

WINDKANALUNTERSUCHUNG EINER LAMINAREN ABLÖSEBLASE IN NASENBEREICH EINES PROFILS MIT HILFE VON μ PIV BEI $Re = 660000$

WIND TUNNEL MEASUREMENT OF A LEADING EDGE SEPARATION BUBBLE ON AN AIRFOIL AT $Re = 660000$ USING μ PIV

Martin Kruse, Ralf Wokoeck, Rainer Hain

Institut für Strömungsmechanik
Technische Universität Braunschweig
Bienroder Weg 3
38106 Braunschweig

Schlagworte: Laminare Ablöseblase, Transition, μ PIV
Key words: Laminar Separation Bubble, Transition, μ PIV

Zusammenfassung

Dieser Beitrag berichtet über Untersuchungen an einer laminaren Ablöseblase mittels mikroskopischer Particle Image Velocimetry (μ PIV). Die Messungen wurden an einem Profilmodell im Windkanal bei einer Reynoldszahl von 660000 durchgeführt. Neben der räumlichen Auflösung dieses kleinskaligen Strömungsphänomens stellt die Dynamik des betrachteten Strömungsfelds hohe messtechnische Anforderungen. Der Bericht adressiert technische Problemstellungen wie die thermische Belastung des Modells und diffuse Wandreflexionen. Vorgestellt wird ein Verfahren zur Korrektur von Verschiebungen des Bildbereichs in Folge von Modellvibrationen. Mögliche Ursachen für Defizite in der erzielten Bildqualität hinsichtlich optischer Abberationen und geringer Seedingdichte werden diskutiert. Abschließend erfolgt ein Vergleich zwischen Messergebnissen und Resultaten einer numerischen Simulation der Ablöseblase.

Einleitung

Das Auftreten laminarer Ablöseblasen zählt zu den typischen Phänomenen bei Reynoldszahlen $Re < 3 \cdot 10^6$. Charakteristisch ist hierbei das druckinduzierte Ablösen einer laminaren Grenzschicht mit nachfolgendem turbulentem Wideranlegen. Im zeitlichen Mittel entsteht so ein geschlossenes Rezirkulationsgebiet, das als laminare Ablöseblase (LSB) bezeichnet wird. Der Transitionsprozess vollzieht sich primär über die Anfachung von Tollmien-Schlichting Wellen. Im Bereich der freien Scherschicht der ablösenden Grenzschicht werden diese stark angefacht, wobei unmittelbar vor dem Umschlag ein gradueller Übergang in eine Kelvin-Helmholtz Instabilität vorliegt (Rist 1998).

Als berührungsfreies Feldmessverfahren eignet sich die Particle Image Velocimetry in besonderer Weise zur Untersuchung der Transition über laminare Ablöseblasen. Beispiele für einen erfolgreichen Einsatz finden sich u.a. bei Ol et al 2006 und Burgmann et al 2006. Hierbei wurden sog. „mid-chord“ Blasen bei Reynoldszahlen < 100000 untersucht, wie sie z.B. an Laminarprofilen bei moderaten Anstellwinkeln auftreten.

An aerodynamisch hochbelasteten Profilen bzw. Tragflügeln treten LSBs im Bereich des Druckanstiegs ausgeprägter Saugspitzen, also in unmittelbarer Nähe der Vorderkante auf. Im Gegensatz zu „mid-chord“ LSBs beträgt ihre Ausdehnung in der Regel nicht mehr als wenige Prozent der Profiltiefe. Dennoch spielen sie für das Überziehverhalten eine maßgebliche Rolle, da ein Aufplatzen der Blase in Folge unzureichendem turbulentem Impulsaustauschs zu einem abrupten Strömungsabriss über die gesamte Fläche führt. Die Anwendbarkeit von μ PIV auf derartige ‚leading edge‘ – LSBs zeigen Raffel et al, 2006 für eine Reynolds-Zahl von 70000.

Der vorliegende Beitrag beschreibt den Versuch, erstmalig eine laminare Ablöseblase im Nasenbereich eines Profils bei einer Reynoldszahl $Re=660000$ mit Hilfe fernmikroskopischer PIV zu messen. Ziel der Untersuchung im Windkanal ist die Bereitstellung von zeitgemittelten Daten zur Validierung numerischer Vorhersageverfahren mit gekoppelter Transitionsvorhersage.

Voruntersuchungen

Detektion der laminaren Ablöseblase: Bereits in vorangegangenen Messkampagnen wurde an dem Profilmodell das Auftreten einer laminaren Ablöseblase im Nasenbereich nachgewiesen, Wokoeck et al 2006. Ihre Lage konnte durch Ölanstrichbilder (siehe Abb. 1) sichtbar gemacht werden. Ein weiteres Indiz für die Existenz einer LSB liefert die in Abb. 2 gezeigte Druckverteilung. Diese weist ein charakteristisches Plateau im Bereich des Druckanstiegs der Saugspitze auf, das auf die Verdrängungswirkung der LSB zurückzuführen ist.

