Strömungsprofilmessungen in Filmströmungen mit einem hochauflösenden Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor Flow profile measurements in liquid film flows using a spatially high-resolving laser Doppler velocity profile sensor

M. Bermuske¹, H. Radner¹, S. Gerke¹, L. Büttner¹, J. Czarske¹, M. Joppa², F. Rüdiger², M. Dues³, U. Müller⁴, H. Müller⁵

- ¹ Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden E-Mail: Mike.Bermuske@tu-dresden.de, Internet: http://www.tu-dresden.de/et/mst
- ² Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Professur für Strömungsmechanik, George-Bähr-Str. 3c, 01069 Dresden
- ³ Intelligent Laser Applications GmbH, Karl-Heinz-Beckurts Str. 13, 52428 Jülich, http://www.ila.de
- ⁴ Optolution Messtechnik GmbH, Gewerbestraße 18, 79539 Lörrach, http://www.optolution.com
- ⁵ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich Gase, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Laser-Doppler-Anemometrie, Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor, Filmströmungen Laser Doppler Velocimetry, Laser Doppler Velocity Profile Sensor, Film Flows

Kurzfassung

Grenz- und Scherschichten besitzen in der Strömungsmechanik eine enorme Bedeutung, sind aber gleichzeitig messtechnisch schwer zugänglich. Ein Beispiel dafür stellen die in der chemischen Verfahrenstechnik verbreiteten Filmströmungen dar. In lebensmitteltechnischen Anlagen werden sie verwendet, um verfahrensbedingte Ablagerungen zu beseitigen, da diese ein großes Problem für die Effizienz der Produktion und auch für die Gesundheit der Konsumenten darstellen. Die Entfernung dieser Rückstände geht mit einem immensen Energieverbrauch einher. Die für eine Prozessoptimierung notwendige vollaufgelöste Simulation ist nicht praktikabel, da die zu simulierenden Effekte mehrere Größenordnungen überspannen. Neue Modelle können die kleinskaligen Effekte vereinfacht beschreiben und dadurch den Simulationsaufwand signifikant reduzieren. Um diese Modelle zu verifizieren, werden allerdings Messungen mit hoher Ortsauflösung benötigt, da die Filmdicken meist nur einige wenige Hundert Mikrometer betragen. Die Ortsauflösung bspw. konventioneller Laser-Doppler-Anemometer ist dafür jedoch unzureichend.

Der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor, der auf der Verwendung zweier fächerförmiger Streifensysteme basiert, erlaubt eine Positionsbestimmung von Partikeln im Messvolumen und erhöht so die erreichbare Ortsauflösung signifikant bis in den Mikrometerbereich. Er ist in der Lage, in dünnen Grenzschichten zu messen und so die kleinskaligen Effekte im Inneren des Strömungsfilms zu untersuchen.

In diesem Beitrag werden erstmalig Messungen in Filmströmungen mit einem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor und die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Einleitung

In der Strömungsmechanik besitzen freie Scherschichten oder Grenzschichten, in denen sich die Strömungsgeschwindigkeit über kurze Distanzen stark ändert, eine zentrale Bedeutung. Eine besondere Strömungsform, die vollumfänglich einen Grenzschichtcharakter aufweist, ist die Filmströmung. Sie kommt in der Industrie sehr häufig vor und tritt überall dort auf, wo Oberflächen mit Flüssigkeiten geschlossen zu benetzen sind. Konkrete technische Anwendungen sind das Beschichten, die Verdunstungskühlung oder die Entfernung prozessbedingter Ablagerungen in Behältern.

