

# LDA-Messungen zur Transition in einer laminaren Ablöseblase

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

Es wird der Aufbau eines Experiments zur Erzeugung einer laminaren, druckinduzierten Ablöseblase beschrieben. Ergebnisse aus Grenzschichtmessungen mit einem Laser-Doppler-Anemometer werden vorgestellt. Diese Meßergebnisse werden mit der linearen Stabilitätstheorie (LST) und mit direkter numerischer Simulation (DNS) verglichen.

## Motivation

Durch hohen Druckanstieg treten besonders an Laminarflügeln und an Hochauftriebshilfen transitionelle Ablöseblasen auf. Dabei löst die laminare Grenzschicht von der Körperkontur ab und es findet Transition in einer freien Scherschicht statt. Anschließend legt sich die nun turbulente Grenzschicht in der Regel wieder an. Die Ablöseblase beeinflusst dabei wesentlich die Anfangsbedingungen für die weitere Grenzschichtentwicklung und somit die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Im Transitionsbereich der Scherschicht fehlen vor allem grundlegende Kenntnisse über das Entstehen dreidimensionaler Strukturen und ihr Einfluß auf das Wiederanlegen der abgelösten Grenzschicht. Diese Kenntnisse sind jedoch erforderlich für das Verständnis der Strömung mit Ablösung.

## Versuchsanlage und experimenteller Aufbau

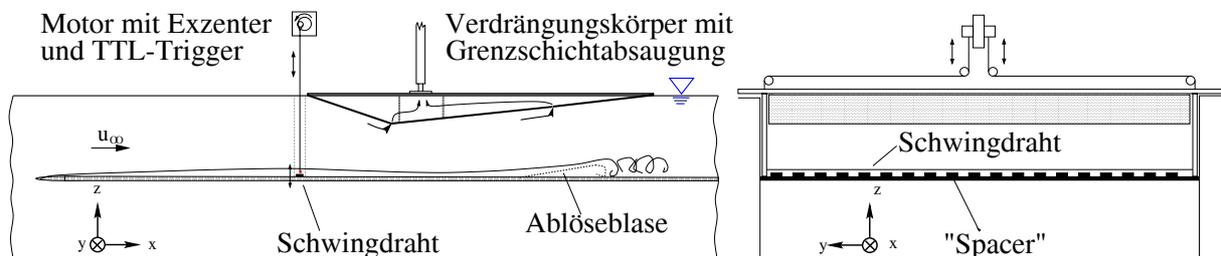


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau

Der Laminarwasserkanal (LWK) wurde speziell für Transitionsexperimente ausgelegt [5]. Der Turbulenzgrad beträgt  $Tu \leq 0,05\%$  für einen Frequenzbereich von  $0,1 - 10\text{ Hz}$ .

bei einer Strömungsgeschwindigkeit von  $140 \frac{mm}{s}$ . Die Meßstrecke ist von jeder Seite optisch zugänglich,  $10 m$  lang,  $1,2 m$  breit und von oben offen. Die Experimente wurden an einer laminar angeströmten ebenen Platte durchgeführt. Die Grundströmung entspricht einer Blasius-Strömung ( $H_{12} = 2,591$ ). Der gemessene Formparameter  $H_{12} = 2,6$  über der Spannweite der Platte schwankt nur um 1% seines Mittelwerts. Die Grenzschicht kann daher mit sehr guter Näherung als zweidimensional betrachtet werden.

Zur Erzeugung einer druckinduzierten, laminaren Ablöseblase wird ein Verdrängungskörper von oben in die Meßstrecke eingebracht (Abbildung 1). Nach einer kurzen Beschleunigungsstrecke findet im Erweiterungsteil ein starker Druckanstieg statt, aufgrund dessen sich die laminare Grenzschicht von der ebenen Platte ablöst. Um am Verdrängungskörper selbst Ablösung und Transition zu verhindern, wird im engsten Querschnitt und im Bereich des Druckanstiegs die Grenzschicht abgesaugt.

