

# Experimentelle Untersuchungen zur Ausbreitung von laser-induzierten Störungen in Grenzschichten mit PIV und Infrarot-Messtechnik

Ulrich Scholz, Christian J. Kähler

Institut für Strömungsmechanik, TU Braunschweig  
Bienroder Weg 3, 38106 Braunschweig

## 1. Einleitung

Die aktive Beeinflussung von laminaren und turbulenten Grenzschichtströmungen mit geeigneten Aktuatoren spielt in nahezu allen Bereichen der Strömungsmechanik eine herausragende Rolle. Einerseits lassen sich mit den Aktuatoren generische Strömungsstrukturen erzeugen, deren Entwicklung und Ausbreitung im Strömungsfeld im Detail studiert werden kann, andererseits kann z.B. die Strömungsablösung an Profilen vermieden oder die Effizienz von Strömungsmaschinen gesteigert werden. Die am besten erforschten Aktuatorkonzepte basieren auf pneumatischer und mikromechanischer Basis. Aufgrund der eingeschränkten Dynamik scheint aus heutiger Sicht jedoch das Entwicklungspotenzial dieser Methoden begrenzt [2]. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein neuer Ansatz verfolgt, mit dem sich berührungslos kurzzeitige Störungen mit beliebiger Pulsfolge durch laser-induzierte Anregung erzeugen lassen.

## 2. Experimenteller Aufbau

Die Experimente wurden im kleinen Windkanal des ISM durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen Windkanal Göttinger-Bauart mit offener Messstrecke. Der Düsendurchmesser beträgt 505 mm und das Kontraktionsverhältnis ist 4:1. Für die Untersuchungen wurde aus Acrylglas eine 470 mm lange, 248 mm breite und 10 mm hohe Platte mit elliptischer Vorderkante (6:1 Achsenverhältnis) und stumpfer Hinterkante gefertigt. Um eine zweidimensionale laminare Grenzschichtströmung zu realisieren, wurde die Platte mit leicht divergent ausgerichteten Endscheiben versehen und horizontal in die Messstrecke eingebaut, siehe Abbildung 1 links.

### PIV-Messtechnik

Die PIV-Messungen wurden mit einem Nd:YAG-Doppelpulslaser (*Quantel Brilliant*) mit folgenden Eigenschaften durchgeführt: Pulsenergie 167 mJ, Pulsenergiestabilität  $\pm 5\%$ , Strahldivergenz 0,43 mrad, Richtungsstabilität  $< 100 \mu\text{rad}$ , Pulsdauer 4,2 ns. Der