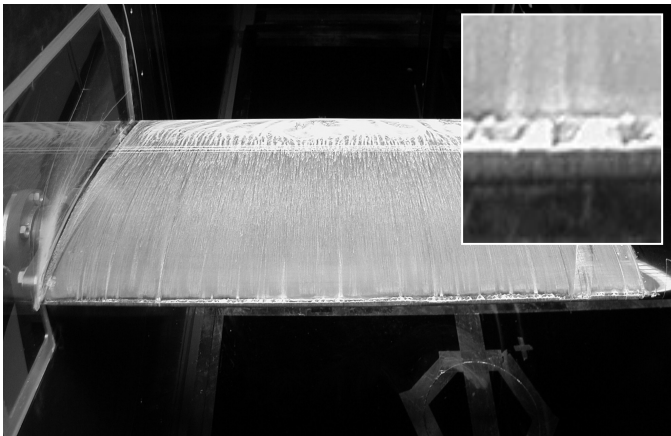


Abb. 1: Ölanstrichbild auf der Saugseite des Profils und Ausschnittsvergrößerung im Bereich der laminaren Ablöseblase

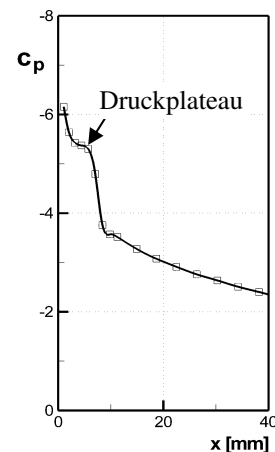


Abb. 2: gemessene Druckverteilung (Saugseite), $\alpha = -12^\circ$, $Re = 660000$

Versuche zum Reflexions- und Schädigungsverhalten unter Laserlichteinwirkung:

Für fernmikroskopische μ PIV - Messungen ist ein eng fokussierter Lichtschnitt sowie eine hohe Laserleistung zur Beleuchtung der Partikel erforderlich. Dies führt zu erheblichen thermischen Belastungen im Bereich beleuchteter Oberflächen. Des Weiteren ist häufig eine starke diffuse Streuung des Laserstrahls an Modelloberflächen zu beobachten, die wandnahe Partikelbilder überstrahlt und eine Auswertung in diesem Bereich verhindert. Eine Möglichkeit zur Reduktion solcher Effekte ist der Einsatz eines streifenden Lichtschnitts. Dieses Vorgehen ist jedoch im vorliegenden Fall mit einer stark konvexen Profilkontur nicht anwendbar. Als alternative Möglichkeit zur Senkung des Temperatureintrags ist der Einsatz von Werkstoffen mit hohem Transmissions- bzw. Reflexionsgrad zu nennen. Diese wurde im Rahmen eines Vorversuchs zum Reflexions- und Schädigungsverhalten verschiedener, für

den Modellbau in Frage kommender Werkstoffe untersucht. Hierzu wurden Materialproben unter 90° mit einem Nd:YAG Laser (532nm) bestrahlt und das konturparallel zur Oberfläche reflektierte Licht mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Ein Beispiel für diese Aufnahmen zeigt Abb. 3 a & b. Aus den Bildern gewonnene Intensitätsspektren lassen eine relative Quantifizierung des diffusen Reflexionsverhaltens zu. Abb. 3 rechts zeigt dies für unterschiedliche Materialproben. Danach reflektieren Faserverbundmaterialien mit schwarz gefülltem Harz nur schwach diffus. In Folge des hohen Absorptionsgrads zeigen sie jedoch von allen Proben das stärkste thermische Schädigungsbild. Klares PMMA (Plexiglas®) weist bei mäßiger Laserleistung erwartungsgemäß nur eine sehr geringe diffuse Streuung auf. Hohe Laserleistung (μ PIV) führt bei längerem Beschuss zu Schäden. Das Material wird blind, reflektiert stark und schmilzt schließlich auf. Metalle wie Stahl und Aluminium sind aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts vergleichsweise unempfindlich gegenüber Schäden durch Laserstrahlung. Frästechnisch gefertigte, geschlichtete Metalloberflächen sind aufgrund der Oberflächenrauigkeit ungeeignet für μ PIV, da sie starke Streuungen verursacht. Poliert man hingegen die Oberfläche spiegelnd, so ist eine nahezu vollständige Rückreflexion des Lichts möglich. Dies vermindert die thermische Belastung erheblich. Zudem erhöht das zurückgestrahlte Licht die Ausleuchtung im Bild befindlicher Partikel. In den Versuchen erwies sich spiegelnd poliertes Aluminium als am geeignetsten. Trotz seines gegenüber Stahl deutlich geringeren Schmelzpunkts erweist es sich auch bei hohen Laserleistungen als schädigungs-resistenter und geringer diffus reflektierend.

