

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER ROHRKRÜMMUNG AUF ÖRTLICH BEGRENZTE TURBULENTE STRUKTUREN IM TRANSITIONSBEREICH

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CURVATURE ON LOCALIZED TURBULENT SPOTS IN TRANSITIONAL PIPE FLOW

Jakob Kühnen und Hendrik Kuhlmann

Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Resselgasse 3, 1040 Wien

Übergang zur Turbulenz, Strömung im gekrümmten Rohr, LDA-Messungen,
Transition to turbulence, curved pipe flow, LDV-measurements,

Zusammenfassung

Der Einfluss der Rohrkrümmung auf örtlich begrenzte turbulente Strukturen wird mittels Laser-Doppler-Anemometrie untersucht. Der Versuchsaufbau ermöglicht laminare Strömungen in einem geraden Rohr bis mindestens $Re=15.000$. In der laminaren Rohrströmung werden mittels eines Triggers örtlich begrenzte turbulente Strukturen ausgelöst und die Entwicklung der Turbulenzen stromabwärts beobachtet. Zwei kritische Schwellenwerte, unterhalb des einen alle turbulenten Strukturen stets relaminarisieren und oberhalb des anderen die Strömung im gekrümmten Rohr immer turbulent ist, konnten identifiziert und eingegrenzt werden.

Einleitung

Die Strömung in gekrümmten Rohren unterscheidet sich, insbesondere im laminaren Bereich, ganz wesentlich von der Strömung in geraden Rohren. Ein Ungleichgewicht zwischen dem Druckgradienten über den Rohrquerschnitt und der Zentrifugalkraft erzeugt bereits bei geringer Krümmung eine charakteristische wirbelähnliche Sekundärströmung, welche meist als Dean-Wirbel bezeichnet wird (Dean 1928).

Schon seit den ersten Untersuchungen von Strömungen in gekrümmten Rohren ist grundsätzlich bekannt, dass sich der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung nicht nur sehr viel gleichmäßiger und weniger abrupt, sondern auch bei erheblich höheren Reynoldszahlen als in geraden Rohren vollzieht. Die Krümmung des Rohres bzw. die daraus resultierende Sekundärströmung hat also einen stabilisierenden Einfluss auf die Strömung und zeigt die Tendenz, hochfrequente turbulente (Geschwindigkeits-)Fluktuationen (zunächst) zu dämpfen. Das wird insbesondere an dem u.a. von Sreenivasan & Strykowski (1983) beschriebenen Phänomen deutlich, dass eine aus einem geraden Rohr einströmende turbulente Strömung in einem daran anschließenden gekrümmten Rohr wieder laminar werden kann.

Die Erforschung des Übergangs zur Turbulenz in geraden Rohren hat in den vergangenen Jahren auch Dank Anwendung moderner optischer Messmethoden und computergestützter Modellierung einen signifikanten Fortschritt erzielen können (Eckhardt et al. 2007, Mullin 2011). Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Übertragung der Erkenntnisse von geraden auf gekrümmte Rohre und der Untersuchung des spezifischen Einflusses der Rohr-

krümmung auf das Transitionsverhalten beim Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung.

Dafür wurde ein Experimentaufbau verwirklicht, bei dem in einem geraden Rohrstück mit kreiszylindrischem Querschnitt zunächst gezielt turbulente Spots innerhalb einer laminaren Grundströmung erzeugt werden können (vgl. auch Hof et al. 2008, Kuik et al. 2010). In einem daran anschließenden gekrümmten Rohrstück wird die zeitliche und räumliche Entwicklung der turbulenten Strukturen bei verschiedenen Reynoldszahlen mittels Laser-Doppler-Anemometrie gemessen und erfasst. Die Auswertung der Datenreihen ermöglicht detaillierte Rückschlüsse auf das Transitionsverhalten, den Einfluss der Krümmung, kritische Reynoldszahlen und die Stabilität der Strömung im gekrümmten Rohr.

