

MESSUNG VON GESCHWINDIGKEITSFELDERN DURCH AUSNUTZUNG DER TIEFENSCHÄRFE MIKROSKOPISCHER OPTIKEN

MEASUREMENTS OF THE VELOCITY FIELD BY EXPLOITATION OF THE DEPTH OF FOCUS FROM MICROSCOPIC OPTICS

S. Paschke, J.-U. Repke, G. Wozny

Technische Universität Berlin, Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik, Straße des 17. Juni 135 –
KWT 9, 10623 Berlin, Germany

Micro-PIV Messungen, Filmströmung, wellige Oberfläche, Brennebenenabtastung
Micro-PIV Measurements, Film Flow, Wavy Surface, Focal Plane Scanning

Zusammenfassung

Für die Untersuchung von Flüssigkeitsströmungen auf geneigten Oberflächen ist eine neue Mikro Particle Image Velocimetry (μ PIV) Methode entwickelt worden, die Messungen des dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes von laminaren und quasi-laminaren Filmströmungen auf nicht transparenten Materialien durch die bewegte Phasengrenzfläche ermöglicht. Bei dieser Technik wird die optische Achse der Kamera orthogonal zur Platte ausgerichtet, so dass Verzerrungen aufgrund von Lichtreflexionen und Brechungen minimiert werden. Die Bildaufzeichnung zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes erfolgt nach dem Prinzip der Brennebenenabtastung, dem so genannten Focal Plane Scanning.

Mit Hilfe einer Wasser-Glycerin Strömung wird die Anwendbarkeit der Methode demonstriert, indem vergleichende Messungen von unten durch eine transparente Schicht und von oben durch die bewegte Oberfläche bei sonst gleichem Setup erfolgen. Weiterhin zeigt ein Vergleich einer Wasserströmung auf einer glatten Edelstahlplatte mit äquivalenten PTV Messungen eine sehr gute Übereinstimmung.

Problemstellung

Die Effizienz von Wärme- und Stoffaustauschapparaten, wie z.B. Packungskolonnen oder Fallfilmverdampfer, hängt stark von der Benetzbarkeit der Flüssigkeiten auf der festen Oberfläche ab. Diese resultiert aus den Oberflächenspannungen zwischen den jeweiligen Phasen (siehe de Gennes 1985), dem Oberflächenmaterial, der Oberflächenstruktur (Palzer et al. 2001) und dem Neigungswinkel. In Abhängigkeit dieser Systemparameter und der Betriebsparameter, wie Gas- und Flüssigkeitsbelastung, können neben einer geschlossenen Filmströmung auch Rinnsal- und Tropfenströmungen auftreten, wie es unter anderem in Saber et al. 2004 und Hoffmann et al. 2004 beschrieben wird.

Die Auslegung und Optimierung von Wärme- und Stoffaustauschapparaten erfolgt zusehends mit Hilfe von CFD Simulationen. So werden verstärkt Anstrengungen unternommen dreidimensionale CFD Modelle für Packungen bzw. Packungssegmente zu erstellen (Repke et al. 2007). Hauptziel der Untersuchungen ist die Analyse der Geschwindigkeitsfelder, da die Trennleistung von thermischen Kontaktapparaten maßgeblich durch die fluiddynamischen Bedingungen bestimmt wird. Neben den zu entwickelnden CFD Modellen werden

57.2

zwingend experimentelle Daten mit hinreichender Genauigkeit zur Validierung benötigt. Eine Anforderung ist hierbei die experimentelle Daten unter möglichst prozessnahen Bedingungen, wie Gasgegenstrom unter Verwendung industrieller Oberflächenmaterialien, aufzunehmen.

Aufgrund der Anfälligkeit von Filmströmungen gegenüber Störungen sollten die experimentellen Messungen mit Hilfe einer nicht-intrusiven Messtechnik erfolgen, so dass sichergestellt werden kann, dass die Ergebnisse unbeeinflusst sind. Optische Messverfahren erfüllen dieses Kriterium und haben als einzige Anforderung, dass das zu untersuchende System optisch zugänglich ist.

