

Profilsensormessungen in einem Kanal mit poröser Wand

Flow-measurements within a channel with porous wall using laser Doppler profile sensor

M. Dues¹, S. Burgmann², J. Kriegseis³, L. Büttner⁴, J. Czarske⁴, U. Janoske²

¹ ILA R&D GmbH, Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13, 52428 Jülich

² Lehrstuhl Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

³ Institut für Strömungsmechanik, Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

⁴ Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik (MST), TU Dresden, 01062 Dresden

Kanalströmung, poröse Wand, Geschwindigkeitsgradient, Profilsensor mit Richtungserkennung

channel flow, porous wall, velocity gradient, laser Doppler profile sensor with detection of flow direction

Zusammenfassung

Überströmung und Durchströmung poröser Strukturen sind in vielen Bereichen der Umwelt und Technik relevant. Die Grundkonfiguration ist dabei in vielen Fällen eine poröse Struktur einer bestimmten Dicke, welche parallel zu ihrer Oberfläche überströmt wird, wobei ein Teilstrom mit derselben Strömungsrichtung durch die Porosität strömt. Für höhere Reynoldszahlen ($Re > 1.000$) ist die Strömungssituation noch unzureichend erforscht. Untersuchungsobjekt ist ein Plexiglas Kanal, bei dem auf einer Wand eine poröse Schicht in Form eines Metallschaums angebracht ist. Der Kanal wird mit Luft durchströmt; die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal beträgt etwa 5,5 m/s, was einer Reynoldszahl von $Re = 4500$ entspricht. An diesem Beispiel wird die Leistungsfähigkeit des Laser-Doppler-Profilsensor-Konzepts mit neu implementierter Richtungserkennung aufgezeigt. Die Ergebnisse der Profilsensormessungen zeigen zum einen, dass das Geschwindigkeitsmaximum zur porösen Wand hin verschoben und zum anderen der Geschwindigkeitsgradient an der porösen Wand signifikant steiler als an der festen gegenüberliegenden Wand ist. Die Strömungssituation in einem Schlitz in der porösen Schicht kann mit dem Profilsensor mit Trägerfrequenztechnik infolge der hohen Ortsauflösung und der Richtungserkennung sehr gut aufgelöst werden: es zeigt sich zum einen eine Ausströmung aus dem porösen Material. Diese beträgt etwa 0,15 m/s, d.h. etwa 2,7 % der gemessenen Maximalgeschwindigkeit. Darüber hinaus kann eine Rückströmzone an der oberen Kante der porösen Schicht gemessen werden. Der zeitliche Mittelwert liegt hier bei etwa -0,05 m/s (weniger als 1 % der gemessenen Maximalgeschwindigkeit). Eine solche Strömungsstruktur wurde bei Messungen in laminarer Strömung bislang nicht festgestellt. Weitere Messungen und Parametervariationen sind vorgesehen, um die Strömungssituation ausführlicher analysieren zu können.

Abstract

In several technical apparatus and also in natural situations there is a flow passing the surface of a porous layer and also intruding this layer. Particularly, there is a flow through this

porous layer of distinct thickness which is parallel to the surface and the main flow. There is a lack of knowledge on this flow condition for higher Reynolds numbers ($Re > 1.000$). In this work the flow inside a channel is investigated. One wall of the channel is equipped with an additional metallic foam forming a porous layer. Air is passing the channel with 5,5 m/s which corresponds to $Re = 4500$. This configuration is used to demonstrate the potential of the new profile-sensor which now enables the identification of flow direction. Results show that the velocity profile within the channel is shifted toward the surface of the porous layer and additionally that the velocity gradient at the porous wall is higher than on the opposite smooth channel wall. Furthermore, the flow within a small slit in the porous layer is measured. This case clearly demonstrates the potential of the laser-Doppler profile sensor with carrier-frequency technique: due to the high spatial resolution and the chance to identify the flow direction it can be shown that there is a small flow passing through the porous layer which is 0.15 m/s, i.e. approximately 2.7 % of the measured maximum-velocity. Additionally, a back-flow-zone can be identified at the upper edge of the porous layer which shows a temporal mean velocity of -0.05 m/s (less than 1 % of the measured maximum-velocity). As literature shows, such a flow structure was not measured yet for laminar flows. Additional measurements are planned to further elucidate this flow condition.

Einleitung

Eine Über- und Durchströmung poröser Strukturen tritt in vielen Bereichen der Umwelt und Technik auf, genannt seien hier z.B. Sinterkörper-Schüttungen in der chemischen Verfahrenstechnik bzw. Metallurgie, Filterstrukturen und partikuläre Ablagerungen in der mechanischen Verfahrenstechnik, Sträucher, Wälder, Pflanzen, d.h. Vegetation, in der Atmosphäre und in Gewässern oder auch Sedimente in Binnen- und Küstengewässern.