Mit Hilfe einer Schwingdrahtvorrichtung wird eine Tollmien-Schlichting-Welle kontrolliert vor dem Verdrängungskörper in die Grenzschicht eingekoppelt. Die Frequenz dieser Störung ( $f_0 = 1,1 Hz$ ) entspricht der nach der linearen Stabilitätstheorie (LST) am stärksten angefachten 2-D-Störung. Mit dieser Frequenz schwingt die Ablöseblase auch im ungestörten Fall, jedoch nicht mit zeitlich konstanten Amplituden wie im Fall mit Störeingabe. Die Messungen erfolgen phasengekoppelt zur Störungseingabe mit Hilfe eines vom Schwingdrahtantrieb abgegebenen TTL-Signals.

Zur Untersuchung dreidimensionaler Störungen werden als regelmäßige Wandrauigkeit  $1 mm$  dicke Metallplättchen, sog. "Spacer" [1, 2], im Abstand von  $\lambda_y = 58 mm$  unter dem Schwingdraht positioniert. Durch die Interaktion der Spacer mit dem Schwingdraht entsteht eine 3-D-Wellenkombination mit einer typischen Peak-Valley-Struktur. Die Grenzschicht dickt dabei im Peak mehr auf als im Valley. Die durch die Spacer eingebrachte Querwellenlänge wurde so gewählt, daß spannweitig regelmäßige Wirbelstrukturen beim Scherschichtzusammenbruch beobachtet werden können. Dazu wurden Visualisierungen mit Hilfe der Wasserstoffbläschenmethode [5] durchgeführt (Abbildung 2).

Mit einem zweikanaligen Dantec-Laser-Doppler-Anemometer (LDA) werden die Geschwindigkeitskomponenten in Hauptströmungsrichtung  $u$  und in Wandnormalenrichtung  $w$ , sowie ihre Schwankungsgrößen gemessen. Die Aufzeichnung der Rohdaten erfolgt mit Hilfe der kommerziellen Software "BSA-Flow".

Das am Laminarwasserkanal installierte LDA weist folgende Eckdaten auf: Rückwärtsstreuung, zwei BSAenhanced-Module, Brennweite  $675 mm$ , Meßvolumendurchmesser ca.  $70 \mu m$ , Interferenzstreifenabstand  $3.22 \mu m$  für die  $u$ -Komponente. Hier wird bei einer Datenrate von  $\frac{120}{s}$  ein Turbulenzgrad von  $Tu \leq 1,1 \%$  gemessen. Einer der blauen Strahlen für die  $w$ -Komponente läßt sich in die Mitte der Optik schieben, um trotz senkrecht zur Kanalseitenwand ausgerichteter Sonde wandnahe Messungen zu ermöglichen. Dabei ergibt sich ein Interferenzstreifenabstand von  $6.11 \mu m$ .

## Meßdatenauswertung

Der wesentliche Bestandteil dieses Transitionsexperiments ist die Messung periodischer Störungen und deren Entwicklung stromab. Dabei werden die während des Transitionsprozesses auftretenden Schwankungsgrößen der Geschwindigkeitskomponenten in Hauptströmungsrichtung  $u$  und Wandnormalenrichtung  $w$  erfaßt. Da die mit dem LDA gewonnenen Daten für eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) nicht äquidistant vorliegen, wird das Zeitsignal linear interpoliert und äquidistant mit  $2^n$  Samples abgetastet. Dabei ist  $2^n$  größer als die Anzahl der aufgenommenen Doppler-Bursts am Meßpunkt. Zur genaueren Bestimmung der Amplituden auch bei geringen Datenraten oder hohen

Frequenzen wird zusätzlich über alle gemessenen Perioden der fundamentalen Frequenz  $f_0$  des Schwingdrahtes eine Phasenmittelung durchgeführt [2, 3].

Bei einer zu untersuchenden dreidimensionalen Störung liefert eine Fourieranalyse in zeitlicher und räumlicher (spannweitischer) Richtung die Amplituden  $a_{h,k}$  und Phasen  $\Phi_{h,k}$  der eingebrachten, sich entwickelnden Störung. Dazu wird folgender Ansatz gemacht [2]:

$$\begin{aligned} u'(x, y, z, t) &= \sum_{h=1}^H a_h(x, y, z) \sin(h2\pi f_0 t + \phi_h(x, y, z)) \\ &= \sum_{h=1}^H \sum_{k=-K}^K a_{h,k}(x, z) \sin(h2\pi f_0 t - k \frac{2\pi}{\lambda_y} y + \phi_{h,k}(x, z)), \end{aligned}$$

Die Indizes  $h$  und  $k$  dieses doppelten Fourieransatzes stehen für die Wellenzahlkoeffizienten in zeitlicher und räumlicher Richtung. Diese Methode kann bis zum Auftreten starker Nichtperiodizitäten in der Strömung zwischen dem Transitionspunkt und dem Wiederanlegebereich angewendet werden.

