

ZEITAUFGELÖSTE, VOLUMETRISCHE MESSUNG ABGELÖSTER STRÖMUNGEN IM WASSERSCHLEPPKANAL MIT HILFE DES TSI-V3V-MESSSYSTEMS

TIME-RESOLVED VOLUMETRIC SEPARATION MEASUREMENT IN A TOWING TANK USING THE TSI-V3V MEASUREMENT SYSTEM

E. Wolf¹, C. Kähler¹, D. Troolin², C. Kykal³ und W. Lai²

¹Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Deutschland
christian.kaehler@unibw.de

²TSI Incorporated, 500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55126, USA
dan.troolin@tsi.com, wing.lai@tsi.com

³TSI GmbH, Neuköllner Strasse 4, 52068 Aachen, Germany
carsten.kykal@tsi.com

Wasserschleppkanal, V3V, 3D-PTV, Ablöseblase, SD7003-Profil
Towing tank, V3V, 3D PTV, separation bubble, SD7003 airfoil

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden zeitaufgelöste, volumetrische Messungen am SD7003-Profil vorgestellt, welche in einem Wasserschleppkanal bei einer Reynoldszahl von 60.000 und einem Anstellwinkel von 4° durchgeführt wurden. Unter diesen Bedingungen bildet sich auf der Saugseite des Profils bei etwa 50 % Profiltiefe eine stabile, laminare Ablöseblase (LSB) aus. Ebenso wie frühere Untersuchungen anhand von Particle Image Velocimetry (PIV) konzentriert sich diese Studie auf die instationäre 3D-Topologie der Blase. Aus diesem Grund wurde die zeitaufgelöste Volumetric 3-Component Velocimetry (V3V)-Technik verwendet, mit der eine dreidimensionale Geschwindigkeitsverteilung innerhalb eines nahezu kubischen Volumens erfasst werden kann. Des Weiteren erreicht man durch die Tatsache, dass das Flügelprofil in einem Wasserschleppkanal durch das ruhende Fluid bewegt wird, einen verschwindend geringen Turbulenzgrad. Außerdem kann die Strömung von der Profilvorderkante bis zum weit entfernten Nachlauf observiert werden, einschließlich des Interaktionsbereichs von Start- und Randwirbel, welche beide eine nachhaltige Auswirkung auf das Ablöseverhalten der Strömung haben können. Deswegen wurde der Einfluss des Randwirbels anhand einer Variation der Spaltbreite zwischen Profilrand und Schleppkanalboden systematisch untersucht. Schließlich wurden infolge einer unbeeinflussten 2D-Anströmung dreidimensionale, zusammenhängende Wirbelstrukturen gemessen, die aus dem Bereich des Wiederanlegens der Strömung abschwimmen. Die Ergebnisse zeigen in Übereinstimmung mit der Literatur, dass die abgeworfenen Wirbel spannweitig eine begrenzte Ausdehnung besitzen. Gleichzeitig wird gezeigt, dass die Wirbel sowohl in Richtung der Spannweite als auch in Richtung der Hauptströmung regelmäßig angeordnet sind. Stromab der Ablöseblase zerfallen die Wirbelstrukturen, während sie ihre relativen Positionen zueinander nicht merklich verändern.

1 Einleitung

Die so genannten Unmanned Air Vehicles (UAVs) erfreuten sich bis heute eines ständig steigenden Interesses. Sie werden typischerweise bei niedrigen Reynoldszahlen betrieben und weisen daher eine Tendenz zur laminaren Strömungsablösung auf. Doch gerade das Vorhandensein oder Platzen einer LSB sorgt für eine merkliche Veränderung der flugmechanischen Eigenschaften. Die Phänomenologie der LSB ist seit Jahrzehnten ein wichtiges Thema in der Literatur. Dies ist vor allem auf die Tatsache zurückzuführen, dass die wichtigen strömungsmechanischen Effekte wie Ablösung, Transition und Turbulenz zeitgleich und in unmittelbarer Nähe beobachtet werden können. Gaster 1966 und Horton 1968 entwickelten ein zweidimensionales Modell einer stationären LSB. Dabei untersuchten sie deren Abhängigkeit vom Druckgradienten und von der Reynoldszahl. Bis heute waren instationäre und dreidimensionale Strukturen Gegenstand vieler Untersuchungen. Hain & Kähler 2005 verwendeten für ihre Messungen die zeitaufgelöste PIV. Dabei diskutierten sie die Tollmien-Schlichting-Instabilitäten oder (T-S)-Wellen und deren Zusammenhang mit dem vertikalen Oszillieren der LSB, die sich saugseitig am SD7003-Profil (siehe Abbildung 1) ausbildet. Des Weiteren konnten Zhang et al. 2008 Kelvin-Helmholtz (K-H)-Wirbelstrukturen aufzeichnen, deren Instabilitäten maßgeblich für die Transition in einer LSB verantwortlich sind. Hierbei wurden auch λ -förmige Wirbel detektiert. In Anbetracht dessen, dass dreidimensionale, instationäre und komplexe Phänomene beobachtet werden sollen, sind 3-Komponenten Geschwindigkeitsmessverfahren unumgänglich. Hierzu gehören beispielsweise Stereo-Scanning-PIV, wie sie von Hori & Sakakibara 2004 angewandt wurde, und Tomographische PIV, die durch Elsinga et al. 2006 zum Einsatz kam. Burgmann et al. 2007, der ebenfalls Experimente mit der Stereo-Scanning PIV durchführte, konzentrierte sich auf die Phänomenologie der abgeworfenen Wirbelstrukturen. Er untersuchte C-förmige Wirbel, die auch von Hain & Kähler 2005 gefunden wurden, welche sich periodisch aus dem Rezirkulationsgebiet der LSB herauslösen und weiter stromab schwimmen. Trotz der Fortschritte im Verständnis der 3D-Strömungsphänomene ist eine detailliertere Analyse dieser Sachverhalte weiterhin essenziell, um das grundlegende, strömungsmechanische Verständnis und die bestehenden CFD-Methoden zu verbessern. Die zeitliche und räumliche Entwicklung der zusammenhängenden Wirbelstrukturen ist hoch instationär und sollte daher mithilfe von zeitaufgelösten Messverfahren untersucht werden, die eine instantane und volumetrische Erfassung des Strömungszustands ermöglichen. In Hinblick auf diese Anforderung ist die V3V Messtechnik, welche in der gegenwärtigen Studie verwendet wird, sehr geeignet.