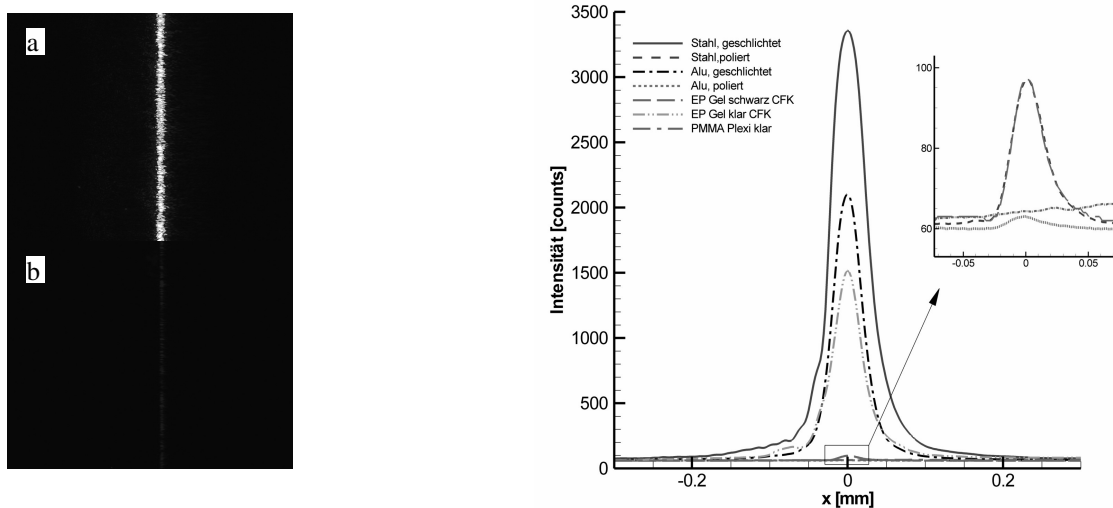


Abb. 3: Versuche zum Reflexions- und Schädigungsverhalten

Links: diffus reflektiertes Licht an einer Stahlprobe: Oberfläche a) geschlichtet, b) spiegelnd poliert
Rechts: Intensitätsspektren diffuser Reflexionen an verschiedenen Werkstoffen und Oberflächen

Versuchsaufbau und Durchführung

Die aerodynamischen Untersuchungen wurden im Modellunterschallwindkanal MUB des ISM durchgeführt. Die Größe der Messtrecke des Kanals Göttinger Bauart beträgt $1,3\text{m} \times 1,3\text{m} \times 6\text{m}$. Der Turbulenzgrad der freien Anströmung ist mit $Tu < 0.2\%$ angegeben. Das Düsenkontraktionsverhältnis beträgt 4,6:1. Der atmosphärisch betriebene Kanal verfügt über einen Kühler, der weitgehend konstante Temperaturen während des Betriebs gewährleistet.

Das eingesetzte generische Höhenleitwerksprofil HGR01 weist eine Spannweite von 1300mm und eine Profiltiefe von $c = 400\text{ mm}$ auf ($\Lambda = 3,25$). Es ist mit einer Klappe über 20% der Profiltiefe ausgestattet, die für die Messungen bei 0° Ausschlagswinkel fixiert wurde. Im Bereich des Mittelschnitts ist es mit 55 Druckmessbohrungen ausgerüstet. Zur Ver-

55.4

meidung thermischer Überbelastung der CFK-Struktur wurde für μ PIV - Untersuchungen ein spiegelnd poliertes Aluminium-Inlay in die Profilnase spaltfrei eingepasst. Dieses ist zur Sicherheit so dimensioniert, dass mögliche Störungen aus dem Bereich der Verklebung keinen Einfluss auf den Messbereich der laminaren Ablöseblase haben. Das Element befindet sich 400mm entfernt von der Windkanalwand und somit außerhalb von Interferenzen zwischen Modell und Kanalwand. Abbildung 4 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus.

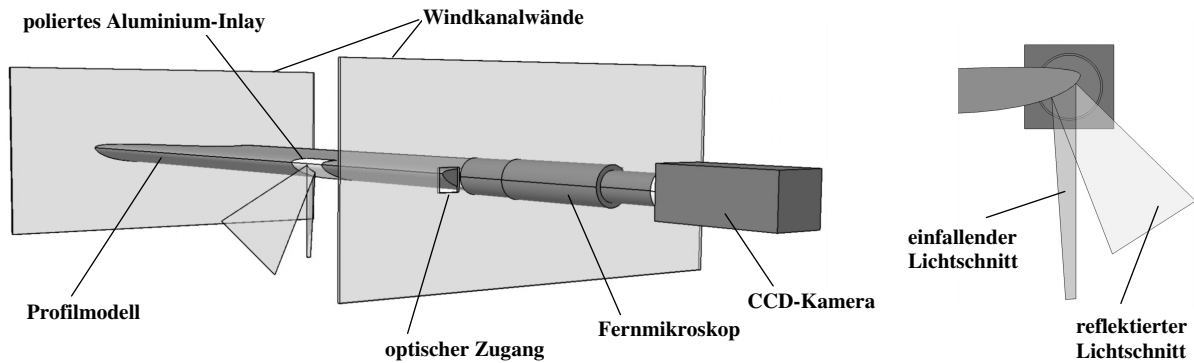


Abb. 4: Prinzipskizze des Messaufbaus, links perspektivisch, rechts Seitenansicht in der Bildebene

Als Laserquelle wurde ein frequenzverdoppelter Nd:YAG Doppelpuls laser (Quantel Brilliant) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$ und einer maximalen Pulsleistung von 150 mJ eingesetzt. Der Laserlichtschnitt wird von unten in die Messstrecke eingekoppelt und ist über ein Traversensystem positionierbar. Die Lichtschnittebene liegt dabei parallel zur Anströmung. Durch Reflexion an dem spiegelnd polierten Aluminium Inlay entsteht eine zweite, koplanare Lichtschnittebene. Liegt der aufzunehmende Bildausschnitt innerhalb des Überlappungsbereich zwischen einfallendem und reflektiertem Lichtschnitt, so wird eine deutlich erhöhte Ausleuchtung (+80%) des Bildbereichs erzielt. Der beleuchtete Bereich auf der Modelloberfläche beträgt ca. 10 mm x 0.5 mm.

