

LDA - Untersuchungen wandgebundener Strömungen in einem großen Brechungsindexangepassten Ölkanal

Stefan Becker & Hermann Lienhart
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 4
91058 Erlangen
sbecker@lstm.uni-erlangen.de

Zusammenfassung:

Um transitionale und turbulente Vorgänge in Wandnähe im Detail untersuchen zu können, wurden am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der FAU Erlangen-Nürnberg detaillierte Arbeiten durchgeführt, um geeignete Messmethoden bereitzustellen. Allerdings gelangen diese extrem wandnahen Messungen nur in Messstrecken, die mit brechungsindexangepassten Fluiden betrieben wurden. Der am LSTM neu aufgebaute Kanal gehört mit dem noch in den USA bestehenden zu den einzigen in dieser Größenordnung existierenden in der Welt. Neben der Beschreibung der Messeinrichtung erfolgt eine Vorstellung von wandnahen Messungen zur Grenzschichttransition bei Absaugung an einer ebenen Platte. Es konnte dort gezeigt werden, dass Messungen der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in Wandnähe bis zu $y^+ \approx 0,05 - 0,1$ erhalten werden konnten, verbunden mit verlässlichen Turbulenzgradmessungen bis $y^+ \approx 0,1$.

1. Einleitung

Um laminar-turbulente Vorgängen im Detail untersuchen zu können, wurden in den letzten Jahren am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der FAU Erlangen-Nürnberg detaillierte Arbeiten durchgeführt, um geeignete Messmethoden bereitzustellen, wie sie quantitative Untersuchungen der Transition erfordern. Erste Entwicklungen von Messverfahren konzentrierten sich auf die Hitzdraht-Anemometrie. Diese sollte so weiterentwickelt werden, dass sie wandnahe Messungen zulässt. Obgleich wesentliche Verbesserungen wandnaher Messungen durch die Entwicklung einer Korrekturmethode erreicht werden konnten, siehe Bathia [1982], ergaben detaillierte Betrachtungen, dass die wandnahen Messungen unter $y^+ \approx 2$ keine verlässlich anzubringenden Korrekturen erlaubten. Dies führte zu der Entscheidung, die Laser-Doppler-Anemometrie für wandnahe Messungen weiterzuentwickeln. Der mit dieser Messmethode erreichte Entwicklungsstand ist u. a. in Durst [1995], Stoots [2001], Becker [2002] publiziert und präsentiert. Es konnte dort gezeigt werden, dass Messungen der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in Wandnähe bis zu $y^+ \approx 0,05 - 0,1$ erhalten werden konnten, verbunden mit verlässlichen Turbulenzgradmessungen bis $y^+ \approx 0,1$. Allerdings gelangen diese extrem wandnahen Messungen nur in Messstrecken, die

mit brechungsindexangepassten Fluiden betrieben wurden. Fluide dieser Art ermöglichen die Anpassung des Brechungsindex des Strömungsfluids an das Wandmaterial und damit das Vermeiden von Brechungen der Laserstrahlen, so dass es möglich wird, Messungen ohne Störeinflüsse der Wandungen auf die Laserstrahlen durchzuführen.

2. Der brechungsindexangepasste Kanal

Der große brechungsindexangepasste Kanal ist eine neue Versuchseinrichtung am Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) (siehe Abb. 1). Die gesamte Versuchsanlage wurde erst in den letzten Jahren fertig gestellt und in Betrieb genommen. Der Aufbau des Kanals entspricht dem eines klassischen Wasserkanals, mit den Hauptkomponenten: Pumpe, Diffusor, Beruhigungskammer mit Gleichrichter und Sieben, der Düse, der Messstrecke selbst und den entsprechenden beschauften Umlenkecken. In die Beruhigungskammer wurde zusätzlich ein Wärmetauscher integriert, mit dem es möglich ist, über die entsprechende Regelung die Temperatur des Öls im Bereich von ± 0.1 °C konstant zu halten. Der gesamte Kanal ist in Edelstahl gefertigt

