

# Untersuchungen zur Transition in einer laminaren Ablöseblase mittels LDA, PIV und DNS

M. Lang, O. Marxen, U. Rist, S. Wagner  
Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart

## 1 Einleitung

Laminare Ablöseblasen treten durch hohen Druckanstieg in der Wandgrenzschicht, zum Beispiel an Laminarflügeln und Hochauftriebshilfen, auf. Dabei löst die noch laminare Grenzschicht von der Körperkontur ab, und es findet Transition in der abgelösten Scherschicht statt. Die anschließend turbulente Grenzschicht legt sich in der Regel wieder an. Das Auftreten transitioneller Ablöseblasen beeinflusst dabei wesentlich die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.

Die Experimente werden in einem besonders turbulenzarmen Wasserkanal an einer frei angeströmten ebenen Platte durchgeführt. Wegen der in Wasser großen Strukturen eignet sich eine solche Anlage besonders zur Strömungssichtbarmachung und für hochaufgelöste Messungen beim laminar-turbulenten Umschlagsprozeß der Grenzschicht.

Im Takt zu einer in die Grenzschicht eingeleiteten, sich stromab entwickelnden Störung wurden phasengekoppelte LDA-Messungen durchgeführt [4]. Zur Ergänzung der anschließend phasengemittelten Daten mit momentanen Felddaten wurde ein 2D-PIV-System aufgebaut. Die PIV-Messungen erfolgten ebenfalls phasenfest zur eingeleiteten Störung.

Es wird ein detaillierter Vergleich experimenteller Ergebnisse mit Ergebnissen aus dreidimensionaler DNS zur Transition in einer laminaren Ablöseblase vorgestellt. Es soll gezeigt werden, daß eine enge Verknüpfung von Numerik und Experiment zu Ergebnissen führen kann, die durch Anwendung nur einer dieser Methoden nicht möglich sind.

## 2 Versuchsanlage und experimenteller Aufbau

Der Laminarwasserkanal wurde speziell für Transitionsuntersuchungen entwickelt. Er zeichnet sich durch einen sehr niederen Turbulenzgrad von  $Tu \leq 0,05\%$  in einem Frequenzbereich von  $0,1 - 10\text{ Hz}$  bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $140\frac{\text{mm}}{\text{s}}$  aus [6].

Mit Hilfe eines Verdrängungskörpers wird eine druckinduzierte laminare Ablöseblase auf einer frei angeströmten ebenen Platte erzeugt [3, 4]. Eine Schwingdrahtvorrichtung dient dazu, eine Tollmien-Schlichting-Welle kontrolliert vor dem Verdrängungskörper in die Grenzschicht einzuleiten. Die fundamentale Frequenz der Störung ( $f_0 = 1,1\text{ Hz}$ ) entspricht der nach der linearen Stabilitätstheorie (LST) am stärksten angefachten 2-D-Störung. Zur Untersuchung dreidimensionaler Störwellen werden als regelmäßige Wandrauigkeiten  $1\text{ mm}$  dicke Metallplättchen, sog. „Spacer“ [1, 2], im Abstand von  $\lambda_z = 58\text{ mm}$  unter dem Schwingdraht positioniert. Durch die Interaktion der Spacer mit dem Schwingdraht bildet sich eine dreidimensionale Wellenkombination mit typischer Peak-Valley-Struktur in der Grenzschicht aus [1, 2, 4]. Der Schwingdraht wird auf beiden Seiten durch handelsübliche Modellbau-Servos angetrieben. Die Ansteuerung der Servos erfolgt durch

eine elektronische Schaltung, die ein Sinussignal generiert und während jeder Periode ein Referenzsignal abgibt (TTL-Trigger).

Mit einem zweikanaligen LDA wurden Grenzschichtprofile phasengekoppelt zum Takt der Störquelle mit den Geschwindigkeitskomponenten in Hauptströmungsrichtung  $u$  und in wandnormaler Richtung  $v$  sowie deren Schwankungsgrößen gemessen [3, 4].