## Meßergebnisse

Bei einer freien Anströmgeschwindigkeit von  $u_\infty = 128 \frac{mm}{s}$  wurden über den gesamten Bereich der abgelösten Grenzschicht an 30 Positionen Geschwindigkeitsprofile gemessen. Die Auflösung in Wandnormalenrichtung betrug dabei 1 mm. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der wichtigsten Grenzschichtparameter über diesen Bereich. Die Reynoldszahl bezogen auf die Verdrängungsdicke  $\delta_1$  an der Ablösestelle betrug  $Re_{\delta_1} = 960$ .

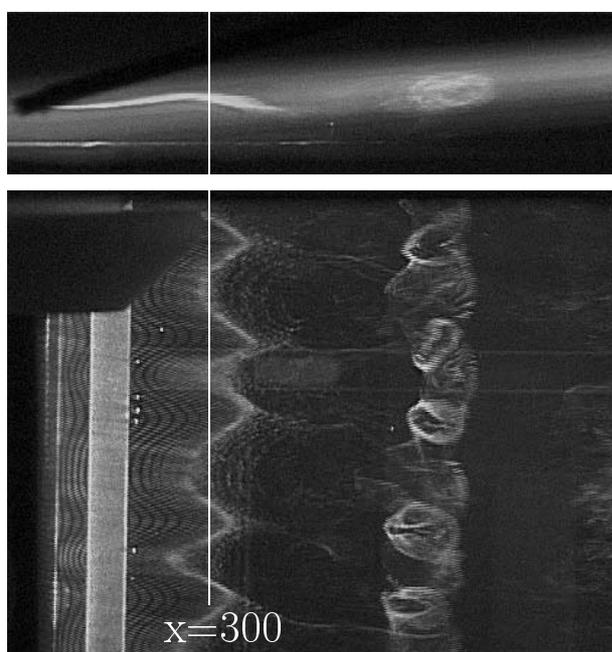


Abbildung 2: Umschlagszenario in der Scherschicht mit Wasserstoffbläschen sichtbar gemacht (3-D-Störung). Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten).

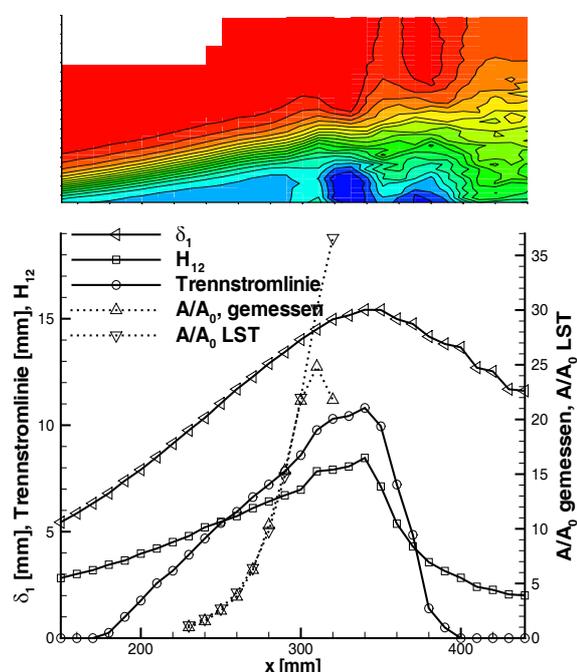


Abbildung 3: Konturlinien der u-Komp. aus LDA-Meßdaten (oben). Grenzschichtparameter und Vergleich mit der LST (2-D-Störung).

