Zeitaufgelöste PIV-Messungen an einem schwingenden SD7003-Profil bei $\mathrm{Re} = 6 \times 10^4$

Daniel Nerger, Christian J. Kähler, Rolf Radespiel
Institut für Strömungsmechanik, TU Braunschweig,
Bienroder Weg 3, 38106 Braunschweig

1. Einleitung

Die Idee den Schlagflug als Antrieb für Fluggeräte zu benutzen gibt es schon so lange wie den Traum vom Fliegen selbst. Auf Grund mäßiger Erfolge, gegenüber dem Propellerantrieb, geriet dieses Antriebskonzept jedoch zunächst in den Hintergrund. Im Zusammenhang mit der Entwicklung von Mikroflugzeugen, bei denen sich auf Grund der geringen Reynoldszahl die Frage nach dem optimalen Antriebskonzept neu stellt, rückt der Schlagflug wieder zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses. Um die aerodynamischen Phänomene des Schlagfluges systematisch zu untersuchen, wurde am Wasserkanal des Institutes für Strömungsmechanik ein Versuchsaufbau realisiert, mit dem phasenstarre und zeitaufgelöste PIV-Messungen an einem SD7003-Profil durchgeführt wurden. Untersucht wurde die reine Hubbewegung und die kombinierte Hub- und Nickbewegung, wie sie in ähnlicher Weise bei Vögeln und Insekten beobachtet werden kann.

2. Versuchsaufbau

Die Profiluntersuchungen wurden im Wasserumlaufkanal des ISM durchgeführt. Der Kanal besitzt eine 1000 mm lange, 250 mm breite und 250 mm hohe Meßstrecke und ein Kontraktionsverhältnis von 4:1. Für die Messungen wurden aus Acrylglas und GFK gefertigte Profile verwendet. Um eine erzwungene Hubbewegung und eine freie, strömungsinduzierte Nickbewegung des Profils zu ermöglichen, wurde der in Abb. 1 dargestellte Apparat konstruiert. Dieser besteht aus einem linear geführten Schlitten, an dem das Profil mit der Saugseite nach unten befestigt wird. Durch eine im Schlitten integrierte Kugellagerung wird die freie Nickbewegung ermöglicht. Diese kann mittels einer Reibscheibe stufenlos gedämpft und bei Bedarf blockiert werden. Die Bewegung erfolgt über ein mit einer Exenterscheibe verbundenes Pleuel, das durch einen Gleichstrom-Elektromotor mit Zahnriemengetriebe angetrieben wird. Es können Hubfrequenzen bis 10 Hz und Amplituden bis ± 20 mm erreicht werden. Um eine gleichförmige Bewegung über eine Periode zu erreichen, verfügt der Apparat über eine Ausgleichsmasse an der Riemenscheibe. Für die Strömungsfelduntersuchungen wurde ein Standard- und ein zeitaufgelöstes PIV System eingesetzt. Das Standard PIV