Für die Aufnahmen der Partikelbilder wurde eine double-frame CCD Kamera vom Typ PCO Sencicam (1280x1024 px²) eingesetzt. Als Objektiv wurde ein Fernmikroskop vom Typ Infinity K2 mit Nahbereichsvorsatz CF1 und einem Verstärkerelement (TR-Tube) verwendet. Mit dieser Konfiguration wird bei einem Abbildungsabstand von 850mm ein Vergrößerungsmaßstab $SF = 1,44$ erzielt. Die Größe des Bildausschnitts beträgt 5,9 x 4,7 mm². Der optische Zugang in den Kanal erfolgt durch ein rechteckiges Glasfenster mit einer Kantenlänge von 55mm und einer Dicke von 2mm.

Die Synchronisation zwischen Lasern und Kamera erfolgte über eine interne Sequencer-Karte des Messrechners (LaVision PTU8). Als Pulsabstand wurde 1 μ s vorgegeben.

Als Partikel wurden Pflanzenöltröpfchen mit einem mittleren Durchmesser von 1 μ m verwendet. Da sich die zu messende laminare Ablöseblase als äußerst störungssensitiv erwies, erfolgte ein globales Seeding des gesamten Windkanals. Versuche das Seeding lokal, etwa 1,5m vor dem Modell einzubringen, führten zu Störungen in der Anströmung. In deren Folge war ein Verschwinden der Ablöseblase innerhalb des Bildbereichs durch den lokal erhöhten Turbulenzgrad festzustellen.

Der Versuch wurde bei einer Geschwindigkeit der freien Anströmung von 25 m/s durchgeführt. Für eine gemessene Kanaltemperatur von 22⁺²°C berechnet sich unter atmosphärischen Bedingungen die Reynoldszahl zu $Re_c = 660000$ und die Mach-Zahl zu $Ma = 0,07$. Der Anstellwinkel des Profilmodells beträgt $\alpha = -12^\circ$. Zur Abdeckung des Strömungsgebiets der laminaren Ablöseblase wurden vier überlappende Bildbereiche aufgenommen.

Auswertung

Zur Berechnung der Geschwindigkeitsfelder aus jeweils 1000 double-frame/double-exposure Aufnahmen pro Bildbereich wurde DaVis 7.1 von LaVision eingesetzt (vergl. Stanislas et al 2005). Für die Auswertung wurde ein Kreuzkorrelationsalgorithmus 2. Ordnung eingesetzt. Neben Multigrid und Multipass Algorithmen verfügt die Software über die 'image deformation'-Technik, die zu einem besseren Signal zu Rausch Verhältnis in der Korrelationsebene führt. Für die Auswertung wurde zunächst mit einem zweistufigen Multigrid - Durchlauf ein gemitteltes Geschwindigkeitsfeld aus den Aufnahmen bestimmt. In einem zweiten Durchlauf mit einem 2-stufigen Multipass Algorithmus wurde dieses Feld als initiales Verschiebungsfeld vorgegeben. Durch dieses Vorgehen und eine gleichzeitige Anwendung einer elliptischen Gauß'schen Fenstergewichtung (große Halbachse in Hauptströmungsrichtung) konnte die Anzahl von Fehlvektoren reduziert werden. Für die $32 \times 32 \text{ px}^2$ großen Auswertefenster mit einer Überlappung von 50% ergibt sich eine Ortsauflösung von 0,074mm im physikalischen Raum.

Vor der Auswertung wurde das nachstehend erläuterte Verfahren zur Bildstabilisierung angewendet. Des Weiteren konnte durch Abzug der mittleren Intensitätsverteilung das Kontrastverhältnis der Einzelbilder angehoben werden.

Bildstabilisierung: Trotz hoher Steifigkeit des Profilmodells traten bei den Messungen Vibrationen auf. Diese sind auf Strömungsablösungen im Hinterkantenbereich des Modells zurückzuführen. In Folge dieser Vibration kommt es zu einer relativen Verschiebung des Bildausschnitts einzelner Doppelbilder zueinander. Die dabei im Experiment aufgetretene maximale Amplitude liegt in der Größenordnung von $5/100 \text{ mm}$. Im Vergleich zur erwarteten Größe der laminaren Ablöseblase ist diese Verschiebung relevant und bedarf einer Korrektur um Fehler bei der statistischen Auswertung zu vermeiden.

