

Strömungsinstabilitäten eines haftenden Tropfens unter Anströmung

Instabilities of an adhering droplet in shear flow

B. Barwari, S. Burgmann, U. Janoske

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

haftender Tropfen, Scherströmung, Konturoszillation, Strömungsinstabilität
adhering droplet, shear flow, oscillation of contour, flow instability

Zusammenfassung

Flüssigkeitstropfen auf Oberflächen unter Einfluss einer Scherströmung treten bei einer Vielzahl von technischen Anwendungen auf. Wird ein haftender Tropfen mit zunehmender Geschwindigkeit angeströmt, beginnt der Tropfen in Abhängigkeit seiner Größe ab einer bestimmten Geschwindigkeit zu oszillieren und bewegt sich schließlich entlang der Körperoberfläche. Der Prozess der Tropfenablösung ist mit einer Oszillation des Tropfens verbunden, d.h. die Tropfenoberfläche deformiert und schwingt mit charakteristischen Frequenzen. Zusätzlich kommt es zu einer Oszillation des Strömungsfeldes innerhalb des Tropfens. Der Nachlauf des Tropfens ist bei den untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten von einer Strömungsablösung charakterisiert. Es zeigt sich, dass die Oszillation des Tropfens eine direkte Auswirkung auf die Strömung im Nachlauf des Tropfens hat. Die Tropfenoszillation erfolgt mit Vielfachen der Eigenfrequenz des Tropfens. Die charakteristischen Strömungsfrequenzen im Tropfennachlauf stimmen in hohem Maße mit den Frequenzen der Tropfenoszillation überein. Es zeigt sich jedoch, dass die korrespondierenden Strouhal-Zahlen im Bereich von $St = 0.05$ und darunter liegen, d.h. deutlich unterhalb der für einen festen Körper zu erwartenden Strouhal-Zahl von $St = 0.13-0.2$. Es ist zu vermuten, dass die Tropfenoszillation eine dämpfende Wirkung auf die Instationarität der Umströmung hat.

Abstract

In many technical applications liquid droplets appear on surfaces and are under the influence of a shear flow. For increasing flow velocity the adhering droplet starts to oscillate. The onset of oscillation depends on droplet size. Further increase of the flow velocity leads to a movement of the droplet along the surface. This process of droplet detachment corresponds to a specific oscillation of the droplet contour and also an oscillation of the flow inside the droplet. The flow field in the wake of the droplet is characterized by flow separation. It has been observed that the oscillation of the droplet governs the flow instability of the wake: droplet oscillation occurs with multiple of the resonance frequency of the droplet and the same peak frequencies can be found in the spectrum of the unsteady flow in the wake. Interestingly, the corresponding Strouhal numbers are approximately $St = 0.05$ and lower instead of $St = 0.13-0.2$ which can be expected for the flow around a rigid body. It can be assumed that the droplet oscillation has a damping effect on the flow fluctuation.

Einleitung

Flüssigkeitstropfen auf Oberflächen treten bei einer Vielzahl von technischen Anwendungen auf, sei es infolge von Kondensation oder als Ablagerung von Tropfen (Spray, Regen, etc.). Oftmals werden die Oberflächen, auf denen die Tropfen haften, überströmt. Wird ein haftender Tropfen mit zunehmender Geschwindigkeit angeströmt, deformiert der Tropfen (Seevaratnam et al., 2010) und beginnt in Abhängigkeit seiner Größe ab einer bestimmten Geschwindigkeit zu oszillieren (Lin et al, 2006, Maurer, 2017). Wird die Anströmgeschwindigkeit weiter erhöht, löst sich der Tropfen schließlich und bewegt sich über die Oberfläche. Die Tropfenbewegung kann in verschiedene Phasen unterteilt werden, z.B. eine Bewegung der fortschreitenden und/oder der rückschreitenden Kontaktlinie oder auch einer Gleitphase, was die Definition eines Ablösezeitpunkts erschwert. In einer jüngsten Arbeit dieser Arbeitsgruppe konnte eine robuste Definition des Ablösezeitpunkts gefunden werden (Barwari et al., 2018b). Dabei wird die normierte Anströmgeschwindigkeit über der normierten Schwerpunktlage des Tropfens aufgetragen (Abb. 1)¹. Auf diese Weise lässt sich der Ablösezeitpunkt für alle bislang untersuchten Fälle präzise bestimmen. Außerdem wurde festgestellt, dass die maßgebliche Geschwindigkeit zum Tropfenablösen diejenige Geschwindigkeit ist, die sich aus dem Geschwindigkeitsprofil an der Wand in Höhe der Oberkante des Tropfens ergibt (Burgmann et al, 2017). Es zeigte sich, dass basierend auf diesen Definitionen der Beginn der Tropfenbewegung in dimensionsloser Form dargestellt werden kann (Abb. 2) und somit eine allgemeine Gesetzmäßigkeit zu bestehen scheint² (Barwari et al., 2018a).