In den wenigsten Fällen liegt im Betriebspunkt des Wärme- und Stoffaustauschapparates eine reine laminare Flüssigkeitsströmungen vor, vielmehr bilden sich Wellen aus die je nach Flüssigkeitsbelastung laminar oder turbulent sind. Daher erfolgen in den meisten Fällen, die experimentelle Untersuchungen auf transparenten Materialien, so dass die Messungen durch diese transparente Schicht erfolgen können (siehe z.B. in Adomeit et al. 2000. und Wittig et al. 1997). Der Vorteil ist, dass es zu keinen Störungen bei der Bildaufnahme aufgrund von Lichtreflektionen und Lichtbrechungen an der Phasengrenzfläche kommt. Als Nachteil ist zu nennen, dass Untersuchungen auf Industriell verwendet Oberflächen wie Edelstahl sind allerdings nicht möglich. Zur Lösung dieses Problems, wurde von Paschke et al. 2006 ein Mikro Particle Image Velocimetry μ PIV Messsystem entwickelt, mit dem es möglich ist das dreidimensional Geschwindigkeitsfeld von laminaren und quasi-laminaren Filmströmungen auf nicht transparenten Oberflächenmaterialien durch die bewegte Phasengrenzfläche zu vermessen.

μ PIV Messaufbau

Für erste Messungen sowie zur Entwicklung und Demonstration der Messtechnik wird die einfache Geometrie einer Platte mit einer Breite von 5 cm und einer Länge von 11cm verwendet. Der Gasgegenstrom soll zu diesem Zeitpunkt aus Vereinfachungsgründen nicht betrachtet werden. Ein leichter Wechsel der Platte ermöglicht die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Oberflächen auf das Geschwindigkeitsfeld.

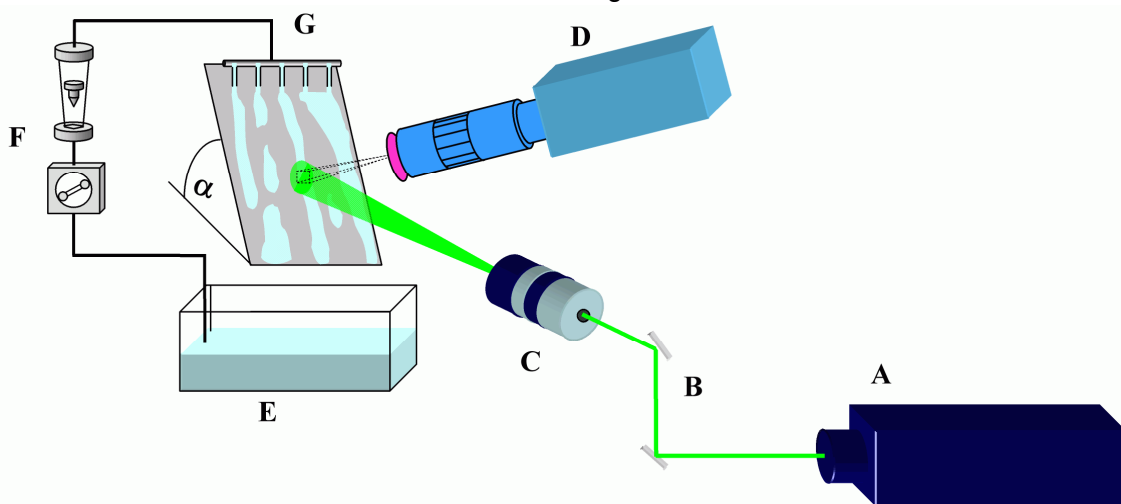


Abb. 1: Experimenteller Versuchsaufbau: A: ND:YAG-Laser, B: Spiegel, C: Lichtschnittoptik, D: CCD Kamera mit Mikroobjektiv und Bandpassfilter 580nm, E: Vorlagebehälter, F: Schlauchpumpe mit Rotameter, G: Feedaufgabe, α : Neigungswinkel

Der Aufbau der Messtechnik ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Rhodamin B markierte Melaminharzpartikel mit einem Durchmesser von $10.23 \mu\text{m}$ werden in der Flüssigkeit suspendiert und in einem Behälter (E) vorgelegt. Die Flüssigkeitsaufgabe auf die um 60 Grad

zum Horizont geneigten Platte erfolgt mit Hilfe einer Schlauchpumpe (F) und einem Aufgabehrohr (G). Die Flüssigkeit wird anschließend wieder in den Vorlagebehälter befördert. Für die Belichtung (B-C) der Messebene (Breite: 2 mm, Länge: 1.5 mm) wird ein Doppelpuls ND:YAG Laser verwendet, der wie die CCD-Kamera (D) an einer Triggereinheit angeschlossen ist.