Ein 2D-PIV-System wurde in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) aufgebaut. Es besteht aus einem Nd:YAG-Laser (Quantel Twins, max. 150 mJ/Puls) mit Lichtleitarm und Lichtschnittoptik (Dantec), einer Digitalkamera (PCO SensiCam, 1280 × 1024 Pixel) und einem Datenerfassungs-PC. Das gesamte System wird durch einen programmierbaren Sequenzer (DLR) angesteuert. Die Auslösung der Meßsequenzen erfolgt über einen externen Triggeranschluß am Sequenzer, phasengekoppelt mit dem Referenzsignal der Störquelle. Dies ermöglicht einen Vergleich phasenfester PIV-Daten mit phasengemittelten LDA-Messungen und DNS.

Durch die gute optische Zugänglichkeit des Laminarwasserkanals von allen Seiten ist die Positionierung der Lichtschnittebene für PIV-Messungen in allen drei Koordinatenebenen des Strömungsraumes möglich. So kann mit PIV die mit dem zweikanaligen LDA nicht meßbare spannweite Geschwindigkeitskomponente  $w$  gemessen werden. Dies ermöglicht, vor allem im Bereich stromab der Sättigung der Störampplituden, einen wertvollen Einblick in den raschen dreidimensionalen Zusammenbruch der abgelösten Scherschicht beim laminar-turbulenten Umschlagprozeß. Dieser Bereich vor dem zeitlich gemittelten Wiederanlegen der abgelösten Grenzschicht zeichnet sich durch zunehmende Nichtperiodizität der instationären Ereignisse bezüglich der Störquelle und durch kleinskalige, dreidimensionale Strukturen aus. Hier können mit phasenfesten PIV-Messungen auch kohärent auftretende spannweite Wirbelstrukturen gemessen werden, die mit dem zweikanaligen LDA aufgrund der fehlenden spannweitigen Geschwindigkeitskomponente nicht erfaßbar sind. Aufgrund der langen Meßzeiten in Wasser und der bei dreidimensionaler Störeinleitung zusätzlich notwendigen spannweitigen Auflösung des Meßbereichs [4] können kleinskalige Strukturen mit phasengekoppelten LDA-Messungen aufgrund des benötigten engen Meßrasters nur bedingt aufgelöst werden.

### 3 Meßdatenauswertung

Die Auswertung der LDA-Meßdaten mit Hilfe eines phasenmittelnden Verfahrens wurde bereits detailliert beschrieben [3, 4]. Dabei wurden die Grenzschichtprofile, je nach Grenzschichtdicke, mit bis zu 35 Meßpunkten aufgelöst ( $\Delta y = 1 \text{ mm}$ ).

Bei PIV-Messungen ergab sich für die gewählten Bildausschnitte im Transitionsbereich eine Auflösung der Grenzschicht mit bis zu 50 Meßpunkten. Die Größe der Korrelationsfenster betrug dabei  $32 \times 32$  Pixel bei einer Schrittweite mit halber Überlappung ( $\Delta y = 0,7 \text{ mm}$ ). Zur Korrelation und weiteren Auswertung der PIV-Daten, wie Beseitigung physikalisch nicht sinnvoller „Ausreißer“ und Interpolation dadurch fehlender Vektoren, kommt die beim DLR eingesetzte Software zum Einsatz. Zur Bestimmung des Partikelversatzes im Sub-Pixel-Bereich kann dabei als Peak-Fit-Routine ein Levenberg-Marquardt-Fit angewendet werden, welcher die Meßfehler durch „Peak-Locking“ erheblich reduziert [5]. Die weitere Datenverarbeitung zur Bestimmung von Grenzschichtparametern aus PIV-Messungen erfolgt über eigene Auswerteroutinen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Messungen bei zweidimensionaler Störeinleitung

Der gemessene Formparameter  $H_{12} = 2,6$  schwankt über die Spannweite der ebenen Platte im Laminarwasserkanal nur um 1% seines Mittelwertes. Die Grenzschicht kann daher mit sehr guter Näherung als zweidimensional betrachtet werden.