Versuchsaufbau

Um den Einfluss der Rohrkrümmung auf turbulente Spots zu untersuchen wurde der in Abb. 1 gezeigte Versuchsaufbau realisiert. Aus einem Vorratsbehälter (R1) wird Wasser in einen höhenverstellbaren Behälter (R2) gepumpt, wobei der Großteil der Wassermenge sofort über einen Überlauf zurück nach R1 fließt um ein gleichmäßiges und konstant bleibendes Höheniveau sicherzustellen. Ein Ablauf aus R2 führt durch eine Beruhigungsstrecke in ein gerades Rohr aus Plexiglas (Innendurchmesser $d=10,2\text{mm}$, Wandstärke $s=0,9\text{mm}$). Die Strömungsgeschwindigkeit ist somit mittels der Druckhöhe h (verstellbar zwischen 1-5m) steuerbar. Nach einer Einlaufstrecke von $100d$ kann mittels eines Triggers die dann voll ausgebildete laminare Strömung gezielt gestört und somit turbulente Spots ausgelöst werden. Nach weiteren $157d$ mündet das gerade Rohr bei $\alpha=0^\circ$ in ein gekrümmtes Rohr, welches um einen Zylinder mit Radius $R_z=506\text{mm}$ gewickelt ist. Nach einer Wickelung von $\alpha=270^\circ$ mündet das Rohr als Freistrahel in einen kleinen Sammelbehälter und wird von dort zurück nach R1 geführt.

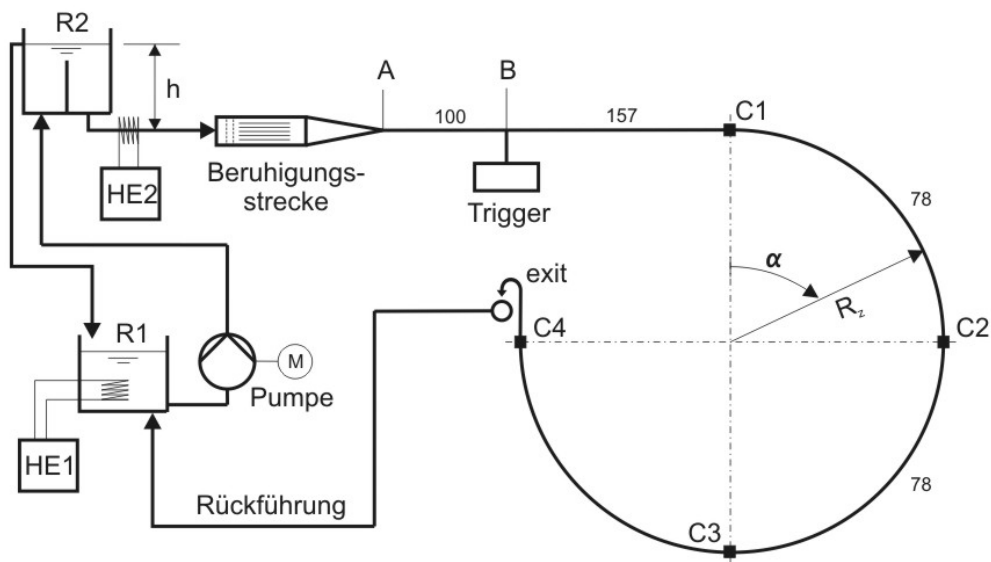


Abb. 1: Schema des Versuchsaufbaus

Die insbesondere wegen der unerwünschten Heizleistung der Pumpe notwendigen Wärmetauscher (HE1 und HE2) ermöglichen ein Einstellen der Temperatur in der Messstrecke mit $\pm 0,1^\circ\text{C}$, wobei die aktuelle Raumtemperatur des Labors den Sollwert vorgibt. Ein möglicher Temperaturgradient entlang der Messstrecke wird dadurch minimiert und eine Isolierung der Messstrecke ist nicht notwendig.

Die auf der mittleren Geschwindigkeit basierende Reynoldszahl $Re=ud/v$ (mit Geschwindigkeit u [m/s], kinematische Viskosität v [mm²/s]) wird manuell durch Auslitern, d.h. durch messen des Massendurchflusses pro Zeit (etwa 30-60s), und Messung der Temperatur am Auslass (exit) ermittelt.