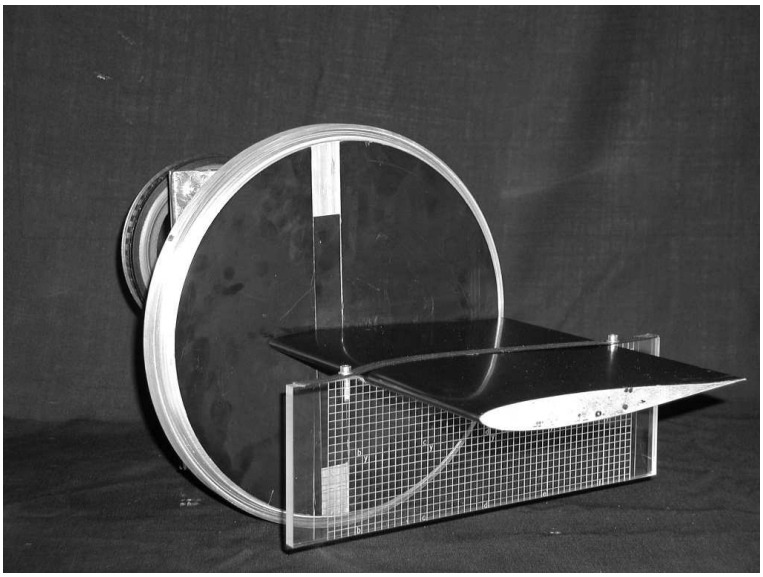

Abbildung 1: Schlagapparat mit Profil und Kalibriergitter

System bestand aus zwei nebeneinander angeordneten CCD Frame-Transfer Kameras (*PCO Sensicam*) und einem Nd:YAG Doppelpulslaser (*Quantel Brilliant*) mit einer Ausgangsleistung von 150 mJ pro Laserpuls (Pulsdauer 5 ns). Für die zeitaufgelösten Messungen wurde ein kontinuierlicher arbeitender Ar^+-Laser (*Spectraphysics*) mit einer maximalen Ausgangsleistung von 6 W verwendet und eine Hochgeschwindigkeitskamera (*Photron FastCam Ultima APX*) mit 10-Bit-Monochrom CMOS Sensor. Die Kameras wurden auf einer 3D-Traverse montiert, um beliebige Bereiche der Meßstrecke untersuchen zu können, ohne das PIV System neu auszurichten. Für die phasenstarren Messungen am bewegten Profil wurde am Schlagapparat mit einer Lichtschranke ein Signal abgenommen und mit Hilfe eines Funktionsgenerators (*Hameg HM8131-2*) um einen gewünschten Phasenwinkel verschoben. Das phasenverschobene Signal diente zur Triggerung einer Sequencerkarte, mit der die Synchronisation der Kameras und Laser erfolgte. Zur optischen Überwachung wurden das Lichtschrankensignal und das Signal vom Funktionsgenerator auf einem Oszilloskop (*LeCroy 9374L*) angezeigt und Mittelwert, Höchst- und Kleinstwert und Standardabweichung über alle Impulse bestimmt. Als Seeding wurden Glashohlkugeln (*3M Scotchlite*) mit einem Durchmesser von $30 - 100\,\mu$s verwendet. In Abb. 2 ist der schematische Aufbau des Systems für die phasenstarren Messungen dargestellt.

3. Voruntersuchungen

In vorhergehenden Arbeiten am Wasserkanal war ermittelt worden, daß die für das Profil charakteristische Laminarblase nicht mit den Angaben aus der Literatur übereinstimmte [1]. Da dies im Wesentlichen auf den hohen Turbulenzgrad des Wasserkanals zurückzuführen ist, wurde die Position des Gleichrichters und der Beruhigungsstrecke korrigiert, so daß sich die Beruhigungsstrecke nun direkt vor der Düse befindet. Zur Vergleichmäßigung der Strömung wurde darüber hinaus ein Sieb eingesetzt. Das

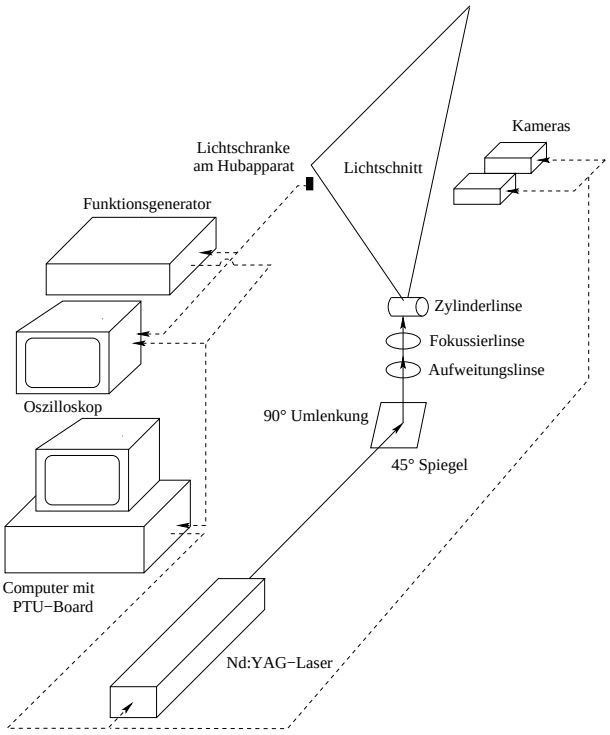

ABBILDUNG 2: Schematischer Versuchsaufbau mit Nd:YAG-Laser

Sieb besitzt eine Maschenweite von 3 mm und einen Drahtdurchmesser von $0,5$ mm und wurde 200 mm hinter dem Gleichrichter und 300 mm vor der Düse positioniert. Die Auslegung des Siebes und die Vorhersage der Turbulenzgradverbesserung erfolgte mit Theorien für Windkanäle von Eckelmann [2] und Mehta [3]. Hiernach sollte der resultierende Turbulenzgrad zwischen $1,1 - 1,2\%$ nach [2] bzw. $1,4 - 1,6\%$ nach [3] liegen. Bei durchgeführten Turbulenzgradmessungen mit PIV ergab sich ein aktueller Wert der Turbulenz von etwa 1,1% (vgl. Abb. 3) über den ganzen Geschwindigkeitsbereich, in Übereinstimmung mit [2]. Um nachzuweisen, daß der Meßfehler des PIV Systems einen vernachläßigbaren Einfluß auf das Messergebnis hat wurde zusätzlich der Turbulenzgrad in Abhängigkeit von der Partikelbildverschiebung bei konstanter Zuströmgeschwindigkeit U_∞ bestimmt, . In Abb. 3 ist zu erkennen, daß mit zunehmender Bildverschiebung der Turbulenzgrad gegen einen Endwert von $\mathrm{Tu} = 0,8\%$ konvergiert. Unter der Voraussetzung, daß sich die Verschiebung mit einem iterativen Multigridverfahren 2. Ordnung (entwickelt von *LaVision*) mit einer Genauigkeit von $0,05$ Px bestimmen läßt, ergibt sich in Abhängigkeit von Δt bei einer mittleren Partikelbildverschiebung von $2,5 - 20$ Px ein relativer Fehler der Verschiebungsmessung von $2 - 0,25\%$. Es ist zu beachten, daß die in die Messungen eingehenden Wellenzahlen zum einen durch die Größe des Messvolumens (≈ 1 mm) und zum anderen durch die Größe des Beobachtungsfeldes (52 mm) begrenzt wurden. Um die Stabilität der ungestörten Anströmung nachzuweisen, ist in Abb. 4 der Verlauf der mittleren Geschwindigkeit über 1000 Aufnahmen dargestellt. Im Vergleich zu einem mit einer rotierenden Scheibe geshutterten Ar^+-Laser, wie er in vorhergehenden Messungen