Ein Vergleich phasengemittelter LDA-Messungen mit DNS bei zweidimensionaler Störeinleitung wurde in [3, 4] vorgestellt (nur Schwingdraht). Es zeigte sich dabei eine sehr gute quantitative Übereinstimmung der Grenzschichtprofile und dazugehöriger wandnormaler Stör-Amplituden- und Phasenverläufe sowie der aus den zeitlich gemittelten Größen gewonnenen Grenzschichtparameter (Verdrängungsdicke  $\delta_1$ , Impulsverlustdicke  $\delta_2$ , Formparameter  $H_{12}$ , Trennstromlinie  $TSL$ ).

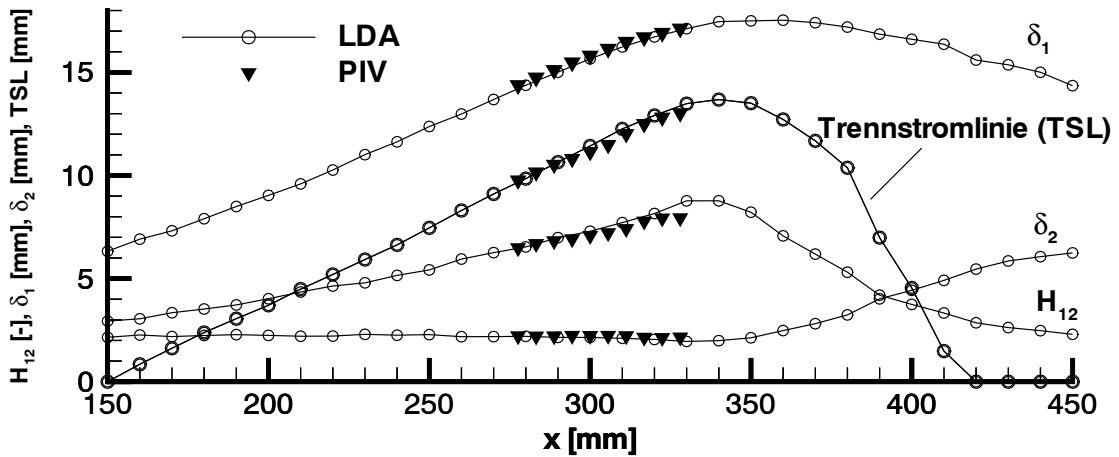


Abbildung 1: Vergleich der Grenzschichtparameter aus LDA- und PIV-Messungen

Mit PIV wurden im nach der LST („linear“) angefachten Bereich der Störung bis in den Sättigungsbereich die Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  in der  $xy$ -Ebene gemessen (Lichtschneitebene wandnormal in Hauptströmungsrichtung). Zur Bestimmung der Grenzschichtparameter wurden jeweils 30 zum Takt der Störquelle phasenfeste PIV-Messungen über 18 Phasenwinkel innerhalb der Periode der fundamentalen Frequenz durchgeführt. Die Mittelung aller so erhaltenen Datensätze liefert zeitlich gemittelte Größen. Abb. 1 zeigt den Vergleich der aus diesen Grenzschichtprofilen bestimmten Grenzschichtparameter mit einem Ergebnis aus LDA-Messungen. Die Referenzmessung mittels LDA wurde dazu über den gesamten Bereich der laminaren Ablöseblase (Trennstromlinie  $TSL > 0$ ) durchgeführt.

### 4.2 Messungen bei dreidimensionaler Störeinleitung

Der Vergleich von LDA-Messungen mit DNS hat sich in [4] auf Grenzschichtprofile und wandnormale Amplituden- und Phasenverläufe der fundamentalen Frequenz beschränkt. Dabei wurde nur die  $u$ -Komponente bei zweidimensionaler Störung betrachtet.

Weiterführend soll nun ein Vergleich von LDA-Messungen mit DNS für die Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  bei Einleitung einer 3-D-Störung vorgestellt werden (Schwingdraht und Spacer). Zur Erfassung der eingeleiteten 3-D-Wellenkombination wurden Grenzschichtprofile über eine Quer-Wellenlänge ( $\lambda_z = 58$  mm) an 16 Positionen in spannweichter Richtung gemessen. Eine doppelte Fourieranalyse der Meßdaten liefert die Amplituden  $A_{h,k}$  und Phasen  $\Phi_{h,k}$  der eingebrachten, stark angefachten Störung. Die Indizes

$h$  und  $k$  stehen dabei für die Wellenzahlkoeffizienten in zeitlicher ( $h$ ) und spannweitisger ( $k$ ) Richtung [2, 4].

