Profilsensormessungen im Nachlauf eines oszillierenden Tropfens

Flow-measurements in the wake of an oscillating droplet using laser Doppler profile sensor

S. Burgmann^{1*}, M. Dues², J. Steinbock², L. Büttner³, J. Czarske³, U. Janoske¹

¹ Lehrstuhl Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal ² ILA R&D GmbH, Rudolf-Schulten-Straße 3, 52428 Jülich

³ Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik (MST), TU Dresden, 01062 Dresden

Kanalströmung, oszillierender Tropfen, Rezirkulationsgebiet, Profilsensor mit Richtungserkennung

channel flow, oscillating droplet, recirculation zone, laser Doppler profile sensor with detection of flow direction

Zusammenfassung

Das Loslösen haftender (Wasser-) Tropfen von Oberflächen ist in vielen technischen Bereichen relevant. Die Bedingungen für das Loslösen eines Tropfens infolge eines Luftstroms sind noch nicht allumfassend geklärt. Eine offene Fragestellung bezüglich der Kräftebilanz um einen solchen umströmten, oszillierenden Tropfen betrifft den Ansatz für einen Widerstandsbeiwert für die Formulierung der aerodynamischen Kraft. Dieser Beiwert ist in hohem Maße von der Strömungssituation um den Tropfen abhängig.

Mit einem LDV- ("laser-Doppler velocity") Profilsensor mit Trägerfrequenztechnik wird für verschiedene Reynoldszahlen die Nachlaufströmung eines haftenden Tropfens in einem Plexiglaskanal untersucht. Es werden Tropfen von 20 μ l auf dem Boden des Kanals appliziert. Der Kanal wird mit Luft durchströmt, wobei ein Seeding in Form von 1 μ m DEHS-Tröpfchen zugesetzt wird.

Die Ergebnisse der Profilsensormessungen zeigen durch die hohe Ortsauflösung des Sensors in Kombination mit einer Richtungserkennung der Strömung deutlich, dass sich im Nachlauf des Tropfens in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Rückströmgebiete ausprägen. Die Rückströmgebiete können mit einer abgelösten Scherschicht am Tropfen assoziiert werden. Heißfilm-Daten bestätigen die Form der Geschwindigkeitsprofile hinsichtlich der Scherschicht-Gradienten. Verknüpft werden kann dies mit der Fluidbewegung im Tropfen, die bei kleineren Reynoldszahlen zunächst zu einer Bewegung in Strömungsrichtung an der Tropfenoberseite führt. Bei höheren Reynoldszahlen bewirkt das Auftreten einer Ablösung eine gegenläufige Bewegung im Tropfen, d.h. eine Stromauf-Bewegung an der Tropfenoberseite. Die Ausbildung des Rezirkulationsgebietes kann der treibende Mechanismus dieser Bewegung im Tropfen sein.

Ein Vergleich der Frequenzen der Auf- und Abbewegung des Tropfens mit den Strömungsfrequenzen zeigt das Auftreten einer oszillierenden Strömung, die mit Strouhalzahlen im Bereich von 0,03 erfolgt und somit einen Hinweis liefert auf aeroelastische Effekte. Gleichzeitig kann gezeigt werden, dass im Gegensatz zu einer starren Halbkugel das Auftreten einer Ablösung zu höheren Reynoldszahlen verschoben wird. Begründet werden kann dies mit der Fluidbewegung im Tropfen, die sich bei höheren Reynoldszahlen als eine Stromauf-Bewegung an der Tropfenoberseite zeigt. Diese kann so ausgeprägt werden, dass sich der Ablösepunkt schließlich weiter stromauf bewegt, als dies bei starren Halbkugeln (Ablösepunkt bei konstant etwa 90°) möglich ist.

Abstract

The removal of droplets on surfaces by an (air-) flow is relevant in many technical applications. Still the condition for droplet movement, i.e. the flow physics is not fully understood. Concerning analytical model of the force balance of adhering droplets in shear flow, the appropriate drag force correlation for an oscillating drop is still missing. Drag force coefficient strongly depends on flow structure around the droplet.

We report on measurements in the wake of the adhering droplet by means of laser-Doppler velocity profile sensor with frequency shift. 20 μ I-droplets are placed on the bottom wall of a PMMA-channel. An air flow seeded with 1 μ m DEHS-particles passes the channel.