verwendet wurde, ist auf Grund einer höheren Genauigkeit des Pulsabstandes eine deutliche Verbesserung zu erkennen. Ein weiterer Grund der gegen die Verwendung des cw-Lasers spricht, ist die Tatsache, dass sich die Shutterscheibe nur schwer auf externe Ereignisse triggern lässt. Auch mit dem zeitaufgelösten PIV-System konnten

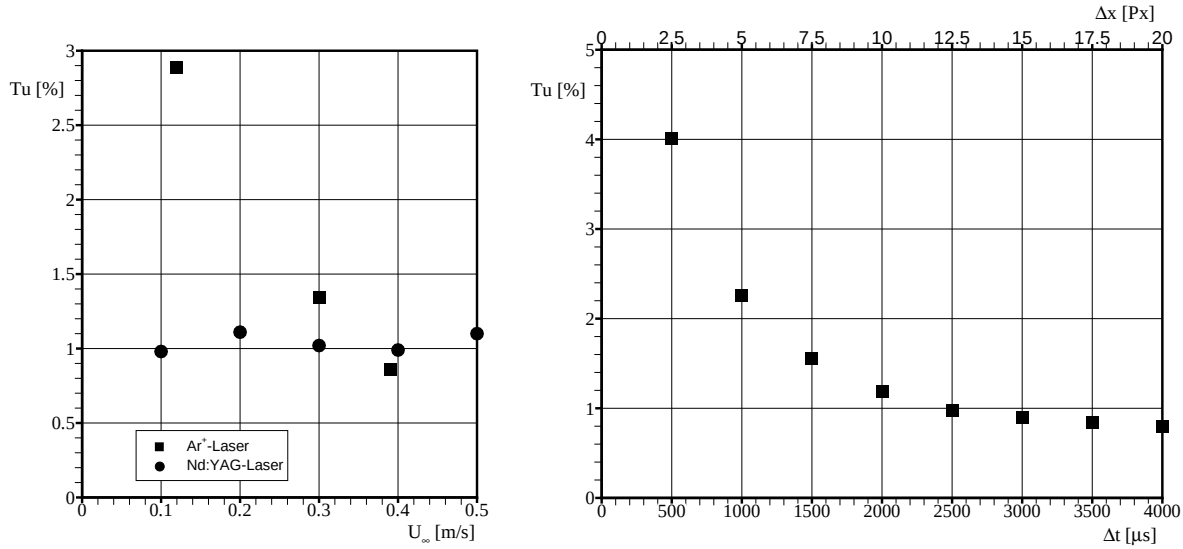

Abbildung 3: Abhängigigkeit des Turbulenzgrades von der Zuströmgeschwindigkeit bei konstanter Partikelbildverschiebung $\Delta x = 12\,\mathrm{Px}$ (links) und der Partikelbildverschiebung bei konstanter Zuströmgeschwindigkeit $U_\infty = 0,3\,\mathrm{m/s}$ (rechts)

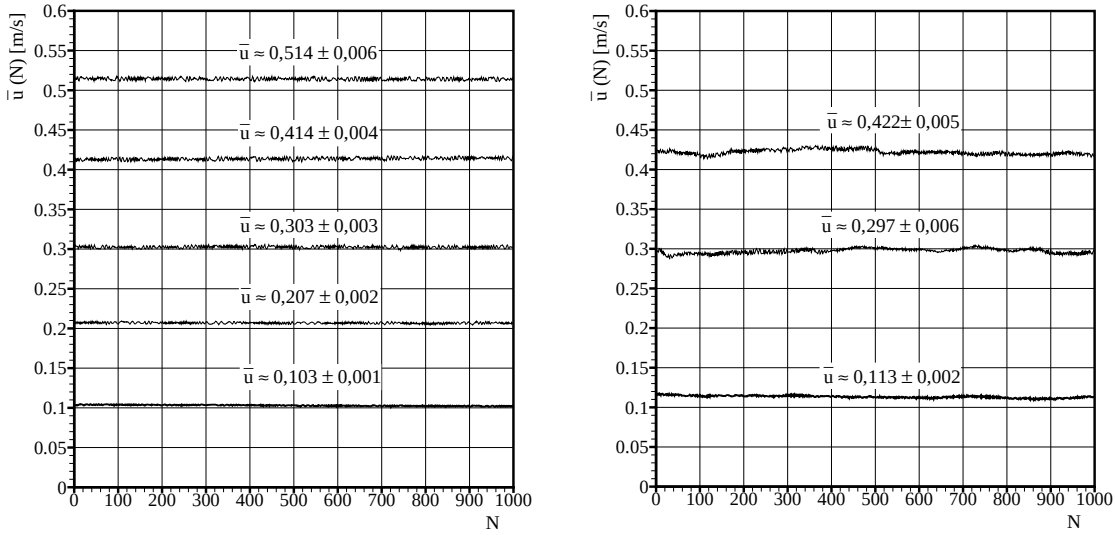

Abbildung 4: Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ in Abhängigkeit von der Bildzahl gemessen mit dem Doppelpuls-Nd:YAG-Laser (links) und dem Ar^+-Laser mit Shutterscheibe (rechts)