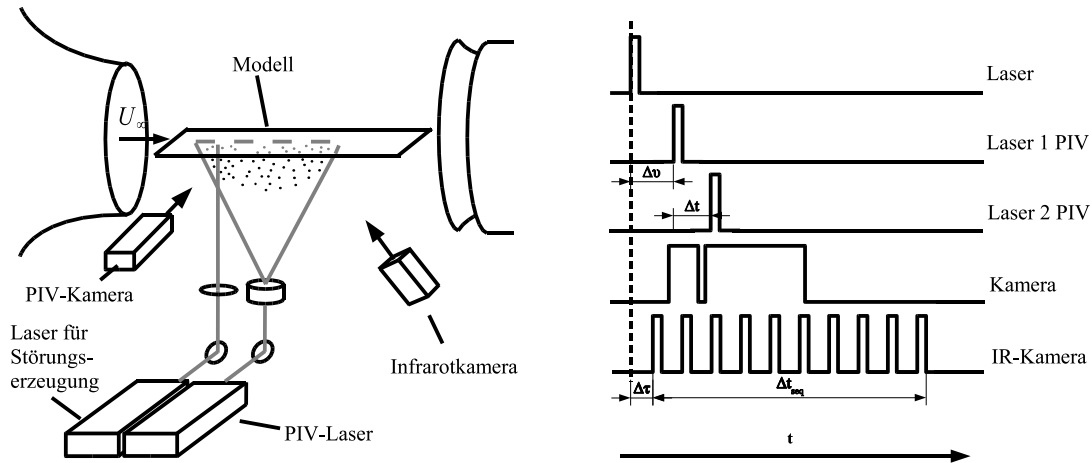


Abbildung 1. experimenteller Aufbau und Triggerung

Ausgangsstrahl wurde zur Beleuchtung von fein zerstäubten Ölpartikeln (mittlerer Durchmesser  $1\ \mu\text{m}$  [4]) aufgeweitet und das an den Partikeln gestreute Licht mit einer gekühlten CCD-Kamera (*PCO Sensicam*) aufgenommen. Der Bildausschnitt betrug  $16,45\text{mm} \times 13,1\text{mm}$ . Die Auswertung der Bilder erfolgte mit einem iterativen Multigradverfahren 2. Ordnung der Firma *LaVision* mit  $32 \times 32$  Pixel Interrogation-Fenstergröße. Damit ergab sich im physikalischen Raum eine Auflösung von  $0,2\ \text{mm}$ . Bei einem  $\Delta t$  von  $15\ \mu\text{s}$  wurde in der Aussenströmung eine Verschiebung von  $16,2$  Pixel und an der Wand von  $0,3$  Pixel realisiert.

Für die Beeinflussung wurde ein zweiter Nd:YAG Doppelpuls laser verwendet, dessen Ausgangsstrahlen mit einer konvexen Linse auf die Modelloberfläche fokussiert wurden. Bei einem ungefähren Durchmesser von  $0,2\ \text{mm}$  lassen sich damit kurzzeitige Energiedichten von ca.  $3,5\ \text{J}/\text{mm}^3$  erzeugen. Die Synchronisation der Komponenten wurde mit einer Sequencer-Karte mit Phasenschieber (*Hardsoft PTU 8*) realisiert, mit der die PIV-Aufnahmen zu einer frei wählbaren Zeit  $\Delta \nu$  nach der Auslösung des beeinflussenden Laserpulses gestartet werden konnten. Mit der aufsteigenden Flanke eines weiteren Sequencer-Signals der Länge  $\Delta t_{\text{seq}}$  (systembedingte maximale Länge:  $\Delta t_{\text{seq}} \leq 100\ \text{ms}$ ) wurde ein Funktionsgenerator (*Hameg HM8131-2*) synchronisiert, dessen Ausgangssignals mit dem Signal der Sequencer-Karte über einen logischen Und-Baustein verknüpft war. Das Signal dient zur Triggerung einer Infrarotkamera im Zeitintervall  $\Delta t_{\text{seq}}$ , wobei sich durch die Vorgabe der Zeit  $\Delta \tau$  der Beginn der Infrarotaufnahmen frei einstellen ließ, siehe Abbildung 1 rechts.

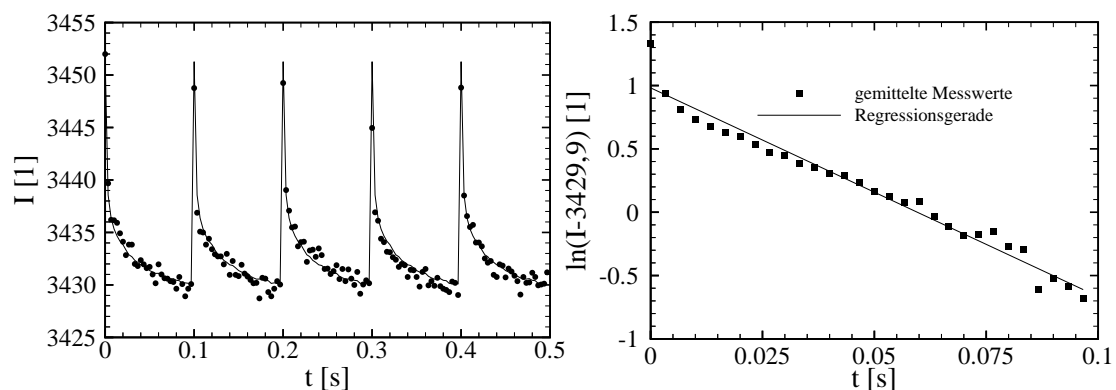
### Infrarotmesstechnik

Im Gegensatz zum PIV-System, das mit einer maximalen Aufnahme Frequenz von  $8\ \text{Hz}$  arbeitet, kann das *Indigo Phoenix* Infrarotkameran system mit DAS-Elektronik bei einer Auflösung von  $256 \times 256$  Pixel und einer Integrationszeit von  $500\ \mu\text{s}$  bis zu  $335$  Bilder pro Sekunde aufnehmen. Der InSb-Sensor arbeitet im Wellenlängenbereich von