Der Zulauf zur Messstrecke (von R2 bis A) ist so konzipiert, dass der Hauptanteil des Druckverlustes der Strecke R2 bis C4 bereits hier auftritt (min. 99%). Dies wird insbesondere durch die Länge des Zulaufes (verstellbar von 2-25m), den dort wesentlichen geringeren Durchmesser des Rohres (4mm) und den Einbau eines Wasserfilters (nicht eingezeichnet) erreicht. Das hat zur Folge, dass der Anstieg des Druckverlustes bei Auslösen einer Turbulenz bei B bzw. in der Messstrecke nur zu einem überaus geringen Anstieg des Gesamtdruckverlustes führt. Der Massendurchfluss kann somit selbst bei laminar-turbulentem Umschlag als annähernd konstant betrachtet werden.

Die Beruhigungsstrecke ermöglicht laminare Strömungen im geraden Rohr bis mindestens $Re=15.000$. Der Trigger ist ein „single-jet trigger“ bestehend aus einem sehr schnell schaltenden Magnetventil (max. Frequenz: 400Hz) in Verbindung mit einem Impulsgenerator und einem kleinen Druckbehälter. Durch ein Loch mit $d_L=0,9\text{mm}$ wird bei B durch Eindüsung geringer Wassermengen (etwa 30mg/Impuls) Turbulenz ausgelöst. Im hier untersuchten Reynoldszahlenbereich (1800 bis 6000) waren Öffnungszeiten des Ventils von 0,03s bei einem Einspritzdruck von 1,5 bar ausreichend, um verlässlich Turbulenz auszulösen.

Die verwendeten Plexiglasrohre haben gegenüber Glasrohren deutlich höhere Fertigungstoleranzen, bieten jedoch mit $d=10,2\pm 0,04\text{mm}$ immer noch ausreichende Genauigkeit. Ein großer Vorteil des dünnen Plexiglasrohres ist seine hervorragende Kaltverformbarkeit beim Biegen bzw. Wickeln um den Zylinder, bei der auch nur eine sehr geringe Deformierung des Innendurchmessers zu beobachten war. Die Ovalität des Innendurchmessers ist mittels Stahlkugeln, die durch das gewickelte Rohr gerollt werden, abschätzbar und ergibt bei der hier gegebenen Krümmung des Rohres eine Querschnittsverengung kleiner als 0,1mm bzw. 0,98%. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Vorteil ist, dass Plexiglasrohre standardmäßig bis zu einer Länge von 4m erhältlich sind, ein aufwändiges Flanschen des Rohres im gekrümmten Teil der Messstrecke daher vermieden werden kann.

Da in dem hier angeführten Zusammenhang nur der laminar-turbulente Übergang und nicht die exakte Größe bzw. Form der Geschwindigkeitsprofile im Rohr von Interesse war (diese wurden als hinreichend bekannt vorausgesetzt, siehe z.B. Bovendeerd et. al 1987, Hüttl et. al 1999) wurde auf umfangreiche Maßnahmen zur Vermeidung störender optischer Effekte, insbesondere konstruktive Maßnahmen oder eine Anpassung der Brechungsindizes von Plexiglas und Wasser, bewusst verzichtet. Die Brechung des Laserstrahls des LDA wurde allerdings rechnerisch gemäß Brechungsgesetz in der Ermittlung der Lagekoordinaten berücksichtigt (vgl. Lowe & Kutt 1992).

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Bei jedem Auslösen des Triggers wird bei B eine Störung der laminaren Grundströmung erzeugt. In Abhängigkeit von der Reynoldszahl verschwindet die Störung sofort wieder (im Bereich etwa $Re<1800$) oder entwickelt sich zu einem turbulentem Spot, der sich stromabwärts mit etwa der mittleren Geschwindigkeit innerhalb der laminaren Strömung mitbewegt. Diese Spots können unter anderem je nach ihrer Form, z.B. nach den Geschwindigkeitsverläufen der mittleren axialen Geschwindigkeit im Rohr (siehe Abb. 2), wiederum in sogenannte Puffs und Slugs unterschieden werden (Wyganski & Champagne 1973). Für Details über Puffs und Slugs sei auf die umfangreiche Literatur, z.B. Eckhardt et al. (2007) und Mullin (2011) sowie die darin zitierte Literatur, verwiesen.