Abb. 2 zeigt Grenzschichtprofile mit dazugehörigen Störampplituden- und Phasenverläufen 290 mm stromab des Beginns des Druckanstiegs in dem nach der LST („linear“) angefachten Bereich der Störung. Verglichen sind für beide Geschwindigkeitskomponenten die zweidimensionalen Störanteile der fundamentalen Frequenz mit ihrer ersten Höherharmonischen ( $h, 0$ -Moden) aus LDA- und DNS-Daten. Die Grenzschichtprofile wurden mit der Hauptströmungskomponente am Grenzschichttrand  $u_\delta$  und die Störampplitudenverläufe mit dem Maximalwert der Schwankungsgröße in Hauptströmungsrichtung  $A_{u,max}(1, 0)$  normiert.

Abb. 3 zeigt die Entwicklung über den gesamten Bereich des Druckanstiegs für Störampplituden der Geschwindigkeitskomponente  $u$ . Für die dargestellten Störmoden wurde für jede Position der maximale Schwankungswert  $A_{u,max}$  aus den wandnormalen Störamp-

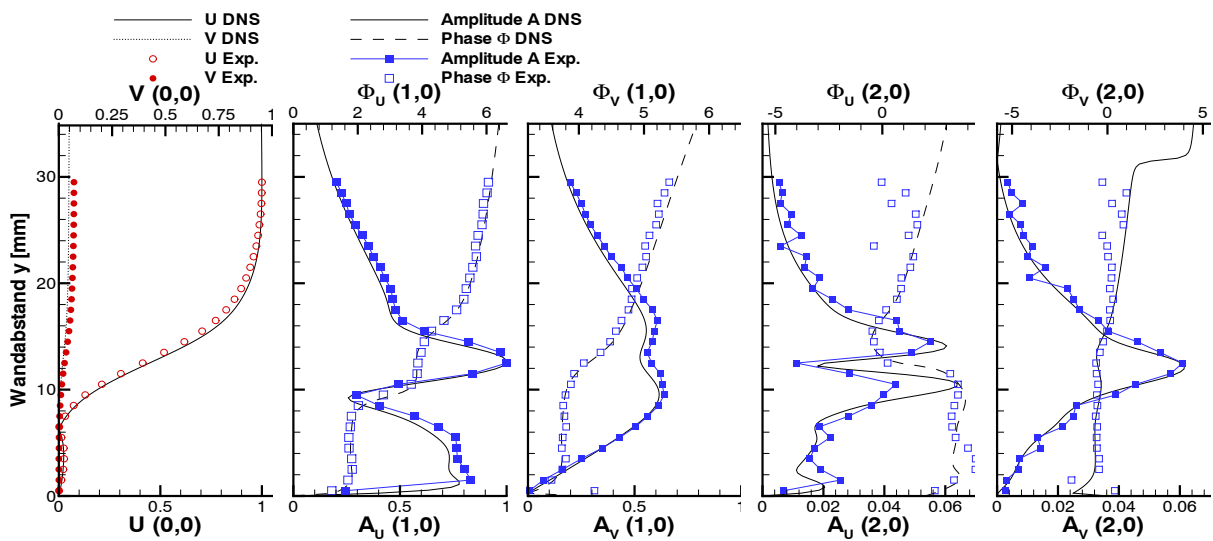


Abbildung 2: Grenzschichtprofile mit Störampplituden- und Phasenverläufen der 2-D-Störanteile bei 3-D-Störeinführung ( $h, 0$ -Moden,  $x = 290$  mm).