Focal Plane Scanning

Untersuchungen durch bewegte Oberflächen können zu starken Verzerrungen bei der Bildaufnahme und somit zur Verfälschung der daraus resultierenden Ergebnissen führen. Ursache hierfür sind Lichtbrechungen und Reflektionen an der bewegten Phasengrenzfläche. Ausner et al. 2005b zeigten, dass sich diese Effekte in Abhängigkeit des Blickwinkels verstärken oder verringern können. Zur Minimierung der Verzerrungen wird daher die Kamera orthogonal zur Filmoberfläche installiert, so dass vorerst keine Korrekturfunktionen benötigt werden. Mikroskopische Optiken zeichnen sich im Allgemeinen durch eine sehr geringe Tiefenschärfe aus, die weit unterhalb der mittleren Filmdicke der zu untersuchenden Flüssigkeitsströmung liegt. Bei dem verwendeten InfiniMax™ Mikroobjektiv mit einem Verstärkungsfaktor von 4 beträgt die Länge des Schärfebereiches beispielsweise etwa 0.08mm.

In Abhängigkeit der Entfernung der Tracerpartikel von der Brennebene ändert sich das morphologische Abbild der Partikel (siehe Meinert et al. 2000) auf den fotografierten Bildern. Tracerpartikel, die sich im Schärfbereich befinden werden scharf abgebildet alle anderen unscharf (Abbildung 2). Für die spätere Auswertung (siehe Abschnitt Bildbearbeitung) dürfen nur die Partikel im Schärfbereich betrachtet werden, alle andern und ggf. auftretende Störungen, müssen mit Hilfe geeigneter Bildbearbeitungsalgorithmen entfernt werden. Anschließend kann dann das Geschwindigkeitsfeld der betrachteten Schärfebene mit den bekannten Korrelationsmethoden bestimmt werden.

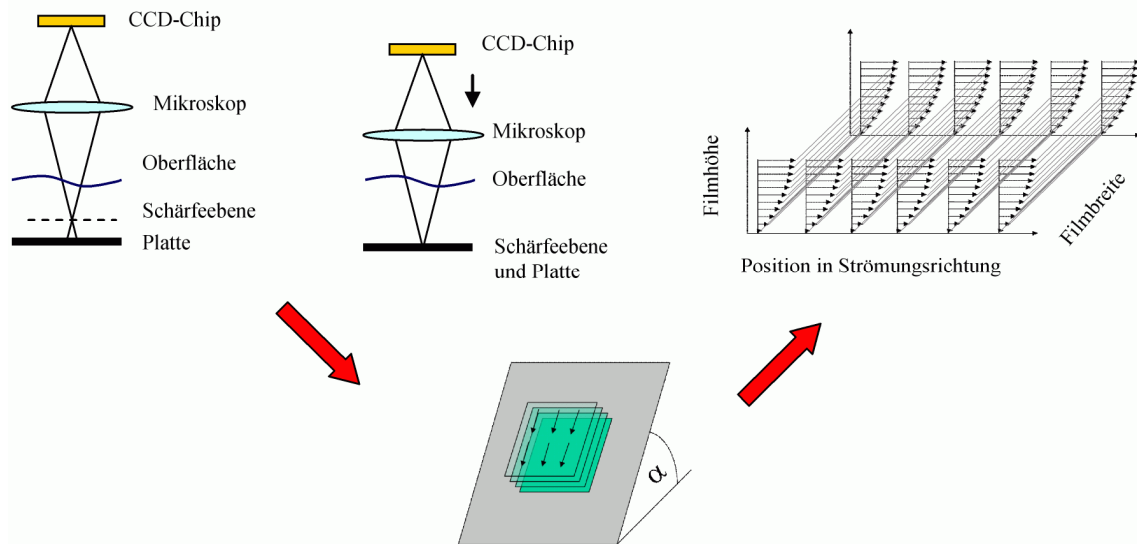


Abb. 2: Prinzip des Tiefenschärfe-Scannings (Focal Plane Scanning)