Thanks to the excellent spatial and temporal resolution of laser-Doppler velocity profile sensor and its capability to measure bidirectional flows, the wake of the droplet can be precisely analyzed. Depending on Reynolds number a backflow region can be detected in the wake of the droplet. A separated shear layer stemming from the upper side of the droplet is assumed. Hotfilm measurements confirm the velocity profiles concerning the shear layer gradient.

It can be concluded that the backflow structure in the wake of the droplet is the driving mechanism for the strong flow movement inside the droplet against channel flow direction which occurs for higher Reynolds numbers.

Analyzing the frequency spectra of the oscillating droplet as well as the flow, it was found that the flow is also oscillating with the same characteristic frequency. The corresponding Strouhal number is almost constant at 0.03. Therefore, it can be assumed that an aeroelastic self-excitation effect may be present that eventually leads to droplet movement.

It can be also concluded that in contrast to rigid hemispherical structures flow separation occurs at higher Reynolds numbers. This can be explained by the fluid motion inside the droplet which exhibits a stronger flow upstream at higher Reynolds numbers. This flow can be that strong, that separation point moves upstream and does not stick to angles of approximately 90° as for rigid hemispheres.

Einleitung

Das Loslösen haftender (Wasser-) Tropfen von Oberflächen ist in vielen technischen Bereichen relevant, sei es als gewollter Prozess z.B. in Brennstoffzellen oder als ungewollter Prozess, z.B. zum Schutz elektronischer Bauteile. Die Bedingungen für das Loslösen eines Tropfens infolge eines Luftstroms sind noch nicht allumfassend geklärt. Empirische Ansätze für einzelne Kombinationen von Fluiden und Substraten wurden bereits entwickelt [1, 2], dennoch ist das Aufstellen einer Kräftebilanz um einen umströmten, oszillierenden Tropfen bislang von vielen Unsicherheiten geprägt. Eine offene Fragestellung bezieht sich auf den Ansatz für einen Widerstandsbeiwert für die Formulierung der aerodynamischen Kraft. Dieser Beiwert ist in hohem Maße von der Strömungssituation um den Tropfen abhängig.

In Vorarbeiten wurde eine Fluidbewegung im Tropfen festgestellt, deren Ausprägung von der Anströmgeschwindigkeit abhängt [3]. Bei kleineren Reynoldszahlen führt die Anströmung zunächst zu einer Bewegung in Strömungsrichtung an der Tropfenoberseite. Bei höheren Reynoldszahlen kann eine gegenläufige Bewegung im Tropfen, d.h. eine Stromauf-Bewegung an der Tropfenoberseite festgestellt werden (Abb. 1).

Gleichzeitig wurde bereits festgestellt, dass angeströmte Tropfen eine Deformation erfahren und beginnen zu oszillieren [4, 5]. Das Frequenzspektrum dieser Tropfenoszillation zeigt mehrere charakteristische Peaks, die sich der Resonanzfrequenz und deren harmonischen Frequenzen zuordnen lassen [6, 7]. Erste Messungen mittels Heißfilmsensor im Nachlauf eines Tropfens haben gezeigt, dass die Strömung Fluktuationen aufweist und die zugehörigen Frequenzspektren ebenfalls charakteristische Peaks aufweisen, welche sich diesen Tropfenoszillationsfrequenzen zuordnen lassen [8].

Darauf basierend kann vermutet werden, dass das Loslösen des Tropfens bedingt wird durch die Art der inneren Strömungsstruktur, der Oszillation des Tropfens und einem entsprechenden Selbsterregungsprozess durch die Kopplung von Tropfenströmung und (oszillierender) Umgebungsströmung.

Noch unklar ist bislang, ob sich die Umströmung des Tropfens von der einer starren Halbkugel unterscheidet, sich ein Ablösegebiet ausbildet und die Strömung im Tropfen die Ausprägung einer solchen Strömungsablösung im Tropfennachlauf beeinflusst. Daher wird die Strömung um den Tropfen mit Hilfe eines Profilsensors vermessen, welcher eine Weiterentwicklung der konventionellen Laser-Doppler-Anemometrie darstellt und hohe örtliche und zeitliche Auflösung aufweist. Es wurde bereits gezeigt, dass mit diesem Sensor auch sehr geringe bi-direktionale Strömungen in Wandnähe gemessen werden können [9].