Die Grundkonfiguration ist dabei in vielen Fällen eine poröse Struktur einer bestimmten Dicke, welche parallel zu ihrer Oberfläche überströmt wird, wobei ein Teilstrom mit derselben Strömungsrichtung durch die Porosität strömt. Insbesondere der Bereich des Übergangs zwischen freier Strömung und Strömung in dem porösen Medium („interface region“) ist von besonderem Interesse hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Struktur und Strömung. Klassischerweise wird für die Berechnung der Strömungsverhältnisse eine Schlupfgeschwindigkeit zwischen freier Strömung und der Darcy-Strömung im porösen Medium angesetzt beispielsweise nach Beavers & Josef [1] oder aber z.B. eine approximiert Eindringtiefe des Strömungsprofils der freien Strömung angenommen [2] (Abb. 1).

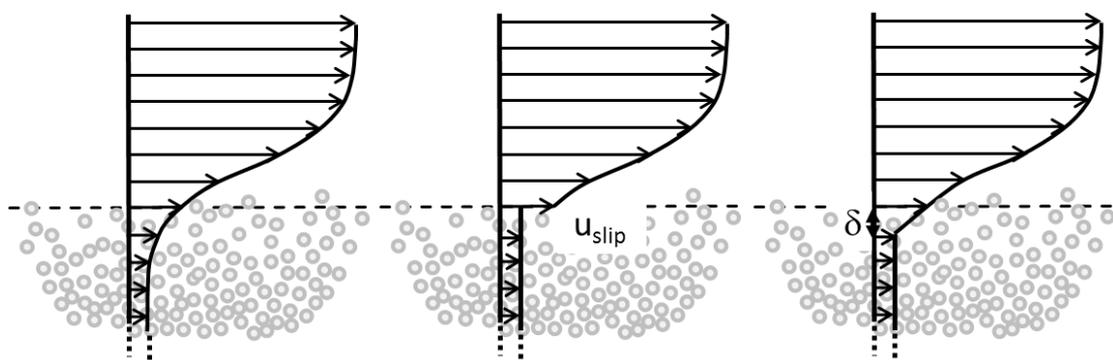


Abb. 1: Skizze eines realen Strömungsprofils der Über- und Durchströmung einer porösen Struktur (links), einer Approximierung mittels Schlupf-Geschwindigkeit (Mitte) und mittels einer Eindringtiefe (rechts)

Während für kleine Reynoldszahlen eine Reihe von experimentellen Untersuchungen vorliegt, ist die Strömungssituation bei turbulenten Bedingungen noch unzureichend erforscht [3,4,5]. Es ist daher erforderlich, das Strömungsprofil über der porösen Struktur mit hoher

räumlicher Auflösung zu erfassen, um beispielsweise ein Maß für die Schlupfgeschwindigkeit finden zu können. Darüber hinaus ist die Ausströmung aus der porösen Struktur von Interesse, da in vielen technischen Anwendungen und natürlichen Bedingungen eine solche Situation vorherrscht.

In diesem Beitrag soll nun anhand einer beispielhaften Kanalströmung gezeigt werden, dass der Profilsensor ein geeignetes Messinstrument ist, um solche Strömungsbedingungen mit der erforderlichen hohen örtlichen Auflösung zu untersuchen.

Messprinzip des Profilsensors

Der Profilsensor basiert auf der Laser-Doppler-Technik und verwendet konvergente und divergente Interferenzstreifensysteme sich kreuzender Laserstrahlen [6], die in einem gemeinsamen Messvolumen überlagert werden (Abb. 2). Aufgrund der charakteristischen Streifenabstandsverläufe d_1 und d_2 entlang der optischen Achse z und der somit durchgeführten Zweifachmessung (ein Dopplersignal für jedes Interferenzstreifensystem) ist über den Quotienten der Dopplerfrequenzen f_1 und f_2 :

$$q(z) = \frac{f_1(v,z)}{f_2(v,z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)} \quad (1)$$

die axiale Position von in der Strömung enthaltenen Partikeln, welche das Messvolumen durchqueren, bekannt. Mit Kenntnis der für die axiale Position gültigen Streifenabstände ist die Geschwindigkeit des Partikels bestimmt durch:

$$v(z) = f_1 \cdot d_1(z) = f_2 \cdot d_2(z) \quad (2)$$

Dadurch wird es also möglich, nicht nur die laterale Geschwindigkeitskomponente, sondern zusätzlich auch die axiale Position z eines Streuobjekts innerhalb des Interferenzstreifensystems zu bestimmen. Die erreichbare Ortsauflösung erhöht sich gegenüber konventionellen LDV-Systemen signifikant bis in den Mikrometerbereich [7,8]. In den hier vorgestellten Untersuchungen wird erstmals eine erweiterte Variante des Profilsensors angewendet, die eine Richtungserkennung erlaubt.