2 Experimenteller Aufbau

2.1 V3V-Technik

Die Volumetric 3-Component Velocimetry (V3V)-Technik wurde von TSI entwickelt. Das Herz des Systems besteht aus drei 4 Mega-Pixel-CCD-Sensoren, die in Form eines Dreiecks angeordnet sind. Nach der Kalibrierung kann eine Tiefeninformation ermittelt werden, indem individuelle Partikelbilder aus drei unterschiedlichen Perspektiven aufgezeichnet werden. Im Unterschied zur Scanning-PIV kann das 3D-Strömungsfeld mit der V3V-Technik simultan in einem viel größeren Messvolumen aufgenommen werden. Des Weiteren ist das System sehr kompakt und eine große Aufnahmekapazität von mehreren Minuten sowie eine schnelle Da-

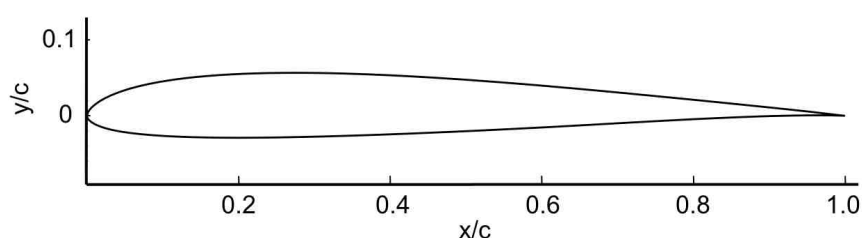


Abb. 1:
Das SD7003-Profil

tenauswertung (nur wenige Minuten für ein Volumenvektorfeld) tragen zu dessen Attraktivität bei. Eine präzise Beschreibung der Funktionsweise des V3V-Systems lieferten Troolin & Longmire 2008 sowie Hill et al. 2008. Für die gegenwärtigen Experimente wurde ein New Wave YAG200-NWL Nd:YAG Doppelpulslaser (200 mJ bei 15 Hz) verwendet. Um das 50 µm Polyamid (PA)-Seeding voluminös zu beleuchten, wurde der Laserstrahl mithilfe zweier geeigneter Linsen in einen Lichtkegel aufgeweitet. Infolgedessen war das Messvolumen während der Experimente bis zu $120 \times 120 \times 100 \text{ mm}^3$ groß.

2.2 Versuchsanlage

Als Versuchsanlage diente ein Wasserschleppkanal von $8,0 \times 0,9 \times 1,0 \text{ m}^3$ Größe. Die Schleppvorrichtung besteht aus einem schienengeführten Wagen, der auf dem Tank bewegt und mithilfe eines computergesteuerten Servomotors präzise kontrolliert werden kann, wobei sich Beschleunigung und Geschwindigkeit zwischen 0 und 1,3 m/s stufenlos einstellen lassen. Aufgrund dieser technischen Gegebenheiten ist das komplette Strömungsfeld von der Vorderkante bis zum Nachlauf erfassbar. Damit die Strömung innerhalb des Messvolumens nicht durch spannweite Geschwindigkeiten, die durch den Randwirbel entstehen, verändert wird, was die Zweidimensionalität und das Ablöseverhalten der Strömung beeinflussen würde, wurde der Spalt zwischen dem Seitenrand des Profils und dem Kanalboden minimiert und die Unebenheit des Kanalbodens im Vorfeld der Experimente vermessen. Hierbei wurden die X-Werte stets dann protokolliert, sobald sich die Bodenhöhe (Z) einen ganzen Millimeter verändert hatte. Die sich daraus ergebenden Messpunkte sind in Abbildung 2 dargestellt, wobei $Z = 0$ den tiefsten Bereich des Kanals repräsentiert. Durch das übertriebene Verhältnis der beiden Achsen (ca. 400 : 1) wird die Unebenheit deutlich hervorgehoben. Die vertikale Verstellbarkeit des Profils wurde mithilfe eines speziellen Adapters erreicht, der im Folgenden vorgestellt werden soll.