Es sei in diesem Zusammenhang nur kurz erwähnt, dass erstens Puff-Strukturen bei tendenziell stromabwärts gleich bleibender Längenausdehnung eine zwar endliche, aber mit gegen

2300 steigender Reynoldszahl sehr rasch anwachsende Lebensdauern aufweisen (d.h. sie relaminarisieren bzw. zerfallen mehr oder weniger zufällig nach einer von der Reynoldszahl abhängigen Zeit, siehe insbes. Kuik et al. 2010), und zweitens Slug-Strukturen, die erst ab ca. $Re > 2300$ existieren, wachsen, d.h. mit steigender Reynoldszahl sich die Vorderfront der Turbulenz wesentlich schneller und die Rückseite der Turbulenz deutlich langsamer als die mittlere Geschwindigkeit der Strömung bewegt (siehe insbes. Durst & Ünsal 2006, Nishi et al. 2008).

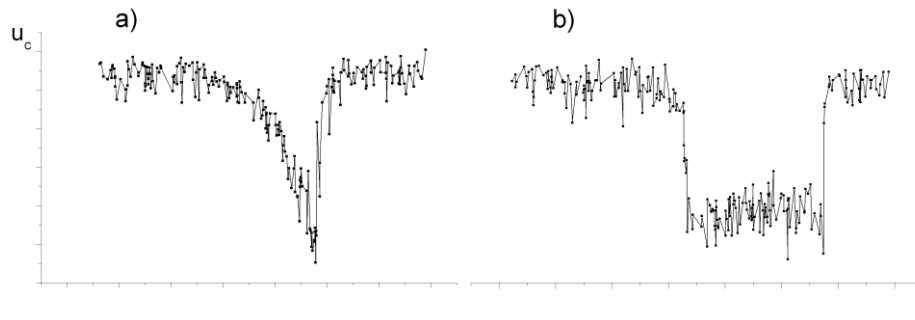


Abb. 2: LDA-Messungen der axialen Geschwindigkeit u_c in der Mitte des geraden Rohres. a) zeigt den charakteristischen Verlauf für ein Puff, b) den Verlauf für ein Slug.

Gemäß Sreenivasan & Strykowski (1983) ist nun zu erwarten, dass in der geraden Rohrstrecke ausgelöste turbulente Strukturen im gekrümmten Rohr noch bei Reynoldszahlen, bei denen im geraden Rohr bereits wachsende Slugs beobachtet werden, nach einer gewissen Strecke relaminarisieren. Zwei unmittelbar damit verknüpfte Fragen sind die nach dem Aspektverhältnis $d/2R_z$ (d.h. dem Verhältnis von Rohr- zu Wicklungsdurchmesser), ab welchem ein solcher Effekt zu beobachten ist und weiters, bis zu welcher (kritischen) Reynoldszahl von Relaminarisierung gesprochen werden kann.

Erstere Frage war nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Zur Frage nach der kritischen Reynoldszahl in gekrümmten Rohren, oberhalb derer die Strömung turbulent wird bzw. unterhalb derer eine bereits turbulente Strömung relaminarisiert, finden sich in der Literatur teilweise recht widersprüchliche Angaben. Gleiches gilt für den Druckverlust in gekrümmten Rohren (vgl. Ali 2001). Der Hauptgrund dafür liegt in der generellen Unklarheit, wann und wie genau der Übergang von der laminaren Strömung mit gegengleich rotierenden Dean-Wirbeln zu turbulenter Strömung erfolgt. Dass der Übergang wesentlich „weicher“ und kontinuierlicher als im geraden Rohr vonstattengeht ist auf die relativ große Amplitude der Sekundärströmung schon im laminaren Bereich zurückzuführen.