Die Gesamtlänge der Ablöseblase ist mit ca. 230 mm durch die Trennstromlinie gegeben. Diese trennt das Rezirkulationsgebiet von der Außenströmung, d.h. im zeitlichen Mittel muß die Massenfluktuation zwischen der Plattenoberfläche und der Trennstromlinie null sein:

$$\int_{z=0}^{z_T} \bar{u}(z) dz = 0$$

Die Meßdatenerfassung mit einem LDA bietet hier den wesentlichen Vorteil, daß vor allem im Bereich der sich aufrrollenden Scherschicht, in dem starke "Wirbel" ausgestoßen werden, Betrag und Richtung der Geschwindigkeitskomponenten gemessen werden können. Dort treten starke Geschwindigkeitsfluktuationen mit wechselnden Vorzeichen auf, die mit Hilfe eines Hitzdrahtanemometers nicht ohne weiteres erfaßt werden können. Die Trennstromlinie kann mit einem LDA somit direkt aus den gemessenen Geschwindigkeitsprofilen ermittelt werden.

Im laminaren Bereich der Ablöseblase wurde ein Vergleich der direkt aus den Meßschrieben erhaltenen Amplitudenverläufe einer eingegebenen *zweidimensionalen Störung*  $\frac{A}{A_0}$  (ohne Spacer) mit den nach der linearen Stabilitätstheorie berechneten Amplitudenverläufen durchgeführt. Dabei dienten die gemessenen und anschließend gesplinten Geschwindigkeitsprofile als Eingabe für einen Orr-Sommerfeld-Löser. Der Vergleich dieser (1,0)-Mode zeigt, daß bis zum Auftreten erster dreidimensionaler Störungen in der Scherschicht bei  $x = 300$  mm die Anfachung der eingegebenen zweidimensionalen Störung im Experiment mit der linearen Stabilitätstheorie beschrieben werden kann (Abbildung 3). Diese Anfachung konnte jedoch erst nach dem Ablösen der Grenzschicht in der freien Scherschicht gemessen werden (Abbildung 4), was auch in [7] beobachtet wurde. Bei einsetzender Sättigung der Störungsanfachung kann eine starke Entwicklung dreidimensionaler Strukturen in der Scherschicht beobachtet werden (Abbildung 2).

Im Falle der eingegebenen *dreidimensionalen Störung* wurden Grenzschichtprofile an 16 Positionen über eine Spacer-Wellenlänge  $\lambda_y$  in spannweitisger Richtung gemessen.

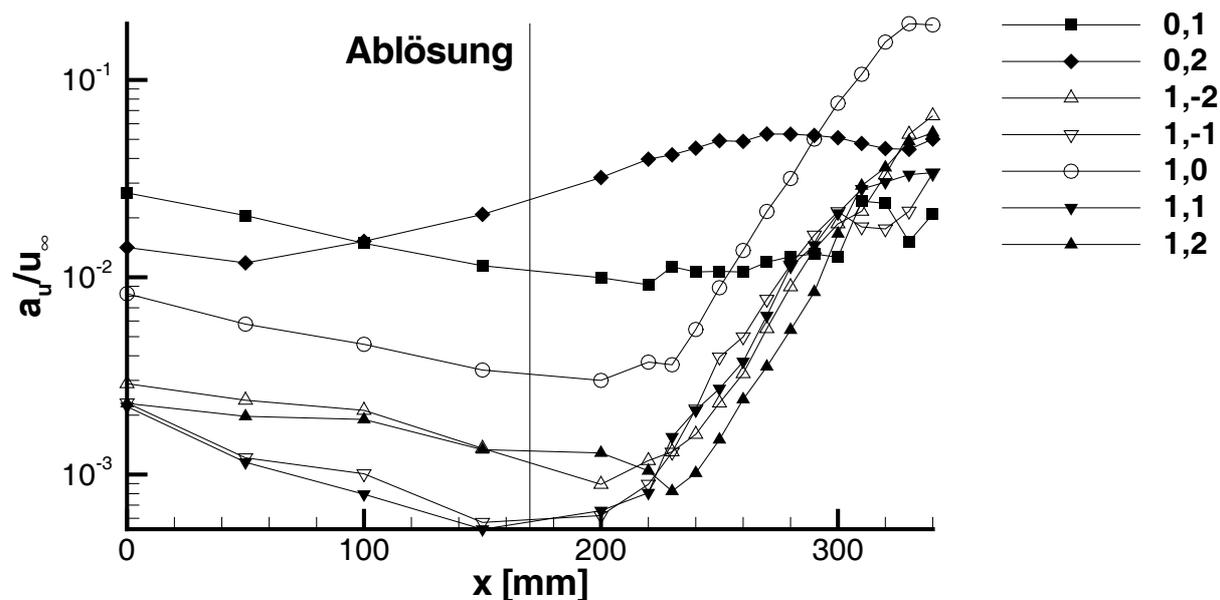


Abbildung 4: Entwicklung der Amplituden  $a_{h,k}$  für die Geschwindigkeitskomponente  $u$  ab dem engsten Querschnitt stromab bei dreidimensionaler Störung.