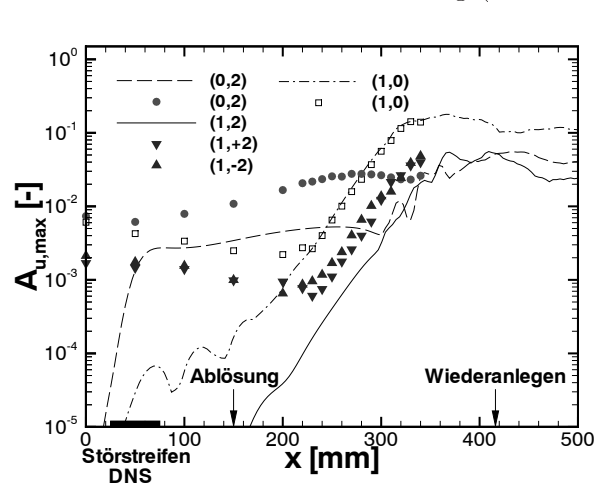


Abbildung 3: Anfachung der Schwankungsgröße  $A_{u,max}$  aus LDA-Messungen (Symbole) und DNS (Linien) über den gesamten Bereich des Druckanstiegs.

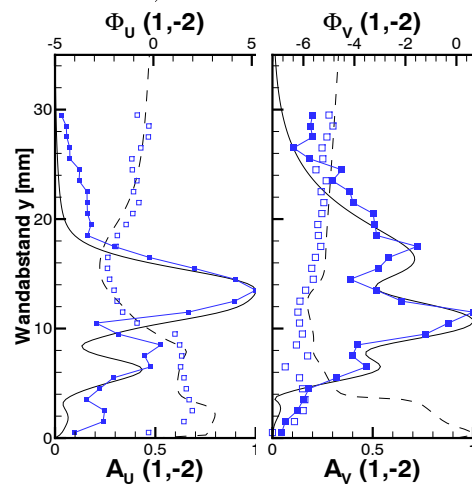


Abbildung 4: Störampplituden- und Phasenverläufe für einen 3-D-Störanteil ( $1, -2$ -Mode,  $x = 290$  mm). Legende aus Abb. 2.

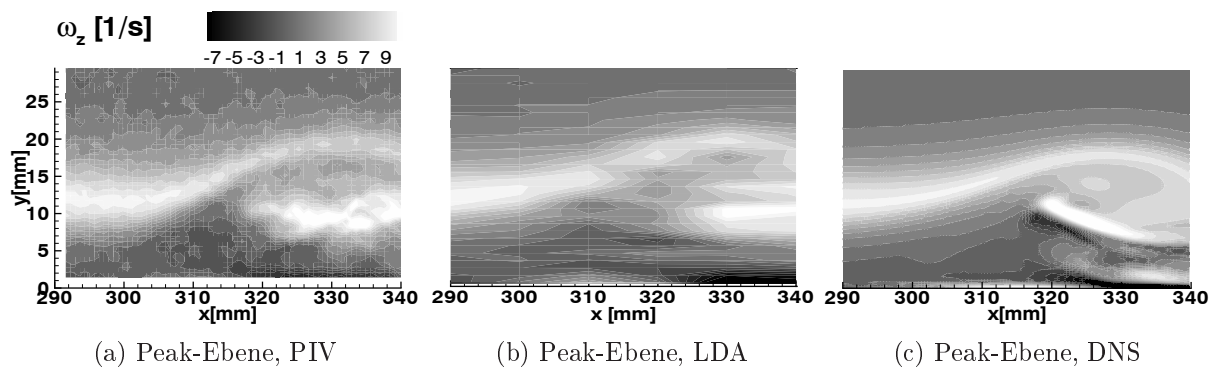


Abbildung 5: Vergleich der Wirbelstärke  $\omega_z$  in der Peak-Ebene aus LDA- und PIV-Messungen mit DNS ( $xy$ -Ebene).

plitudenverläufen aufgetragen und mit der Geschwindigkeit  $u_\delta$  am Grenzschichttrand zu Beginn des Druckanstiegs ( $x = 0 \text{ mm}$ ) normiert. Eine sehr gute quantitative Übereinstimmung, sowohl der Störungsanfängung als auch des Absolutwertes für  $A_{u,max}$ , zeigt die 1, 0-Mode (2-D-Anteil) kurz nach dem Ablösen der Grenzschicht. Die 1,  $\pm 2$ -Moden (instationäre 3-D-Anteile) weisen gleiche Anfängung experimenteller und numerischer Ergebnisse bei unterschiedlichem Störniveau auf. Das höhere Störniveau dieser entgegengesetzt schrägläufigen Wellen im Experiment ist auf die hier auch höheren Anteile der stationären Quermode (0, 2-Mode) zurückzuführen. Zum Vergleich experimenteller und numerischer Ergebnisse dieses instationären 3-D-Anteils wurden die Amplitudenverläufe jeweils mit ihrem maximalen Schwankungswert  $A_{u,max}$  normiert. In Abb. 4 beobachtet man erneut eine sehr gute quantitative Übereinstimmung sowohl bei den wandnormalen Amplitudenverteilungen als auch bei den Phasenverläufen.

