

Experimentelle Untersuchung von Flüssigkeitsfilmströmungen auf horizontal makrostrukturieren Packungsblechen mit Stereo-PIV

Experimental investigation of liquid film flows over horizontal macro structured packing sheets using stereo particle image velocimetry

S. J. Gerke, J.-U. Repke

Technische Universität Berlin, Fakultät III Prozesswissenschaften, Fachgebiet Dynamik und Betrieb technischer Anlagen, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, E-Mail: soeren.j.gerke@tu-berlin.de,
Internet: <http://www.tu-berlin.de/dbta>

PIV, Filmströmung, strukturierte Packungen, Mikrostrukturen, komplexe Oberflächen
PIV, film flow, structured packing, micro-structures, complex surfaces

Kurzfassung

In Destillations- und Absorptionskolonnen sind strukturierte Packungen weit verbreitet, da diese hohe Trennleistungen bei niedrigen Druckverlusten ermöglichen. Die Kenntnis des Verhaltens der Flüssigkeitsströmung ist dabei ein entscheidender Aspekt für die Vorhersage der Trennleistung von Packungskolonnen und die Optimierung der Geometrie von Packungsstrukturen. Dieser Beitrag zeigt die Untersuchungen mit einer nicht-invasiven optischen Messtechnik zur Aufnahme von Filmdicken und Geschwindigkeitsverteilung auf industriell relevanten Packungsstrukturen. Mit dem Ziel die dafür zugrundeliegenden dreidimensionalen fluiddynamischen Bedingungen innerhalb einer realen strukturierten Packung zu erfassen, wurde eine Stereo Particle Image Velocimetry (PIV) zunächst auf horizontale Makrostrukturen und dünne Flüssigkeitsfilmströmungen angepasst. Um den verzerrungsfreien optischen Zugang für die Messtechnik zu gewährleisten, wurden die Messzellen aus transparentem Silikon gefertigt und der Brechungsindex der Flüssigkeit angepasst. Die zeitgemittelten 2D3C Geschwindigkeitsfeldmessungen zeigen einen positiven Effekt auf den Fluidaustausch innerhalb des Flüssigkeitsfilmes indem im Vergleich zur glatten Packungsoberfläche Strömungskomponenten normal zur Hauptanströmungsrichtung hervorgerufen werden. Die Makrostruktur Die Strömung folgt der Kontur der Makrostruktur und wird bei deren Überströmung abwechselnd beschleunigt (Berge) und verzögert (Täler).

Abstract

Understanding the liquid phase in structured packing is crucial for the prediction of the separation performance of packed tower and for further optimization of the packing geometry. Therefore, experimental investigations on the liquid film flow phenomena over corrugated structured packing geometries are presented and evaluated. An adapted method for stereoscopic Particle Imaging Velocimetry (PIV) is used to investigate liquid film flow thickness and velocity distribution over a horizontal macro-structure with a smooth surface or a micro-structured surface at different locations. Low distortion optical access to the flow is guaranteed by using transparent moulds of the packing materials and refractive index matched liquid mixtures. The results indicate cross-mixing over the film height and between micro-structures induced by the complex surface. Following the contour of the macro-structure the liquid film is accelerated at hills and decelerated at valley regions.

Einleitung

Filmströmungen sind aufgrund ihres großen Oberfläche-Volumen-Verhältnis vorteilhaft für viele verfahrenstechnische Prozesse. Die Aufarbeitung von Stoffgemischen mit thermischen Trennverfahren, insbesondere der Rektifikation, Absorption und Desorption in Packungskolonnen hat einen großen Anteil an dem Energieverbrauch der chemischen Industrie. In Destillations- und Absorptionskolonnen steht typischerweise eine gravitationsgetriebene Flüssigkeitsphase im Gegenstrom zur druckgetriebenen aufsteigenden Gasphase. Einbauten wie strukturierte Packungen sollen durch ihre spezielle Geometrie die Ausbildung und Ausbreitung von Filmströmungen begünstigen und den Stoffübergang zwischen Flüssig- und Gasphase intensivieren.

Es kommt zu einem komplexen Strömungsverhalten bei der mehrphasigen Überströmung der Packungselemente, dessen detailliertes Verständnis für eine Verbesserung der Vorhersagemodelle und eine Steigerung der Effizienz dieser Großapparate notwendig ist. Durch eine Optimierung der Packungsgeometrie können zudem erhebliche Leistungssteigerungen erzielt werden, wie Messungen von Bühlmann 1987, Olujić et al. 2000 und Schultes 2008 auf Maßstab einer ganzen Kolonne mit mehreren Packungssegmenten zeigen.

Strukturierte Packungselemente entstehen durch eine dichte Schichtung „gewellter“ Bleche. Damit wird eine große spezifische Oberfläche bei gleichzeitig geringem Druckverlust der Gasströmung geschaffen. Die Größenordnung der Struktur der Bleche liegt typischerweise im Bereich von 0,01 bis 0,03 m und bildet die Makrostruktur der Packung aus, die den Abstand der Bleche und die Strömungskanäle für die Gasströmung definiert. Zudem sind der Oberfläche der Packungsbleche Mikrostrukturen, beispielsweise lamellen- oder tetraederförmig, mit Abmessungen im Bereich von mehreren hundert Mikrometern aufgeprägt. Experimentelle und theoretische Untersuchungen zeigen, dass diese Strukturen zu einer höheren mittleren Filmdicke, stabileren Flüssigkeitsfilmen und verbesserter Benetzung führen (Zhao und Cerro 1992, Vlachogiannis und Bontozoglou 2002, Sebastia-Saez et al. 2013).