Hierzu wurde ein auf der Kreuzkorrelation basierendes Verfahren zur Bildstabilisierung eingesetzt. Als profilgebundene Fixpunkte dienten im vorliegenden Fall Wandreflexionen, die ein charakteristisches und über die Bilderserie unveränderliches Helligkeitsmuster aufweisen. Nach der Festlegung eines Referenzbilds und eines Auswertebereichs lassen sich für alle weiteren Bilder Verschiebungsvektoren zum Referenzbild mittels Kreuzkorrelation ermitteln. Die anschließende Verschiebung des Bildbereichs anhand der Vektoren ermöglicht eine Stabilisierung des Bildausschnitts mit einer Genauigkeit von 1px. Durch eine Erweiterung des Verfahrens auf zwei Auswertefenster pro Bild können neben translatorischen auch rotatorische Abweichungen berücksichtigt werden. Im vorliegenden Fall wurde eine rein translatorische Bildkorrektur durchgeführt, da rotatorische Abweichungen des Bildbereichs nicht beobachtet wurden. Die Bildverschiebung wurde jeweils für das erste Frame berechnet und für das zweite Frame unverändert übernommen. Dies ist zulässig, da in Folge des kurzen Belichtungsabstands ($dt = 1 \mu\text{s}$) keine erkennbare Verschiebung zwischen dem ersten und zweiten Frame vorlag.

Das Verfahren erwies sich als robust und effektiv, solange keine Veränderung des Helligkeitsmusters der Reflexion in Folge von Verschmutzung oder Materialschädigung der Oberfläche auftraten.

Ergebnisse

Bildqualität: Die erzielte Bildqualität erwies sich als wesentliches Defizit der Messung. Die Partikelbilder zeigen besonders in Wandnähe starke astigmatische Verzerrungen sowie Beugungsmuster auf. Durch ein Schließen der Blende des Fernmikroskops ließ sich der Astigmatismus deutlich reduzieren. Allerdings musste danach die Laserleistung erhöht werden, um eine ausreichende Beleuchtungsstärke zu erzielen. Dies wiederum führte zu erheblich

stärkeren diffusen Reflexionen an der Oberfläche des Profils. Der gewählte Kompromiss zwischen minimierten diffusen Reflexionen und ausreichender Abbildungsqualität geht zu Lasten des Kontrasts. In Folge des geringen Signal-zu-Rausch Verhältnisses der Messungen steigt die Anzahl berechneter Fehlvektoren. Ein Beispiel für die Bildqualität findet sich nebenstehend in Abb. 5.

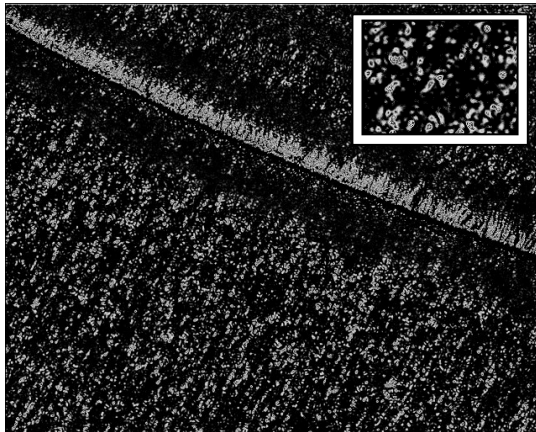


Abb. 5: Partikelbilder in Bildausschnitt 2

Hauptursache der optischen Abberationen ist nach bisherigem Kenntnisstand die starke Abschattung des Fernmikroskops durch das Profilmodell (siehe Abb. 4) die in Ihrer Wirkung einer außermittigen Blende gleicht. Darüber hinaus ist die Verschmutzung des optischen Zugangs durch sich ablagernde Ölpartikel zu nennen. Der unmittelbar am eingesetzten Fenster verlaufende Eckenwirbel zwischen Profil und Windkanalwand beschleunigt die Verschmutzung. Ferner hat die Güte des verwendeten Glasfensters Einfluss auf die Abbildungsqualität.

Auffällig ist weiterhin eine ungleichmäßige Verteilung der Seedingdichte im beobachteten Strömungsfeld. Deutlich zu geringe Partikelhäufigkeiten traten vornehmlich im Bereich der laminar ablösenden Grenzschicht (1. Bildbereich) und der sich ausbildenden Scherschicht (2. Bildbereich, siehe Abb. 5) auf. Zur Klärung des Phänomens wurde eine numerische Simulation durchgeführt, bei der Partikelbahnen vom Staupunktbereich ausgehend verfolgt wurden. Grundlage hierfür ist eine stationäre, Reynolds-gemittelte Navier-Stokes Lösung (DLR Tau-Code, Rel. 2007). Das in Abb. 6 dargestellte Ergebnis zeigt die Abweichungen zwischen Stromlinien (ideales Folgeverhalten) und Partikelbahnen. Angenommen wurde ein, für die Versuchsbedingungen repräsentatives Partikel mit einem Durchmesser von $1\mu\text{m}$ und einer Dichte von 930 kg/m^3 . Die hierfür ermittelten Bahnkurven zeigen einen deutlichen Schlupf unmittelbar stromab der Profilnase. Diese Drift erklärt den beobachteten Mangel an Seedingdichte in Bereich der laminar ablösenden Grenzschicht. Der Eintrag von Partikeln in die laminare Ablöseblase erfolgt ausschließlich in Folge turbulenter Mischungsvorgänge im Bereich der wiederanlegenden Strömung. Dieser kann von der zeitgemittelten numerischen Lösung nicht wiedergegeben werden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass ein Eintrag nur erfolgen kann, wenn die Partikelbahn innerhalb der durchmischten Grenzschicht liegt. Da Partikel kleineren Durchmessers eine geringere Drift aufweisen ist die Wahrscheinlichkeit ihres Eintrags in die LSB höher als für größere Partikel. Hierdurch erklärt sich der auftretende Effekt einer geringeren Intensität und Konzentration der Partikelbilder innerhalb der LSB.