Zum Vergleich phasengemittelter LDA-Messungen und DNS mit phasenfesten PIV-Messungen wurde die Wirbelstärke  $\omega_z$  in der  $xy$ -Ebene an einer spannwitigen Peak-Position (Position stärkster spannwitiger Grenzschichtaufdickung) bestimmt. Abb. 5 zeigt in einem quantitativen Vergleich der Wirbelstärke (Graustufen) das Aufrollen der Scher-

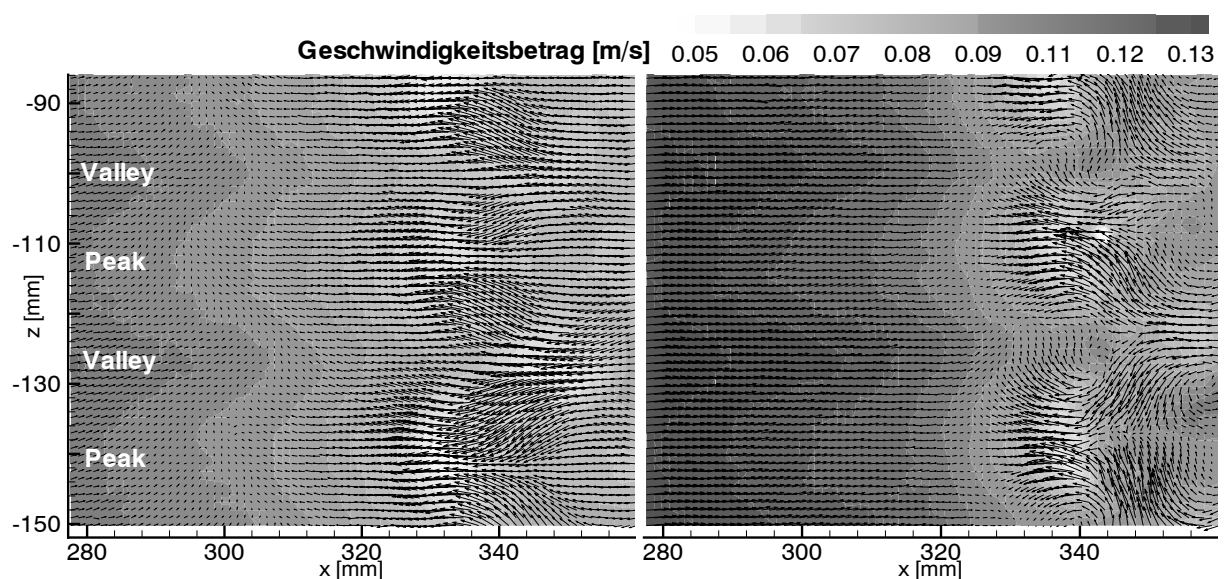


Abbildung 6: Aufeinanderfolgende ( $\Delta t = 100 \text{ ms}$ ), phasenbezogene PIV-Messungen im Sättigungsbereich der stark angefachten 3-D-Störung ( $xz$ -Ebene).

schicht im Sättigungsbereich aus PIV-, LDA- und DNS-Daten. Deutlich ist das feinere Auflösungsvermögen der Wirbelstruktur mittels PIV im Vergleich zur LDA-Messung zu erkennen. Aufgrund der niederen Frequenzen und somit langen Meßzeiten in Wasser wurde bei der LDA-Messung zu Gunsten einer feinen Auflösung der Grenzschichtprofile ( $\Delta y = 1 \text{ mm}$ ) eine recht grobe Auflösung in Strömungsrichtung gewählt ( $\Delta x = 10 \text{ mm}$ ).