Wird nun die Schärfeebene orthogonal zur Platte verschoben, wie in Abbildung 2 dargestellt, ist es möglich die Filmströmung in unterschiedlichen Ebenen zu scannen (engl. Focal Plane Scanning). Zu diesem Zweck ist die gesamte Kamerakonstruktion auf einen Mikrometerverschiebeschlitten montiert, so dass ein Ebenenabstand von 0.05mm gewährleistet werden kann. Aus den Geschwindigkeitsfeldern der einzelnen Ebenen lässt sich abschließend das drei dimensionale Geschwindigkeitsfeld bestimmen und in geeigneter Weise darstellen.

57.4

Die Bildaufnahme erfolgt wie in Raffel et al. 1998 beschrieben nach dem double frame / single exposure Prinzip. Der Zeitschritt zwischen den beiden Belichtungen liegt zwischen 30 μ s und 100 μ s. Für jede Ebene werden aufgrund der geringen möglichen Partikeldichte der scharfen Partikel 300 Doppelbilder aufgenommen, um hinreichend genaue Ergebnisse zu erzielen.

Digitale Bildbearbeitung und Auswertung

Wie oben beschrieben ist es notwendig unscharfe Partikel und andere Störungen von den Bildern zu entfernen. Hierfür ist mit Hilfe der Image Processing Toolbox von Matlab, Mathworks Inc., ein geeigneter Filter entwickelt worden, mit dem es möglich ist, dass gesamte Bildmaterial sequenziell zu bearbeiten.

Nur Partikel, welche in der bekannten Brennebene liegen, werden scharf abgebildet und in die Auswertung einbezogen. Partikel die sich vor der Brennebene befinden werden aufgeweitet, sie erscheinen als ein Ring mit einem schwarzen Zentrum. Partikel hinter der Brennebene erscheinen wie als schwach fluoreszierender Partikel mit einer umgebenden Korona. Beiden ist gemein, dass die projizierte Fläche mit zunehmender Entfernung von der Brennebene steigt und die Grauwerteverteilung flacher und breiter wird. Folglich stehen zwei Selektierungsparameter für die Bildbearbeitung zur Verfügung.

In einem ersten Schritt werden alle Grauwerte entfernt die sich unterhalb eines bestimmten Schwellwertes befinden und die Grauwerteverteilung wird angepasst (siehe Russ 1999). Somit werden sehr unscharfe Partikel, Störungen und das Hintergrundrauschen gefiltert, die sich sonst bei den nächsten Filterschritten als störend auswirken könnten. Weiterer Vorteil dieser schnellen Vorfilterung ist aufgrund der geringeren Anzahl der verbleibenden Partikel eine Beschleunigung nachfolgenden Filterfunktionen.

Mit Hilfe des von Canny 1986 entwickelten Kantendetektierungsverfahren werden die verbliebenen Partikel selektiert und ihre Kanten gespeichert. Ist die Projektionsfläche und der Umfang eines scharfen Partikels bekannt, können die Kanten der unscharfen Partikel entfernt werden. Durch Füllen der verbliebenen Kanten kann somit eine Maske erstellt werden, die es durch mathematische Operationen ermöglicht, dass auf dem Originalbild nur noch scharfe Partikel zu finden sind.

Da die beiden Laser nicht die absolut gleiche Intensität besitzen, sich das Fluoreszenzverhalten von Belichtung zu Belichtung aber ändern kann und die Partikel unter Umständen eine geringe Auf- oder Abwärtsbewegung machen, treten nach der Filterung neben Partikelpaaren auch Einzelpartikel auf. Es ist somit nötig die beiden Bilder abschließend zu vergleichen und alle Einzelpartikel zu entfernen.

Die Filterparameter wie Schwellwert, Grauwertanpassung, Projektionsfläche und Durchmesser müssen für jedes einzelne Experiment angepasst und bei einem Wechsel der Partikel neu bestimmt werden. Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Bildbearbeitungsfilters ist eine geringe Partikelgrößenverteilung, optimal ist wenn alle Partikel die gleich Größe aufweisen.