2.3 Konstruktion

Die konstruktive Arbeit beinhaltete sowohl die Fertigung eines Profils, als auch einer geeigneten Aufhängung. Unter Berücksichtigung der möglichen Schleppgeschwindigkeiten wurde die Profillänge auf 300 mm und die Profildbreite auf 500 mm festgelegt. Das Profil wurde aus massivem Plexiglas hergestellt und anschließend sorgfältig poliert, mit dem Ziel Reflexionen an der Oberfläche zu vermeiden. Die vollkommen transparente Natur des Profils ermöglichte

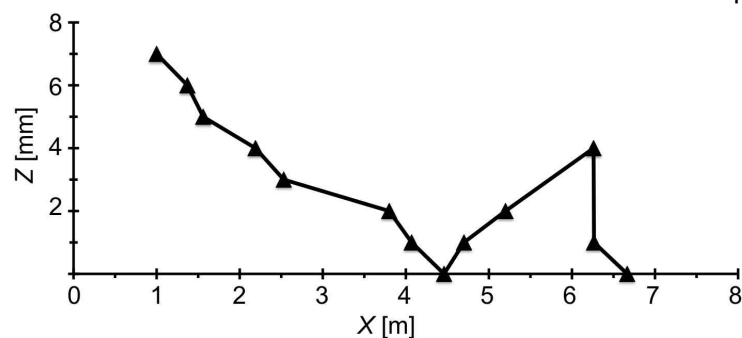


Abb. 2: Unebenheit des Schleppkanalbodens



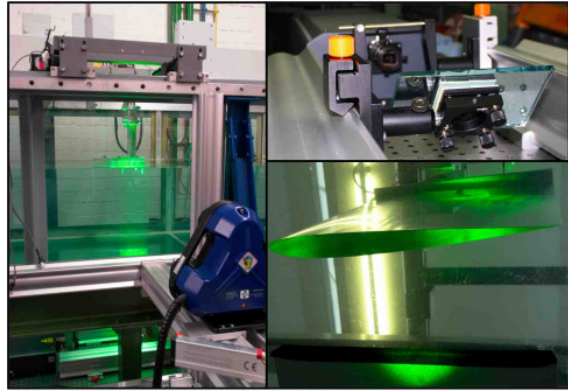
Abb. 3: Rotationstisch zur Verstellung des Anstellwinkels



Abb. 4: Drei-Klemmen-System

es mithilfe der V3V-Technik die Strömung von Ober- und Unterseite des Profils gleichzeitig zu messen. Hierzu wurde je eine konkave Form für beide Profelseiten gefräst, um das Material für die spanende Bearbeitung und für die Politur zu stabilisieren (besonders im Hinblick auf die 0,4 mm dünne Hinterkante). Das Profil wurde an einer Aluminiumplatte verschraubt und bei $x/c = 0,25$ mit einer Welle verstiftet. Dort wurden kleine, aerodynamische Momente erwartet. Das andere Ende der Welle wurde mit einem Stumpf, der als Zeiger dient, passgenau verbunden, um eine exakte Übersetzung des An-

stellwinkels zu garantieren. Die präzise Einstellung des Winkels geschah anhand eines Präzisionsdrehtischs (siehe Abbildung 3), der üblicherweise für optische Applikationen verwendet wird. Folglich konnte der Anstellwinkel stufenlos um 360° verstellt werden. Eine simple und präzise Höhenadjustierung wurde durch ein Drei-Klemmen-System (siehe Abbildung 4) realisiert. Durch die Verwendung von zwei fest verbauten und einer frei beweglichen Klemme konnte die Einstellung der vertikalen Position und des Anstellwinkels voneinander entkoppelt



Aufgrund dieser Anordnung kann das System vollständig von einer einzelnen Person bedient werden. Der Versuchsaufbau wurde unter Berücksichtigung der Unebenheit des Kanals, der Modellgröße und des Leistungsprofils der Schleppvorrichtung festgelegt. Der Laser wurde unterhalb der Messstrecke installiert und dessen Lichtkegel senkrecht nach oben umgelenkt (siehe Abbildung 5). Zusätzlich wurde auf der Unterseite des Kanals lichtimpermeables Material angebracht, um den Laserkegel zu einem Volumen mit diskretem und geradem Querschnitt zu formen. Außerdem wurde die V3V-Kamera senkrecht zu den Wänden der Messstrecke und in geeigneter Höhe (Zentrum des Messvolumens in der Mitte der Spannweite) ausgerichtet. Die Aufhängung wurde an der vorgesehenen Aufnahmestelle am Schleppwagen fixiert und das Profil abgesenkt. Somit konnte der Spalt zwischen Profilrand und Kanalboden auf weniger als 2 mm im Bereich der Messstrecke reduziert werden.

