss dieser Druckschwankungen quantitativ zu untersuchen wurden die Wanddrucksignale mit Hilfe des Wavelet-conditionings untersucht (s. Camussi & al 2010, Grilliat & al 2011). Wavelet-conditioning besteht darin, die Energiebeiträge eines turbulenten Signals bei einem gewählten Frequenzbereich zeitlich zu detektieren. Jeder Energiebeitrag wird Ereignis genannt. Bei jedem Ereignis wird ein Ausschnitt des turbulenten Signals entnommen. Ausschnitte werden anschließend gemittelt.

Diese Methode wurde für alle vier Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Eine Überlagerung der gemittelten Signale konnte erreicht werden, wenn die Druckschwankungsamplitude mit $U_0^{1.5}$ normiert wurde und die Zeitskala $t \cdot U_0^{0.5}$ betrug. Dieses Ergebnis wurde bereits von Camussi & al 2010 gezeigt, und mittels eines Potentialmodells erklärt. Aus den Detektionsaugenblicken der Ereignisse wurde ein Zeitsignal konstruiert. Eine Umschlaganalyse dieses Signals zeigte, dass die Auftretensfrequenzen der Ereignisse von der Strouhalzahl $S_t = 0.15$ moduliert wird. Somit wird bewiesen, dass der Instabilitätsprozess die Dynamik des beobachteten Ablösephänomens beeinflusst.

Fazit

In der vorliegenden Studie wurde ein zwischen zwei Platten montiertes Tragflächenprofil mittels 2D-PIV und Druckmessungen untersucht. Hierbei wurde ein Ablösungsmechanismus an der Hinterkante detektiert, der die Entstehung von Wirbel im Tragflächenprofilnachlauf verursachte. Zusätzlich zu diesem Mechanismus wurden hohen Druckschwankungen erfasst, die aus einem Instabilitätsprozess entstanden sind. Es wurde gezeigt, dass dieser Instabilitäts-

prozess die Dynamik des Ablösungsmechanismus stark beeinflusst. Dieser Instabilitätsprozess stellt somit eine Gefahr für alle Messungen, bei denen instationäre Strömungsgrößen ermittelt werden.

Dankesworte

Die Messungen zu dieser Studie wurden von der European Community im Rahmen des Sixth Framework Project PROBAND AST4-CT-2005-012222 unterstützt.

Literatur

Camussi, R., Grilliat, J., Caputi-Gennaro, G. and Jacob, M.C. 2010: "Experimental study of a tip leakage flow: wavelet analysis of pressure fluctuations", J. Fluid Mech., 660, pp. 87–113.

Grilliat J., 2009 : "Contribution à l'étude aéroacoustique des écoulements de jeu", Thèse de doctorat 2009-34, Ecole Centrale de Lyon.

Grilliat, J., Jacob, M.C., Camussi, R., 2011: "Untersuchung einer hinterkante bei einem einzelschaufel mit Hilfe des Wavelet-conditionings", Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 6. – 8. September 2011, Ilmenau.

Roger, M., Moreau, S., 2005 : "Back-scattering correction and further extensions of Amiet's trailing-edge noise model. Part 1: theory", J. Sound & Vibration, 286, pp. 477–506.

Rozenberg, Y., Robert, G., Moreau, S., 2012 : "Wall-Pressure Spectral Model Including the Adverse Pressure Gradient Effects", AIAA JOURNAL, 50(10), pp. 2168-2179.