keine zuverlässigen Tu-Messungen durchgeführt werden, da bei diesem auf Grund der Pixelgröße von $17,5\,\mu\mathrm{m}$ (*PCO* Kamera mit CCD-Chip ($6,7\,\mu\mathrm{m}$) die Partikelbilder nicht ausreichend abgetastet werden. Zur Visualisierung dieses Effektes wurden die aufgenommenen Einzelbilder mit unterschiedlichem Zeitabstand symmetrisch um jedes n-te Bild ausgewertet, d. h. n-1/n+1, n-2/n+2..., wobei $n = 5, 15, 25$ ... Der Zeitabstand

variierte dabei zwischen $\Delta t = 1000\,\mu\text{s} - 4000\,\mu\text{s}$. Für jeden Fall ergaben sich insgesamt 418 Bilder. Für diese wurde nun das Histogramm in Abhängigkeit vom Zeitabstand bzw. der Partikelbildverschiebung und von der Geschwindigkeit bestimmt. In Abb. 5 sind die beiden Histogramme dargestellt. Die Intervallbreite beträgt $0,005\,\text{Px}$ bzw. $0,005\,\text{m/s}$. In der linken Abbildung ist die zunehmende Dynamik mit größer werdenden Δt zu erkennen. Obwohl die Messgenauigkeit mit zunehmender Dynamik ansteigt, ist zu erkennen, daß ganzzahlige Verschiebungen wahrscheinlicher sind. Dieser als Peaklocking bekannte Effekt, beruht im Wesentlichen auf der unzureichenden Abtastung der Partikelbilder. Für die Geschwindigkeitsverteilung bedeutet dies, daß diese stark vom gewählten Δt abhängt, wie in Abb. 5 rechts dargestellt. Während das Verhältnis von Partikelbild- zu Pixelgröße bei der *PCO* deutlich über einem gewünschten Minimum von 1,5 lag, betrug dieses bei der *APX* für etwa 90% der Partikelbilder weniger als diesen Wert. Deutlich verschärft wird dieses Problem bei PIV Messungen in Luft, gemäß $d_\tau = \sqrt{(Md_\text{p})^2 + d_\text{diff}^2}$, da auf Grund der geringeren Tracerpartikelgröße d_p der Anteil der geometrischen Abbildung Md_p gegenüber der beugungsbegrenzten $d_\text{diff} = 2,44 f_\sharp (M+1)\lambda$ vernachlässigbar ist.

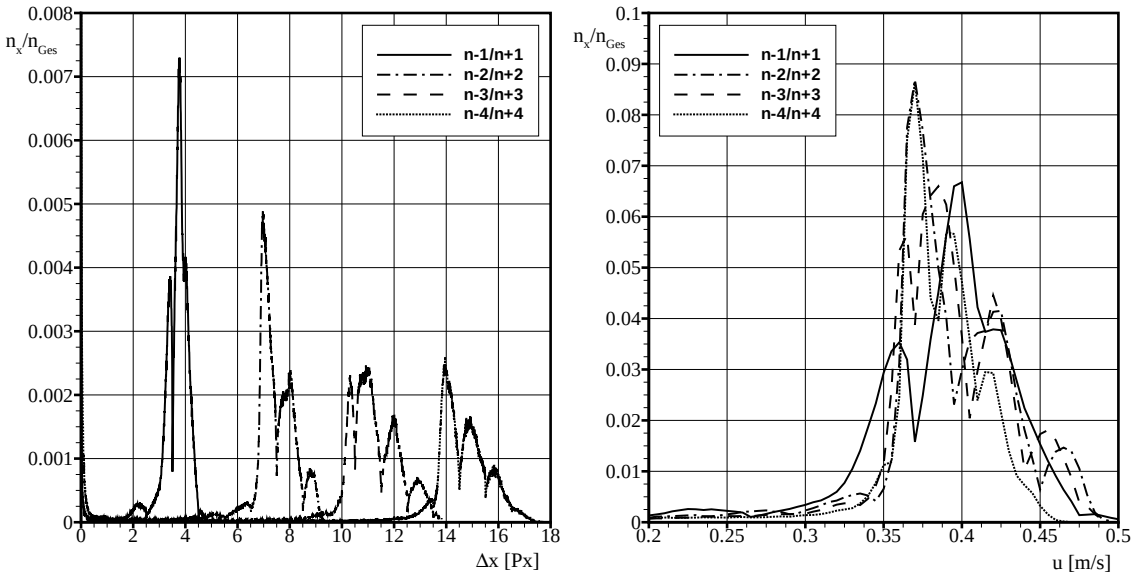

Abbildung 5: Histogramm der zeitaufgelösten PIV Aufnahmen in Abhängigkeit der Partikelverschiebung (links) und der Geschwindigkeit in Strömungsrichtung (rechts)