1-5  $\mu\text{m}$ , ist jedoch mit einem Spektralfilter auf 2-5  $\mu\text{m}$  begrenzt. Mit einer Sensorgröße von  $9,6 \times 7,7 \text{ mm}$  und einer Auflösung von  $320 \times 256$  Pixel ergibt sich desweiteren eine quadratische Pixelgröße von  $30 \mu\text{m}$ . Das thermische Rauschen des auf 75 K gekühlten Sensors kann mit ca. 3 Counts angegeben werden, was bei einer thermischen Auflösung von 0,1 K einen messbare Temperaturdifferenz 0,3 K ergibt

### Modellauslegung

Für eine effektive Einkopplung des Laserpulses in die Strömung muss das Modell zwei Eigenschaften ausweisen. Zum einen muss es eine geringe Wärmekapazität besitzen, damit sich die Oberflächentemperatur schon bei geringer Wärmezufuhr möglichst stark ändert und somit die maximale Wärmemenge an das Fluid abgegeben werden kann, zum anderen sollte auch die Wärmeleitfähigkeit möglichst klein sein, damit nur ein geringer Anteil der Wärme durch Wärmeleitung verloren geht. Obwohl Acrylglas beide Anforderungen erfüllt, ist eine direkte Verwendung aufgrund der geringen Absorption und Temperaturbeständigkeit unmöglich (Aufweichbereich  $80\text{-}130^\circ\text{C}$ ). Daher wurde in das Windkanalmodell an der beeinflussten Stelle ein  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$  großes Inlay aus Silizium bündig eingebracht. Um Reflektionen und damit Strahlungsverluste zu minimieren, wurde die polierte Oberfläche des Silizium geätzt. Abbildung 2 links zeigt eine zeitgenaue Messung des Abkühlverhaltens der erhitzten Oberfläche. Es ist zu erkennen, dass die durch Punkte dargestellten Einzelmesswerte gut mit dem gemittelten Verlauf (durchgezogene Linie) übereinstimmen. Abweichungen zum Zeitpunkt des Beschusses lassen sich auf 0,5K beziffern. Wie in Abbildung 2 rechts für den Fall der Strömung an einer ebenen Platte mit einer Anströmgeschwindigkeit von 6,5 m/s gezeigt, kann das Abklingverhalten der beeinflussten Stelle gut durch ein exponentielles Gesetz beschrieben werden, wie es auch in der Literatur zu finden ist [3].



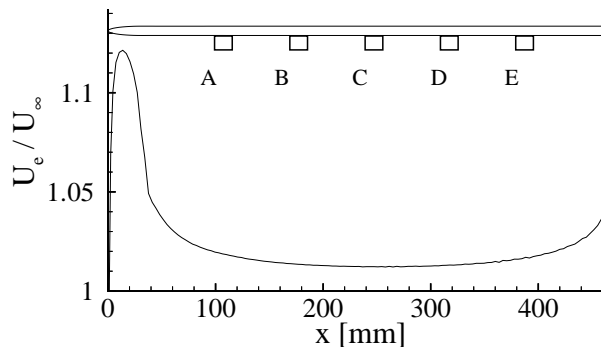
**Abbildung 2.** thermisches Abklingverhalten der Modelloberfläche nach dem Laserbeschuss

Größere Abweichungen ergeben sich jedoch direkt nach dem Laser-Beschuß, wo die gemessene Oberflächentemperatur erheblich höher als theoretische vorausgesagt ist. Erklärungen hierfür liegen in den Nichtlinearität der Kamera und den