Abb. 1: Charakteristische Strömungsstrukturen in einem 20-µl Wassertropfen auf Basis von PIV-Messungen für drei ausgewählte Kanalströmungsgeschwindigkeiten

Versuchsaufbau



Abb. 2: Strömungskanal zur Tropfenströmungsuntersuchung mit beispielhaft appliziertem Tropfen; deutlich sichtbar sind die Laserstrahlen des LDV-Profilsensors Abb. 3: Skizze des Strömungskanals mit appliziertem Tropfen und Ausrichtung des LDV-Profilsensors im Tropfennachlauf

Die Tropfenumströmung wird in einem Plexiglaskanal untersucht, bei dem auf der unteren Wand der Tropfen mittels Kanüle aufgesetzt werden kann (Abb. 2). Untersucht werden Wassertropfen; der Kontaktwinkel eines solchen Tropfens liegt für Plexiglas bei 74,4° ± 0,3°. Der

Kanal hat eine Gesamthöhe von 12 mm und eine Breite von 15 mm. Der Kanal wird mittels eines Axiallüfters mit Luft durchströmt. Der Ansaugteil ist mit einer Düsenstruktur ausgestattet und der Kanal ist ausreichend lang, um eine voll-ausgebildeten Kanalströmung auszubilden. Die maximale untersuchte Reynoldszahl (basierend auf der mittleren Luftgeschwindigkeit und dem hydraulischen Durchmesser des Kanals) beträgt Re_{ch} = 20000. Die entsprechenden Reynoldszahlen bezogen auf den Tropfendurchmesser betragen Re_d = 200–5000. Für die Profilsensormessungen wird ein Seeding in Form von 1 μ m DEHS-Tröpfchen zugesetzt.

Der Profilsensor wird so positioniert, dass durch die untere Kanalwand hindurch gemessen wird und die optische Achse in der Mittelebene des zu untersuchenden Tropfens bzw. des Strömungskanals liegt (Abb. 3).

Das Messprinzip des verwendeten Profilsensors mit Trägerfrequenztechnik basiert auf der Laser-Doppler-Technik und verwendet konvergente und divergente Interferenzstreifensysteme sich kreuzender Laserstrahlen [10], die in einem gemeinsamen Messvolumen überlagert werden. Die Brennweite liegt bei 160 mm für beide Laserstrahlsysteme. Der Strahlabstand an der Frontlinse für den Laser mit 532 nm Wellenlänge liegt bei ≈ 45 mm und für den Laser mit 553 nm Wellenlänge bei ≈ 70 mm. Da zwei Interferenzstreifensysteme verwendet werden, werden zwei Dopplerfrequenzen gemessen. Über den Quotienten dieser Frequenzen ist die axiale Position von in der Strömung enthaltenden Partikeln, welche das Messvolumen durchqueren, bekannt. Die erreichbare Ortsauflösung erhöht sich gegenüber konventionellen LDV-Systemen signifikant bis in den Mikrometerbereich [11,12]. Da die Streifenabstände für jede Position z bekannt sind, kann die laterale Geschwindigkeitskomponente über das Produkt aus Dopplerfrequenz und Streifenabstand für beide Streifenmuster bestimmt werden, was die Bestimmung valider Geschwindigkeitswerte verbessert. Hier wird eine erweiterte Variante des Profilsensors angewendet, die eine Richtungserkennung erlaubt. Dazu wird bei jedem der beiden Laser ein optoakustischer Modulator (Braggzelle) genutzt, mit der einer der beiden Teillaserstrahlen frequenzverschoben wird. Durch die leicht veränderte Wellenlänge entsteht ein wanderndes Interferenzstreifenmuster. Bezüglich der Shiftfrequenz f_{S} wird je nach Durchtrittsrichtung der Partikel eine andere Frequenz f_D erzeugt. Die verwendeten Shiftfrequenz f_S liegen bei 3 MHz bzw. 5 MHz. Das Messvolumen des verwendeten LDV-Profilsensors hat eine Länge von etwa ± 200 µm. Um die Geschwindigkeitsverteilung über einen Bereich von einigen Millimetern im Nachlauf des Tropfens zu vermessen, wird ein Traversiersystem verwendet. Für das verwendete Gesamtsystem wurde eine Messunsicherheitsanalyse vorgenommen [13].