Kohrt et al. 2011 weist für vollständig benetzte Plattenelemente mit verschiedenen Mikrostrukturen industrieller Packungen gegenüber einer technisch glatten Oberfläche signifikante Steigerungen des flüssigseitigen Stofftransports nach. Die Ursache wird in fluiddynamischen Phänomenen vermutet, die durch die Interaktion der Flüssigkeitsströmung mit der Mikrostruktur hervorgerufen werden (Davies und Warner 1969). In Gerke et al. 2017 wird für ebene geneigte Plattenelemente nachgewiesen, dass die Mikrostruktur Strömungskomponenten quer zur Hauptströmungsrichtung induziert, die einen verstärkten Austausch über die Filmhöhe und zwischen den Mikrostrukturen ermöglichen.

Mit dem Ziel die fluiddynamischen Bedingungen innerhalb einer industriell relevanten strukturierten Packung zu erfassen, wurde die Messtechnik zunächst auf horizontale Makrostrukturen angepasst. In diesem Beitrag werden die Messungen rückseitig durch transparente Silikonabdrücke von metallischen Packungsoberflächen des Typs MONTZ-Pak B1-250 mit und ohne Mikrostrukturierung ausgeführt.

Experimenteller Aufbau

Entsprechend Abbildung 1 wird der flüssigseitige Massenstrom pulsationsfrei über eine Zahnradpumpe P-01 in ein Reservoir mit Überlaufwehr der an der Oberseite der Messzelle geleitet. Nach Durchströmen der Messzelle wird die Flüssigkeit zurück in den Kreislauf geführt. Der Massenstrom wird über ein Coriolis-Massendurchflussmesser FI-01 bestimmt und mittels Plattenwärmeübertrager HE-01 und Kryo-Umwälz-Thermostat auf 25°C temperiert. Ein Gasgegenstrom kann in der Messzelle nach Abnahme durch Druckminderer PIC-11 von der Prozessluft über einen Massendurchflussregler FIC-11 mit kalorimetrischer Durchflussmessung eingestellt werden. Das Hauptelement der Messzellen entsprechend Abbildung 2, sind die Abformungen der Packungsbleche. Diese sind aus der optisch klaren Vergussmasse Polydimethylsiloxan (PDMS, Momentive RTV615) hergestellt und bilden die

Oberflächenstruktur der Packungsbleche exakt nach. Zudem kann dadurch der optische Zugang zu der Strömung rückseitig durch eine unbewegte Phasengrenze erfolgen.