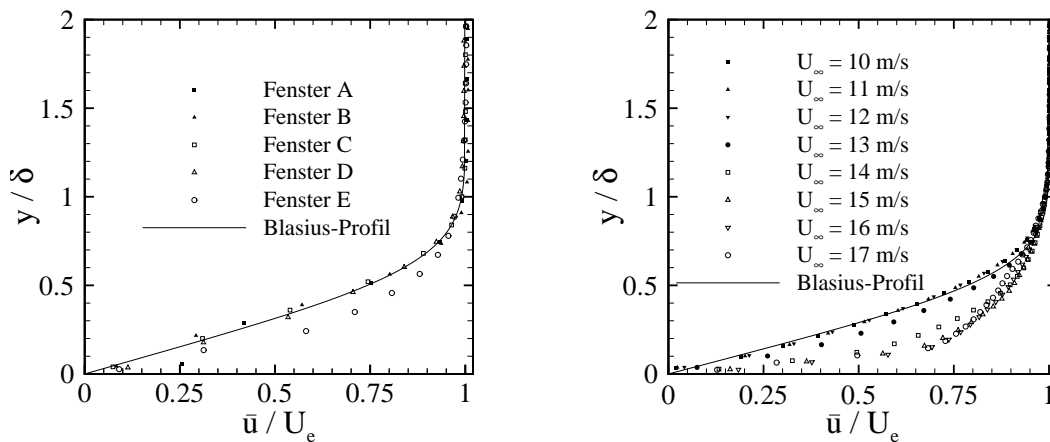
Strahlungseigenschaften des Plasmas bzw. in der abgegebenen Wärme Strahlung, die nach Boltzmann von der vierten Potenz der absoluten Temperatur abhängig ist. Wichtig ist festzustellen, dass vor allem das Minimum der gemessenen Temperatur nach jedem Schuss ungefähr den gleichen Wert annimmt (vgl. 2), was aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Acrylglases die Folgerung zulässt, dass ein Großteil der Wärme an das Fluid abgegeben wird.

### 3. Voruntersuchungen

In Voruntersuchungen wurde zunächst die ungestörte Strömung entlang einer ebenen Platte untersucht um die Übereinstimmung mit einer idealen ebenen Plattenströmung zu verifizieren. Dazu wurden an verschiedenen Positionen die Grenzschichtprofile gemessen und mit der theoretischen Lösung nach Blasius verglichen. Die ausgewählten Messorte sind in Abbildung 4 zusammen mit dem Verlauf der mit XFOIL 6.9 gerechneten Geschwindigkeit am Rand der Grenzschicht dargestellt. Man erkennt, dass die ausgewählten Messorte in einem Bereich liegen, in dem die Geschwindigkeit am Grenzschichttrand  $U_e$  durch die Verdrängungswirkung der Platte nur unwesentlich von der Anströmgeschwindigkeit  $U_\infty$  abweicht.



**Abbildung 3.** Verhältnis der Geschwindigkeit am Rand der Grenzschicht  $U_e$  zur Anströmgeschwindigkeit  $U_\infty$  und Positionen der Messfenster



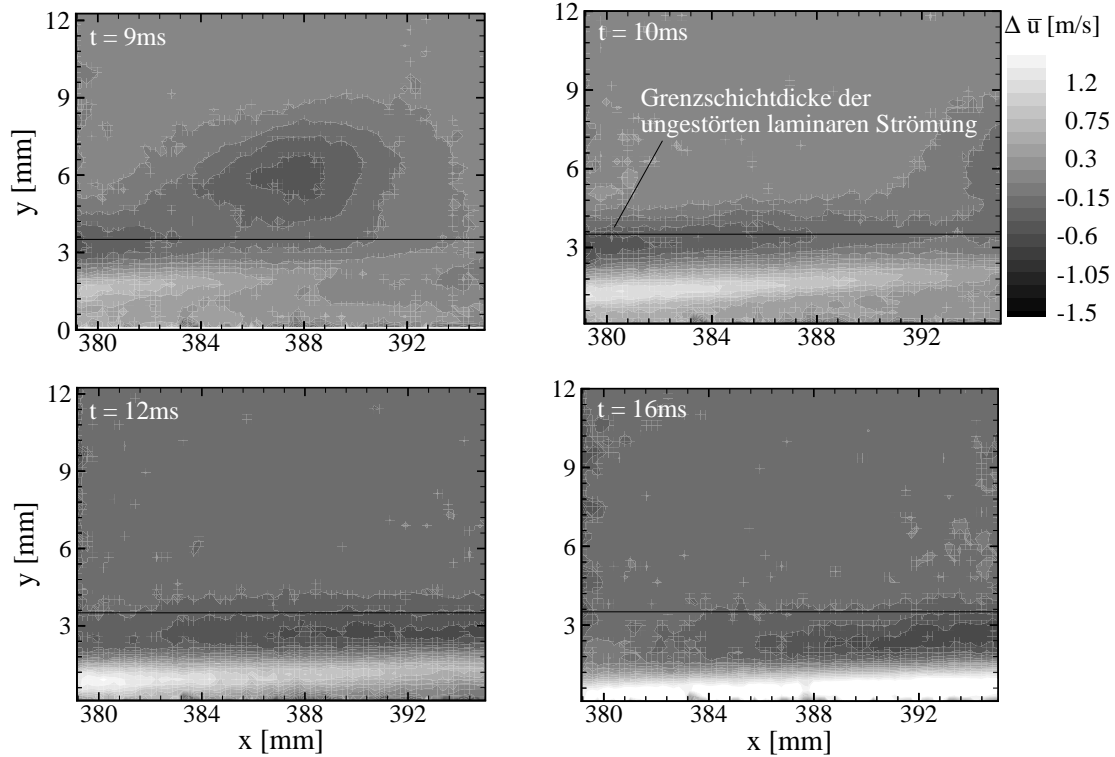
**Abbildung 4.** Grenzschichtprofile einer ebenen Platte ohne Druckgradienten an verschiedenen Orten (siehe Abb. 3) und im Messfenster E bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Abbildung 4 links zeigt, dass die bei  $\bar{u} = 14 \text{ m/s}$  in den Messfenstern A-D bestimmten Grenzschichtprofile sehr gut mit dem *Blasius*-Profil übereinstimmen. In Messfenster E hingegen befindet sich die Grenzschicht schon deutlich in einem transitionellen Zustand. Durch Variation der Anströmgeschwindigkeit  $U_\infty$  am Ort E wurde die kritische Reynoldszahl, also diejenige Reynoldszahl an der die Transition abgeschlossen ist, näherungsweise bestimmt. Nach Abbildung 4 rechts befindet sich die Strömung ab  $12 \text{ m/s}$  im Transitionsbereich. Von  $14 \text{ m/s}$  an gleichen sich alle bei höheren Geschwindigkeiten aufgenommenen Profil gut, so dass die kritische Reynoldszahl näherungsweise zu  $Re_{\text{krit}} = 3,6 \cdot 10^6 - 3,8 \cdot 10^6$  bestimmt werden kann, was gut mit dem in der Literatur angegebenen Bereich von  $3,5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$  übereinstimmt (vergl. [5]).