Im geraden Rohr erbringen axiale Geschwindigkeitsprofile einen eindeutigen und mittels LDA-Messung leicht zu ermittelnden Nachweis laminarer oder turbulenter Strömung. LDA-Messungen der axialen Geschwindigkeit in der Rohrmitte, d.h. am Ort des größten Geschwindigkeitsunterschieds zwischen laminarer und turbulenter Strömung, können über die Längenausdehnung und Art (Puff/Slug) örtlich begrenzter turbulenter Strukturen Auskunft geben (siehe Abb. 3). Die gleiche Vorgehensweise wurde daher auf die gekrümmte Rohrstrecke übertragen.

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, verschiebt sich das Maximum des axialen Geschwindigkeitsprofils im gekrümmten Rohr im Vergleich zum geraden Rohr nach außen. Deutlich wird auch, dass genau in der Rohrmitte praktisch kein Unterschied zwischen laminarem und dem zeitlich gemittelten turbulenten Profil besteht. Um zu Abb. 3 vergleichbare Messungen der Längenausdehnung turbulenter Strukturen vorzunehmen, war daher die Wahl des Messpunktes bei $-0,6r$ zielführend.

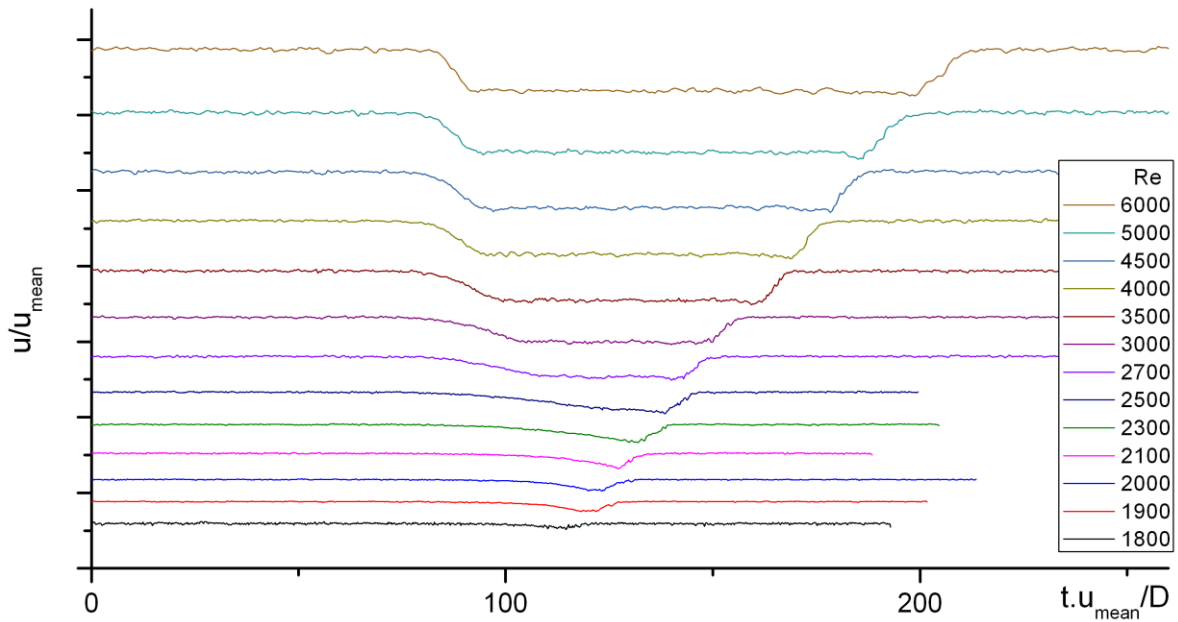


Abb. 3: LDA-Messungen der axialen Geschwindigkeit im Mittelpunkt des geraden Rohres (bei $B+127d$), d.h. am Ort des größten Geschwindigkeitsunterschieds zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Jede Kurve ist ein Mittelwert aus 10 Perioden, d.h. einzeln getriggerten turbulenten Strukturen. (Bei s/w : $Re=1800$ bezeichnet die unterste, $Re=6000$ die oberste Kurve).