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Amplituden einiger  $(h, k)$ -Moden für die Geschwindigkeitskomponente  $u$  vom engsten Querschnitt unter dem Verdrängungskörper bis in den Sättigungsbereich. Bemerkenswert ist, daß im Falle einer eingegebenen dreidimensionalen Störung eine stationäre  $(0, 2)$ -Mode über den Verdrängungskörper hinweg stark angefacht wird. Im Gegensatz dazu gewinnt beim Grenzschichtumschlag mit fundamentaler Resonanz ohne Ablösung [2] die  $(0, 1)$ -Mode an Dominanz. Im vorliegenden Fall bilden sich pro Spacerwellenlänge zwei Peak-Valley-Ebenen aus. Da dennoch ein starker Anteil der  $(h, \pm 1)$ -Moden vorhanden ist, wird als Grundquerwellenlänge die durch die Spacer eingebrachte Wellenlänge von  $\lambda_y = 58 \text{ mm}$  zu Grunde gelegt.

## Vergleich mit DNS

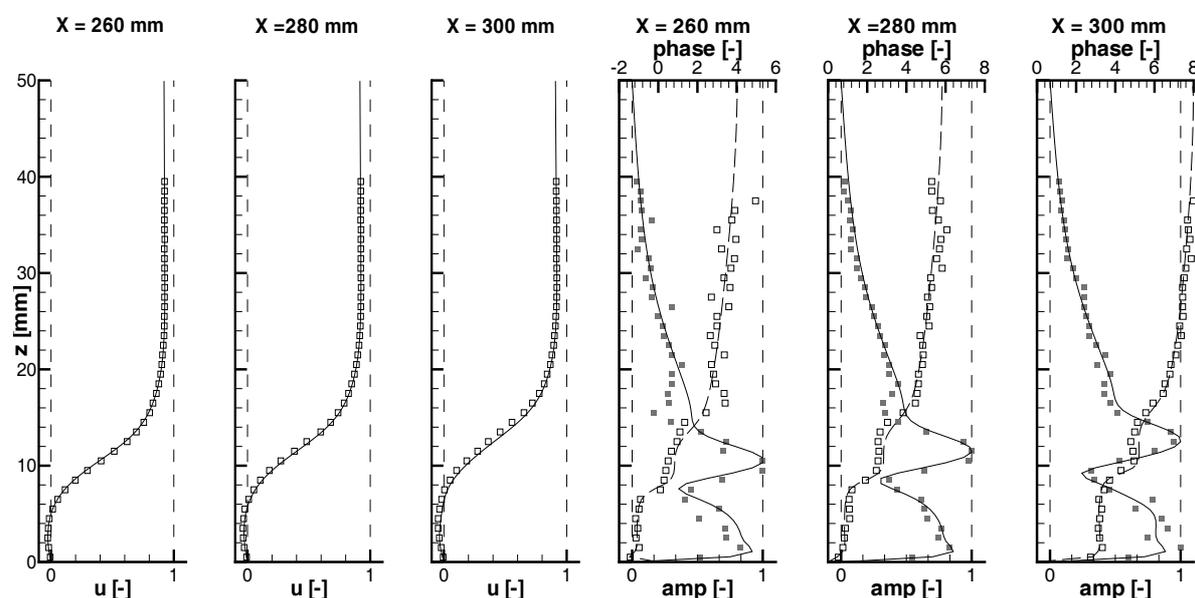


Abbildung 5: Vergleich der gemessenen (Symbole) und mit DNS berechneten Grundströmungsprofile (links) mit dazugehörigen Amplitudenverläufen  $a_{(1,0)}$  und Phasenverläufen  $\phi_{(1,0)}$  (rechts) der 2-D-Störung  $((1, 0)$ -Mode).