Abb. 5: Versuchsaufbau mit dem V3V-System

3 Ergebnisse

Die Messungen wurden bei $\alpha = 4^\circ$ und $Re = 60.000$ durchgeführt, was einer Anströmgeschwindigkeit von $u_\infty = 0,2 \text{ m/s}$ entspricht. Als Referenzfall wurde der Anstellwinkel $\alpha = 4^\circ$ untersucht. Zur Teilchenverfolgung wurde ein $50 \mu\text{m}$ PA-Seeding verwendet. Zuvor durchgeführte Experimente zeigten, dass sich diese Art der Tracer-Partikel klumpfrei im Wasser verteilen. Wegen des hohen Füllvolumens musste während der Messungen regelmäßig neues Seeding hinzugegeben werden. Dabei stellte sich heraus, dass die PA-Tracer etwas Zeit in Anspruch nehmen bis sie homogen verteilt sind. Alle Visualisierungen wurden mit TECPLOT erstellt.

3.1 Gestörte Profilmströmung

Um die Entstehung und Entwicklung der dreidimensionalen, zusammenhängenden Wirbelstrukturen bei zweidimensionaler Anströmung betrachten zu können, wurden zu Beginn die beiden Hauptstörgrößen, der Start- und Randwirbel, untersucht. Zu diesem Zweck wurde das Profil ca. 10 cm vom Boden angehoben; gerade so hoch, dass das Messvolumen (V3V-Kamera) geeignet positioniert war. Für eine strömungsmechanisch korrekte Auswertung wurde die Schleppgeschwindigkeit zum Geschwindigkeitsvektorfeld addiert. Des Weiteren wurden die Messungen beim Anstellwinkel 8° aufgrund eines höheren Auftriebsbeiwerts als sehr tauglich zur Vorstellung von Rand- und Startwirbel befunden.

3.1.1 Randwirbel

Zunächst wurde die instationäre Strömung untersucht, aus welcher ein Randwirbel resultiert. Die zeitlich-räumliche Entwicklung des Randwirbels ist in Abbildung 6 dargestellt. Hierzu wurden Isoflächen eines negativen, zweiten Eigenwerts λ_2 angezeigt und mit der normierten, wandparallelen Wirbelstärke eingefärbt. Der Profilrand befindet sich bei $z = 0$. Zur Auswer-

tung wurden die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Vektorfelder um $\Delta x = u_\infty / f$ verschoben, wobei f die Aufnahmezeit der Kamera (7,25 Hz) ist. Aus diesem Grund könnten einzelne, sich gegenseitig überlappende Wirbel als neue, zusammenhängende Strukturen interpretiert werden. Dennoch lässt sich der erwartete Verlauf des Randwirbels erkennen. Des Weiteren ist in Abbildung 7 die wandnormale Schnittebene nahe der Vorderkante abgebildet. Die unmittelbar aufgenommenen Vektoren wurden mit ihrer normierten Geschwindigkeit in Hauptströmrichtung eingefärbt. Während in Abbildung 7 a) nur Partikelvektoren visualisiert sind, die sich weit vom Rand entfernt befinden ($z \geq 0,3 c$), werden in Abbildung 7 b) alle erfassten Partikelvektoren dargestellt. Insgesamt zeigt sich, dass die Wirbelbewegung nur für eine starke Störung der Grenzschicht in unmittelbarer Nähe des Profils sorgt. Durch Verringerung des Spaltes zwischen Profil und Kanalboden kann dieser Einfluss weiter minimiert werden, sodass eine Beeinflussung der Strömung im Mittelschnitt durch den Randwirbel vernachlässigbar ist, was durch diese Untersuchung gezeigt werden sollte.

3.1.2 Startwirbel

Abbildung 8 zeigt den Startwirbel in Interaktion mit dem Randwirbel 0,69 s nach der Anfahrt des Profils. Im linken Bild sind die Schnittebenen mit der augenblicklichen Partikelgeschwindigkeit (u_∞ wurde noch nicht addiert) eingefärbt. Zusätzlich indizieren die Partikelvektoren das gemessene 3D-Strömungsverhalten. Rand- und Startwirbel wurden mithilfe des λ_2 -Kriteriums detektiert und mit der spannwitigen Wirbelstärke eingefärbt. Im rechten Bild sind abgesehen von der identischen Geschwindigkeitsverteilung zwei Isoflächen entgegengesetzter Größe dargestellt. Weiterhin wurden Stromlinien eingefügt, um die Spiralform des Randwirbels zu unterstreichen. Aufgrund von Reibung entlang dem Profilrand wird die zunächst