PIV-Messungen in der  $xz$ - und  $yz$ -Ebene ermöglichen die quantitative Erfassung der spannweitigen Geschwindigkeitskomponente  $w$ . Dazu wurden Messungen im Bereich der Sättigung bis zum zeitlich gemittelten Wiederanlegen der abgelösten Grenzschicht durchgeführt. Dieser Bereich zeichnet sich durch eine rasche dreidimensionale Entwicklung in der Grenzschicht aus.

Abb. 6 zeigt zwei zeitlich aufeinanderfolgende ( $\Delta t = 100 \text{ ms}$ ), phasenfeste PIV-Messungen in der  $xz$ -Ebene (Lichtschnittebene bei  $y = 15 \text{ mm}$  parallel zur ebenen Platte) im Transitionsbereich der abgelösten Scherschicht. Dabei wurde jeweils über 10 aufeinanderfolgende Messungen gemittelt. Nach der Sättigung der Störungsanfuchung ( $x > 320 \text{ mm}$ , Abb. 3) ist deutlich die stark dreidimensionale Entwicklung der abgelösten Scherschicht unter Ausbildung zunächst kohärenter Strukturen zu sehen. Zur besseren Darstellung dieser Wirbelstrukturen im Vektorbild wurde jeweils ein konstantes Geschwindigkeitsfeld ( $u = -100 \text{ mm/s}$ ) überlagert. Die Graustufen zeigen jedoch den tatsächlich gemessenen Geschwindigkeitsbetrag ( $\sqrt{u^2 + w^2}$ ) an. Deutlich ist die durch die dreidimensionale Störungseinleitung hervorgerufene spannweitige Deformation der Grenzschicht (Peak-Valley) zu erkennen ( $h, 2$ -Mode).

In der  $yz$ -Ebene (Lichtschnittebene normal zur Hauptströmungskomponente  $u$ ) wurden stromab der Sättigung in der bereits stark dreidimensional entwickelten Grenzschicht phasenfeste PIV-Messungen durchgeführt. Die Abbildungen 7 a-d zeigen stromab die Entwicklung der zum Zusammenbruch der Scherschicht führenden Wirbelstrukturen vor dem zeitlich gemittelten Wiederanlegen der nun turbulenten Grenzschicht. Dabei wurde