Aus Abbildung 4 wird auch deutlich, dass eine im geraden Rohr bei $Re=2300$ ausgelöste Turbulenz im Punkt C3 nicht mehr nachweisbar ist. Gleiches gilt für $Re=5000$, allerdings aus völlig unterschiedlichen Gründen. Während bei $Re=2300$ jede Turbulenz bis C3 relaminarisiert und somit verschwindet, ist die Strömung im gekrümmten Rohr bei $Re=5000$ selbst bei laminarer Strömung im geraden Rohr (stromaufwärts von C1) immer turbulent. Bei $Re=5000$ ist im gekrümmten Rohr, unabhängig von der laminaren Strömung im Einlauf, offensichtlich keine laminare Strömung mehr möglich.

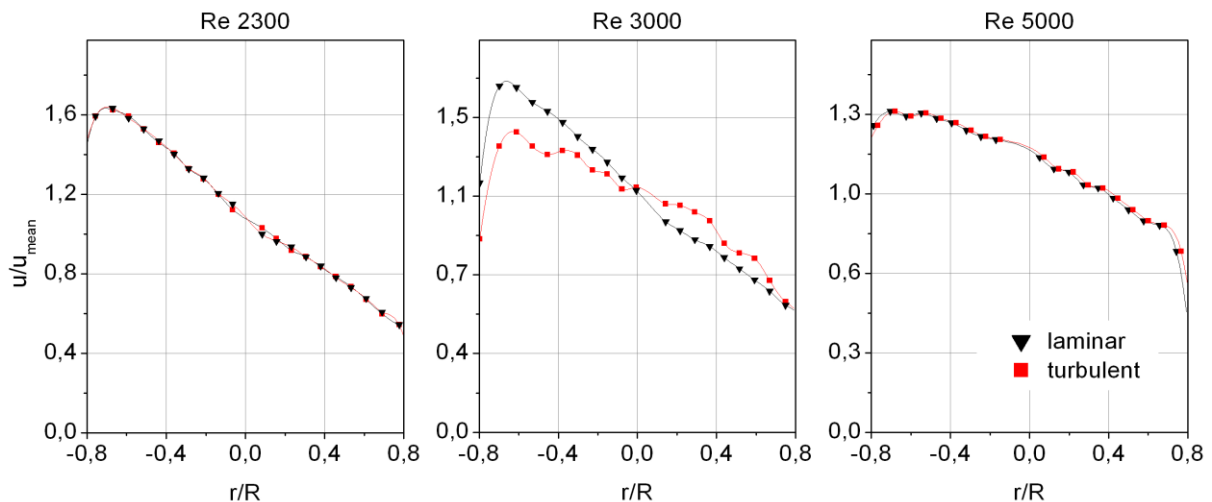


Abb. 4: Vergleich zeitlich gemittelter axialer Geschwindigkeitsprofile bei C3, mit laminarer oder turbulenter Strömung im geraden Rohr. Messungen waren nur im gezeigten Bereich $r \in [-0,8; 0,8]$ möglich, da auf Maßnahmen zur Vermeidung störender optischer Effekte verzichtet wurde (siehe Text).