4. Strömungsstruktur bei stationärer Profilumströmung

Hauptmerkmal des verwendeten SD7003-Profils ist das Auftreten einer laminaren Ablöseblase, über die die Transition von laminarer zu turbulenter Grenzschicht stattfindet. Detaillierte Grundlagenuntersuchungen über Transitionsvorgänge und Strömungsstrukturen der laminaren Ablöseblase in einer 2D-Kanalstömung sind in jüngerer Zeit von Rist et al. [4], [5] angegeben worden. Danach wird das Transitionsverhalten von angefachten 2D Tollmien-Schlichting Wellen in der Grenzschicht stromauf der Blase und in der Scherschicht der Blase dominiert. Auf

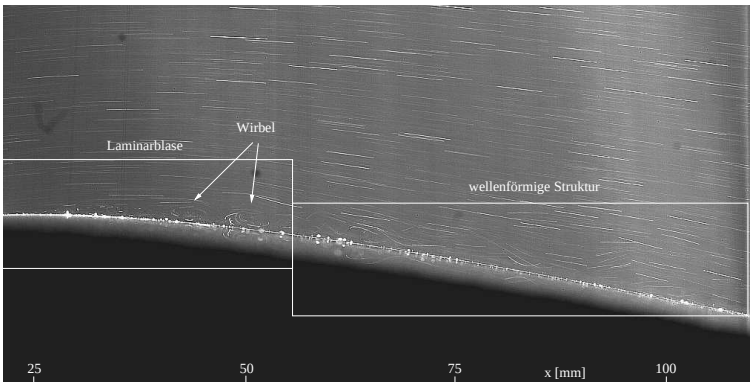

ABBILDUNG 6: Langzeitbelichtung mit der CMOS-Kamera und Ar^+-Laser im Bereich der Ablöseblase, $\alpha = 8°$, $\Delta t = 1667\,\mu$s , $\Delta t_L = 1667\,\mu$s

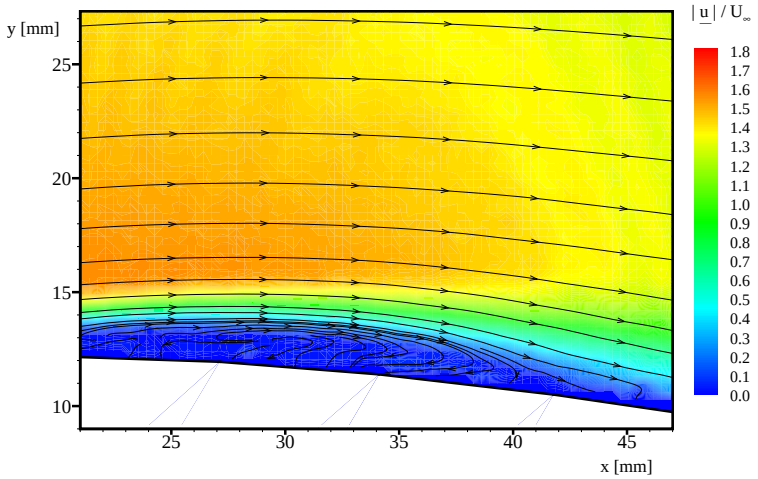

ABBILDUNG 7: Detailmessungen im Bereich der laminaren Ablöseblase mit der CCD-Kamera und Nd:YAG-Laser, $\alpha = 8°$, $\Delta t = 2500\,\mu$s

diesen primären Strukturen entwickeln sich über der Blase sehr instabile höhere Moden und es tritt ein pulsierender Zerfall in turbulente Strukturen auf. Mit dem hier beschriebenen Versuchsaufbau soll untersucht werden, ob ähnliche Strömungsvorgänge auch in den Ablöseblasen eines Tragflügelprofils auftreten. Um die Struktur und Dynamik der Blase zu beobachten, wurden im stationären Fall bei einem Anstellwinkel von $\alpha = 8°$, einer Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 0,3\,$m/s und einer resultierenden Reynoldszahl $\mathrm{Re} = 6 \times 10^4$ Messungen durchgeführt. Zunächst erfolgten zeitaufgelöste Aufnahmen mit der *Photron APX Kamera* mit 50 mm *Nikon* Objektiv. Es wurden zum einen Langzeitbelichtungen mit 60 Hz und 1/60 s Belichtungszeit durchgeführt und zum anderen PIV Aufnahmen mit 2000 Hz und 1/2000 s Belichtungszeit. Im Anschluß wurden mit einer *PCO Sensicam* und einem *Sigma* 105 mm Makroobjektiv hochauflösende PIV-Messungen im Bereich der Ablöseblase durchgeführt. In Abb. 6 ist beispielhaft ein Einzelbild der Langzeitbelichtung dargestellt und in Abb. 7 das ausgewertete und über 500 Bilder gemittelte Geschwindigkeitsfeld mit überlagertem