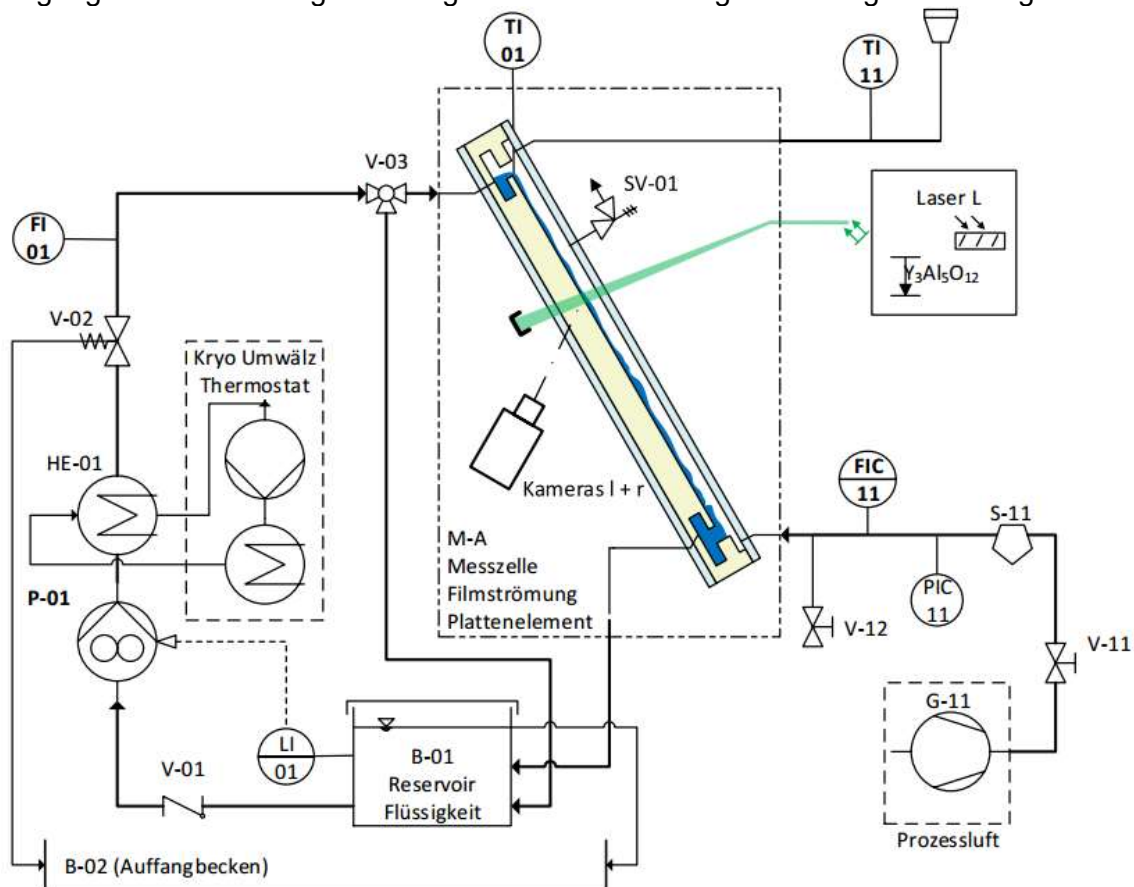


Abb. 1: Schema der Versuchsanordnung

Brechungseffekte an der Phasengrenze PDMS/Flüssigkeit werden durch Brechungsindexanpassung vermieden. Für die Messungen kommt ein optisch klares Flüssigkeitsgemisch aus Glycerin und Wasser zum Einsatz, das auf den Brechungsindex der Abformungen $n = 1,41$ abgestimmt ist. Für dieses Mischungsverhältnis beträgt die Dichte 1151 kg/m^3 und die Viskosität wurde zu $8,5 \text{ mPas}$ bestimmt. Für das reine Glycerin-Wasser-Gemisch wurden an den Seiten der nach unten gerichteten Flanken der Makrostruktur durch Einschnürung sowie die hydrophobe Eigenschaft des PDMS unbenetzte Gebiete erzeugt. Dieses Verhalten wurde auch von Shetty und Cerro 1998 bei der Überströmung von Rinnsalen über Makrostrukturen beobachtet. Durch die Hinzugabe von 5 g/l des Tensids Marlipal 24/70 wurde die Oberflächenspannung von 60 mN/m auf 26 mN/m reduziert und für die gezeigten Massenströme eine stabile Benetzung erreicht.

Abbildung 2 zeigt wie die PDMS-Abformungen mit verschiedenen Halteelementen eingefasst und mit den Modulen Überlaufwehr und Beobachtungsfenster ausgestattet werden. Über den Halterahmen aus Aluminiumprofilen ist ein schneller Wechsel zwischen den Messzellen möglich.

Für erfolgreiche Experimente ist eine genaue Ausrichtung der Messzellen essentiell. Diese erfolgt über elektronische Neigungsmesser, eine Präzisionswasserwaage und Kreuzlinienlaser. So wird garantiert dass die Makrostruktur möglichst horizontal und die Hauptströmungsrichtung vertikal eingestellt ist. Die Flüssigkeitsfilmströmung entsteht durch die vollständig benetzende Überströmung des Überlaufwehrs mit einer Breite von $b = 10 \text{ cm}$. Die Kanalhöhe über den Bergen der Makrostrukturen beträgt bei geschlossenem Deckel $h = 1 \text{ cm}$.