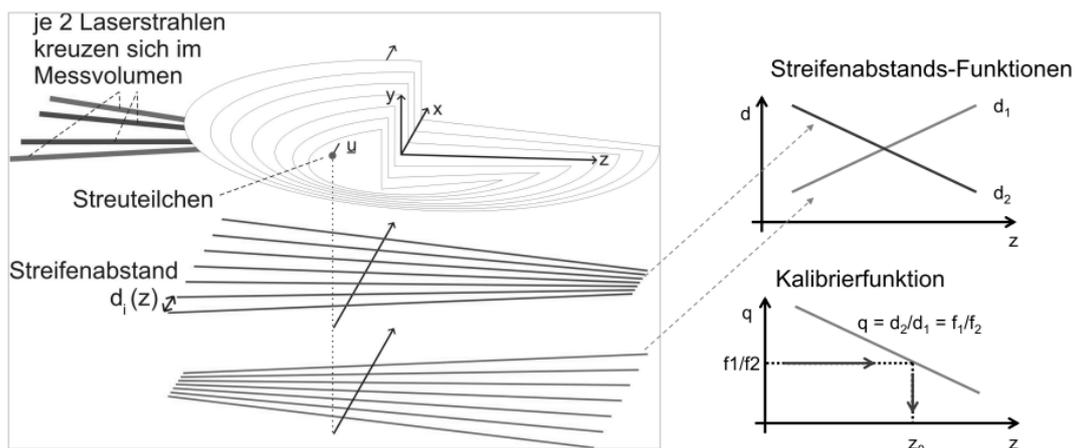


Abb. 2: Messprinzip des Profilsensors

2C-Profilsensor mit Trägerfrequenztechnik

Bisher wurden die Profilsensoren (PS) zumeist als 1C-Varianten ohne Trägerfrequenztechnik bzw. „Frequenzshift“ aufgebaut, d.h. mit einem solchen Sensor kann lediglich eine Geschwindigkeitskomponente des Strömungsvektors ohne eine Vorzeichendetektion gemessen werden. Damit ist jedoch die Untersuchung von sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten,

wie diese im wandnahen Bereich und auch vor allem in Grenzschichten auftreten, nur begrenzt möglich. Auch die Untersuchung von starken Scherströmungen (z.B. Freistrahlauforschungen) oder Strömungen mit Ablösungen sind aufgrund der auftretenden Rückströmungen nur bedingt möglich. Daher ist es zweckmäßig, einen LDV-Profilsensor mit Trägerfrequenztechnik aufzubauen, d.h. einer der beiden Teillaserstrahlen wird frequenzverschoben. Dazu wird ein optoakustischer Modulator (Braggzelle) genutzt, so dass durch die leicht veränderte Wellenlänge ein wanderndes Interferenzstreifenmuster entsteht. Bezüglich der Shiftfrequenz f_s wird je nach Durchtrittsrichtung der Partikel eine andere Frequenz f_D erzeugt. Da zusätzlich von Anwendern auch eine zweite Geschwindigkeitskomponente zur detaillierten Erfassung örtlich hochaufgelöster gekoppelter Schwankungsgrößen nachgefragt wird, erfolgt der Aufbau des 2C-LDV-Profilsensors mit Trägerfrequenztechnik als Kombination eines 2C-LDV-Standardsystems (durch die Verwendung von 2 Laserwellenlängen und einem Versatz der Strahlpaare um 90°) mit einem 1C-Profilsensor (Abb. 3). Damit kann einerseits die Position des Partikels in der Längsrichtung des Messvolumens durch die Profilsensorkomponente örtlich hochaufgelöst erfasst werden. Andererseits ist gleichzeitig die Messung beider Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zur optischen Achse mit dem Standard-2C-LDV möglich. Der Profilsensor wird also wie bisher durch zwei in der gleichen Ebene angeordnete LDV-Komponenten gebildet. Die zweite Geschwindigkeitskomponente wird durch die Anordnung einer dritten LDV-Komponente senkrecht zur Profilsensorkomponente angeordnet.