Besonders hoher Wärme- und Stoffübertransport wird bei der Verwendung von Flüssigkeitsstrahlen erreicht, die mit Hilfe einer Düse auf die zu behandelnde Oberfläche gerichtet werden. Dabei wird die Flüssigkeit im Bereich des Auftreffpunktes umgelenkt und bildet anschließend einen radial strömenden Flüssigkeitsfilm. Die Folge sind sehr hohe Geschwindigkeitsgradienten an der benetzten Oberfläche, die sich positiv auf die Transportvorgänge auswirken. Beispielsweise berichtet [1] über Wärmeströme von bis zu $\dot{q} = 400 \text{ MW/m}^2$. Bei der industriellen Reinigung werden Strahlreinigungssysteme vor allem für hartnäckige Verschmutzungen genutzt [2].

Um beispielsweise derartige Reinigungsprozesse zielsicher vorauszusagen und somit eine optimale Auswahl der Prozessparameter zu ermöglichen, bedarf es einer umfassenden Kenntnis der Vorgänge innerhalb der Strömung. Zur Erstellung einfacher Modelle sind deshalb grundlegende Untersuchungen durchzuführen. Neben, bedingt durch die Komplexität der Problemstellung, teuren numerischen Rechnungen besteht die Möglichkeit experimenteller Untersuchungen. Die Strömungsbedingungen in der industriellen Anwendung übersteigen jedoch die Möglichkeiten üblicher Messverfahren [3].

Filme mit Dicken in der Größenordnung von h = 0,1 mm und Strömungsgeschwindigkeiten wie U = 30 m/s sowie starke Oberflächenwellen [4,5] erfordern räumlich und zeitlich besonders hochauflösende Messung, um Geschwindigkeitsprofile, Geschwindigkeitsschwankungen und die Wandschubspannung korrekt erfassen zu können. In der Literatur finden sich bisher lediglich Ergebnisse aus Messungen mit konventionellen Laser-Doppler-Anemometern, bei denen die Abmessungen des Messvolumens in etwa der Filmhöhe in technischen Anwendungen entsprechen [6,7]. Das Geschwindigkeitsprofil in der Filmströmung kann damit nicht in hinreichender Auflösung erfasst werden. Als Lösung für dieses messtechnische Problem kommt in diesem Beitrag der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor zum Einsatz, und es werden erste Messergebnisse vorgestellt.

Der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor



Abb. 1: Überlagerte fächerförmige Streifensysteme, die das Messvolumen des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors bilden.

Das Prinzip des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors basiert auf dem bekannten Verfahren der Laser-Doppler-Anemometrie, jedoch werden bei dem Profilsensor zwei überlagerte, fächerförmige, physikalisch unterscheidbare Interferenzstreifensysteme verwendet [8,9], siehe Abb. 1. Dadurch wird es möglich, nicht nur die laterale Geschwindigkeitskomponente, sondern zusätzlich auch die axiale Position z eines Streuobjekts innerhalb des Interferenzstreifensystems mit Mikrometer-Genauigkeit zu bestimmen. Für Grenzschichtprofilmessungen wird dann die optische Achse z des Sensors in wandnormaler Richtung ausgerichtet. Der Sensor wurde im Rahmen dieser Tagung bereits mehrfach für Strömungsmessungen vorgestellt, siehe z.B. [10].

Die Interferenzstreifensysteme werden über den axialen Verlauf ihrer Streifenabstände $d_{1,2}(z)$ beschrieben. Objekte, die sich durch die Streifensysteme bewegen streuen Licht mit den Dopplerfrequenzen $f_{1,2}(z)$. Die Funktion

$$q(z) = \frac{f_2(U,z)}{f_1(U,z)} = \frac{U/d_2(z)}{U/d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)}$$

ist unabhängig von der Geschwindigkeit, jedoch abhängig von der axialen Position, so dass sich die axiale Position der Streuteilchen dadurch angeben lässt.