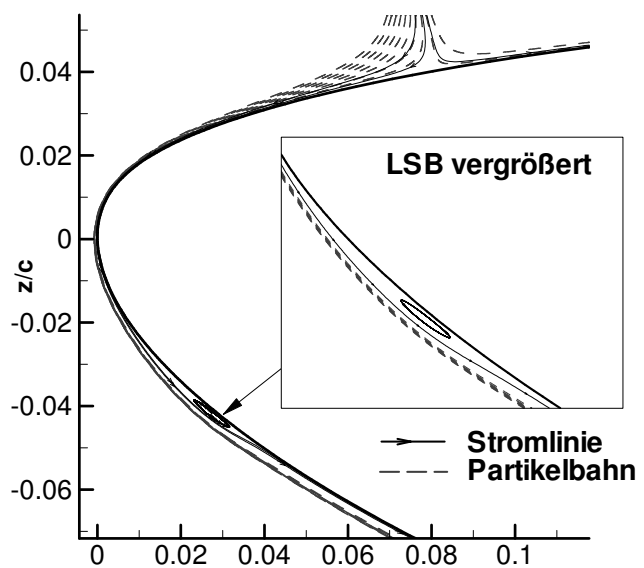


Abb. 6: Simulation von Partikelbahnen, $d_p=1\mu\text{m}$, $\rho_p=930\text{ kg/m}^3$

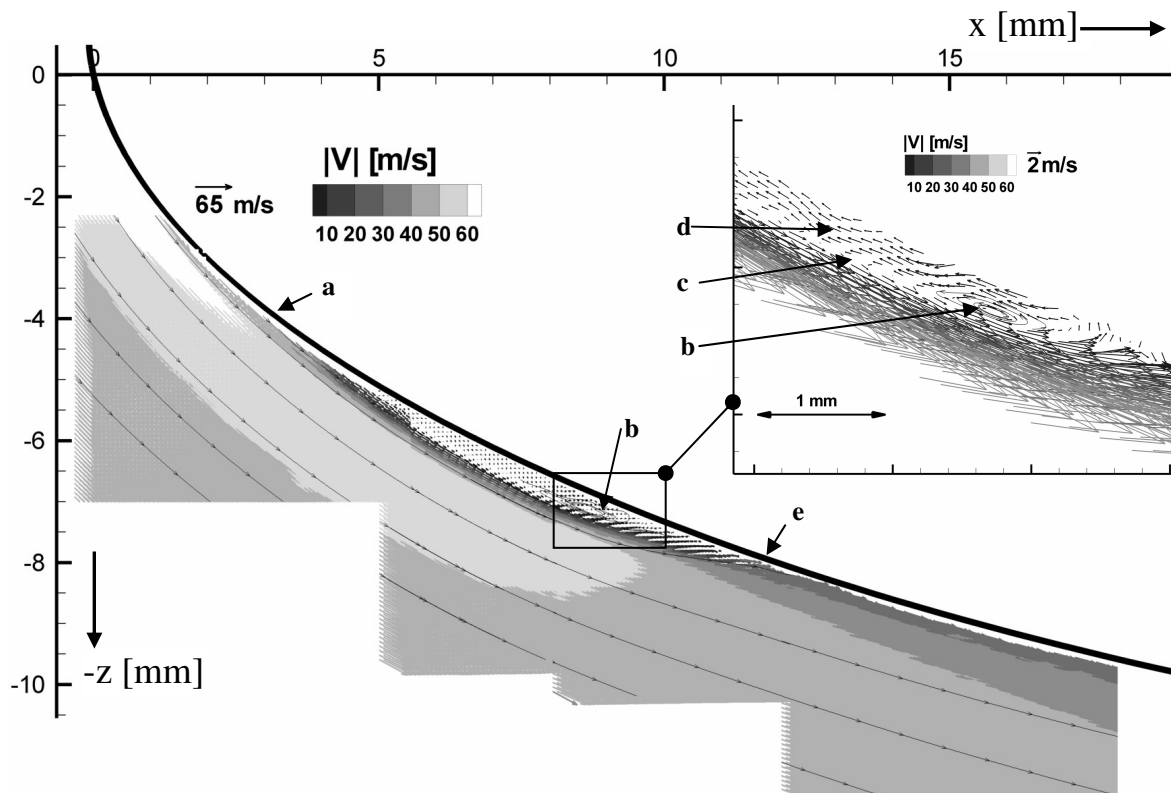


Abb. 7: LSB: Zusammengesetztes Vektorfeld der gemessenen Geschwindigkeiten und Stromlinien
 a) laminare Ablösung, b) Wirbelzentrum, c) Scherschicht, d) Rückströmung, e) turbulentes Wideranlegen