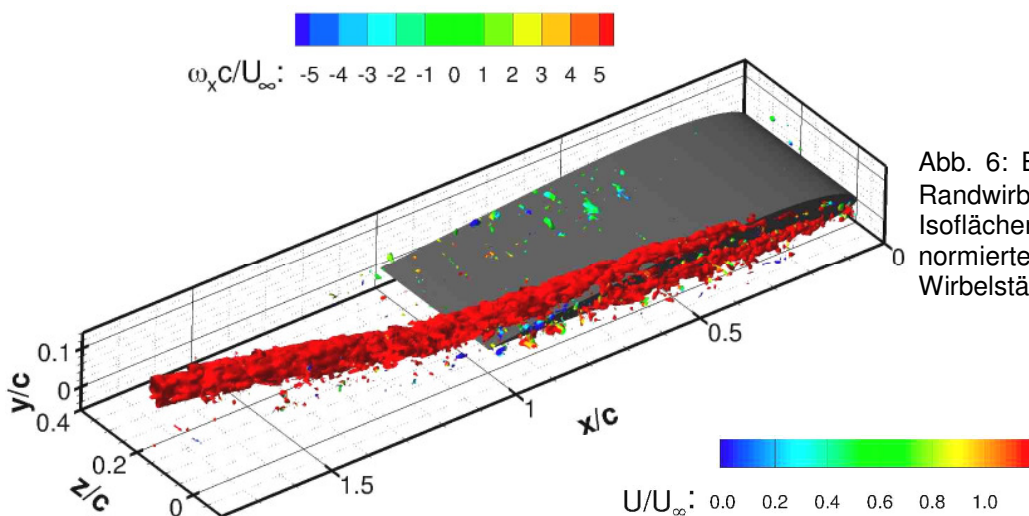
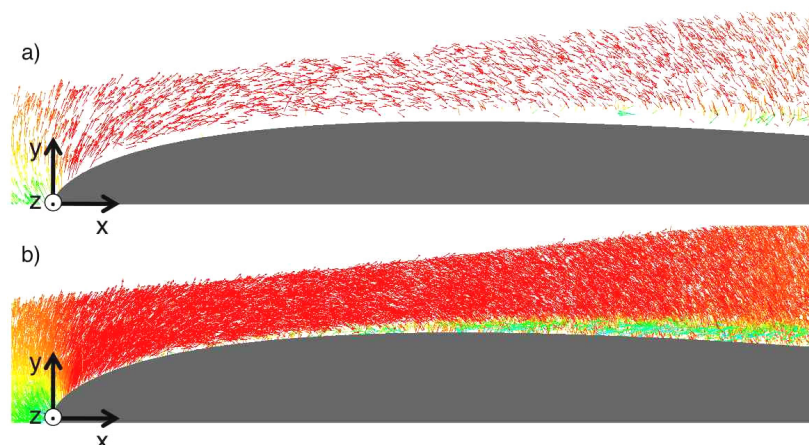


Abb. 6: Entwicklung eines Randwirbels für $\alpha = 8^\circ$; λ_2 -Isoflächen eingefärbt mit normierter wandparalleler Wirbelstärke

Abb. 7: Verteilung von Partikelvektoren in Abhängigkeit vom Abstand zum Profilrand; Vektoren eingefärbt mit deren u / u_∞ -Wert



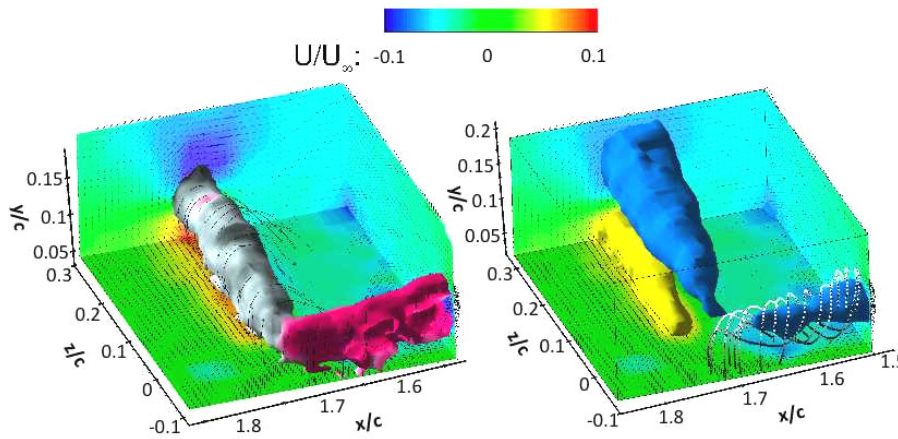


Abb. 8: Startwirbel (grau) und Randwirbel (pink); λ_2 -Isoflächen (links) und u/u_∞ -Isoflächen (rechts)

ruhende Strömung mitbewegt. Gleichzeitig stabilisiert die Spiralbewegung des Randwirbels diesen Effekt, wobei der Einfluss sowohl des Randwirbels, als auch des Startwirbels örtlich begrenzt ist.