Die Partikelgeschwindigkeit ermittelt sich wie auch beim konventionellen LDA aus dem Produkt aus Dopplerfrequenz und Streifenabstand, wobei diesmal der lokale Streifenabstand an der Position z verwendet wird:

$$U(z) = f_1(U, z) d_1(z) = f_2(U, z) d_2(z)$$

Durch die Möglichkeit der Positionsbestimmung von Streuteilchen im Messvolumen wird die Ortsauflösung gegenüber der konventionellen Laser-Doppler-Anemometrie um ca. zwei Größenordnungen verbessert; diese kann bis in den Submikrometerbereich reichen. Durch Auswerten einer großen Anzahl von Streuteilchen, die statistisch verteilt in der Strömung vorliegen, kann das im Messvolumen vorherrschende Geschwindigkeitsprofil reproduziert werden. Für die Erfassung von Strömungsgrenzschichten wie hier im Fall der Filmströmung ist das Verfahren daher prädestiniert.

Die beiden Interferenzstreifensysteme müssen prinzipiell physikalisch unterscheidbar sein. Im vorliegenden Fall wurde dazu Wellenlängenmultiplex eingesetzt. Die beiden Streifensysteme werden durch zwei Festkörperlaser der Wellenlängen 532 nm und 561 nm erzeugt.

Experimenteller Aufbau

Der in Abbildung 2 gezeigte Aufbau besteht aus drei Teilen, dem Laser-Doppler-Profilsensor, einer Prallplatte aus Acrylglas und einer Düse, die mit Wasser als Arbeitsfluid bei einem Volumenstrom von 4,1 l/min betrieben wird. Die Düse hat einen Durchmesser von D = 5,2 mm und befindet sich in der Höhe H = 52 mm über der Glasplatte. Durch den von ihr erzeugten Strahl bildet sich auf der Prallplatte ein dünner, statistisch radialsymmetrischer Film aus, welcher im hydraulischen Sprung endet. Um das Strömungsprofil in radialer Richtung aufnehmen zu können, kann die Düse entsprechend traversiert werden. Für die Vermessung des Strömungsprofils wurde der Profilsensor unterhalb der Anordnung positioniert, und die Strahlen wurden von unten durch die Prallplatte in den Film geleitet, um eine Verzerrung durch die auftretenden Oberflächenwellen zu vermeiden. Dieser projiziert die zwei Streifensysteme durch die Glasplatte in die Filmströmung. Das Arbeitsfluid (H₂O) wurde mit ca. 10 µm großen silberbeschichteten Glashohlkugeln als Seeding versetzt. Die Streulichtsignale werden durch die Glasplatte mit einer Optik beobachtet und über eine Glasfaser mit einer Beobachtungseinheit detektiert. Die Signalauswertung erfolgt auf einem PC.



Abb. 2: Verwendeter Aufbau zur Messung der Filmströmung mit dem Laser-Doppler-Profilsensor. Die Laserstrahlen werden von unten durch die Glasplatte geleitet. Die Düse kann in radialer Richtung r traversiert werden, um das Strömungsprofil an mehreren Stellen zu erfassen.

Ergebnisse

In Abbildung 3 ist das Geschwindigkeitsprofil in einem Abstand von r = 11,7 mm zum Auftreffpunk des Wasserstrahls zu sehen. Die blauen Punkte entsprechen den einzelnen detektierten Partikeln mit zugehöriger Geschwindigkeit in radialer Richtung r und Position z. Gemessen wurde über eine Zeitdauer von 200 Sekunden, in welcher ca. 650.000 Burstsignale detektiert wurden. Die rote Linie repräsentiert die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. Im Bereich nahe der Prallplatte wurden im Vergleich zur Mitte des Profils nur sehr wenige Bursts detektiert. Eine Vermutung ist hier, dass eine durch Reibungseffekte hervorgerufene, in z gerichtete Strömungskomponente die Partikel von der Wand wegtreibt. Ein weiterer Grund könnten "Lift-Forces" sein. Diese könnten in zukünftigen Messungen mit kleineren Partikeln vermindert werden, um die Signalausbeute in Wandnähe zu erhöhen. Das Geschwindigkeitsprofil stimmt sehr gut qualitativ mit den in der Literatur [7] beschriebenen Geschwindigkeitsprofilen überein. Man erkennt die für Profile nahe des Strahlauftreffpunktes typische Geschwindigkeitsüberhöhung, den parabelförmigen Abfall zur Grenzfläche, welcher auf eine laminare Strömung hinweist, sowie einen linearen Abfall zur Filmoberfläche.