Mittleres Geschwindigkeitsfeld: Abbildung 7 zeigt das aus vier Bildbereichen zusammengesetzte Vektorfeld der gemittelten Geschwindigkeiten im Bereich der laminaren Ablöseblase. Wie sich zeigt, konnten alle charakteristischen Merkmale des Strömungsfeldes der LSB aufgelöst werden. Das Ablösen der laminaren Grenzschicht (a) erfolgt bei $x = 3\text{ mm}$. Die in diesem Bereich vorliegende Verzögerung der Potentialströmung in Folge des starken Druckanstiegs ist deutlich erkennbar. Die Ausschnittsvergrößerung für den Bereich des Wirbelzentrums (b) der LSB verdeutlicht die sehr hohen Geschwindigkeitsgradienten. Die Lage des Zentrums der freien Scherschicht (c) mit der Strömungsgeschwindigkeit $V = 0\text{ m/s}$ ist ersichtlich. Unmittelbar stromab des Wirbelzentrums beginnt sich die LSB zu schließen. Das turbulente Wideranlegen der abgelösten Grenzschicht erfolgt im Mittel bei $x = 11.5\text{ mm}$. Ein rasches Anwachsen der turbulenten Grenzschicht im Bereich des weiteren Druckanstiegs stromab der LSB ist zu erkennen. Die gemessene laminare Ablöseblase weist ein Seitenverhältnis von etwa 9 mm Länge zu 0.8 mm Höhe (bezogen auf den Grenzschichtrand) auf. Ein Maß für die Dynamik des Feldes lässt sich durch das Verhältnis von maximaler Geschwindigkeit und dem Betrag der mittleren Rückströmgeschwindigkeit angeben. Dieses liegt bei 67 m/s zu 3.5 m/s . Ausgedrückt in Pixel-Verschiebung ergibt sich ein Verhältnis von $14:0.7$.

Statistische Schwankungsgrößen: Die Auswertung statistischer Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeiten ermöglicht Rückschlüsse auf den Transitionsprozess über die laminare Ablöseblase und die Entwicklung der turbulenten Grenzschicht stromab. Bedingt durch die mangelnde Bildqualität der Messung sowie teils zu geringer Partikeldichten zeigte die Auswertung viele zu eliminierende Fehlvektoren. Trotz der Mittelung über jeweils 1000 Bilder ist die statistische Absicherung daher insbesondere im Bereich der laminaren Ablösung als nicht ausreichend zu erachten. Daher sind lediglich qualitative Aussagen zu den Schwankungsgrößen im Feld zulässig. Beispielhaft wird dies nachstehend für die Entwick-

lung der normierten turbulenten kinetischen Energie k erörtert. Diese wird in Abb. 8 gezeigt. Wie erwartet ist ein starkes und rasches Anwachsen der turbulenten kinetischen Energie im Bereich des laminar/turbulenten Strömungsumschlags zu beobachten. Dieses beginnt Oberhalb des Wirbelzentrums der Blase bei $x = 8\text{ mm}$ und erreicht sein Maximum mit gemessenen Werten von $k/U_\infty^2 = 0.24$ bei $x = 10\text{ mm}$. Im Bereich der nachfolgenden turbulenten Grenzschicht zeigt sich nur langsam eine Abnahme dieses Niveaus. Innerhalb des Rezirkulationsgebiets treten keine nennenswerten Schwankungen auf. Neben diesem physikalisch plausiblen Verhalten von k weist die Messung jedoch auch Widersprüche auf. So ist ein Auftreten von turbulenter kinetischer Energie bereits im Bereich der ablösenden laminaren Scherschicht zu beobachten. Neben möglichen Fehlvektoren kommen weitere Ursachen für dieses, aus Sicht der Turbulenzentwicklung falsche Ergebnis in Frage. Zum einen kommt es unter den Versuchsbedingungen zu turbulenten Hinterkantenablösungen am Profilmodell. Diese bewirken eine Schwankung der Gesamtzirkulation wodurch Verlagerungen der laminaren Ablöselage zu erwarten sind. Des Weiteren ist das Phänomen des sog. ‚flappings‘ laminarer Ablöseblasen in Betracht zu ziehen, welches ein niederfrequentes Schwanken der Scherschicht bezeichnet. Beide Phänomene würden das Messergebnis in der aufgetretenen Art und Weise beeinflussen. Auffällig ist weiterhin das Auftreten von Werten $k \neq 0$ außerhalb der Grenzschicht im vierten Bildausschnitt. Dieses ist bislang nur durch Fehlvektoren zu erklären.