Die Bilddatenauswertung und Geschwindigkeitsanalyse erfolgt mit Hilfe des kommerziellen Computerprogramms VidPIV, entwickelt von der ILA GmbH, in der die Standardkorrelationsmethoden (siehe Keane et al. 1992) implementiert sind. In dieser Arbeit wird die gemittelte Kreuzkorrelation ohne Verwendung weiterer Geschwindigkeitsfilterfunktionen verwendet. Der Vorteil ist, dass die Daten nicht verfälscht werden können und somit besser vergleichbar bleiben. Zur Reduzierung der Berechnungszeit werden die 300 Bilder pro Ebene zu 10 neuen Bildern zusammen gefasst. Vorherige Analysen zeigten im Vergleich keinen Unterschied in den Geschwindigkeiten.

Zur Abschätzung des Fehlers bei der Geschwindigkeitsberechnung wird die einfache Kreuzkorrelation auf die zusammengefassten Bilder angewandt und die mittlere Standardabweichung

chung bestimmt. Für die Fehler in Richtung der Filmdicke wird angenommen das dieser etwa in der Größenordnung der halben Tiefenschärfe liegt, also $\pm 0.03\text{mm}$.

Ergebnisse und Diskussion

Um die Anwendbarkeit der Methode zu demonstrieren werden erste Messungen auf einer geneigten Glasplatte durch die bewegte Phasengrenzfläche und nach der konventionellen Methode von der Rückseite durch die Gasplatte mit ruhender Gasphase durchgeführt und miteinander verglichen. In beiden Fällen wird ein Wasser-Glycerin Gemisch, mit einer molaren Wasserkonzentration von 0.8, auf der Glassplatte bei einer Reynolds-Zahl von 12 untersucht, welche für die Filmströmung definiert ist als:

$$\text{Re} = \frac{\dot{V}}{\nu \cdot b} = \frac{\bar{w} \cdot \delta}{\nu} \quad (1)$$

Zum qualitativen und quantitativen Vergleich wird die analytische Lösung nach Nusselt 1916 mit Berücksichtigung des Neigungswinkels aufgetragen

$$w(y) = \frac{g \cdot \sin \alpha \cdot \rho \cdot \delta^2}{2 \cdot \eta} \left[\frac{2 \cdot y}{\sigma} - \left(\frac{y}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2)$$

mit

$$\sigma = \left(\frac{3 \cdot \nu^2}{g \cdot \sin \alpha} \right)^{1/3} \cdot \text{Re}^{1/3}. \quad (3)$$