Abb. 3: Geschwindigkeitsprofil bei r = 11,7 mm; Position 9 in Abbildung 4. Die Position der Prallplatte wird zwischen $z = 0 - 50 \mu m$ vermutet, die mittlere Position der Wasseroberfläche bei ca. $z = 450 \mu m$. Blau: Position und Geschwindigkeit einzelner detektierter Streupartikel. Rot: mittlere Geschwindigkeit.



Abb. 4: Geschwindigkeitsprofile entlang der Ausbreitungsrichtung der Filmströmung. Die Position der Prallplatte wird zwischen $Z = 0 - 50 \mu m$ vermutet. Bei r = 0 mm befindet sich die Mitte des auftreffenden Wasserstrahls. Bei r = 2.6 mm befindet sich der Rand des Wasserstrahls. Aufgetragen sind jeweils die mittleren Geschwindigkeiten.

In Abbildung 4 wurde die Düse in radialer Richtung r traversiert und das Geschwindigkeitsprofil bei verschiedenen Abständen zum Auftreffpunkt des Jets gemessen. Die schwarzen Linien repräsentieren jeweils die mittleren Geschwindigkeiten. Bei Messposition 0 befindet sich die Mitte des auftreffenden Wasserstrahls. Im Bereich um den Auftreffpunkt entsteht eine Stauströmung und der Strahl wird umgelenkt. Dies ist deutlich anhand zunehmender Geschwindigkeiten in radialer Richtung zu erkennen. Position 3 befindet sich mitten im Umlenkbereich, welcher durch eine, selbst im zeitlichen Mittel, stark gekrümmte Phasengrenze gekennzeichnet ist. An dieser Stelle treten im Zusammenhang mit ebenfalls vorhandenen Oberflächenwellen starke Reflektionen auf, welche den Detektor zum Großteil übersteuern und eine Messung verhindern. Eine angepasste Signalverarbeitung, welche gezielt die Bursts in Abwesenheit der Reflexe detektiert, sowie eine längere Messzeit an dieser Position sollen die Messung zukünftig ermöglichen. Die maximale radiale Geschwindigkeit konnte bei Position 4 gemessen werden. Von dieser Position an nimmt, im betrachteten Messbereich, auch die Filmdicke kontinuierlich ab und die Geschwindigkeitsüberhöhung verschiebt sich in Richtung der Filmoberfläche. Der Geschwindigkeitsgradient im wandnahen Bereich nimmt für höhere r ab. Dieses Verhalten entspricht dem Kenntnisstand in der Literatur [11]: Eine möglicherweise turbulente Strahlströmung wird im Staubereich relaminarisiert und umgelenkt. Innerhalb der sich anschließenden Filmströmung wächst die Grenzschicht und der Einfluss der viskosen Kräfte nimmt zu. Die aus Kontinuitätsgründen zuerst sinkende Filmhöhe beginnt bei größeren Radien, welche in der hier vorgestellten Messung nicht erreicht werden, wieder zu steigen.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass sich der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor prinzipiell für die Untersuchung von Filmströmungen eignet. Das gemessene Feld der mittleren Strömungsgeschwindigkeit stimmt mit dem Kenntnisstand der Literatur überein. Zukünftig sollen die Messungen auch phasensynchron zu den Oberflächenwellen des Films erfolgen, indem die Auslenkung der Oberfläche durch einen Abstandssensor gleichzeitig aufgezeichnet wird.