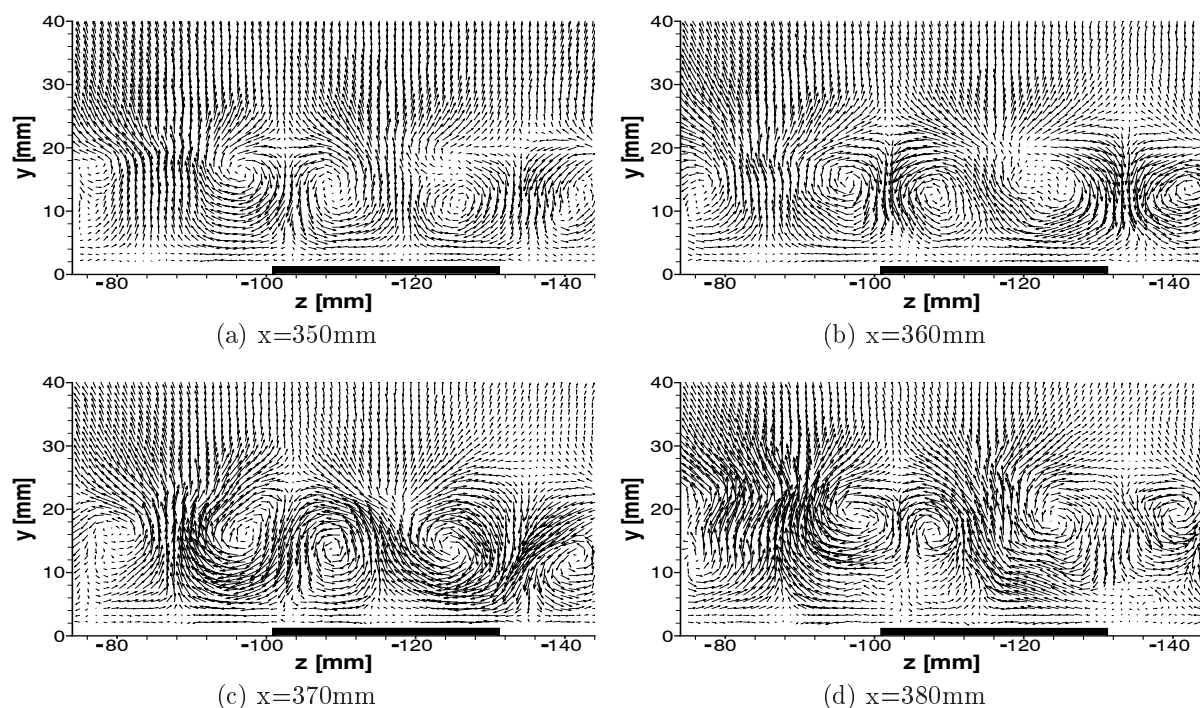


Abbildung 7: Phasenfeste PIV-Messungen in der  $yz$ -Ebene vor dem Wiederanlegen der abgelösten Grenzschicht mit skizzierter Spacerposition.

der Phasenwinkel der Messungen bezüglich des Referenzsignals der Störquelle so gewählt, daß die dargestellten Strukturen stromab mitverfolgt werden konnten. Der dargestellte Bildausschnitt erstreckt sich über 1,17 Wellenlängen  $\lambda_z$ .

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden detaillierte Untersuchungen zur Transition in einer laminaren Ablöseblase mittels LDA, PIV und direkter numerischer Simulation (DNS) vorgestellt. Die Ergebnisse phasengekoppelter LDA-Messungen und DNS zeigen eine sehr gute Übereinstimmung beim Vergleich stationärer und instationärer Störmodenanteile einer eingeleiteten dreidimensionalen Störwellenkombination für beide gemessenen Geschwindigkeitskomponenten. Phasenfeste PIV-Messungen in allen drei Ebenen des Strömungsraumes ermöglichen einen quantitativen Einblick in die Vorgänge beim Transitionsprozeß der abgelösten Scherschicht in einer laminaren Ablöseblase. Dabei konnten kohärent auftretende kleinskalige Wirbelstrukturen gemessen werden, die aufgrund der mit dem zweikanaligen LDA nicht meßbaren Geschwindigkeitskomponente in spannweitung Richtung nicht erfaßbar sind. Zum weiteren quantitativen Vergleich experimenteller Momentanfelddaten mit dreidimensionaler DNS soll in Zukunft das eingesetzte PIV-System zur Erfassung aller drei Geschwindigkeitskomponenten zu einem Stereo-PIV-System erweitert werden.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsarbeiten im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Transition“.

## Literatur

- [1] P.S. Klebanoff, K.D. Tidstrom, and L.M. Sargent. The three-dimensional nature of boundary layer instability. *J. Fluid Mech.*, 12:1–41.
- [2] M. Kruse. *Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie zur Untersuchung des laminar-turbulenten Grenzschichtumschlags an der ebenen Platte*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1997.
- [3] M. Lang, O. Marxen, U. Rist, and S. Wagner. Experimental and numerical investigations on transition in a laminar separation bubble. In Wagner, Rist, Heinemann, and Hilbig, editors, *Notes on Numerical Fluid Mechanics, New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics*. 12<sup>th</sup> Stab Symposium 2000, Stuttgart, Springer Verlag, Heidelberg, 2000.
- [4] M. Lang, O. Marxen, U. Rist, S. Wagner, and W. Würz. LDA-Messungen zur Transition in einer laminaren Ablöseblase. In *Lasermethoden in der Strömungstechnik*. 8. Fachtagung der GALA, 12.–14. Sep. 2000, Freising-Weihenstephan, Shaker Verlag, Aachen, 2000.
- [5] O. Ronneberger, M. Raffel, and J. Kompenhans. Advanced evaluation algorithms for standard and dual plane particle image velocimetry. 9<sup>th</sup> International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 13.–16. July, Lisbon, Portugal, 1998.
- [6] Th. Wiegand. *Experimentelle Untersuchungen zum laminar-turbulenten Transitionsprozess eines Wellenzuges in einer Plattengrenzschicht*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996.