Anhand von Abb. 4 wird deutlich, dass die beobachtete lokale Messunsicherheit in einem typischen Geschwindigkeitsprofil an der Wand zwischen 0.025 und 0.225 m/s liegt. Hohe Werte an den Rändern des beobachteten Bereichs können auf eine starke Abnahme der burst-Anzahl an den Rändern des traversierten Messvolumens zurückgeführt werden. Innerhalb des Messvolumens von \pm 200 µm liegt die mittlere erweiterte Messunsicherheit bezüglich der Geschwindigkeit bei 0,051 m/s. Für weitere Details zur Messtechnik sei hier auf entsprechende Publikationen der Autoren verwiesen [9, 13].

Wie bereits erwähnt, wird die Strömung durch die Plexiglas-Bodenplatte des Kanals vermessen, auf die der Tropfen appliziert wird. Die Strömung wird sowohl vor dem Tropfen als auch an verschiedenen Positionen hinter dem Tropfen vermessen. Das komplette Geschwindigkeitsprofil wird erfasst, in dem der Sensor in Schrittweiten von 100 µm traversiert wird. D.h. dass eine Überlappung der Messbereiche von 25% gewählt wird. Jeder Profilsensor-Messdatensatz eines Geschwindigkeitsprofils besteht aus etwa 310000 Einzel-bursts. Die berechneten und dargestellten mittleren Geschwindigkeitswerte in den folgenden Diagrammen basieren auf einem räumlichen "binning" mit einer Schrittweite von 10 µm.

Untersuchungsergebnisse

In Abb. 5 und 6 sind exemplarisch die Messergebnisse für eine ungestörtes Anströmprofil (vor dem Tropfen) und das entsprechende Geschwindigkeitsprofil im Nachlauf (2 mm hinter dem Tropfen) dargestellt.



Abb. 5: Profilsensormessung der Anströmung (links: Histogramm und Mittelwerte, Mitte: detektierte burst-Anzahl pro Messposition und rechts: Standardabweichung der Geschwindigkeitsmessung)

Es wird deutlich, dass zum einen das turbulente Geschwindigkeitsprofil der Anströmung als auch ein Gebiet mit lokaler Strömungsumkehr im Tropfennachlauf mit hoher Präzision gemessen werden kann. Der wandnächste Messpunkt liegt infolge des räumlichen "binnings" bei 10 µm, d.h. bei y+ = 0,233. Zu beachten ist dabei, dass der zeitliche Mittelwert selbst dieses Messpunkts auf 10-20 validen Einzelmessungen basiert, die Mehrzahl der Werte für die lokale mittlere Geschwindigkeit allerdings berechnet wird auf Basis von etwa 1000 validen Einzelmessungen. Die Standardabweichung der Geschwindigkeitswerte liegt im Bereich von 0,25 bis 1,5. Der stärkere Anstieg der Werte im Bereich von y = 1,5 mm im Tropfennachlauf (Abb. 6) kann auf den steilen Geschwindigkeitsgradienten an dieser Stelle zurückgeführt werden. Details dazu werden im Folgenden diskutiert.



Abb. 6: Profilsensormessung der Nachlaufströmung 2 mm hinter einem Tropfen (links: Histogramm und Mittelwerte, Mitte: detektierte burst-Anzahl pro Messposition und rechts: Standardabweichung der Geschwindigkeitsmessung)

In Abb. 7 wird das gemessene Geschwindigkeitsprofil im Nachlauf eines 20 µl-Tropfens für $Re_d = 500 (u_{bulk} = 1,55 \text{ m/s})$ gezeigt. Der Tropfen hat eine Länge von etwa 5,4 mm und eine mittlere Höhe von 1,6 mm. Es werden die Daten der Profilsensormessung mit Ergebnissen einer Heißfilmmessung für einen gleichen Tropfen bei gleichen Bedingungen und an gleicher Position verglichen (Details zur Heißfilm-Messung können [8] entnommen werden). Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten für y-Positionen, die kleiner sind als die Tropfenhöhe, deutlich gegenüber der Anströmgeschwindigkeit reduziert sind. Aus diesen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass sich hinter dem Tropfen infolge der Verdrängungswirkung ein Nachlaufgebiet ausbildet. Dieses Nachlaufgebiet erstreckt sich bis mindestens eine Tropfenlänge hinter dem Tropfen.