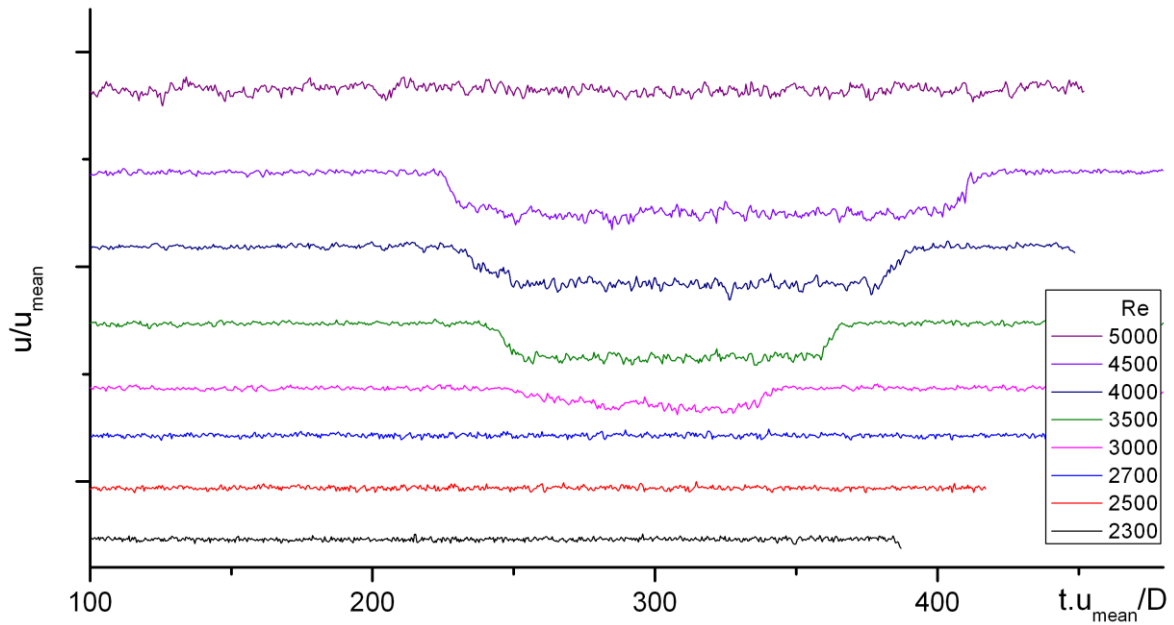


Abb. 5: LDA-Messungen der axialen Geschwindigkeit in der Mittenebene bei $-0,6r$ des gekrümmten Rohres (bei C3 bzw. B+313d). Jede Kurve ist ein Mittelwert aus 10 Perioden, d.h. einzeln getriggerten turbulenten Strukturen. (Bei s/w: $Re=2300$ bezeichnet die unterste, $Re=5000$ die oberste Kurve).

Noch klarer wird dies aus Abbildung 5. Mittels LDA-Messungen bei C3, d.h. nach einer Krümmung von 180° , lässt sich zeigen, dass bis $Re=2700$ alle stromaufwärts im geraden Rohr ausgelösten turbulenten Spots bei C3 wieder verschwunden sind, während bereits bei $Re=5000$ die Strömung stets turbulent ist (gut erkennbar auch an den deutlich höheren Fluktuationen). Im Bereich $Re=4500$ bis $Re=4800$ beginnt die Strömung im gekrümmten Rohr intrinsisch, also sozusagen „von selbst“, turbulent zu werden (Abb. 6). Die geschieht zufällig und abrupt, ähnlich dem Szenario im geraden Rohr.