Neue Möglichkeiten für Filmströmungsmessungen bieten sich durch den Einsatz von adaptiven Optiken. Bei der hier vorgestellten Arbeit erfolgte die Messung in Transmission, d.h. durch die Bodenplatte hindurch, um Störungen durch die Oberflächenwellen auf der Oberseite auszuschließen. Die Bodenplatte muss dafür transparent, planar und von hoher optischer Güte sein. Dieses kann jedoch nicht in allen Anwendungsfällen gewährleistet werden. Bei der Untersuchung von Reinigungsvorgängen kann die Bodenplatte eine Oberflächenstruktur aufweisen und, wie in vielen industriellen Prozessen, aus Metall sein. In diesem Fall verbleibt die fluktuierende Flüssigkeitsoberfläche als alleiniger optischer Zugang, was jedoch durch die zeitlich veränderliche Brechung der Lichtstrahlen die Messtechnik vor enorme Herausforderungen stellt. Dieses Problem kann perspektivisch mit Hilfe adaptiver optischer Komponenten gelöst werden, welche die auftretenden Störungen durch eine aktive Regelung kompensieren [12,13].

Literatur

- [1] J. H. Lienhard V, "Liquid jet impingement", Annual Review of Heat Transfer 6(6), Begel House Inc., 1995
- [2] A. Tamime, "Cleaning-In-Place", Dairy, Food and Beverage Operations, 3. Aufl. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2009
- [3] M. Joppa, H. Köhler, F. Rüdiger, H.P. Majschak, J. Fröhlich, "Vereinfachte Berechnung der Strömung bei der Strahlreinigung", Tagungsband VVD 2015 Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik, Selbstverlag der TU Dresden, 2015, S. 197-208 (ISBN 978-3-86780-430-1).
- [4] A. Rao, J.H. Arakeri, "Wave structure in the radial film flow with a circular hydraulic jump", Experiments in Fluids 31(5), S. 542–549, 2001
- [5] T. Azuma, T. Hoshino, "The Radial Flow of a Thin Liquid Film", 1st Report, Laminar-Turbulent Transition, Bulletin of JSME 27(234), Japan Society of Mechanical Engineers, S. 2739–2746, 1984
- [6] T. Azuma, T. Hoshino, "The Radial Flow of a Thin Liquid Film", 3rd Report (Velocity Profile), Bulletin of JSME 27(234), Japan Society of Mechanical Engineers, S. 2755–2762, 1984
- [7] J. Stevens, B.W. Webb, "Measurements of flow structure in the radial layer of impinging free-surface liquid jets", International Journal of Heat and Mass Transfer 36(15), S. 3751–3758, 1993
- [8] J. König, S. Mühlenhoff, K. Eckert, L. Büttner, S. Odenbach, J. Czarske "Velocity measurements inside the concentration boundary layer during copper-magneto-electrolysis using a novel Laser Doppler profile sensor", Electrochimica Acta 56(17), S. 6150 - 6156, 2011
- [9] K. Shirai, Y. Yaguchi, L. Büttner, J. Czarske, S. Obi, "Highly spatially resolving laser Doppler velocity measurements of the tip clearance flow inside a hard disk drive model", Exp Fluids 50(3), S. 573-586, 2011
- [10] L. Büttner, K. Shirai, A. Voigt, M. Neumann, J. Czarske, T. Weier, C. Cierpka, "Anwendung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors zur Vermessung elektro-magnetisch beeinflusster Elektrolytströmungen", 16. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S. 4.1 - 4.8, 9. - 11. September 2008, Karlsruhe
- [11] J. H. Lienhard V: "Heat transfer by impingement of circular free-surface liquid jets", 18th National and 7th ISHMT–ASME Heat and Mass Transfer Conference, Invited Keynote Paper, 2006
- [12] L. Büttner, C. Leithold, J. Czarske, "Neue Möglichkeiten für die laseroptische Strömungsmesstechnik durch den Einsatz von adaptiver Optik", 21. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Beitrag 33, 3.–5.09.2013
- [13] L. Büttner, C. Leithold, J. Czarske, "Interferometric Velocity Measurements through a fluctuating Gas-Liquid Interface employing Adaptive Optics", Optics Express 21(25), S. 30653-30663, 2013