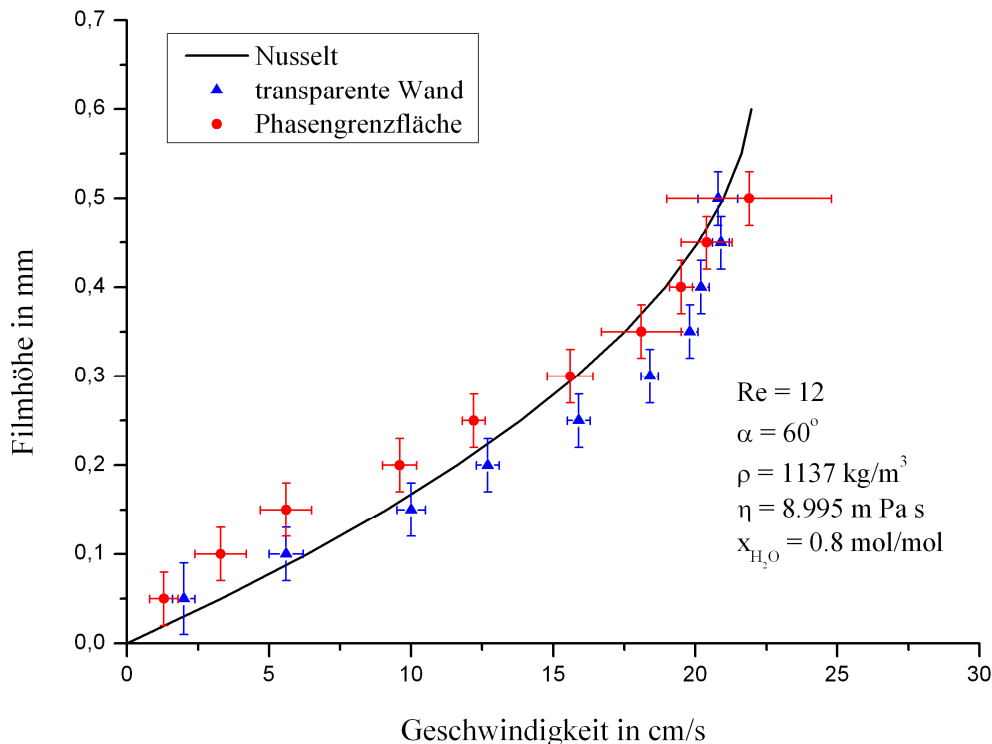


Abb. 3: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile einer Wasser-Glycerin-Strömung auf einer Glasplatte für $\text{Re}=12$. Aufnahmen durch die bewegte Oberfläche (Kreise) und durch die Glasplatte (Dreiecke), die Linie repräsentiert die analytische Nusselt Lösung; Partikelgröße $10.23\mu\text{m}$

57.6

Mit Hilfe dieser Gleichung kann das Geschwindigkeitsprofil für eine laminare wellenlose Filmströmung berechnet werden. Sie ist für Reynolds-Zahlen kleiner vier gültig und berücksichtigt keine weiteren Effekte, wie z.B. Einlaufängen oder Oberflächenbeschaffenheit. Es ist zu erwarten, dass mit steigender Reynolds-Zahl die Abweichung vom Realverhalten zunehmen und beim Umbruch zur turbulenten Strömung ($Re > 400$) so hoch sind, dass die Gleichung ihre Gültigkeit verliert.

Die Ergebnisse der beiden Messreihen sind in Abb. 3 dargestellt und zeigen im Vergleich eine gute Übereinstimmung untereinander sowie auch mit der Nusselt Lösung. Die Messpunkte folgen dem parabolischen Trend der Nusselt Lösung und die Filmhöhe sowie die maximale Oberflächengeschwindigkeit stimmen gut miteinander überein. Aufgrund des Charakters von Filmströmungen kann keine hundertprozentig vollständige Übereinstimmung erwartet werden.