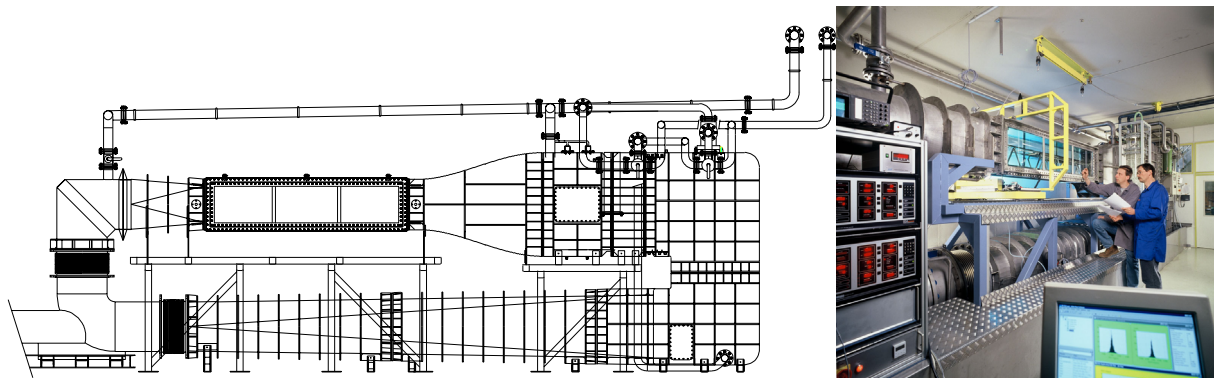


Abb. 1: Brechungsindexangepasster Strömungskanal zur Durchführung wandnaher Strömungsuntersuchungen (LSTM)

Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht der wichtigsten technischen Daten. Als Vergleich wurden die technischen Parameter eines ähnlichen Kanals am INEEL in den USA herangezogen. Beide Kanäle sind die einzigen in dieser Größenordnung existierenden in der Welt. Die Abmessungen der Messstrecke des LSTM Kanals ist bei annähernd gleicher Messstreckenlänge im Querschnitt etwas kleiner, aber am LSTM können demgegenüber 2.5-mal höhere Geschwindigkeiten und damit auch höhere Reynoldszahlen erreicht werden. Ein deutlicher Unterschied zeigte sich im Turbulenzgrad in der Messstrecke. Am LSTM wurde ein Turbulenzgrad von ca. 0.15% erreicht. Die Messungen wurden hierbei mit der Heißfilmetechnik durchgeführt. Ein möglichst kleiner Turbulenzgrad gilt u. a. als eine wichtige Voraussetzung für kontrollierte Untersuchungen zum laminaren - turbulenten Grenzschichtumschlag.

	INEEL	LSTM
Messstreckengröße	0.62 x 0.62m	0.6 x 0.45m
Messstreckenlänge	2.4m	2.52m
Kontraktionsverhältnis	4:1	6:1
Fluid / Öl	Drakeoel 5 (PENRECO)	Odina 913 (SHELL)
Brechungsindex	1.4585	1.4585
Kinematische Viskosität	12.1e-6 m ² /s	11.2e-6 m ² /s
Temperaturkontrolle über Wärmetauscher	extern	intern
Maximale Geschwindigkeit	1.9m/s	5m/s
Turbulenzgrad	0.5%	0.15%

Tab. 1: Technische Parameter der brechungsindexangepassten Versuchseinrichtung

3. Untersuchungen zum transitionalen Grenzschichtverhalten bei Absaugung

Die Untersuchungen zum transitionalen Grenzschichtverhalten hinter einer Absaugelochreihe erfolgten in einer zweidimensionalen Blasiusgrenzschicht. Die Grundlage der gewählten Versuchsparameter bildeten die Direkten Numerischen Simulationen (DNS) von Messing [1999] und Meitz [1996]. Diese Berechnungen in einer Blasiusgrenzschicht ergaben Abweichungen in der errechneten Strömungsstruktur, die bisher noch nicht völlig geklärt werden konnten. Die Berechnungen wurden mit einer definierten Störquelle vor den Absaugelöchern durchgeführt, und somit beeinflusst die Absaugung die Anfachung bzw. Auslöschung der sich ausbildenden Tollmien-Schlichting-Wellen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde bewusst auf diese definierte Anregung verzichtet, um die realen physikalischen Prozesse hinter den Absaugelöchern bei „freier Transition“ zu simulieren. Unter „freier Transition“ ist hier zu verstehen, dass keine zusätzliche künstlich definierte Störung vor den Absaugelöchern in die Grenzschicht eingebracht und somit der Transitionsprozess in der Plattengrenzschicht vom natürlichen Störspektrum der Versuchseinrichtung geprägt wird. Günstig erweist sich hierbei der niedrige Turbulenzgrad der benutzten Messstrecke (siehe Tabelle 1). Die Auslegung der Lage und Größe der Absaugelöcher, der Absaugeraten und der Geschwindigkeiten erfolgte auf der Basis der Reynoldszahl und der Geschwindigkeitsverhältnisse der Absaugung zur Außenströmung entsprechend den in der DNS verwendeten Parametern. Die Absaugelochreihe bestand aus insgesamt 43 Bohrungen mit einem Durchmesser von 3.5 mm und einem Lochabstand von 6.74 mm. Somit umfasste die Absaugelochreihe 48% der Gesamtbreite der Versuchsplatte.

Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgten mit Hilfe der Laser Doppler Anemometrie (LDA). Für die Untersuchungen wird ein LDA System auf der Basis von Lichtwellenleitern benutzt. Das Gesamtsystem kann mit einem 2D und einem 1D Sondenkopf ausgestattet werden. Für

die hier durchgeführten Untersuchungen wurde, bedingt durch die verschiedenen optischen Weglängen der verschiedenen Farben einer mehrkomponentigen Optik im Strömungsfluid Öl, eine zeitversetzte 1D-Messung der einzelnen Komponenten des dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektors gewählt. Einen schematischen Überblick über den messtechnischen Aufbau gibt die Abbildung 2.

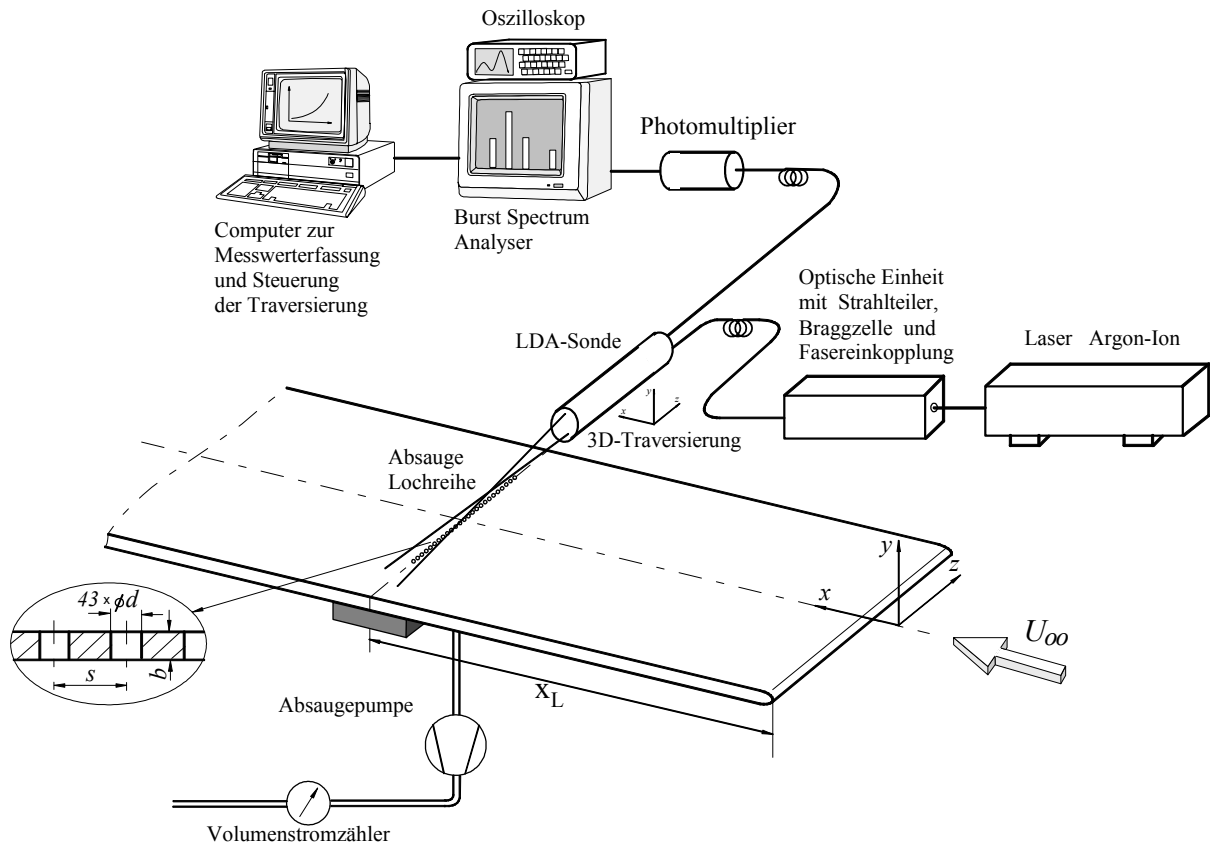


Abb. 2.: Schematischer Überblick über den Messaufbau und das LDA Messsystem

Mit dem gewählten Versuchsaufbau konnten Geschwindigkeitsverhältnisse auf der Plattenoberseite erzielt werden, die die Kriterien einer Blasiusgrenzschicht erfüllen. Der Ort der Absaugung und die Absaugeraten wurden so gewählt, dass eine optimale Übereinstimmung zu den numerischen Simulationen gewährleistet wurde. Die Tabelle 2 fasst in einem Überblick die Versuchsparameter zusammen.