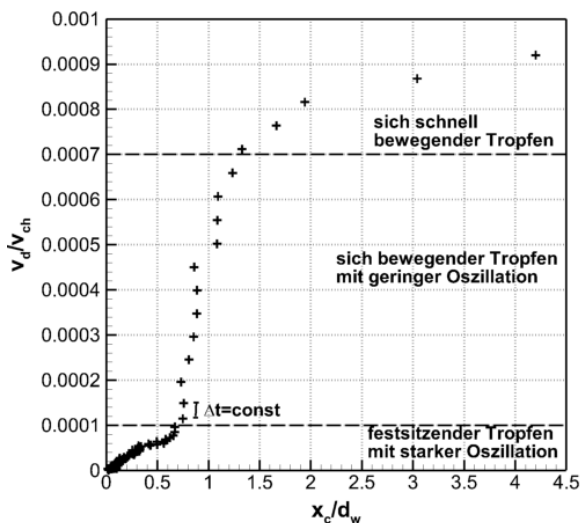


Abb. 1: Dimensionslose Darstellung der Tropfengeschwindigkeit über der Tropfenposition, exemplarische Darstellung für $V_{Tropfen} = 23.4 \mu\text{l}$

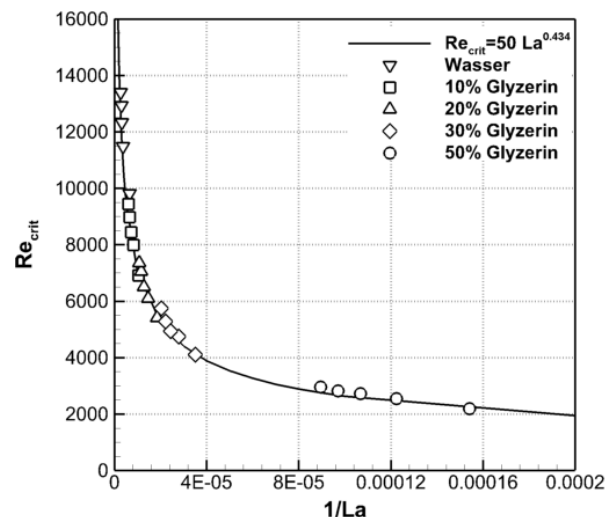


Abb. 2: Darstellung der kritischen Reynoldszahl der Tropfenbewegung über dem Kehrwert der Laplace-Zahl

Der Prozess der Tropfenablösung ist wie beschrieben mit einer Oszillation des Tropfens verbunden, d.h. die Tropfenoberfläche deformiert und schwingt mit charakteristischen Frequenzen. Gleichzeitig tritt innerhalb des Tropfes eine oszillierende Strömung auf. Es konnte festgestellt werden, dass die auftretenden Frequenzen der Konturoszillation und der Strömungsozillation im Tropfen nahezu identisch sind und mit Vielfachen der Resonanzfrequenz eines Tropfens korrespondieren (Burgmann et al., 2018).

¹ In diesem Falle ist v_d die Geschwindigkeit des Tropfens, v_{ch} die Anströmgeschwindigkeit, x_c die zurückgelegte Distanz des Tropfenschwerpunkts und d_w die Tropfenbreite.

² Die Reynoldszahl wird dabei mit den Stoffeigenschaften und der Höhe des Tropfens sowie der Geschwindigkeit in Höhe der Tropfenoberkante gebildet. Die Laplace-Zahl wird mit den Stoffeigenschaften sowie der Oberflächenspannung und der Breite des Tropfens gebildet. Es ergibt sich folgender Zusammenhang: $Re_{crit} = 50 \cdot La^{0,434}$

Es ist zu vermuten, dass die Oszillation des Tropfens wiederum eine direkte Auswirkung auf die Strömung im Nachlauf des Tropfens hat, bzw. die Strömung im Nachlauf eine Rückkopplung auf die Tropfenoszillation ausübt. Wood & Breuer (2016, 2017) konnten in Experimenten mit einer starren und einer flexiblen Halbkugel bei Reynoldszahlen im Bereich von $Re = 50.000-100.000$ zeigen, dass sich im Nachlauf der Halbkugel sowohl für den starren, als auch für den flexiblen Fall eine Strömungsablösung einstellt. Zudem zeigte sich, dass für höhere Reynoldszahlen das Strömungsbild sich in der Art verändert, dass für die flexible Halbschale im zeitlichen Mittel eine Wirbelzone entsteht, die vom Boden „abgelöst“ hinter der Halbschale entsteht, so dass kein klassisches Wiederanlegen der Strömung vorliegt. Außerdem konnten Wood & Breuer (2017) zeigen, dass die turbulenten Schwankungen im Nachlauf für eine oszillierende Kontur gegenüber der starren Kontur gedämpft werden. Ein Vergleich der Spektren der Konturdeformation und der Strömungsfluktuation im Nachlauf zeigte, dass einige Peak-Frequenzen der Strömungsfluktuation mit charakteristischen Frequenzen der Konturdeformation zur Deckung gebracht werden können. Zusätzlich konnte eine charakteristische Frequenz abgehender Wirbel bestimmt werden, welche allerdings im Spektrum der Konturdeformation nicht sichtbar ist. Aus dieser Frequenz lässt sich eine Strouhal-Zahl von $St = 0.165$ bei einer Reynoldszahl von $Re = 100.000$ bestimmen. Es ist die Frage, ob ähnliche Zusammenhänge auch für oszillierende Tropfen in einem Reynoldszahlbereich von $Re = 15.000$ festgestellt werden können. Die Zusammenhänge zwischen der Oberflächenoszillation des Tropfens, der Tropfeninnenströmung und der Umströmung des Tropfens sind bislang nicht in ausreichendem Maße untersucht.