Abb. 7: Profilsensormessung (+) im Nachlauf eines 20 μ I-Tropfens im Vergleich zu Heißfilm-Daten (\circ) für Re_d = 500; Messpositionen bei 1, 2 und 4 mm hinter dem Tropfen

Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit verändern sich die Strömungsprofile, sowohl in den Messdaten des Profilsensors als auch bei den Heißfilmdaten. Wie in Abb. 8 für den Fall $Re_d = 1200$ gezeigt wird, kann bei etwa y = 1,5 mm ein starker Geschwindigkeitsgradient detektiert

werden. Dies weist auf eine abgelöste Scherschicht hin, die sich oben am Tropfen entwickelt. Durch die hohe räumliche Auflösung und die Möglichkeit, bi-direktional zu messen, zeigt sich in den Profilsensordaten im Gegensatz zu den Heißfilm-Ergebnissen eine Rückströmzone, die sich bis etwa einer halben Tropfenlänge hinter dem Tropfen ausbildet. Bis auf den Bereich der Rückströmung, die naturgemäß mit einem einfachen Heißfilmsensor so nicht erfasst werden kann, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse der beiden Techniken. Auch für eine weitere Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit können die oben genannten Beobachtungen gemacht werden. In Abb. 9 sind die entsprechenden Geschwindigkeitsprofile für Re_d = 1650 dargestellt. Auch hier zeigt sich ein starker Geschwindigkeitsgradient bei etwa y = 1.5 mm sowie eine Rückströmzone ähnlicher Ausprägung.



Abb. 8: Profilsensormessung (+) im Nachlauf eines 20 μ I-Tropfens im Vergleich zu Heißfilm-Daten (\circ) für Re_d = 1200; Messpositionen bei 1, 2 und 4 mm hinter dem Tropfen



Abb. 9: Profilsensormessung (+) im Nachlauf eines 20 μ I-Tropfens im Vergleich zu Heißfilm-Daten (\circ) für Re_d = 1650; Messpositionen bei 1, 2 und 4 mm hinter dem Tropfen

Vergleicht man nun diese Ergebnisse mit den Erkenntnissen, die bereits mittels PIV bezüglich der Innenströmung eines Tropfens gewonnen wurden (vgl. Abb. 1, [3]), können folgende Aussagen getroffen werden (bezüglich einer Anströmung eines Tropfens von links):

Im Falle einer reinen Strömung im Uhrzeigersinn im Tropfen (Re_d ≈ 400 - 500) bildet sich im Nachlauf des Tropfens keine Rückströmzone aus. Zeigt sich im Tropfen im hinteren Bereich eine starke Strömung entgegengesetzt der Anströmung, kann eine Rückströmzone im Tropfennachlauf beobachtet werden.

Es kann also vermutet werden, dass sich bei erhöhter Anströmgeschwindigkeit eine Scherschicht an der Oberseite des Tropfens ablöst, die im zeitlichen Mittel zu einem Rezirkulationsgebiet im Tropfennachlauf führt, welches eine Drehrichtung im Uhrzeigersinn aufweist. Diese führt an der Hinterseite des Tropfens zu einer Bewegung aufwärts und kann somit als treibender Mechanismus für die entsprechende Bewegung im Tropfen entgegen der Strömungsrichtung gesehen werden.

Abgelöste Scherschichten zeigen oftmals ein Aufrollen der Schicht, d.h. eine Wirbelbildung mit charakteristischer Frequenz. Auf Basis der Heißfilmdaten [3] wurde eine Frequenzanalyse der zeitlichen Veränderung der Strömung im Tropfennachlauf durchgeführt und entsprechende charakteristische Frequenzen gefunden. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus einer vorherigen Vermessung der Tropfenoszillation [7] zeigt, dass die gefundenen Frequenzspektren für die Strömungsoszillation und Tropfenoszillation bezüglich der charakteristischen Frequenzpeaks identisch sind. Diese Korrelation wurde für höhere Reynoldszahlen gefunden, die sich mit der Ausbildung eines Rezirkulationsgebietes in Verbindung bringen lassen (Abb. 10). Die entsprechende Strouhal-Zahl (basierend auf dem Tropfendurchmesser und der Anströmgeschwindigkeit) ist über einen weiten Bereich an Tropfenvolumina und für verschiedene Fluide nahezu konstant bei Werten von etwa St = 0,03 (Abb. 11).