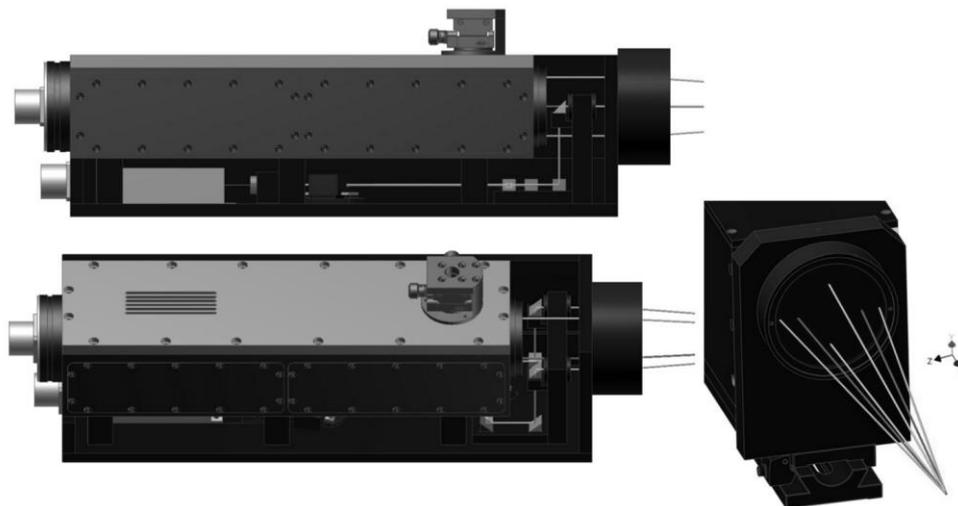


Abb. 3: Aufbau des frequenzmodulierten 2C-LDV-Profilsensors

Der Sensor wird also wie beschrieben durch die Kombination eines Standard-2C-LDV-Systems mit einer dritten Komponente in einer der beiden Sensorebenen aufgebaut. Dazu wird die Profilsensorkomponente mit einem größeren Strahlabstand ausgestattet. Die Auswirkung des unterschiedlichen Strahlschnittwinkels der den Profilsensor bildenden Komponenten auf die Messvolumenlänge kann durch eine passende Kollimatorauslegung weitgehend kompensiert werden. Die horizontale Komponente des Standard-LDV-Systems wird auch mit einem divergenten Interferenzstreifenverlauf aufgebaut, bei der zweiten LDV-Komponente ist der Verlauf der Interferenzstreifen weitgehend parallel.

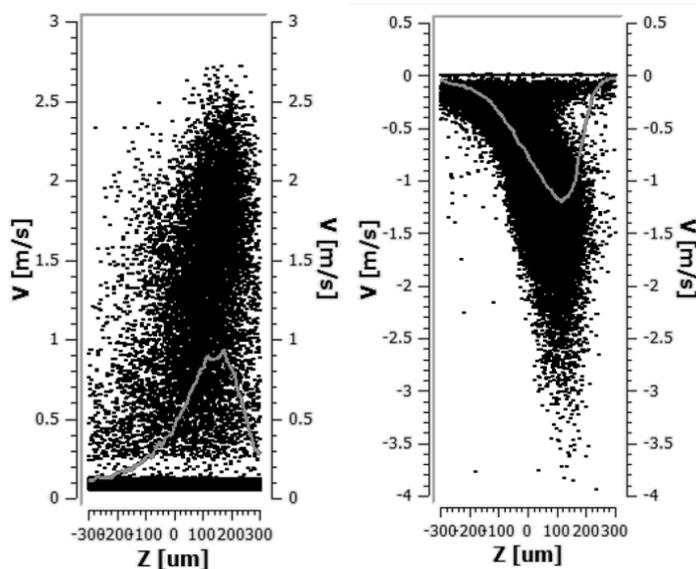


Abb. 4: Gegenüberstellung der Messung der wandnahen Strömung ohne Trägerfrequenztechnik (links) und mit Trägerfrequenztechnik (rechts)

Abb. 4 zeigt die Gegenüberstellung von Messungen mit einem „ungeshifteten“ (links) und einem „geschifteten“ Profilsensor (rechts) an der glatten Wand einer Kanalströmung (vgl. Versuchsaufbau im nächsten Abschnitt). Die Ergebnisse zeigen die einzelnen gemessenen Geschwindigkeitswerte (Rohdaten) über die Länge eines Messvolumens in einem Bereich von 0 - 0,6 mm von der Wand. Beide Messungen verdeutlichen, dass die Erfassung von sehr kleinen Geschwindigkeiten direkt an der Wand aufgrund von Licht-Reflexen, von wenigen Partikeln in der Grenzschicht und aufgrund der hohen Dynamik des Dopplersignals erwartungsgemäß schwierig ist. Der „geschiftete“ Profilsensor (Abb. 4 rechts) löst diese Aufgabenstellung deutlich besser, da die aufgeprägte Shiftfrequenz die Signalfrequenzen in einen Bereich $\gg 0$ verschiebt und damit eine Trennung von Signal und Rauschen über eine Filterung einfacher zu realisieren ist. Zu beachten ist hier, dass durch die Richtungserkennung die wahre Richtung der Strömung, in diesem Falle in negative x-Richtung, korrekt erkannt wird. Die gemessenen Null-Geschwindigkeiten beim „geschifteten“ PS-Sensor werden vermutlich durch an der Wand haftende Partikel oder Kratzer im Glas verursacht und werden in der nachfolgenden Datenverarbeitung herausgefiltert. Die graue Linie zeigt den Verlauf des gleitenden Mittelwerts über einen Bereich von jeweils $10 \mu\text{m}$. Dieser Verlauf dient nur zur Orientierung beim Messvorgang und ist für ungefilterte Rohdaten nicht sehr aussagekräftig.