Die Untersuchungen erfolgten bei 5 verschiedenen Absaugeraten im Bereich der unterkritischen, kritischen und überkritischen Absaugung. Überkritisch bedeutet hier, dass durch die Absaugung eine derart hohe Störung in der Grenzschicht induziert wird, deren Resultat ein beschleunigter Grenzschichtumschlag ist. Die Abbildung 3 zeigt als Beispiel die Geschwindigkeits- und Turbulenzgradverteilung hinter dem Absaugeloch bei überkritischer Absaugung. Als Vergleich sind die Untersuchungen ohne Absaugung integriert.

	Simulation	Experiment
ν (Viskosität)	1.50E-05	1.12E-05
U_∞ (Anströmgeschwindigkeit)	15 m/s	3.74m
δ_1 (Verdrängungsdicke)	1.22 mm	3.67 mm
Re_{δ_1}	1224	1224
X_L (Position Absaugelochreihe)	506 mm	1700 mm
Re_{x_L}	5.059E+05	5.670E+05

Tab. 2: Parameter von Simulation und Experiment

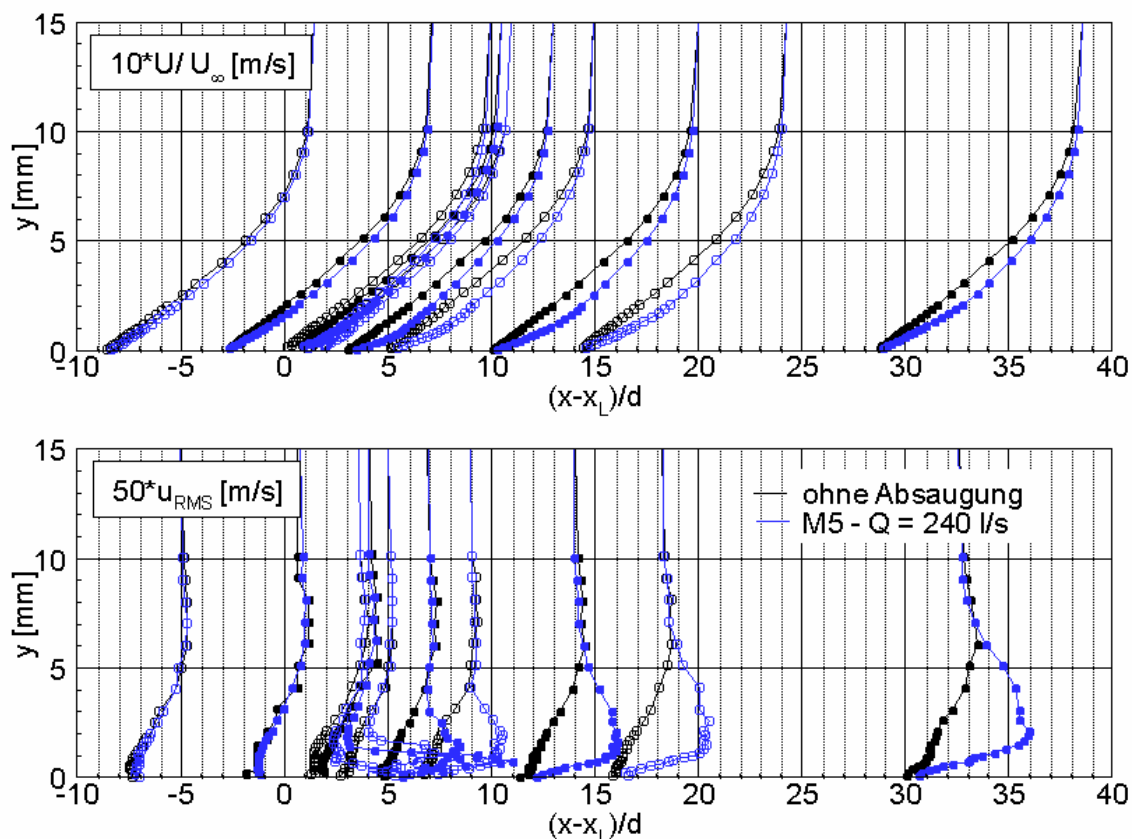


Abb.3: Geschwindigkeits- und Turbulenzgradverteilung bei überkritischer Absaugung