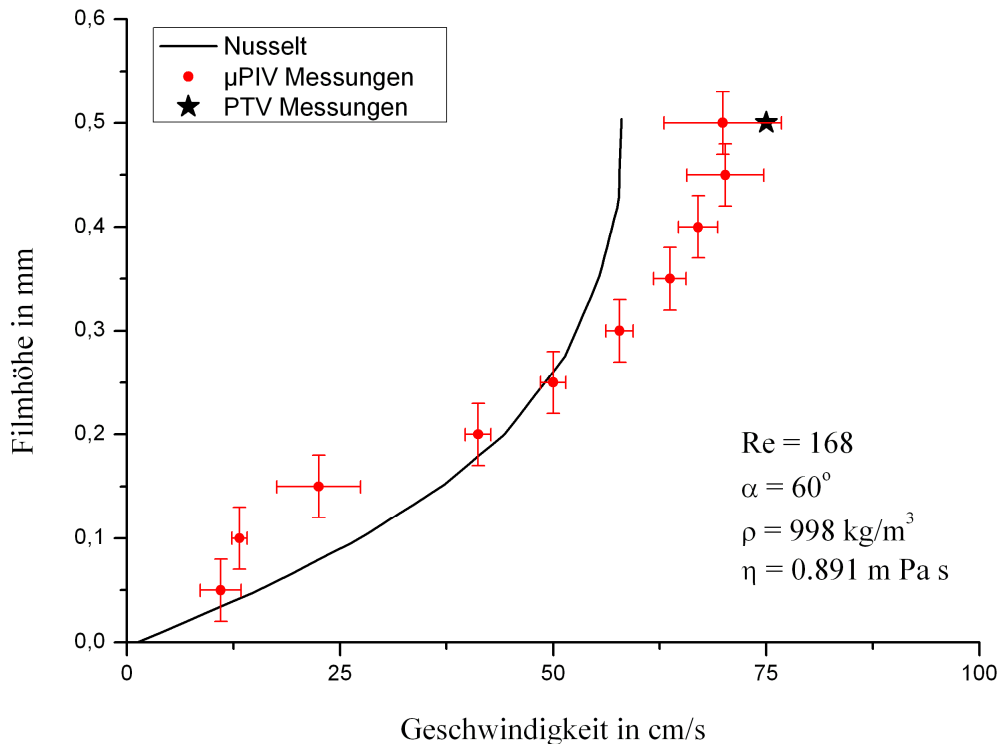


Abb. 4: Geschwindigkeitsprofil für eine Wasserströmung auf einer glatten Edelstahlplatte für $Re=168$; Oberflächengeschwindigkeit nach PTV (Stern) und Nusselt Lösung (Linien); Partikelgröße $10.23\mu\text{m}$

In Abb. 4 sind Ergebnisse einer mit Wasser überströmten glatten Edelstahlplatte für eine Flüssigkeitsbelastung von $Re=168$ dargestellt. Als qualitativer Vergleich ist das Nusselt-Profil ebenfalls aufgetragen. Die Messergebnisse folgen in diesem Fall nicht dem erwarteten parabolischen Profil, sondern vielmehr dem von Brauer 1971 beschriebenen Geschwindigkeitsprofil mit zwei Wendepunkten. Hiernach unterteilt sich die Filmströmung in einen wandnahen Bereich und den oberflächennahen Bereich. Die Oberflächengeschwindigkeit ist im Vergleich mit einer wellenlosen Filmströmung sehr viel größer. Die Wellen transportieren einen Hauptteil der Flüssigkeitsmasse mit hoher Geschwindigkeit über die wandnahe Schicht hinweg. Zwischen den beiden Schichten kommt es zu einem starken Impulsaustausch, was schließlich zu einer örtlichen Abflachung des Geschwindigkeitsgradienten führt. Der Vergleich mit äquivalenten Partikel Tracking Velocimetry Messungen von Ausner et al. 2005a zeigt eine sehr

gute Übereinstimmung der Oberflächengeschwindigkeit und bestätigt die μ PIV Messergebnisse.

Induziert wird dieses Verhalten sehr wahrscheinlich durch die spezielle Form der Flüssigkeitsaufgabe. Die Flüssigkeit wird im Aufgaberohr durch kleine Öffnungen auf die Platte aufgegeben. Berechnet man die mittlere Geschwindigkeit bzw. Reynoldszahl an den Austrittsöffnungen liegt diese etwa um den Faktor 5 höher als die mittlere Filmgeschwindigkeit nach Nusselt für dieselbe Flüssigkeitsbelastung, daraus folgt, dass der quasi-laminare Strömungsbereich verlassen wird und Turbulenz auftritt. Zwar ist zu erwarten, dass sich die Strömung stabilisiert und sich ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil ausbildet, doch die Einlaufänge ist im Vergleich zur Plattenlänge zu groß.

Das Aufgaberohr wurde in Hinblick auf die Untersuchung zweiphasiger Flüssigkeitsströmungen konstruiert, und zeigt im Gegensatz zur Aufgabe mit einem Wehr auch morphologisch anderes Verhalten (siehe Hoffmann et al. 2004). Als Vorteil erwies sich Anfangs, gerade im Hinblick auf die Untersuchungen mit Gasgegenstrom, die einfache Integrierung des Aufgaberohrs in das zu vermessende System.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten und entwickelten μ PIV Methode sowie dem beschriebenen Focal Plane Scanning ist es möglich Geschwindigkeitsprofile direkt durch die bewegte wellige Filmoberfläche auf nichttransparenten Materialien zu messen. Für die digitale Bildbearbeitung findet dabei ein entwickelter Filteralgorithmus Anwendung, der Störungen und unscharfe Partikel entfernt. Ein Vergleich mit Messungen nach der konventionellen Methode, Vermessung der Filmströmung durch eine transparente Schicht, zeigt eine gute Übereinstimmung und die Anwendbarkeit der neu entwickelten Methode. Weitere Untersuchungen zeigen, dass bei höheren Reynolds-Zahlen das Geschwindigkeitsprofil von dem erwarteten parabolischen Verlauf abweichen kann. Dieses Verhalten lässt sich auf die spezielle Art der Flüssigkeitsaufgabe zurückführen. Zur weiteren Untersuchung dieses beobachteten Verhaltens ist die Flüssigkeitsaufgabe auszutauschen. Zielstellung künftiger Untersuchung ist die Analyse der Wechselwirkung an flüssig-flüssig Grenzfläche mit der entwickelten Methodik, um z.B. das komplexe Verhalten dreiphasig betriebener Stoffaustauschprozesse, wie in Repke et al. 2007 dargestellt, aufzuklären.