Zur direkten numerischen Simulation (DNS) des Experiments, die ab dem engsten Querschnitt unter dem Verdrängungskörper beginnt, mußte dort zunächst mit Hilfe von Messungen und 2D-DNS im Beschleunigungsbereich die Einströmrandbedingung, d.h. das laminare Grenzschichtprofil im engsten Querschnitt ( $x = 0$ ), ermittelt werden. Eine Messung des Geschwindigkeitsverlaufs in konstanter Höhe  $z$  über den Druckanstieg hinweg ohne Ablösung (die Ablöseblase wurde mit Hilfe eines Turbulators beseitigt) diente dann für eine dreidimensionale räumliche DNS als Potentialgeschwindigkeit am oberen Rand des Integrationsgebiets. Das eingesetzte numerische Verfahren entspricht dem in [6] zur ausführlichen Untersuchung transitionaler Ablöseblasen verwendeten. Zur Berücksichtigung des tatsächlichen (instationären) Geschwindigkeitsverlaufs am oberen Rand bei Auftreten einer großen Ablöseblase wird zusätzlich ein Grenzschichtinteraktionsmodell gemäß [4] eingesetzt.

Simuliert wurde der Fall einer eingegebenen, rein zweidimensionalen Störung von ver-

gleichbarer Amplitude wie im Experiment, die bereits mit der LST verglichen wurde. Ein zusätzlich in der DNS eingebrachter 3D-Puls sehr kleiner Amplitude bewirkte den Zusammenbruch der abgelösten Scherschicht hin zu feinskaligen, turbulenten Bereichen. Abbildung 5 zeigt den Vergleich von gemessenen und berechneten Grundströmungsprofilen. Diese wurden mit der größten Geschwindigkeit am oberen Rand des Integrationsgebietes normiert. Zusätzlich sind die zugehörigen Amplitudenverläufe  $a_{(1,0)}$  und Phasenverläufe  $\phi_{(1,0)}$  über der Wandnormalenrichtung dargestellt. Die Amplitude wurde dabei mit ihrem Maximalwert normiert. Es zeigt sich eine sehr gute quantitative Übereinstimmung.

## Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Transition in der freien Scherschicht einer druckinduzierten, laminaren Ablöseblase vorgestellt. Mit einem LDA wurden die Schwankungsgrößen kontrolliert eingegebener, zwei- und dreidimensionaler Störungen gemessen. Der Vergleich mit Daten aus direkter numerischer Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Grundströmungsprofilen, Amplituden- und Phasenverläufen der sich entwickelnden, eingegebenen Störung.

In Zukunft ist eine weitere, enge Verzahnung zwischen Experiment und direkter numerischer Simulation vorgesehen. Die LDA-Messungen sollen durch PIV-Messungen ergänzt werden.

## Literatur

- [1] KLEBANOFF P.S., TIDSTROM K.D., SARGENT L.M. 1962, *The three-dimensional nature of boundary layer instability*; J. Fluid Mech. 12, pp. 1–41
- [2] KRUSE M., 1997, *Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie zur Untersuchung des laminar-turbulenten Grenzschichtumschlags an der ebenen Platte*; Dissertation an der Universität Stuttgart, VDI, 1997
- [3] KRUSE M., WAGNER S. 1996, *LDA Measurements of Laminar-Turbulent Transition in a Flat-Plate Boundary layer*, 8th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 8.–11. July, Lisbon, Portugal
- [4] MAUCHER, U., RIST, U., WAGNER, S., 1998, *A Refined Method for DNS of Transition in Interacting Boundary Layers*; AIAA 98-2435, 29<sup>th</sup> Fluid Dynamics Conference, June 15-18, Albuquerque, New Mexico, USA. To appear in AIAA Journal 2000.
- [5] STRUNZ M., 1987, *Ein Laminarwasserkanal zur Untersuchung von Stabilitätsproblemen in der Strömungsgrenzschicht*; Dissertation an der Universität Stuttgart
- [6] RIST U., 1999, *Zur Instabilität und Transition in laminaren Ablöseblasen*; Habilitation an der Universität Stuttgart, Shaker Verlag, 1998
- [7] WATMUFF J.H., 1999, *Evolution of a Wave Packet Into Vortex Loops in a Laminar Separation Bubble*; J. Fluid Mech. 397, pp. 119–169