3.2 Ungestörte Profilmströmung

Nach der Absenkung des Profils und der Reduktion des Spalts zwischen Profilrand und Schleppkanal auf unter 2 mm ist die ankommende Strömung im mittleren Bereich der Spannweite zweidimensional. Eine Beeinflussung der dreidimensionalen Wirbelstrukturen im Bereich der Ablösung, aufgrund einer durch den Randwirbel induzierten Quergeschwindigkeit, kann daher ausgeschlossen werden.

3.2.1 Wirbelabwerfen

Die Verteilung der Momentangeschwindigkeit in Hauptströmrichtung ist in Abbildung 9 dargestellt. Da die Grenzschicht aufgrund der geringen Partikeldichte in Wandnähe nicht aufgelöst werden konnte, wurden die unmittelbar gemessenen Partikelvektoren angezeigt, um die Glaubwürdigkeit der Daten zu überprüfen. Dies ist notwendig, da jede Leerstelle durch einen interpolierten Vektor ersetzt wird. Wie auch immer, stromab von $x/c = 0,7$ existieren einzelne Gebiete einer verringerten Hauptströmungsgeschwindigkeit ($u/u_\infty = 0,5$). Durch λ_2 -Isoflächen konnten auch die entsprechenden Wirbel lokalisiert werden. Wie weitere Messungen bestätigten, schwimmen die Wirbel in einem mehr oder weniger schachbrettförmigen Muster ab. Sie besitzen eine ungefähre Größe von $0,04^x \times 0,04^y \times 0,06^z c^3$. Des Weiteren sind die Wirbel mit den unterschiedlichen, normierten Wirbelstärken eingefärbt. Während $\omega_z c/u_\infty$ einheitlich negativ ist, sind $\omega_x c/u_\infty$ und $\omega_y c/u_\infty$ asymmetrisch auf die Randbereiche der Wirbel verteilt. Dies unterstreicht den dreidimensionalen Charakter der Wirbel und steht in Wechselbeziehung mit einer regelmäßigen Verteilung

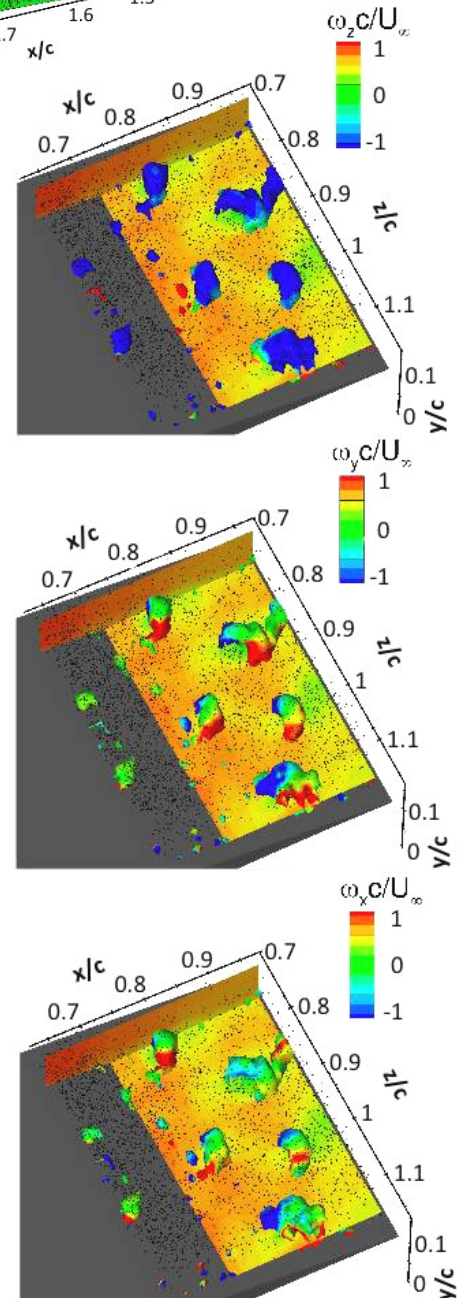


Abb. 9: Dynamische Struktur der abgeworfenen Wirbel; Schnittebenen eingefärbt mit u/u_∞ -Wert und λ_2 -Isoflächen eingefärbt mit den unterschiedlichen normierten Wirbelstärken

von Quellen und Senken. Allerdings kann aufgrund des Mangels an Seeding-Partikeln in der Grenzschicht und der Größe des regulären Gitters von 2 mm keine genauere Aussage über die Topologie dieser Wirbel getroffen werden.