#### 4. Hauptuntersuchungen

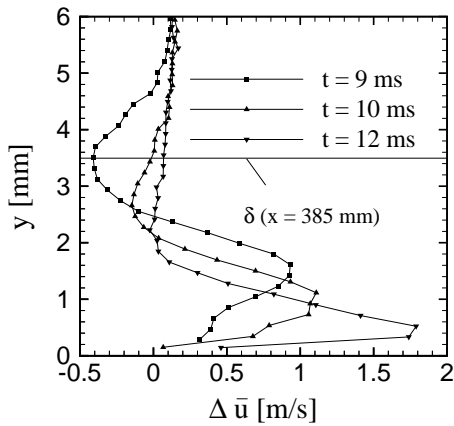
Um die Wirksamkeit der thermischen Störung zu untersuchen, wurde der Laserstrahl bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $10 \text{ m/s}$  im laminaren Bereich der Strömung auf eine Stelle  $x = 305 \text{ mm}$  hinter der Plattenvorderkante fokussiert. Aufgrund seiner technologischen Bedeutung ist die Wechselwirkung von Strahlung und Materie (Festkörper) in der Literatur ausführlich diskutiert worden [1]. Durch das Auftreten eines Strahlungsfeldes hoher Dichte wird das Material an der Oberfläche (hier Silizium) zunächst lokal aufgeschmolzen, verdampft und schließlich durch Photoionisation und inverse Bremsstrahlung in ein Plasma überführt. Das Plasma dehnt sich explosionsartig aus und bildet eine Schockwelle, hinter der sich das ionisierte Gas befindet. In so erzeugten Plasmen sind Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von bis zu  $1500 \text{ m/s}$  gemessen worden [6]. Um die minimale Energiedichte zu bestimmen, die erforderlich ist, um eine Störung im Strömungsfeld zu erzeugen, wurde die Pulsenergie des Nd:YAG-Lasers variiert. Bei ca. 60% der maximalen Pulsenergie d.h. bei einer Energiedichte von  $2,1 \text{ J/mm}^3$ , konnte mit PIV eine Störung der laminaren Grenzschicht beobachtet werden, die sich mit zunehmender Pulsleistung kaum verändert. Gleichzeitig ist auch ein Knall hörbar, der sich der Schockwelle zuordnen lässt und ein breites Strahlungsspektrum aufgrund der Plasmabildung. Es kann daher gefolgert werden, dass die induzierten Strömungsstrukturen durch Druckschwankungen initiiert werden, die wiederum auf Schockwellen beim Aufschmelzvorgang zurückzuführen sind. In Abbildung 5 ist dazu eine Sequenz von farbkodierten Messungen aufgetragen die 8 ms nach der Auslösung des Lasers beginnend die Entwicklung der Störung nach 10 ms, 12 ms und 16 ms in Form der Relativgeschwindigkeiten zur Grundströmung in  $x$ -Richtung zeigt.