Stromlinienbild. Wie in Abb. 6 zu sehen, löst die laminare Scherschicht direkt am Bildbeginn ab. Unter dieser liegt ein keilförmiger Bereich, der sich bis zum Bereich der dicksten Stelle der Blase bei etwa $x = 35\,\mathrm{mm}$ erstreckt und in dem sich ein laminarer Wirbel befindet. Dieser Keil wird zum einen durch die Profilkontur und zum anderen durch die abgelöste Grenzschicht begrenzt. An der dicksten Stelle findet der Ubergang zur turbulenten Scherschicht statt, was das Wiederanlegen der Strömung bewirkt. Der Anlegevorgang und damit das Schließen der Blase ist bei ca. $x = 45\,\mathrm{mm}$ beendet. An der dicksten Stelle ist die Blase ca. 3 mm hoch. Die Länge beträgt insgesamt ca. 30 mm. Damit nimmt die abgelöste, laminare Grenzschicht ca. 60% der Gesamtlänge der Blase ein. Im Innern der Blase lassen sich neben der laminaren Rückströmung zwei wirbelartige Strukturen erkennen, die sich beide mit dem Uhrzeigersinn drehen. Beim Betrachten mehrerer Bilder fällt auf, daß der stromauf gelegene Wirbel sehr instabil ist und schnell wieder zerfällt. Der stromab gelegene Wirbel dagegen ist kontinuierlich vorhanden, verändert aber ständig seine Stärke und Lage. Die Ausdehnung der Blase verändert sich durch das zeitliche Verhalten des Wirbels nur geringfügig und auch der Teil der Laminarblase bis zur dicksten Stelle, also der Bereich der abgelösten laminaren Grenzschicht ist dabei nahezu stationär. Im Nachlauf der Blase ist eine wellenförmige Partikelbewegung zu beobachten, die sich auch in den hochauflösenden PIV-Messungen wiederfinden läßt. Die maximale Amplitude der Wellenbewegung befindet sich ungefähr in der Mitte der Grenzschicht und nimmt bei Annäherung an das Profil bzw. beim Übergang in die Außenströmung ab. Aus den vorhandenen Ergebnissen läßt sich noch nicht erkennen, ob die Ursache der Wellenbewegung abschwimmende Wirbel sind.

5. Instationäre Profilumströmung

Im Rahmen der Untersuchung der instationären Profilumströmung wurde zum einen eine reine Hubbewegung mit einem Anstellwinkel von $\alpha = 0°$ bzw. $\alpha = 4°$ und zum anderen eine kombinierte Hub- und Nickbewegung realisiert. Die Nickbewegung erfolgte strömungsinduziert, wurde aber in ihrer Amplitude auf $\Theta = 0°$ bis $-14°$ begrenzt. Dies ist notwendig, da sonst keine Schuberzeugung möglich ist. Für alle untersuchten Fälle waren die Hubamplitude von $z = 20\,\mathrm{mm}$ und die Hubfrequenz von $f = 1\,\mathrm{Hz}$ konstant. Dadurch ergab sich zusammen mit $l = 200\,\mathrm{mm}$ und $U_\infty = 0,3\,\mathrm{m/s}$ eine reduzierte Frequenz von $k = \pi f l/U_\infty = 2,1$. Die reduzierte Frequenz stellt einen wichtigen Ähnlichkeitsparameter für den Vergleich instationärer Vorgänge dar. Für jede Meßreihe wurden insgesamt vier Kameras nebeneinander positioniert (2×2), so daß sich insgesamt ein Beobachtungsfeld von $412\,\mathrm{mm} \times 83\,\mathrm{mm}$ ergibt, mit 20480 Geschwindigkeitsvektoren. Es wurden an jeweils 72 Meßpunkten im Phasenabstand von 5° je 50 Bilder aufgenommen. Durch diese phasenstarren Messungen konnte das zeitliche Verhalten der Profilumströmung mit hoher räumlicher Auflösung und Meßgenauigkeit beobachtet werden. Dazu gehörte die Veränderung der Staupunktlage, die Entstehung und Entwicklung von Wirbeln durch Strömungsablösungen und des Startwirbels, sowie dessen Abschwimmen im Nachlauf des Profils. Bei der Hubbewegung mit $\alpha = 0°$ und der kombinierten Bewegung war die Strömung während der ganzen Periode immer