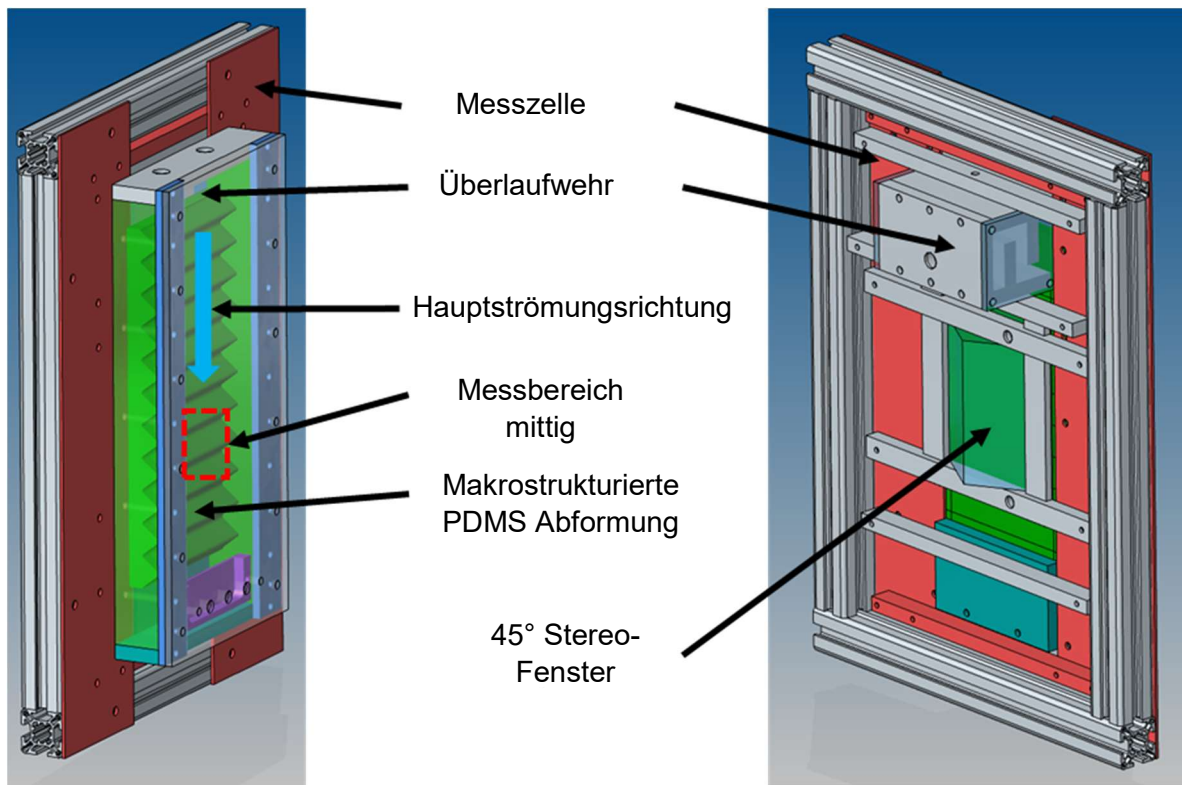


Abb. 2: Aufbau der Messzellen mit horizontaler Makrostruktur.

Das Stereo-PIV System in der Anordnung nach Abbildung 3 besteht aus zwei Andor HiSense Neo sCMOS Kamern (F) mit einer Auflösung von 5,5 MPixel, welche über selbst konstruierte Scheimpflugadapter mit zwei Navitar 12x Zoom Objektiven (E) sowie 570 nm Lang-Pass Filtern gekoppelt sind. Der Flüssigkeit (C) sind Partikel mit einem mittleren Durchmesser von 10 μm beigemischt, deren Oberfläche mit Rhodamin B beschichtet ist. Diese werden in dem senkrecht auf die Messzelle ausgerichteten Lichtschnitt (A) eines 532 nm Nd:YAG Doppelpuls laser (Litron Nano T 135-15 PIV) zum Fluoreszieren angeregt. Die Synchronisation der Triggersignale wird über eine Synchronisationseinheit Dantec Dynamics erreicht.

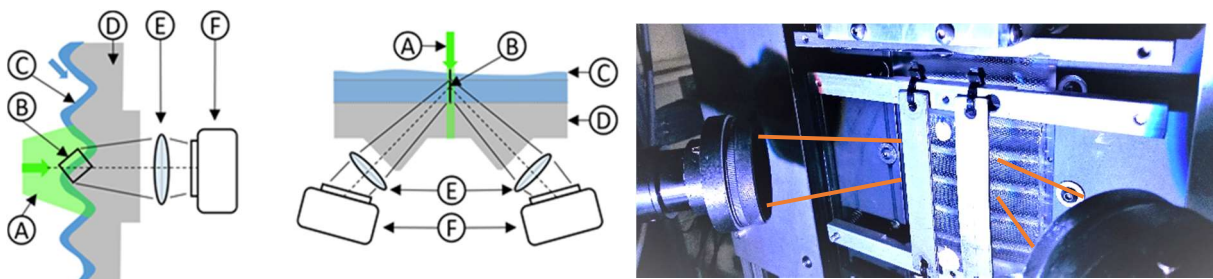


Abb. 3: Schematische Anordnung des Stereo-PIV(links) und rückseitige Ansicht auf das Stereo-Fenster im experimentellen Aufbau(rechts).

Der gesamte Aufbau zur stereoskopischen Bilderfassung ist auf einer 3D-Traveler angebracht, sodass verschiedene Messbereiche mit einer Wiederholgenauigkeit von 40 μm angefahren werden können. Für jeden Messbereich muss eine neue volumetrische Kalibrierung aufgenommen werden. Um dazu nahe der Kontur der Makrostruktur Lageinformationen zu gewinnen, wurde ein eigens an die Geometrie der Makrostrukturen angepasstes doppelseitiges Kalibriernormal mit einem 3200 dpi Drucker erstellt (siehe Abbildung 4) und auf einem planaren Glassubstrat aufgebracht. Die Positionierung des Kalibriernormals im Lichtschnitt erfolgt mit einem Piezomotor (Q-522.030, Physik Instrumente) mit 40 nm bidirektionaler Wiederholgenauigkeit. Um restliche Abweichungen zwischen der Lichtschnitt und Kalibriernormal zu kompensieren, wurde in der Aufnahme- und

Auswertesoftware Dynamics Studio v6.0 eine Optimierung der Kalibrierungen anhand mehrerer Partikelbilder vorgenommen.

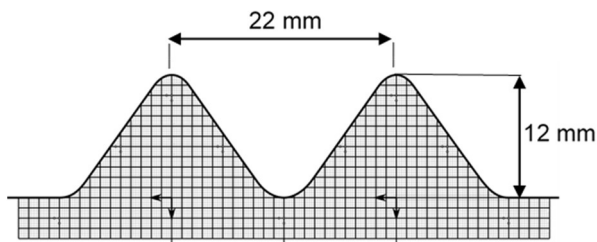


Abb. 4: Kalibriergitter mit a 250 µm Gitterweite, die dicken Linien zeigen Millimeter Gitter an.