Zunächst kann festgestellt werden, dass der vorderste Bereich der Störung mit ca.  $0,9U_\infty$  wandert, was z.B. auch für einen turbulenten Spot charakteristisch ist. Dabei wird als Störung eine Änderung der gemittelten Geschwindigkeit von 2% der lokalen ungestörten Anströmung angesehen. Das vorderste Gebiet liegt oberhalb der laminaren Grenzschichtdicke und lässt sich von seiner Form mit einer ellipsenähnlichen Fläche vergleichen. Dem vorderen Teil der Störung, der vor allem oberhalb der ungestörten Grenzschichtdicke liegt, folgt ein Teil, der dadurch gekennzeichnet ist, dass sich



**Abbildung 5.** Entwicklung einer turbulenten Störung an einem festen Ort zu verschiedenen Zeiten

eine turbulente Struktur entwickelt, die sich innerhalb der umgebenden ungestörten laminaren Grenzschichtdicke befindet.



**Abbildung 6.** Stör-  
geschwindigkeitsprofile  
parallel zur Wand zu  
verschiedenen Zeiten

Zur Quantifizierung der Strukturen sind in Abbildung 6 exemplarisch jeweils die Geschwindigkeitsprofile an der Stelle  $x=385$  mm zu den ersten drei Zeitpunkten, die auch in Abbildung 5 benutzt wurden, dargestellt. Nach 9 ms ist zunächst der vorderste Teil der Störung zu erkennen, der von 2,4 mm bis 6 mm Wandabstand reicht und eine Geschwindigkeitsdifferenz von bis zu  $-0,4$  m/s aufweist. Die Grenzschicht ist hingegen erheblich stärker gestört. Bei  $t=10$  ms beschränkt sich die Störung fast ausschließlich auf die Grenzschicht. In der Nähe der Wand entwickeln sich bis ca. zur halben Grenzschichtdicke mit der Zeit immer stärker werdende Übergeschwindigkeiten

die auf zunehmend turbulenteres Verhalten schließen lassen. Zwischen der halben Grenzschichtdicke und der Grenzschichtdicke selbst bildet sich aus Kontinuitätsgründen ein Gebiet niedrigerer Geschwindigkeiten.

Abbildung 7 zeigt den vordersten Bereich der Störung an verschiedenen Positionen auf der Platte. Betrachtet man die Entwicklung des vordersten Bereichs mit der Lauflänge, so kann anhand der abnehmenden Intensitäten der Störungsgeschwindigkeiten in  $x$ -Richtung gefolgert werden, dass dieser Störungsteil mit zunehmendem Alter gedämpft wird. Dies entspricht den Erwartungen, weil in diesem Strömungsteil keine mittleren Gradienten auftreten, die für die Aufrechterhaltung der Turbulenz nötig wären.