anliegend, obwohl der effektive Anstellwinkel, bei dem die Strömung im stationären Fall ablöst ($\alpha \approx 12°$) maximal doppelt so groß war. Bei einem Anstellwinkel von $\alpha = 4°$ tritt dagegen sogenannte dynamische Ablösung auf. Die einzelnen typischen Phasen des hier vorhandenen sog. Deep Stall lassen sich im Verlauf der Bewegung wiederfinden. Dazu gehören 1. anliegende Strömung, 2. Ausbildung des Vorderkantenwirbels, 3. das Abfließen des Wirbels nach der Ablösung und 4. das Wiederanlegen. In den Abb. 8 und 9 sind ausgewählte Phasenwinkel für zwei untersuchte Fälle dargestellt. Es läßt sich zusammenfassend sagen, daß durch die Überlagerung der Hubbewegung mit einer Nickbewegung ein größerer Schub erzeugt werden kann, ohne daß die Strömung beginnt abzulösen. Dies wird dadurch erreicht, daß ein sehr großer induzierte Anstellwinkel durch die Hubbewegung eingestellt werden kann und dadurch die Schubkomponente, aber gleichzeitig der effektive Anstellwinkel des Profils durch die Nickbewegung auf einen unkritischen Wert reduziert wird.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit sind phasenstarre und zeitaufgelöste PIV Messungen an einem stationären und einem bewegtem Profil im Wasserkanal beschrieben. Untersucht wurde das SD7003-Profil bei einer konstanten Zuströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 0,3\,\mathrm{m/s}$ und einer resultierenden Reynoldszahl von $\mathrm{Re} = 6 \times 10^4$. Die Profilbewegung wurde mit einem Schlagapparat realisiert, der eine erzwungene Hubbewegung und eine strömungsinduzierte Nickbewegung erlaubt. Mit dem realisierten PIV-Aufbau konnte die Struktur und Dynamik der auftretenden laminaren Ablöseblase beobachtet werden. Des weiteren konnte gezeigt werden, daß Hochgeschwindigkeitskameras mit CMOS Sensoren im gegenwärtigen Entwicklungsstadium nur bedingt für PIV Messungen geeignet sind. Die Untersuchungen am bewegten Profil zeigen, daß bei einer reinen Hubbewegung mit einem Anstellwinkel von $\alpha = 4°$ dynamische Ablösung auftritt, wobei der effektive Anstellwinkel deutlich über dem Wert der stationären Ablösung liegt. Um eine möglichst hohe Schuberzeugung ohne die Begrenzung durch Ablöseerscheinungen zu realisieren, besteht eine Möglichkeit in der Überlagerung der Hubbewegung mit einer Nickbewegung. Hierbei ist eine strömungsinduzierte Nickbewegung mit Begrenzern einfacher zu realisieren, als eine aktive Nickeinrichtung.

[1] M. S. Selig, J. F. Donovan, D. B. Fraser, *Airfoils at low speeds*, H. A. Stokely (publisher), Soartech 8, Virginia, USA, 1989

[2] H. Eckelmann, *Einführung in die Strömungsmesstechnik*, Teubner Verlag, Stuttgart, 1997

[3] R. D. Mehta, *The Aerodynamic Design of Blower Wind Tunnels with Wide-Angle Diffusers*, Prog. Aerospace Science, Vol. 18, pp. 59-120, 1977

[4] M. Lang, O. Marxen, U. Rist, S. Wagner, *Experimental and numerical investigations on transition in a laminar separation bubble*, Notes in Numerical Fluid Mechanics, Vol. 77, Springer Verlag, 2001

[5] O. Marxen, U. Rist, S. Wagner *The effect of spanwise-modulated disturbances on transition in a 2-d separated boundary layer*, AIAA Paper 2003-0789, 2003