Je Messpunkt wurden pro Kamera 100 Doppelbilder bei einer Messfrequenz von 10 Hz aufgenommen. Jedes Doppelbild wurde mit einem adaptiven PIV Algorithmus ausgewertet, sodass Geschwindigkeitsgradienten nahe der Wand durch eine Verzerrung der Auswertefenster besser erfasst werden können. Die Größe der kleinsten Auswertefenster wurde zu 32 x 32 Pixel gewählt und der Zeitabstand zwischen den Belichtungen so angepasst, dass der maximale Partikelversatz, typischerweise an der Flüssigkeitsoberfläche, nicht den Wert von 8 Pixel übersteigt.

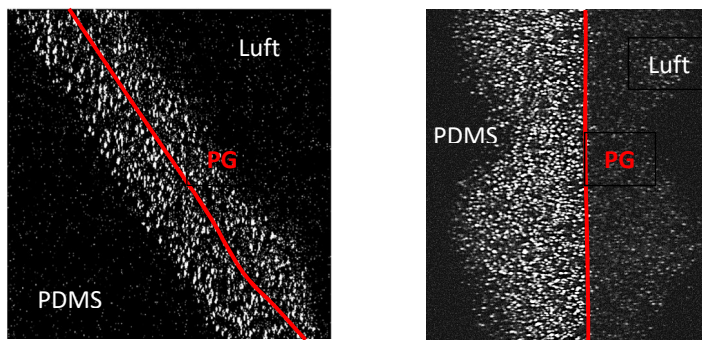


Abb. 5: Beispiele für die Totalreflexion von Partikelsignalen an der Phasengrenze (PG) Flüssigkeit-Luft für fluoreszierende (links: Rhodamin B) und streuende (rechts: Polystyrol) Partikel.

Die Rekonstruktion der Phasengrenze erfolgt manuell anhand der Partikelverteilung. Durch Spiegelpaare von Partikeln kann die Phasengrenze ähnlich wie Adomeit und Renz 2000 beschrieben identifiziert werden. Durch die Anisotropie der verwendeten Fluoreszenzpartikel erscheinen die reflektierten Signale nahezu mit derselben Helligkeit, sodass zusätzlich ein gespiegeltes Geschwindigkeitsfeld gemessen wird. Bei nicht fluoreszierenden Partikeln ist die Unterscheidung mit dem hier beschriebenen Stereo-PIV Setup wesentlich klarer, da das Signal der wahren Partikelbilder durch Vorwärtsstreuung entsteht, das reflektierte Bild hingegen nur aus der schwächeren rückwärtigen Streuung (siehe Abbildung 5).

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse stellen einen ersten Vergleich zwischen glatter und mikrostrukturierter horizontaler Makrostruktur (basierend auf MONTZ-Pak B1-250) für die Massenströme 47,9 kg/h und 71,1 kg/h dar, die Film-Reynolds-Zahlen ergeben sich dabei zu 15,65 und 23,24. Die Abmessung eines aufgezeichneten Strömungsfeldes betragen jeweils 10 mm x 12 mm. Abbildung 6 zeigt dass diese konsistent miteinander verknüpft werden können. Wie erwartet folgt die Strömung hauptsächlich der Kontur. Durch die Wandhaftung finden sich die niedrigen Geschwindigkeiten an der Wand und die höchsten Geschwindigkeiten an der Filmoberfläche. Bei der Umlenkung der Strömung an dem Berg vergrößert sich die maximale Geschwindigkeit um bis zu 20 Prozent gegenüber der Oberflächengeschwindigkeit im Bereich der Flanken, entsprechend wird die Filmdicke verringert, was Auswirkungen auf den Stofftransport haben sollte. Für die glatte Makrostruktur zeigen alle Messungen vor der Verlangsamung und Aufweitung im Tal eine minimale Aufweitung und anschließende Einschnürung (grün-gestrichelt in Abb.6 hervorgehoben). Dieser Effekt konnte nicht bei den Messung mit

mikrostrukturierter Oberfläche wahrgenommen werden (vergleiche Abb. 7). Abbildung 7 zeigt dass trotz des hohen Massenstromes nur niedrige Geschwindigkeiten in den Mikrostrukturtälern auftreten. Dennoch werden die Querkomponenten v und w durch die Mikrostruktur mit einem Betrag bis 10 Prozent der Oberflächengeschwindigkeit über die Filmdicke verstärkt (vergleiche mit Gerke et. al. 2017). Der Vergleich der gemessenen Strömungsprofile aus Abb. 8+9 mit Nusselt-Theorie, zeigt generell verringerte Geschwindigkeiten und größere Filmdicken für die Makrostrukturen.