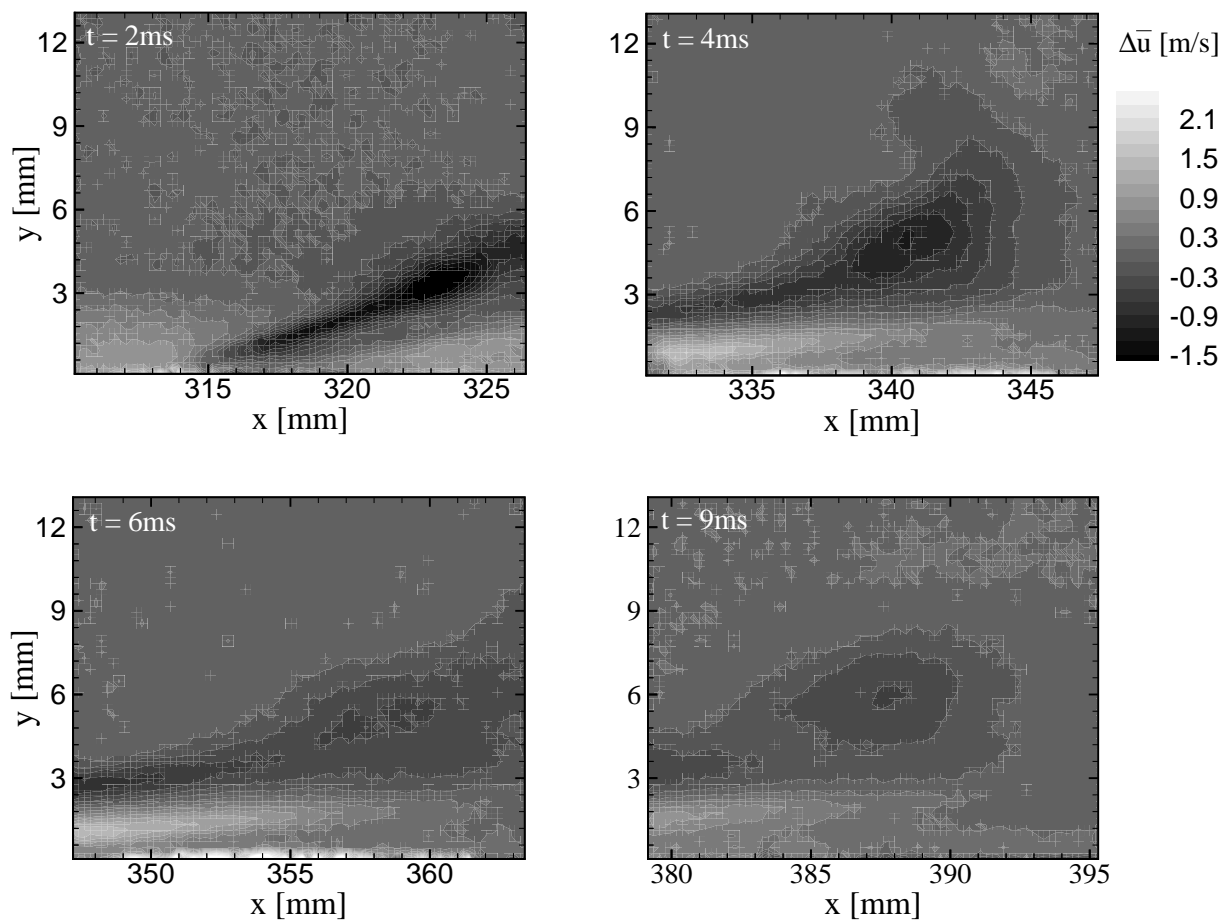


Abbildung 7. Vorderster Teil der Störung an verschiedenen Positionen

## 5. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass sich durch einen Laserpuls mit geeigneter Energiedichte berührungslos Störungen in Grenzschichten erzeugen lassen. Diese formen sich zu turbulenten Strukturen aus, die größtenteils bezüglich der ungestörten Grenzschichtdicke innerhalb dieser bleiben. Der Teil der Strukturen, der oberhalb der Grenzschicht liegt, wird durch die fehlende Energiezufuhr schwächer, wohingegen sich der unterhalb der Grenzschichtdicke liegende Teil durch die Zufuhr von Energie aus der Scherströmung weiter

entwickelt. Die Geschwindigkeit, mit der die Struktur in der ungestörten Anströmung mitkonvektiert, kann zwischen  $0,9U_\infty$  und  $0,5U_\infty$  angegeben werden, was den Eigenschaften eines turbulenten Spots ähnlich ist.

- [1] **Amoruso, S., Bruzzese, R., Spinelli, N. Velotta, R.:** *Characterization of laser-ablation plasmas*, J. Phy. B: At. Mol. Opt. Phys. 32, IOP Publishing, 1999
- [2] **Gad-el-Hak, M.:** *Flow Control: The Future*, Journal of Aircraft 38, 2001
- [3] **Jischa, M.:** *Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch*, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1982
- [4] **Kähler, C. J., Sammler, B., Kompenhans J.:** *Generation and control of tracer particles for optical flow investigations in air*, Experiments in Fluids 33, Springer Verlag, 2002
- [5] **Schlichting H., Gersten K.:** *Grenzschichttheorie*, Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [6] **Viallagrán-Muniz, M, Sobral, H., Navarro-González, R.:** *Shock and thermal wave study of laser-induced plasmas in air by the probe beam deflection technique*, Measurement in Science and Technology 14, IOP Publishing, 2003