Abb. 10: charakteristische Frequenzspektren der Tropfenoszillation und der Strömung im Tropfennachlauf für $Re_d = 1550$

Abb. 11: Strouhalzahlen der Tropfenoszillation und der Strömung im Tropfennachlauf für verschiedene untersuchte Konfigurationen

Zusammenfassung und Ausblick

Mittels LDV-Profilsensor mit Trägerfrequenztechnik wurde die Strömung im Nachlauf eines haftenden Tropfens vermessen. Es wurde gezeigt, dass bei einer räumlichen Auflösung von 10 µm eine Messunsicherheit von im Mittel 0,051 m/s (bei einer mittleren Anströmung von 5 m/s) vorliegt. Auch bei nur wenigen validen Messsignalen in Wandnähe werden im zeitlichen Mittel sehr gute Auflösungen erzielt. Somit kann mit dieser Technik die komplexe Strömung im Nachlauf eines Tropfens, die von Strömungsrichtungswechsel und starken Geschwindigkeitsgradienten geprägt ist, präzise vermessen werden. Konkret zeigen die Ergebnisse der Profilsensormessungen deutlich, dass sich im Nachlauf des Tropfens in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Rückströmgebiete ausprägen. Heißfilm-Daten aus einer vorherigen Messkampagne können hinsichtlich der Form der Geschwindigkeitsprofile im Bereich der Scherschicht-Gradienten bestätigt werden. Die Rückströmgebiete können mit einer abgelösten Scherschicht

am Tropfen assoziiert werden. Der Tropfen schwingt mit charakteristischen Frequenzen. Aus den Heißfilmdaten kann ebenfalls eine charakteristische Schwingungsfrequenz ermittelt werden. Die Frequenz, die sich sowohl in der Tropfenoszillation, als auch in der Nachlaufströmung als charakteristische Frequenz ausbildet, kann mit der Auf- und Abbewegung des Tropfens korreliert werden [14]. Die entsprechenden Strouhalzahlen des oszillierenden Tropfens und der Strömung sind nahezu konstant bei St = 0,03 und liegen damit in einem Bereich, in dem nach Försching [15] aeroeleastische Effekte wie "gallopping" auftreten können. Die Auf- und Abbewegung kann als Quelle des aeroelastischen Effekts interpretiert werden.

Gleichzeitig kann gezeigt werden, dass im Gegensatz zu einer starren Halbkugel das Auftreten einer Ablösung bzw. eines Rezirkulationsgebietes im Tropfennachlauf zu höheren Reynoldszahlen verschoben wird. Für starre Halbkugeln und ähnliche Objekte wird beobachtet, dass für den Fall einer Strömungsablösung diese unabhängig von der Anströmung bei etwa 90° erfolgt, vgl. [16,17]. Für den Fall eines Tropfens scheint die äußere mit der inneren Strömung dahingehend zu interagieren, dass eine Reynoldszahl-Abhängigkeit vorliegt. Begründet werden kann dies mit der Fluidbewegung im Tropfen, die bei kleineren Reynoldszahlen zunächst zu einer Bewegung in Strömungsrichtung an der Tropfenoberseite führt. Bei höheren Reynoldszahlen bewirkt das Auftreten einer Ablösung eine gegenläufige Bewegung im Tropfen, d.h. eine Stromauf-Bewegung an der Tropfenoberseite. Diese kann so ausgeprägt werden, dass sich der Ablösepunkt schließlich weiter stromauf bewegt, als dies bei starren Halbkugeln möglich ist.

Die Untersuchungen mittels LDV-Profilsensor haben durch die hohe Ortauflösung, den hohen Dynamik-Bereich der Geschwindigkeitsdetektion sowie die hohe Genauigkeit bei der Geschwindigkeitsbestimmung positiver und negativer Geschwindigkeiten nahe Null neue Erkenntnisse zur Tropfenumströmung gebracht, die bislang messtechnisch nicht erfasst werden konnten. Diese neuen Erkenntnisse fanden naturgemäß bei der Aufstellung analytischer Modelle zur Kräftebilanz an einem angeströmten Tropfen bislang keine Berücksichtigung. Hier kann eine Verbesserung erzielt werden. Nichts desto trotz sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Zusammenhänge zwischen Außen- und Innenströmung zu klären. Die Strömung im Tropfen bedarf insbesondere ergänzender Messungen, da bei den PIV-Messungen bislang der Effekt der Oberflächenkrümmung nicht kompensiert werden konnte aufgrund des oszillierenden Charakters des Tropfens. Neue Komponenten und Methoden aus dem Bereich der adaptiven Optik [18,19, 20] werden in Zukunft weitere Messungen ermöglichen, bei denen schnelle deformierbare Spiegel genutzt werden [21], um die Verzerrungen durch die Phasengrenzfläche des Tropfens zu kompensieren.