3.2.2 Entwicklung der Wirbel

Abbildung 10 zeigt die zeitlich-räumliche Entwicklung der bekannten Wirbelgruppe. Zu diesem Zweck wurden die Wirbelkerne mit λ_2 -Isoflächen identifiziert und mit ihrer y -Position eingefärbt, um deren jeweilige 3D-Position zu verdeutlichen. Des Weiteren wurden asymmetrische Isoflächen der normierten, wandnormalen Wirbelstärke hinzugefügt, um zwischen individuellen Wirbeln zu unterscheiden. Bei t_0 befinden sich die Strukturen A bis E innerhalb derselben Ebene. Wirbel A, C und E sind im stets gleichen Abstand von $0,15 c$ zueinander entlang einer fiktiven Linie angeordnet. In einem ähnlichen Abstand zueinander befinden sich die Wirbel B und D ca. $0,1 c$ stromabwärts davon, jedoch diagonal versetzt. Bis $t_0 + 3 \Delta t$ ($\Delta t = 0,138$ s) haben alle Wirbel ihre maximale Größe erreicht und sich leicht stromab bewegt. Außerdem hat sich eine neue größere Struktur F in den Bildbereich geschoben. Zwischenzeitlich verlagert sich C zunehmend zu D. Bis $t = t_0 + 7 \Delta t$ ist es jedoch vollständig aus dem Messvolumen in y -Richtung abgesunken. Während dieses Vorgangs haben sich die übrigen Wirbel weiter stromab verschoben. Innerhalb der oberflächenparallelen Ebene ändern sie dabei ihre Positionen untereinander nicht merklich. Betrachtet man die Graufärbungen, so ist zu erkennen, dass F in y -Richtung weiter ausgedehnt ist als die übrigen Wirbel. Schließlich kann man unter Beachtung der Konvektionsgeschwindigkeit und dem Abstand der Wirbel zueinander die Frequenz des Wirbelabwerfens abschätzen. Vergleicht man die Wirbelkonstellationen der ersten beiden Frames (t_0 und $t_0 + \Delta t$), so hat sich Wirbel A beispielsweise $0,05 c$ (15 mm) weit bewegt. Mit einer Aufnahmezeit von $f = 7,25$ Hz beträgt die Konvektionsgeschwindigkeit somit $u_k = 0,11$ m/s, was wiederum einer Frequenz von 7,3 Hz für das Wirbelabwerfen entspricht. Im weiteren Verlauf der Experimente wurde die großskalige Struktur F wiederholt detektiert und daher genauer betrachtet. In Abbildung 11 wurden die

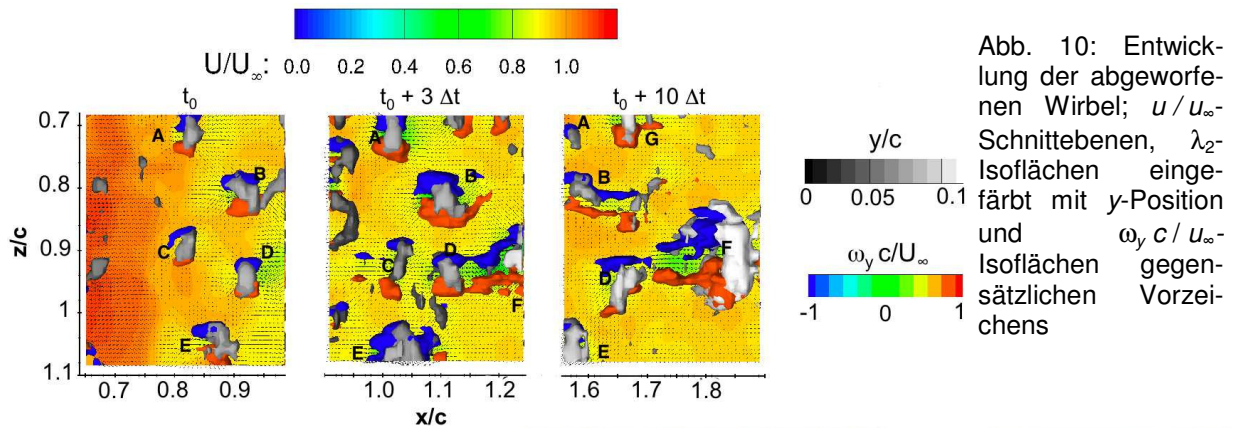


Abb. 10: Entwicklung der abgeworfenen Wirbel; u/u_∞ -Schnittebenen, λ_2 -Isoflächen eingefärbt mit y -Position und $\omega_y c / U_\infty$ -Isoflächen gegensätzlichen Vorzeichens