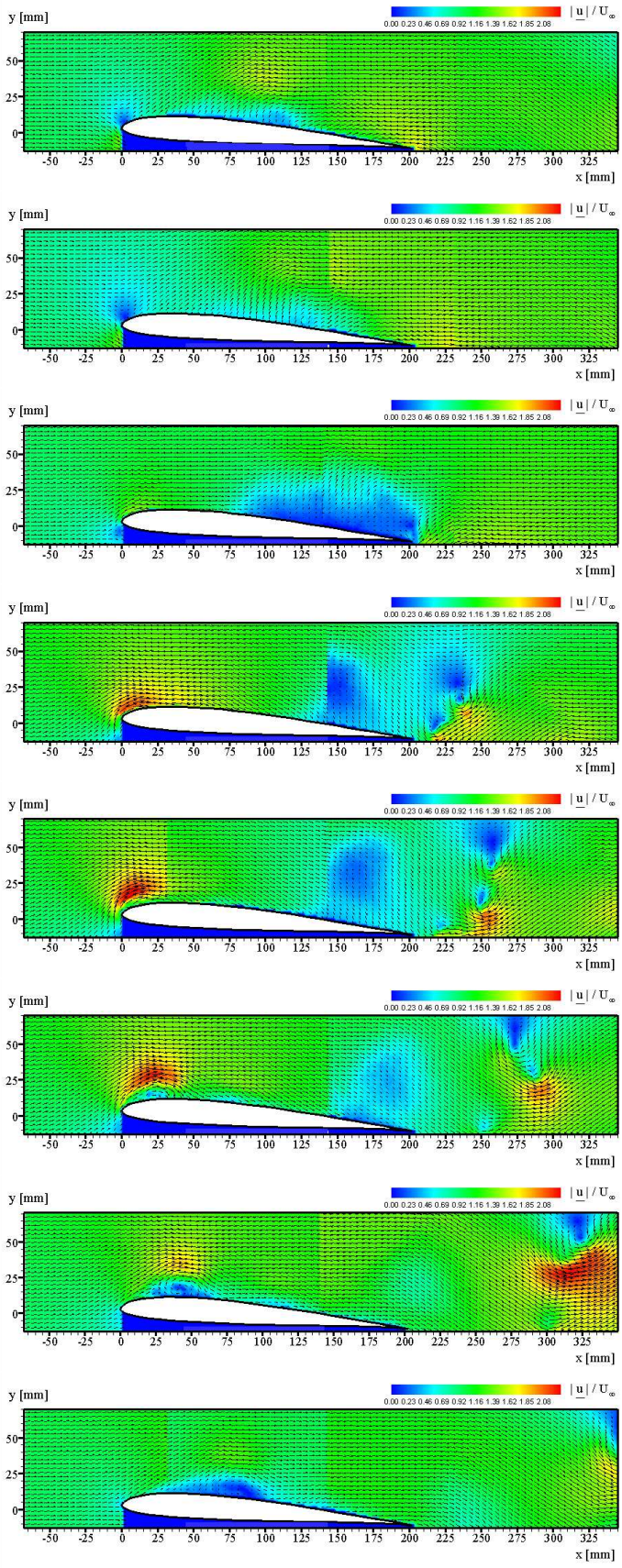

Abbildung 8: Geschwindigkeitsfelder für eine reine Hubbewegung des Profils bei $\alpha = 4°$, Phasenwinkelabstand jeweils $\varphi = 45°$, oben beginnend bei $\varphi = 0°$

41.10

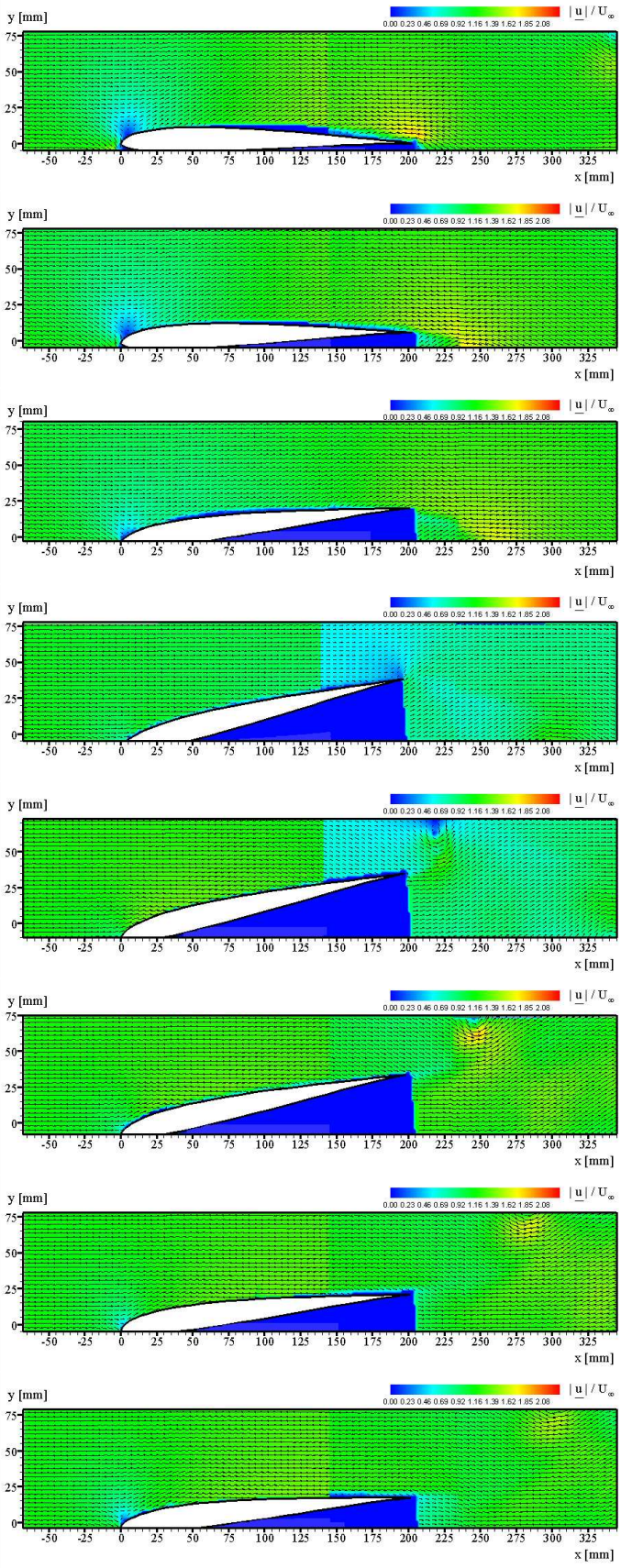

ABBILDUNG 9: Geschwindigkeitsfelder für eine kombinierte Hub- und Nickbewegung des Profils, Phasenwinkelabstand jeweils $\varphi = 45°$, oben beginnend bei $\varphi = 0°$