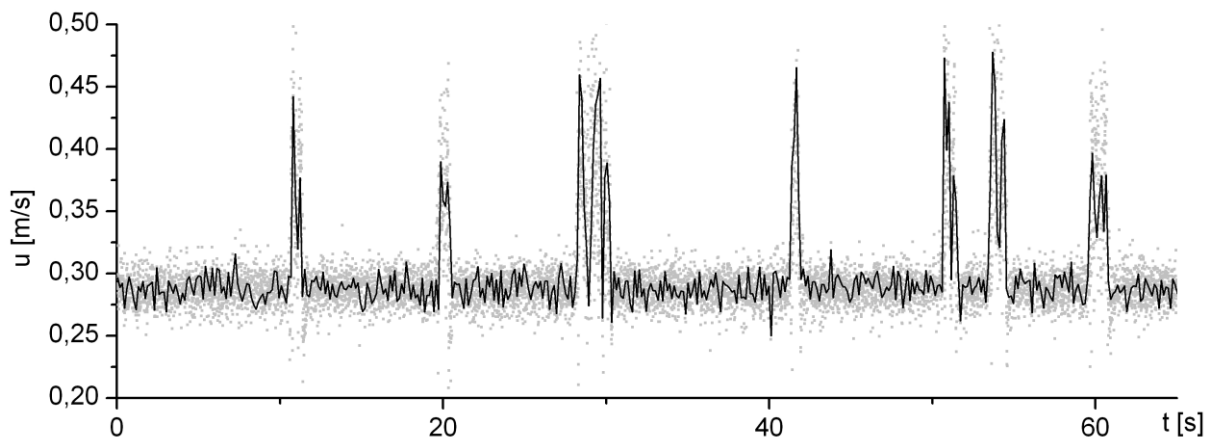


Abb. 6: LDA-Messungen der axialen Geschwindigkeit bei $Re=4700$ in der Mittenebene bei $0,6r$ (Rohrinnenseite) des gekrümmten Rohres (bei C3 bzw. B+313d). An der Rohrinnenseite kommt es zu einer *Zunahme* der axialen Geschwindigkeit bei Turbulenz (vgl. Abb.4). Die Turbulenzen sind nicht extern im geraden Rohr getriggert sondern lösen zufällig im gekrümmten Rohr aus.

Zusammenfassung und Ausblick

Zwei kritische Schwellenwerte, unterhalb des einen alle turbulenten Spots stets relaminarisieren und oberhalb des anderen die Strömung im gekrümmten Rohr immer turbulent ist, konnten identifiziert und eingegrenzt werden.

Details des Übergangs und wie die Schwellenwerte genau vom Aspektverhältnis $d/2R_z$ abhängen ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Dankesworte

Unser Dank gilt insbesondere Hannes Fuger, Jürgen Koptik, Adrian Fliri, Philipp Gartner, Christian Riener, Heinz Marek und Harald Neth für die Mitarbeit.

Literatur

- Ali, S., (2001), 'Pressure drop correlations for flow through regular helical coil tubes', *Fluid Dyn. Res.*, 28, 295–310
- Bovendeerd, P. H. M., Steenhoven, A. A. V., Vosse, F. N. V. D. & Vossers, G., (1987), 'Steady entry flow in a curved pipe', *Journal of Fluid Mechanics*, 177, 233–246
- Dean, W. R. (1928), 'The stream-line motion of fluid in a curved pipe', *Phil. Mag.* 5, 673–695
- Durst, F. & Ünsal, B. (2006), 'Forced laminar-to-turbulent transition of pipe flows', *Journal of Fluid Mechanics*, 560, 449–464
- Eckhardt, B., Schneider, T. M., Hof, B. & Westerweel, J. (2007), 'Turbulence transition in pipe flow', *Annual Review of Fluid Mechanics* 39, 447–468
- Hof, B., Lozar, A., Kuik, D. J. & Westerweel, J. (2008), 'Repeller or attractor? Selecting the dynamical model for the onset of turbulence in pipe flow.' *Phys. Rev. Lett.* 101 (21), 214501
- Hüttl, T., Wagner, C. & Friedrich, R., (1999), 'Navier-Stokes solutions of laminar flows based on orthogonal helical co-ordinates', *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 29, 749–763
- Kuik, D. J., Poelma, C., Westerweel, J. (2010), 'Quantitative measurement of the lifetime of localized turbulence in pipe flow', *Journal of Fluid Mechanics*, 645, 529–539
- Lowe, M. L. & Kutt, P. H., (1992), 'Refraction through cylindrical tubes', *Exp. in Fluids*, 13, 315–320
- Mullin, T. (2011), 'Experimental studies of transition to turbulence in a pipe', *Annual Review of Fluid Mechanics* 43(1), 1–24
- Nishi, M., Ünsal, B., Durst, F. & Biswas, G., (2008), 'Laminar-to-turbulent transition of pipe flows through puffs and slugs', *Journal of Fluid Mechanics*, 614, 425–446
- Sreenivasan, K. R. & Strykowski, P. J. (1983), 'Stabilization effects in flow through helically coiled pipes', *Exp. in Fluids*, 1, 31–36
- Wyganski, I. J. & Champagne, F. H. (1973) 'Transition in a pipe. Part 1. Origin of puffs and slugs and flow in a turbulent slug', *Journal of Fluid Mechanics*, 59, 281–335