Versuchsaufbau



Abb. 5: untersuchter Strömungskanal mit optischer Zugänglichkeit und einer Wand mit innen aufgebrachtem Metallschaum

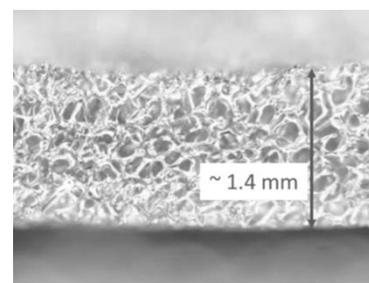


Abb. 6: Detailaufnahme des Metallschaums

Untersuchungsobjekt ist ein Plexiglaskanal, bei dem auf einer Wand eine poröse Schicht in Form eines Metallschaums angebracht ist. Der Kanal hat eine Gesamthöhe von 12 mm und

eine Breite von 15 mm. Die in den Kanal eingelegte poröse Schicht hat im Mittel eine Dicke von 1,4 mm (siehe Abb. 6). Die geometrischen Bedingungen wurden mittels eines laser-optischen Distanzmessers (Micro-Epsilon ILD2300-2, Auflösung 0,03 μm) genauestens erfasst. Der Metallschaum ist ein Nickel-Schaum mit einer offenen Oberfläche von 88 % und 110 ppi (pores per inch). Der Kanal wird mittels eines Axiallüfters mit Luft durchströmt, wobei ein Seeding in Form von 1 μm DEHS-Tröpfchen zugesetzt wird. Die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal beträgt etwa 5,5 m/s, was einer Reynoldszahl von $Re = 4500$ entspricht. Der Ansaugteil ist mit einer Düsenstruktur ausgestattet und der Kanal ist 1000 mm lang, so dass infolge dessen von einer voll ausgebildeten Kanalströmung ausgegangen werden kann.

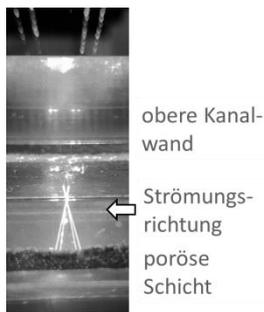


Abb. 7: Ausrichtung der optischen Achse zum Kanal



Abb. 8: eingebetteter Spiegel in poröser Struktur

Der Profilsensor wird so positioniert, dass durch die obere Kanalwand hindurch gemessen wird und die optische Achse auf die Oberfläche der porösen Struktur ausgerichtet ist (Abb. 7). Im hinteren Teil des Kanals, d.h. nach einer Lauflänge von 750 mm liegen die Messpositionen: zum einen ist in die poröse Wandstruktur ein Schlitz von 4 mm Breite eingebracht. An dieser Stelle

wird das Strömungsprofil am Austritt aus der porösen Struktur vermessen. Zum anderen ist in den porösen Metallschaum ein dünnes Spiegelplättchen eingelassen (Abb. 8). Die dritte Messposition liegt direkt stromauf des Spiegelplättchens, d.h. direkt an der Oberfläche des Metallschaums.

Da zu erwarten ist, dass die metallische unregelmäßige Struktur des porösen Mediums sich störend auf die Detektion des Streulichts auswirkt, dient die Messposition des Spiegels dazu zu untersuchen, ob sich ein solches Objekt, welches die optische Detektion vereinfacht, sich wesentlich störend auf das zu messende Geschwindigkeitsprofil über der porösen Struktur auswirkt.

Untersuchungsergebnisse

Es wurden die Geschwindigkeitsprofile der Kanalströmung an drei verschiedenen Positionen vermessen: an Pos. 1 direkt über der porösen Struktur, an Pos. 2 kurz hinter Pos. 1 über dem dünnen eingelassenen Spiegelglas und an Pos. 3 kurz hinter Pos. 2 in dem Schlitz. Es muss festgestellt werden, dass bei senkrechter Ausrichtung der optischen Achse des Profilsensors zur porösen Oberfläche in der Nähe der Oberfläche zu starke Reflektionen auftreten. Die hier dargestellte Messung erfolgte sowohl für die poröse Wand als auch für den Spiegel unter einem leichten Winkel von 10° . Auf diese Weise können Rückreflektionen von der Oberfläche in den Sensor vermindert werden. In den bisherigen Messungen kann erst bei einem Wandabstand von 0,3 mm über der porösen Wand kein sinnvolles Signal mehr detektiert werden. Bei der Messung über dem Spiegel beträgt dieser reflektionsbedingte Abstand nur etwa 0,15 mm. Die Ergebnisse der Profilsensormessungen zeigen grundsätzlich, dass das Geschwindigkeitsprofil im Kanal mit poröser Wand leicht aus der Kanalmitte verschoben ist (Abb. 9 und 10). Im Folgenden wird ein symmetrisches Vergleichsgeschwindigkeitsprofil gezeigt. Dieses ergibt sich aus einer Approximation des gemessenen Geschwindigkeitsverlaufs in der oberen Hälfte der freien Strömung und einer entsprechenden Spiegelung. Zu beachten ist außerdem, dass die hier dargestellte Kanalhöhe die poröse Schicht mit einbezieht. Die Lage der Oberfläche der porösen Struktur ist als Schraffur mit eingezeichnet.