Literatur

[1] Milne A, Amirfazli A (2009) Drop Shedding by Shear Flow for Hydrophilic to Superhydrophobic Surfaces Langmuir 2009, 25(24), 14155–14164

[2] Barwari B, Burgmann S, Bechtold A, Rohde M, Janoske U (2019): Experimental study of the onset of down-stream motion of adhering droplets in turbulent shear flows, Experimental Thermal and Fluid Science, 109, 109843

[3] Burgmann S, Barwari B, Janoske U (2018) Inner flow structure of an adhering oscillating droplet in shear flow, 19th International Symposium on the application of laser and imaging techniques to fluid mechanics, Lissabon, 16.-19. Juli 2018

[4] Gupta AK, Basu S (2008) Deformation of an oil droplet on a solid substrate in simple shear flow. Chem Eng Sci 63(22):5496–5502

[5] Barwari B, Burgmann S, Janoske U (2018) Deformation and movement of adhering droplets in shear flow, 5th Int. Conf. on Experimental Fluid Mechanics, München, 2.-4. Juli 2018

[6] Sharp JS, Farmer DJ, Kelly J (2011) Contact angle dependence of the resonant frequency of sessile water droplets. Langmuir 27:9367–9371

[7] Burgmann S, Barwari B, Janoske U (2018): Oscillation of adhering droplets in shear flow, 5th Int. Conf. on Experimental Fluid Mechanics, München, 2.-4. Juli 2018

[8] Barwari B, Burgmann S, Janoske U (2018) Instabilities of an adhering droplet in shear flow, 26. Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", Rostock, 4.-6. September 2018

[9] Dues M, Burgmann S, Kriegseis J, Büttner L, Czarske J, Janoske U (2019): Flow-measurements within a channel with porous wall using laser Doppler profile sensor, 27. Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", Erlangen, 3-5. September 2019

[10] Czarske J, Büttner L, Razik T, Müller H (2002) Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution. Meas. Sci. Technol. 13, S. 1979–1989

[11] Büttner L, Bayer C, Voigt A, Czarske J, Müller H, Pape N, Strunck V (2008) Precise flow rate measurements of natural gas under high pressure with a laser Doppler velocity profile sensor, Exp Fluids, 45, 1103–1115

[12] König J, Voigt A, Büttner L, Czarske J (2010) Precise micro flow rate measurements by a laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing, Measurement Science and Technology, 21(7), 074005

[13] Burgmann S, Dues M, Barwari B, Steinbock J, Büttner L, Czarske J, Janoske U (2021) Flow measurements in the wake of an adhering and oscillating droplet using laser-Doppler velocity profile sensor, Experiments in Fluids, 62:47

[14] Barwari B, Rohde M, Wladarz O, Burgmann S, Janoske U (2021) Motion of adhering droplets induced by overlapping of gravitational and periodical acceleration. J Multiph Flow 135:103537

[15] Försching HW (1974) Grundlagen der Aeroelastik. Springer, Berlin, Heidelberg

[16] Tavakol MM, Abouali O, Yaghoubi M (2015): Large eddy simulation of turbulent flow around a wall mounted hemisphere. Appl. Math. Model. 39 (13), 3596–3618

[17] Fedrizzi M, Giacobello M, Soria J, Atkinson C, Jones M (2012), Experimental Investigation of a Hemisphere in a Thin Flat Plate Boundary Layer, 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, Launceston, Australia, 3-7 December 2012

[18] Büttner L, Thümmler M, Czarske J (2020) Velocity measurements with structured light transmitted through a multimode optical fiber using digital optical phase conjugation. Opt Express 28:8064–8075

[19] Gao Z, Radner H, Büttner L, Ye H, Li X, Czarske J (2021) Distortion correction for particle image velocimetry using multiple-input deep convolutional neural network and Hartmann-Shack sensing, Optics Express 29, 18669-18687

[20] Teich M, Mattern M, Sturm J, Büttner L, Czarske JW (2016) Spiral phase mask shadow-imaging for 3D-measurement of flow fields. Opt Express 24:27371–27381

[21] Radner H, Stange J, Büttner L, Czarske J (2021) Field programmable system-on-chip based control system for real-time distortion correction in optical imaging, IEEE Transactions on Industrial Electronics 68(4), 3370-3379