Formelzeichen und Symbole

b	[m]	Plattenbreite
d_p	[m]	Partikeldurchmesser
g	[m ² /s]	Erdbeschleunigung
Re	[-]	Film-Reynolds-Zahl
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
w	[m/s]	Geschwindigkeit
\bar{w}	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit
x	[mol/mol]	Molenbruch
y	[m]	Abstand
α	[°]	Neigungswinkel
δ	[m]	Filmdicke
η	[m Pa s]	dynamische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität

Danksagung

Die Autoren danken der deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung sowie der ILA GmbH für den technischen Support.

Literatur

- Adomeit, P., Renz, U., 2000; Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films, *Int. J. Multiphase Flow*, 26, pp 1183-1208
- Ausner, I., Hoffmann, A., Repke, J.-U., Wozny, G., 2005a: Experimentelle und numerische Untersuchungen mehrphasiger Filmströmungen, *Chem. Ing. Tech.*, Vol. 77, No. 6, pp 735-741
- Ausner, I., Kallweit, S., Wozny, G., 2005b: Velocity measurements of film flow on inclined steel plates, 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, USA
- Brauer, H., 1971: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmung. Sauerländer Verlag, Aarau
- Canny, J., 1986: A computational approach to edge detection, *IEEE Transaction on pattern Analysis and Machine Intelligence* 8, pp 679-714
- de Gennes, P.-G., 1985: Wetting: statics and dynamics, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 57, No. 3, pp 827-863
- Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J.-U., Wozny, G., 2004: Aufreißende Filmströmung auf geneigten Oberflächen, *Chem. Ing. Tech.*, Vol. 76, No. 3, pp 1065-1068
- Keane, R.-D., Adrian, J.-R., 1992: Theory of cross-correlation analyses of PIV images, *Appl. Sci. Res.*, 49, pp 191-215
- Meinert, C. D., Wereley, S. T., Gray, M. H. B., 2000: Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry, *Meas. Sci. Technol*, 11, pp 809-814
- Nusselt, W., 1916: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. *VDI-Zs*, Vol. 60, No 27, pp 541-546
- Palzer, S., Hiebl, C., Sommer, K., Lechner, H., 2001: Einfluss der Rauigkeit einer Feststoffoberfläche auf den Kontaktwinkel, *Chem. Ing. Tech.*, Vol. 73, No. 8, pp 1032-1038
- Paschke, S., Ausner, I., Repke, J.-U., Wozny, G., 2006: A Micro-PIV Method for Film Flow Measurements, 16th Intern. Conf. Proc. Eng. & Plant Des., Berlin, pp 113-120, ISBN 3-7983-20-9.
- Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J., 1998: Particle Image Velocimetry, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Repke, J.-U., Ausner, I., Paschke, S., Hoffmann, A., Wozny, G., 2007: On the Track to Understanding Three Phases in One Tower, *Trans IChemE*, 85 (A1) , pp. 50-58
- Russ, J. C., 1999: The Image Processing Handbook, 3rd edn. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida
- Saber, . H. H., El-Genk, M. S., 2004: On the breakup of a thin liquid film subject to interfacial shear, *J. Fluid Mech.*, 500, pp 113-133
- Witting, S., Elsäßer, A., Samenfink, W., Ebner, J., Dullenkopf, K., 1997: Velocity profiles in shear-driven liquid films: LDV-Measurements, In: *Developments in Laser technique and Fluid Mechanics*, pp 509-522