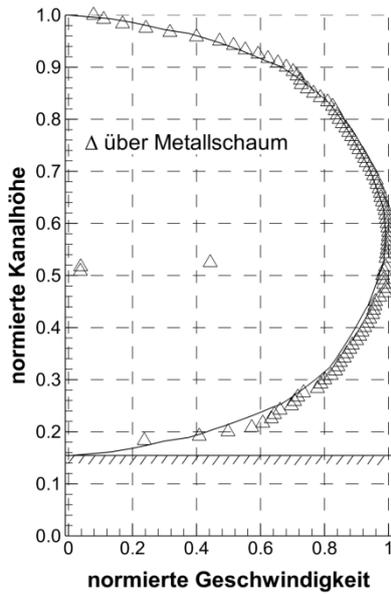


Abb. 9: Profilsensormessung über der porösen Struktur (Δ), Vergleich mit symmetrischem Geschwindigkeitsprofil (-)

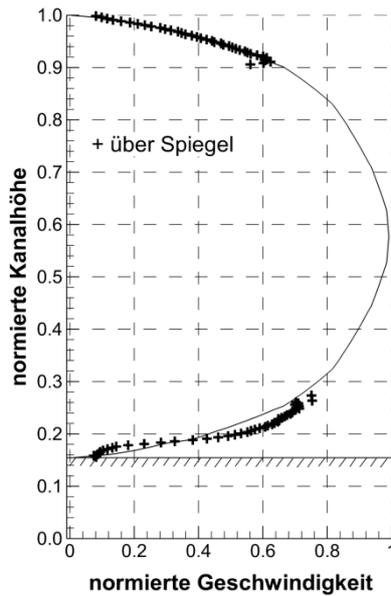


Abb. 10: Profilsensormessung über dem Spiegel (+), Vergleich mit symmetrischem Geschwindigkeitsprofil (-)

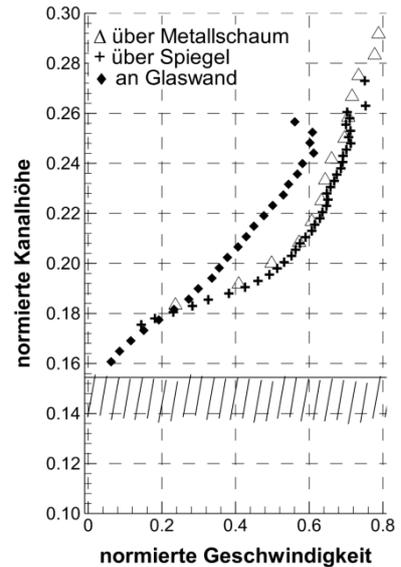


Abb. 11: Vergleich der Gradienten an der porösen Struktur (Δ), am Spiegel (+) und an der gegenüberliegenden Wand (\blacklozenge)

Zum einen ist das Geschwindigkeitsmaximum zur porösen Wand hin verschoben und zum anderen ist der Geschwindigkeitsgradient an der porösen Wand bzw. dem Spiegel signifikant steiler als an der festen gegenüberliegenden Wand. Dies wird in der Detailansicht in Abb. 11 noch einmal deutlich: hier wird das gemessene Geschwindigkeitsprofil an der oberen, glatten Kanalwand entsprechend der Gradienten an poröser Struktur und Spiegel überlagert. Ähnliche Ergebnisse liegen auch für laminare Strömungen vor (vgl. [4]).

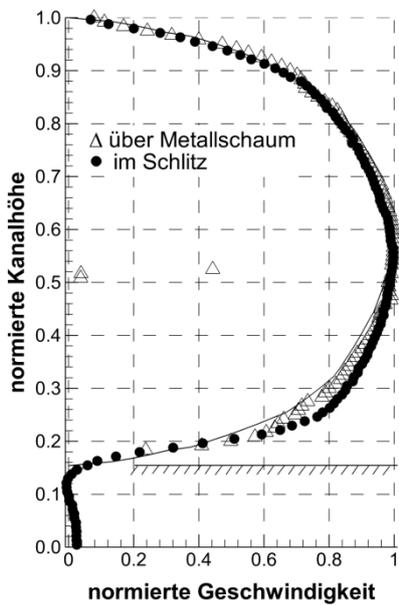


Abb. 12: Profilsensormessung im Schlitz (●) im Vergleich zu der Messung über der porösen Struktur (Δ) und Vergleich mit symmetrischem Geschwindigkeitsprofil (-)