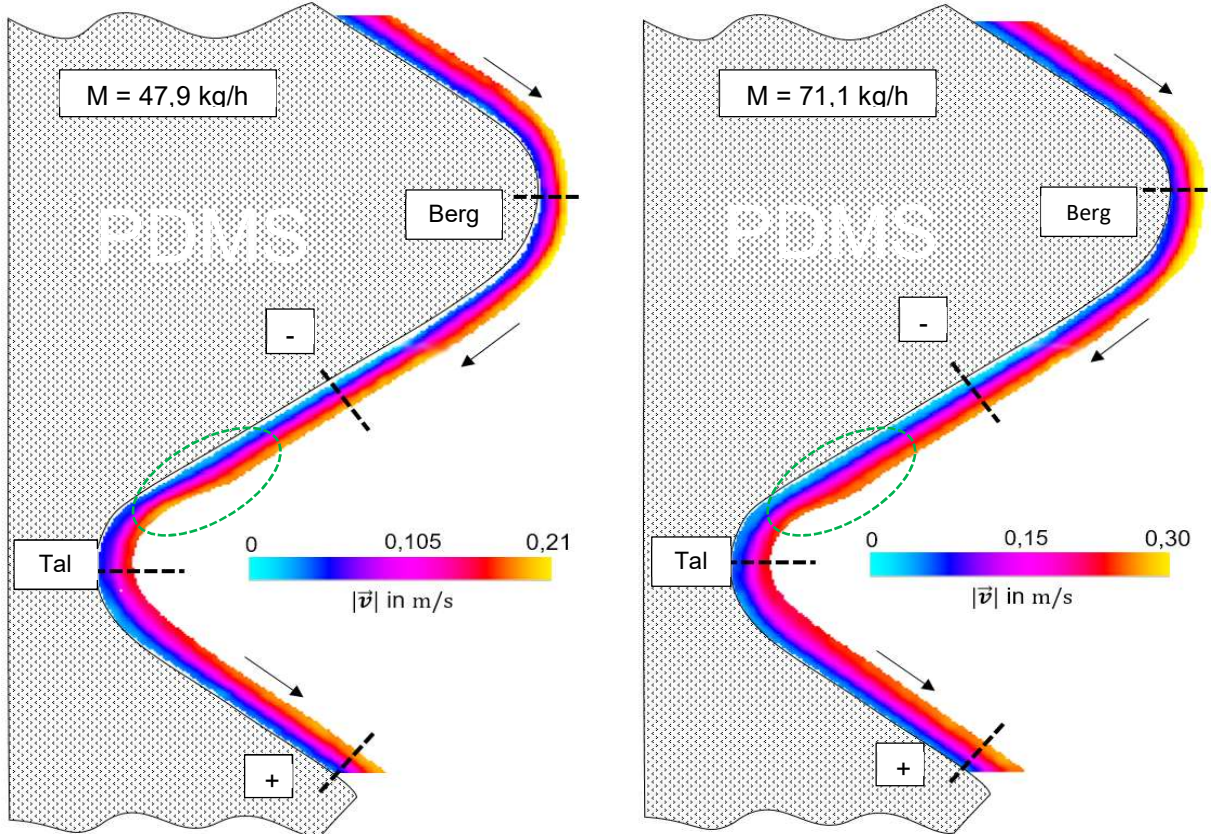


Abb. 6: Gemessene Verteilung des Geschwindigkeitsbetrags auf glatter horizontaler Makrostruktur für einen 13 mm x 20 mm Ausschnitt 100 mm unterhalb des Überlaufwehrs. Zusammengesetzt aus jeweils zwei unabhängigen Messungen. Die Pfeile symbolisieren die Hauptfließrichtung und die Strichlinien zeigen die Positionen der unten diskutierten Geschwindigkeitsprofile.

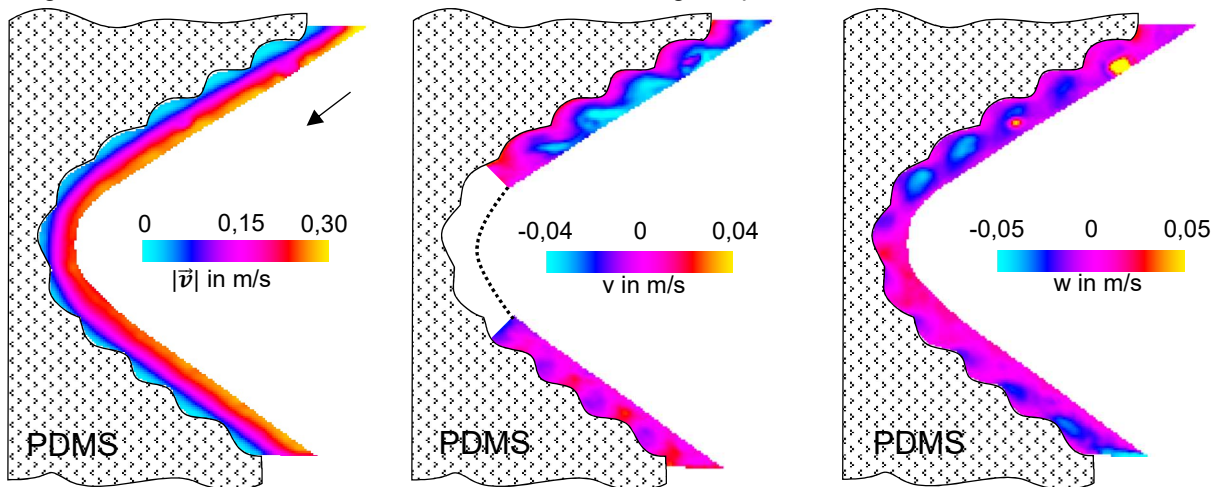


Abb. 7: Gemessene Geschwindigkeitsverteilungen mikrostrukturierter horizontaler Makrostruktur im Tal bei $M = 71,1 \text{ kg/h}$ für einen Bereich von 10 mm x 12 mm. Links: Betrag, Mitte: Geschwindigkeit v über die Filmdicke normal zur Flanke(berechnet), Rechts: Querkomponente w .