Vergleich zur numerischen Simulation: Im direkten Vergleich zu den Messungen ist in Abb. 9 ein Ergebnis einer numerischen Simulation für die Transition über die Ablöseblase dargestellt. Zur Modellierung der Turbulenz in der RANS - Lösung wurde das SST - Modell von Menter verwendet (Menter, 1993). Die berechnete laminare Ablöseblase weist hinsichtlich ihrer Lage und Ausdehnung ein hohes Maß an Ähnlichkeit mit den Messergebnissen auf. Der laminare Ablösepunkt sowie der Bereich des turbulenten Wideranlegens sind gegenüber dem Experiment ca. 1mm stromauf verschoben, da die berechnete Hinterkantenablösung deutlich zu klein bestimmt wird. Dies erhöht die Saugspitze, wodurch es zu einer früheren Ablösung kommt. Hinsichtlich der gezeigten Entwicklung von k besteht im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung zum Experiment. Das Ansprechen des Turbulenzmodells oberhalb des Wirbelzentrums der LSB ist physikalisch sinnvoll erfasst. Gegenüber der Messung zeigt sich ein enger abgegrenzter Bereich der Maximalwerte von k und eine schnellere Abnahme im Bereich der turbulenten Grenzschicht.

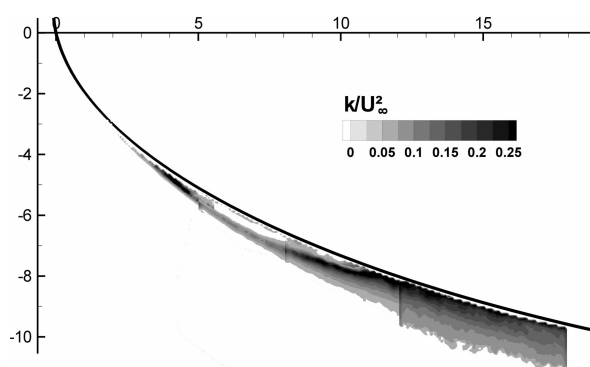


Abb. 8: Entwicklung der turbulenten kinetischen Energie im Experiment

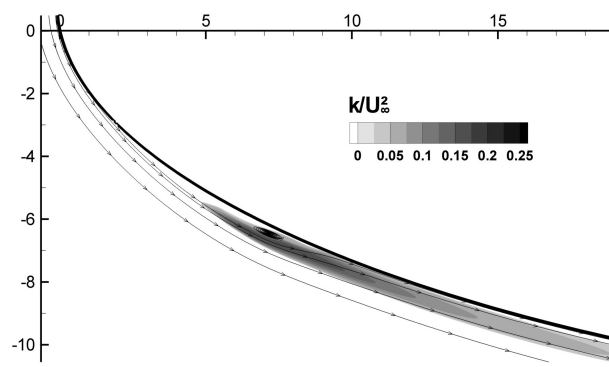


Abb. 9: Entwicklung der turbulenten kinetischen Energie in der Simulation

Fazit

Die vorgestellte Messung hat die Anwendbarkeit der fernmikroskopischen Particle Image Velocimetry auf laminare Ablöseblasen bei einer vergleichsweise hohen Reynoldszahl von 660000 gezeigt. Wichtige technische Problemstellungen wie die thermische Modellbelastung und das Auftreten von Vibrationen wurden erfolgreich gelöst. Ursachen für die nicht zufrieden stellende Bildqualität wurden erörtert und konnten in wesentlichen Teilen auf den Messaufbau zurückgeführt werden. Als wichtige Schwierigkeit für Messungen an laminaren Ablöseblasen bei höheren Reynoldszahlen ist das Folgeverhalten der Partikel zu nennen. Die Messung liefert zur Validierung numerischer Verfahren bislang nicht verfügbare Daten zur Lage und Form einer laminaren Ablöseblase bei technisch relevanter Größe der Reynoldszahl. Für eine Gewinnung von fundierten Aussagen zur Turbulenzentwicklung ist der gemessene Datensatz bislang nicht ausreichend.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung des Projekts (DFG-Ra595/6-1).

Literatur

- Rist, U., 1998: Zur Instabilität und Transition in laminaren Ablöseblasen, Habilitation Universität Stuttgart, 1998
- Ol, M.V., McAuliffe, B.R., Hanff, E.S., Scholz U., Kähler, C.J., 2005
Comparison of laminar separation bubble measurements on a low Reynolds number airfoil in three facilities, AIAA-2005-5149, 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario, June 6-9 2005
- Burgmann, S., Klaas, M., Schröder, W., 2006: Vortex detection via scanning PIV Measurements, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 14. Fachtagung, pp. 40.1-40.8
- Raffel, M., Favier, D., Berton, E., Rondot, C., Nsimba, M. Geissler, W., 2006: Micro-PIV and ELDV wind tunnel investigations of the laminar separation bubble above a helicopter blade tip, Meas. Sci. Technol. Vol 17, pp. 1652-1658, IOP Publishing 2006
- Wokoek, R., Krimmelbein, N., Radespiel, R., Ciobaca, V., Krummbein, A., 2006: RANS Simulation and Experiments on the Stall Behaviour of an Airfoil with Laminar Separation Bubbles, AIAA-2006-0244, AIAA 2006
- Stanislas, M., Okamoto, K., Kähler, C.J., Westerweel, J., 2005: Main results of the Second International PIV Challenge, Experiments in Fluids, Vol. 39, pp 170-191, Springer 2005
- Menter, F.R., 1993: Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows, AIAA Paper 93-2906, AIAA 1993