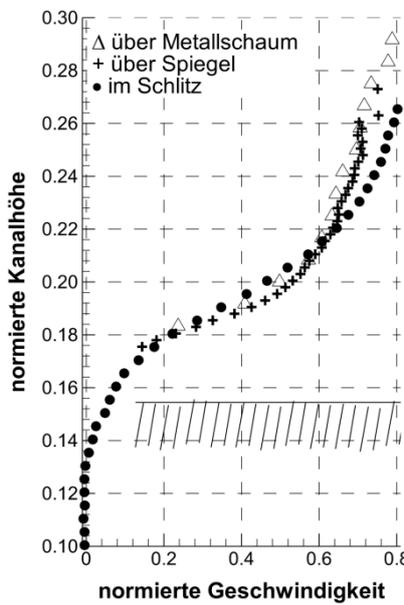


Abb. 13: Profilsensormessung im Schlitz (●) im Vergleich zu der Messung über der porösen Struktur (Δ) und über dem Spiegel (+)

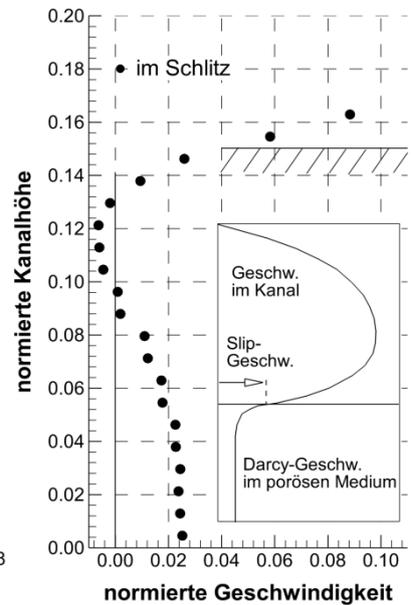


Abb. 14: Detailansicht der Profilsensormessung im Schlitz (●); eingeklinkt: Geschwindigkeitsverlauf im Schlitz nach [4]

Der direkte Vergleich der Messungen über der porösen Wand und über dem Spiegel zeigt außerdem, dass die gemessenen Profile sehr ähnlich sind, so dass vermutet werden kann, dass eine Rekonstruktion des Geschwindigkeitsprofils über der porösen Schicht aus einer Messung über einem dünnen, eingebetteten Spiegel gewagt werden kann. Weitere Untersuchungen werden dazu folgen.

Die weitere, zusätzliche Messposition im Schlitz zeigt zusätzlich das Potential des Profilsensors mit Trägerfrequenztechnik: Die Strömungssituation im Schlitz in der porösen Schicht kann sehr gut aufgelöst werden (Abb.12). Es zeigt sich zunächst im Vergleich zu der Strömung über der porösen Struktur, dass hier Unterschiede festgestellt werden können. Das gesamte Profil ist noch stärker aus der Mitte in Richtung der porösen Struktur verschoben. Allerdings flacht der Geschwindigkeitsgradient im Vergleich zu den Messungen an der porösen Struktur und auch am Spiegel in Wandnähe etwas ab (Abb. 13). Es ist daher fraglich, ob aus einer solchen Messung eine Slip-Geschwindigkeit abgeleitet werden kann, wie dies in der Literatur versucht wurde [4]. Zudem kommt es zu einer weiteren Veränderung des Geschwindigkeitsprofils, wie die Detailbetrachtung in Abb. 14 zeigt. Zum einen kann eine Ausströmung aus dem porösen Material festgestellt werden (vgl. eingeklinkte Darstellung nach [4] in Abb. 14). Diese beträgt etwa 0,15 m/s, d.h. etwa 2,7 % der gemessenen Maximalgeschwindigkeit. Auch hier zeigt sich hinsichtlich der Auflösung der Geschwindigkeitswerte und des Messortes das Potential des Profilsensors gegenüber anderer Messtechnik. Darüber hinaus kann mittels des frequenzmodulierten Profilsensors erstmals eine Rückströmungszone an der oberen Kante der porösen Schicht gemessen werden. Der zeitliche Mittelwert liegt hier bei etwa -0,05 m/s (weniger als 1 % der gemessenen Maximalgeschwindigkeit). Eine solche Strömungsstruktur wurde bei Messungen mittels LDA oder PIV in laminarer Strömung bislang nicht festgestellt. Weitere Messungen und Parametervariationen sind vorgesehen, um die Strömungssituation ausführlicher analysieren zu können.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein 2C-LDV-Profilsensors mit Trägerfrequenztechnik als Kombination eines 2C-LDV-Standardsystems mit einem 1C-Profilsensor aufgebaut. Der Profilsensor wird durch zwei in der gleichen Ebene angeordnete LDV-Komponenten gebildet, wobei einer der beiden Teillaserstrahlen mittels eines optoakustischen Modulators (Braggzelle) frequenzmoduliert wird. Die zweite Geschwindigkeitskomponente wird durch die Anordnung einer dritten LDV-Komponente senkrecht zur Profilsensorkomponente angeordnet.