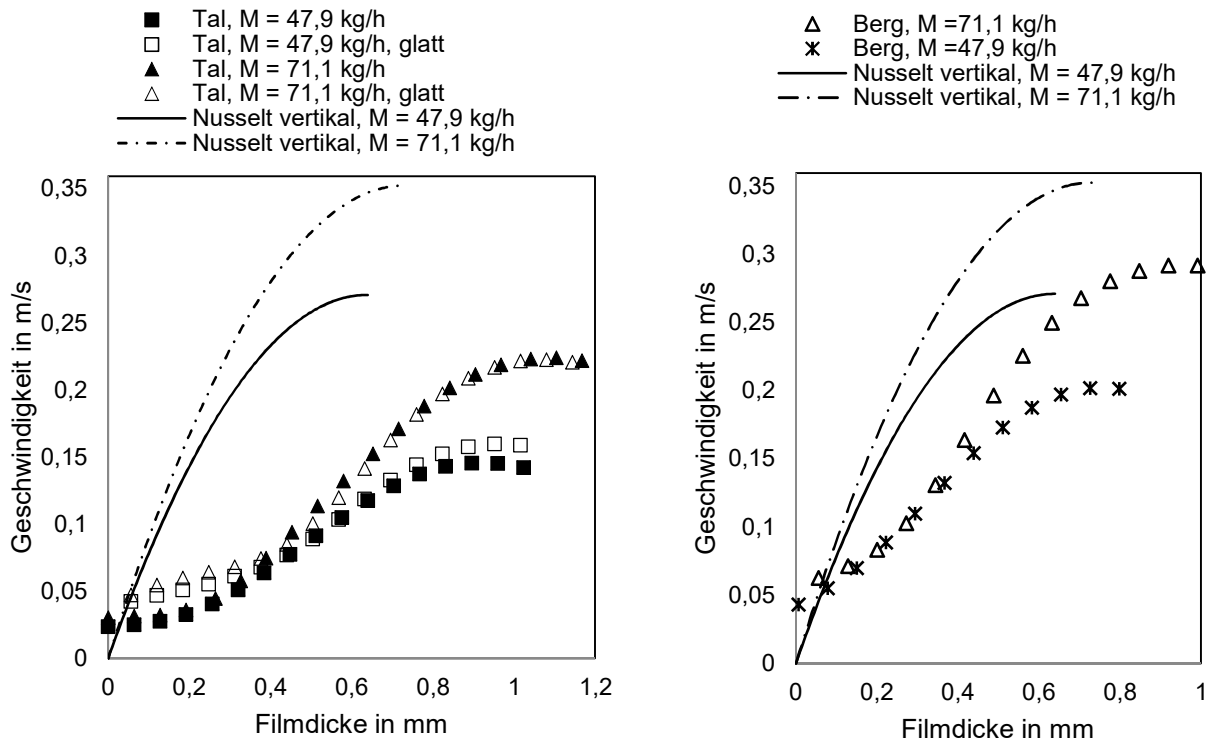


Abb. 8: Gemessene Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung für die Positionen Tal(links) und Berg(rechts) im Vergleich zum Nusselt-Profil für die ideale Plattenüberströmung.

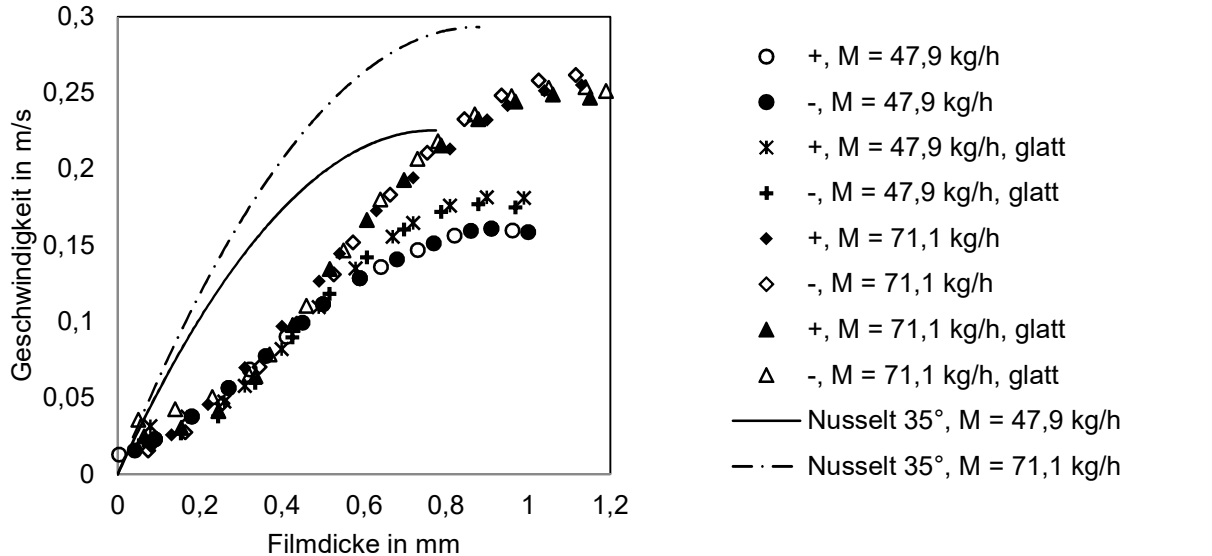


Abb. 9: Gemessene Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung auf den negativ und positiv geneigten Flanken der Makrostruktur im Vergleich zum Nusselt-Profil für die ideale Plattenüberströmung für eine 35° geneigte Platte.