Die Ergebnisse belegen, dass sich hinter den Absaugelöchern ein Störpeak in der Grenzschicht ausbildet, der stromab nach außen, von der Wand weg, wandert. Für den unterkritischen Untersuchungsfall wird dieser Peak ausgedämpft, bei überkritischer Absaugung kommt es zu einer Anfächung und damit zu einer Beschleunigung des Umschlagsprozesses.

Für die Klärung der physikalischen Mechanismen des transitionalen Grenzschichtverhaltens war es wichtig, weitere Erkenntnisse über das zeitliche Verhalten der Störung zu erhalten. Daher wurde basierend auf dem Geschwindigkeits- Zeitverlauf am Peakmaximum eine Frequenzanalyse durchgeführt.

20.6

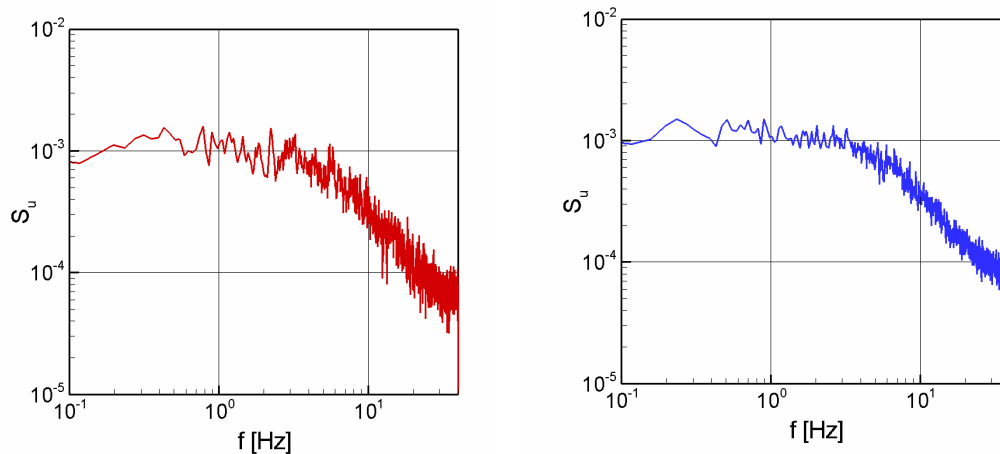


Abb. 4: Spektrale Leistungsdichte bei a) unterkritischer und b) überkritischer Absaugung

Das so berechnete Leistungsdichtespektrum zeigt für beide Untersuchungsfälle keine dominierenden Frequenzen. Die Ergebnisse deuten daraufhin, dass der Transitionsprozess im Gegensatz zu der Simulation nicht über eine Tollmien-Schlichting-Instabilität eingeleitet wird, sondern als ein stochastischer Prozess aufgefasst werden muss.

Danksagung

Das Projekt wurde gefördert und unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft unter der Projektnummer BE 2129/4

Literatur:

- Batia [1982] Bathia, Durst, F. and Jovanovic, J., Correction of hotwire anemometer measurements near walls, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 122, pp. 411 – 431, 1982
- Becker [2002] Becker, S., Stoots, C.M., Condie, K., Durst, F. and McEligot, D., LDA Measurements of Transitional Flows Induced by a Square Rib, *J. of Fluid Engineering*, Vol. 124, 2002
- Durst [1995] Durst, F., Jovanovic, J. and Sender, J., LDA measurements in the near wall region of a turbulent pipe flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 295, pp. 305 – 335, 1995
- Meitz [1996] Meitz, H.L., Numerical investigations of suction in a transitional flate-plate boundary layer, Dissertation, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Arizona, 1996
- Messing [1998] DNS-Untersuchung der diskreten Absaugung durch Einzelloch- Arrays, 2. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben 20A 9505G, Universität Stuttgart, 1998
- Stoots [2001] Stoots, C., Becker, S., Condie, K., Durst, F. and McEligot, D., A large-scale matched index refraction flow facility for LDA studies around complex geometries, *Experiments in Fluids* 30, Springer Verlag, 2001