Untersuchungsobjekt für die Demonstration der Leistungsfähigkeit des Profilsensors ist ein Plexiglas Kanal, bei dem auf einer Wand eine poröse Schicht in Form eines Metallschaums angebracht ist. Bei einer Reynoldszahl von $Re = 4500$ wird das Geschwindigkeitsprofil über der porösen Schicht, über einem darin eingebetteten dünnen Spiegel und in einem Schlitz in der porösen Schicht gemessen. Es zeigt sich, dass erst bei einem Wandabstand von 0,3 mm über der porösen Wand kein sinnvolles Signal mehr detektiert werden kann. Bei der Messung über dem Spiegel beträgt dieser reflektionsbedingte Abstand nur etwa 0,15 mm. Grundsätzlich zeigen die Messungen, dass die gemessenen Profile sehr ähnlich sind, so dass vermutet werden kann, dass eine Rekonstruktion des Geschwindigkeitsprofils über der porösen Schicht aus einer Messung über einem dünnen, eingebetteten Spiegel gewagt werden kann. Bezüglich des Geschwindigkeitsprofils kann festgestellt werden, dass das Geschwindigkeitsprofil im Kanal mit poröser Wand leicht aus der Kanalmitte verschoben ist: das Geschwindigkeitsmaximum ist zur porösen Wand hin verschoben und der Geschwindigkeitsgradient an der porösen Wand bzw. dem Spiegel ist signifikant steiler als an der festen gegenüberliegenden Wand. Ähnliche Ergebnisse werden in der Literatur auch für laminare Strömungen beschrieben [4]. Die Strömungssituation im Schlitz in der porösen Schicht kann

mit Hilfe des frequenzmodulierten Profilsensors sehr gut aufgelöst werden und es zeigen sich Strömungsphänomene, die bislang nicht in der Literatur beschrieben wurden. Es kann eine Ausströmung aus dem porösen Material festgestellt werden. Diese beträgt etwa 0,15 m/s, d.h. etwa 2,7 % der gemessenen Maximalgeschwindigkeit. Darüber hinaus kann erstmals eine Rückströmungszone an der oberen Kante der porösen Schicht gemessen werden. Der zeitliche Mittelwert liegt hier bei etwa -0,05 m/s (weniger als 1 % der gemessenen Maximalgeschwindigkeit). Hier zeigt sich hinsichtlich der Auflösung der Geschwindigkeitswerte und des Messortes das Potential des Profilsensors gegenüber anderer Messtechnik.

Es sind weitere Untersuchungen zur Über- und Durchströmung von porösen Strukturen notwendig, um beispielsweise die Schlupfgeschwindigkeit über einen größeren Skalenbereich hinsichtlich Porosität, Kanal-zu-Porositätsverhältnis sowie Reynoldszahl zu analysieren.

Danksagung

Diese Arbeit wurde in Teilen durch die DFG gefördert (DFG BU 2241/4-1).

Literatur

- [1] G. S. Beavers, and D. D. Joseph (1967) Boundary conditions at a naturally permeable wall. *J Fluid Mech.* 30, 197–207.
- [2] M. Le Bars, and M.G. Worster (2006) Interfacial conditions between a pure fluid and a porous medium: implications for binary alloy solidification, *J. Fluid Mech.*, vol. 550, pp. 149–173
- [3] S. Saleh, J. F. Thovet, and P. M. Adler (1993) Flow Along Porous Media by Particle Image Velocimetry, *AIChE Journal*, Vol. 39, No. 11, pp. 1765-1776
- [4] S. K. Gupte, and S. G. Advani (1997) Flow near the permeable boundary of a porous medium: An experimental investigation using LDA, *Experiments in Fluids*, 22: 408-422
- [5] D. Pokrajac, and C. Manes (2009) Velocity Measurements of a Free-Surface Turbulent Flow Penetrating a Porous Medium Composed of Uniform-Size Spheres, *Transp Porous Med* 78:367–383
- [6] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller (2002) Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution. *Meas. Sci. Technol.* 13, S. 1979–1989
- [7] L. Büttner, C. Bayer, A. Voigt, J. Czarske, H. M. Iler, N. Pape, V. Strunck (2008) Precise flow rate measurements of natural gas under high pressure with a laser Doppler velocity profile sensor, *Exp Fluids*, 45, 1103–1115
- [8] J. König, A. Voigt, L. Büttner, J. Czarske (2010) Precise micro flow rate measurements by a laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing, *Measurement Science and Technology*, 21(7), 074005