Alle gemessenen Profile zeigen den erwarteten parabolischen Verlauf der Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung zur Filmoberfläche hin. Bei dem Vergleich von negativ und positiv geneigter Flanke in Abb. 9 kann kein wesentlicher Unterschied der Geschwindigkeitsprofile ermittelt werden. Für den hohen Massenstrom zeigt hier die Mikrostruktur keinen signifikanten Einfluss in Abb. 8+9. auf die und die Differenz der Oberflächengeschwindigkeit zeigt Der abgeflachte Verlauf nahe der Wand, besonders im Bereich des Tals sollte durch weitere höher auflösende Messungen untersucht werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Für einen detaillierten Einblick in das fluiddynamische Verhalten der Flüssigkeitsphase bei der Überströmung strukturierter Packungen wurde eine Stereo-PIV auf die Strömungsmessung dünner Filme auf optisch transparenten Abformungen der horizontalen MONTZ-Pak B1-250 Makrostruktur mit und ohne Mikrostruktur angepasst. Hierfür wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt, mit dem typische fluiddynamische Bedingungen von Packungskolonnen reproduzierbar untersucht werden können.

Die Ergebnisse zeigen unabhängig von der Oberflächenstrukturierung für die glatte und mikrostrukturierte Makrostruktur eine vergleichbare Verteilung des Geschwindigkeitsbetrags über die Höhe des Flüssigkeitsfilms. Für die mikrostrukturierte Oberfläche wurde eine Hervorhebung des Queraustausches festgestellt. Die Makrostruktur führt zu einer abwechselnden Beschleunigung und Abbremsung um bis zu 20 Prozent gegenüber der Geschwindigkeit auf den Flanken. Für die glatte Makrostruktur wurde eine Abweichung des Verlaufes der Filmströmung von der Oberflächenkontur beschrieben, die sich vor der Umlenkung innerhalb des Tals anlagert und nicht bei der mikrostrukturierten Oberfläche auftritt.

In einem nächsten Schritt wird erstmals mit der hier vorgestellten Stereo-PIV die komplexe Strömung in einem transparenten Packungskanal mit um 45° angestellter Makrostruktur untersucht.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Re 1705/8-2) für die finanzielle Unterstützung. Unser Dank richtet sich weiterhin an die Firma Montz für die Bereitstellung der Packungsbleche.

Literatur

- Adomeit, P., Renz, U., 2000:** "Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films", International Journal of Multiphase Flow, Volume 26, Issue 7, Pages 1183-1208.
- Bühlmann, U., 1987.** Performance of Rombopak, structured column packing, in distillation. In IChemE Symp. No. 104. Distillation and Absorption, 7.-9. Sept. 1987, A115-A127.
- Davies, J. T., Warner, K. V., 1969:** „The effect of large-scale roughness in promoting gas absorption“, Chemical Engineering Science, 24(2), 231-240.
- Gerke, S. J., Marek, A., Repke, J.-U., 2017:** „Untersuchung des Einflusses von Mikrostrukturen auf die Fluiddynamik von Flüssigkeitsfilmströmungen auf Packungsoberflächen mithilfe von Stereo-PIV“. 25th Symposium „Experimentelle Strömungsmechanik“, Karlsruhe/Germany, B 68.
- Kohrt, M., Ausner, I., Wozny G., Repke, J.-U., 2011:** „Texture influence on liquid-side mass transfer“, In Chemical Engineering Research and Design, Volume 89, Issue 8, Pages 1405-1413.
- Olujć, Ž, Seibert, A., Fair, J., 2000:** "Influence of corrugation geometry on the performance of structured packings: an experimental study", Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 39.4, S. 335–342.
- Sebastia-Saez, D., Gu, S., Ranganathan, P., Papadikis, K., 2013:** „3D modeling of hydrodynamics and physical mass transfer characteristics of liquid film flows in structured packing elements“, International Journal of Greenhouse Gas Control, Elsevier BV, 492-502.
- Schultes, M., 2008:** „Raschig Super-Pak – Eine neue Packungsstruktur mit innovativen Vorteilen im Vergleich“. Chemie Ingenieur Technik 80 (7), 927–933, doi:10.1002/cite.200800045.
- Shetty, S., Cerro, R. L., 1998:** „Spreading of a Liquid Point Source over a Complex Surface“, Industrial & Engineering Chemistry Research, 37 (2), 626-635.
- Vlachogiannis, M., Bontozoglou, V., 2002:** „Experiments on laminar film flow along a periodic wall“, Journal of Fluid Mechanics, 457, 133-156.
- Zhao, L., Cerro, R. L., 1992:** "Experimental characterization of viscous film flows over complex surfaces", International journal of multiphase flow, 18(4), 495-516.