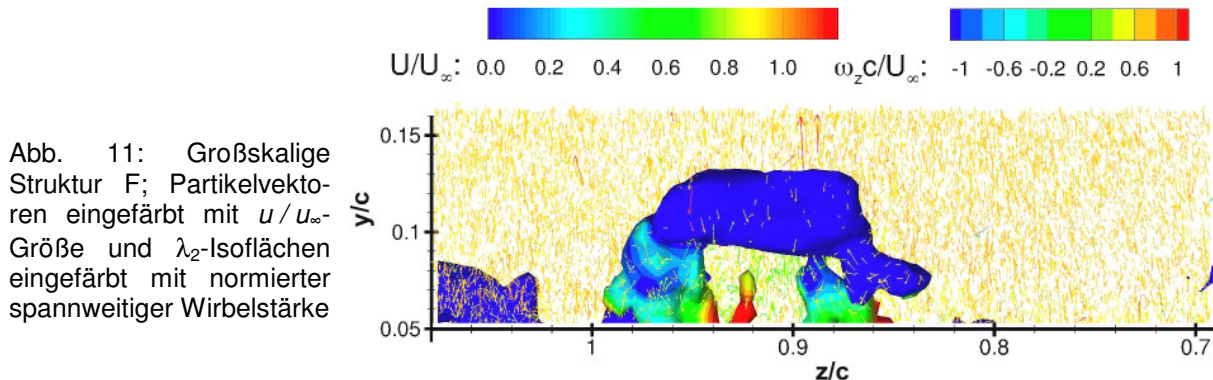


Abb. 11: Großskalige Struktur F; Partikelvektoren eingefärbt mit u/u_∞ -Größe und λ_2 -Isoflächen eingefärbt mit normierter spanntweiger Wirbelstärke

λ_z -Isoflächen mit der normierten, spannweitenigen Wirbelstärke eingefärbt. Zusätzlich wurden Partikelvektoren eingefügt. Die Ausdehnung der Struktur in y - und z -Richtung (ca. $0,12 c$) ist nun klar ersichtlich. Unterhalb von $y = 0,05 c$ enthält das Messvolumen nahezu keine Partikelvektoren, da es von der Laserbeleuchtung abgeschirmt wurde. Daher wurden die Isoflächen unterhalb dieses Werts ausgeblendet. Folglich kann keine präzise Aussage über die Topologie dieses Wirbels getroffen werden, außer dass er im messbaren Bereich eine Halbringform besitzt, wie sie von Zhang et al. 2008 beobachtet wurde.

4 Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war die quantitative Untersuchung von instationären, zusammenhängenden Wirbelstrukturen, die im Bereich des Wiederanlegens der Strömung in einer LSB entstehen. Hierfür wurde die V3V-Technik von TSI verwendet. Die Experimente wurden in einem Wasserschleppkanal bei $Re = 60.000$ und $\alpha = 4^\circ$ durchgeführt. Zuerst wurde der Einfluss von Rand- und Startwirbel auf die Zweidimensionalität der Strömung untersucht. Anschließend wurden die Störeinflüsse durch den Versuchsaufbau minimiert und eine zweidimensionale Anströmung untersucht. Währenddessen wurde bei ca. 70 % der Profiltiefe eine Gruppe von Wirbeln detektiert, die regelmäßig angeordnet (Schachbrett) sind und in Wechselbeziehung mit einer Quellen- und Senkenverteilung stehen. Die weitere Entwicklung der abgeworfenen Wirbel wurde zeitlich aufgelöst. Zusätzlich wurde eine großskalige Struktur detektiert. Obwohl weder die Grenzschicht noch die genauen Dynamiken dieser Struktur, die teilweise außerhalb des beleuchteten Volumens lag, aufgelöst werden konnten, liefert diese Untersuchung einen wesentlichen Beitrag den Wahrheitsgehalt der spekulativen Vorstellungen vorhergehender Untersuchungen zu erfassen.

Dankesworte

Die Autoren danken Prof. Münch und Hr. Banachowicz von der Universität der Bundeswehr München für die Bereitstellung der Versuchsanlage und ihre technische Unterstützung.

Literatur

- Gaster, M., 1966: „The Structure and Behaviour of Laminar Separation Bubbles“, AGARD, CP-4, pp. 813-854
- Horton, H., 1968: „Laminar Separation Bubbles in Two and Three Dimensional Incompressible Flow“, Ph.D. Thesis, Department of Aeronautical Engineering, Queen Mary College / University of London
- Hain, R., Kähler, C., 2005: „Advanced Evaluation of Time-Resolved PIV Image Sequences“, 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, USA, 21.-23. September
- Zhang, W., Hain, R., Kähler, C., 2008: „Scanning PIV Investigation of the Laminar Separation Bubble on a SD7003 Airfoil“, Experiments in Fluids, 45, pp. 725-743
- Hori, T., Sakakibara, J., 2004: „High-Speed Scanning Stereoscopic PIV for 3D Vorticity Measurement in Liquids“, Measurements Science and Technology, 15, pp. 1067-1078
- Elsinga, G., Scarano, F., Wieneke, B., Oudheusden, B., van, 2006: „Tomographic Particle Image Velocimetry“, Experiments in Fluids, 41, pp. 933-947
- Burgmann, S., Dannemann, J., Schröder, W., 2007: „Time-Resolved and Volumetric PIV Measurements of a Transitional Separation Bubble on an SD7003 Airfoil“, Experiments in Fluids, 44, pp. 609-622
- Troolin, D., Longmire, E., 2008: „Volumetric 3-Component Velocimetry Measurements of Vortex Rings from Inclined Exits“, 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, Portugal, 07.-10. Juli
- Hill, D., Troolin, D., Walters, G., Lai, W., Sharp, K., 2008: „Volumetric 3-Component Velocimetry Measurements of the Turbulent Flow in Stirred Tank Reactors“, 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, Portugal, 07.-10. Juli