Experimenteller Aufbau

Der Versuch wird so gestaltet, dass die Oszillation eines haftenden Tropfens unter Anströmung untersucht werden kann. Dazu wird ein Plexiglaskanal verwendet, der einen Querschnitt von $22 \times 22 \text{ mm}^2$ aufweist. Der Kanal wird von Luft durchströmt, wobei der Volumenstrom über einen Massflow-Controller eingestellt und kontinuierlich gesteigert werden kann. Die Kanallänge ist ausreichend groß, so dass eine vollausgebildete Strömung vorliegt. Der zu untersuchende Tropfen wird vor Versuchsbeginn mittels einer Spitze auf die untere Kanalwand gesetzt. Der Tropfen in dem untersuchten Größenbereich von $5-40 \mu\text{l}$ weist unter allen Bedingungen eine Höhe von unter 10% der Kanalhöhe b auf, d.h. der Tropfen der Höhe h liegt innerhalb des stärksten Gradientenbereichs des Geschwindigkeitsprofils an der Kanalwand (vgl. Abb. 3).

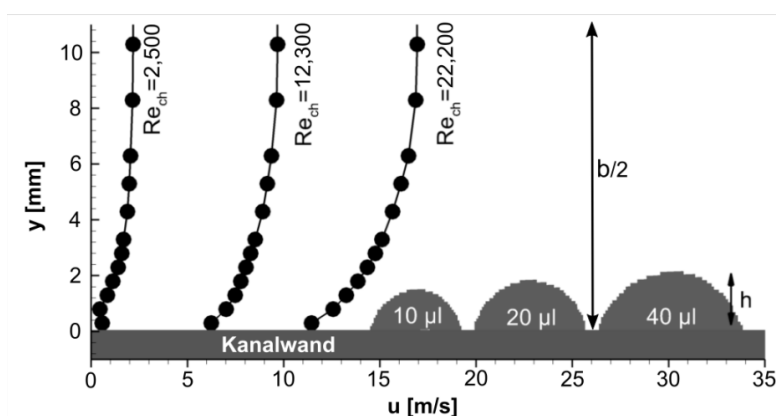


Abb. 3: Geschwindigkeitsprofile der Kanalströmung für den untersuchten Reynoldszahlbereich und charakteristische Tropfengrößen

Zur Vermessung der Tropfenoszillation wird eine Schattentechnik verwendet, wobei der Tropfen von einer LED beleuchtet wird und die Kamera (MotionBLITZ EoSens Cube7) auf der gegenüberliegenden Seite positioniert ist (Abb. 4a). Der scharfe Kontrast der Bilder erlaubt eine präzise Kantendetektion und somit eine zeitliche Auslösung der Oszillation der

Tropfenkontur ($f_{rec} = 1.000 \text{ Hz}$). Das Strömungsfeld stromab des Tropfens wird an ausgewählten Punkten und für ausgewählte Anströmgeschwindigkeiten mittels Heißfilmsonde (TSI 1750 CTA mit einer Abtastrate von ebenfalls $f_{HF} = 1.000 \text{ Hz}$ vermessen (Abb. 4b). Zur Vermessung der Tropfeninnenströmung wird die Particle-Image Velocimetry eingesetzt. In diesem Falle wird ein PIV-Messsystem verwendet, das aus einem Infrarot-Diodenlaser mit $\lambda = 805 \text{ nm}$ und 50 W Leistung sowie einer 8 bit HCC1000 CMOS-Hochgeschwindigkeits-Kamera mit 1024×1024 Pixeln besteht. Das Laserlicht wird über einer Zylinderlinsen-Optik zu einem Lichtschnitt geformt und über ein Prisma umgelenkt. Die für die PIV-Technik erforderlichen Tracerpartikel werden vor Versuchsbeginn in die Flüssigkeit gemischt. Es werden Polyesteron-Partikel mit einem mittleren Durchmesser von $4.2 \mu\text{m}$ verwendet. Die Kamera ist mit einem modularen C-Mount Zoom-Objektiv ausgestattet, welches eine geringe Tiefenschärfe aufweist (Abb. 4c). Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse für einen $15 \mu\text{l}$ -Tropfen gezeigt.

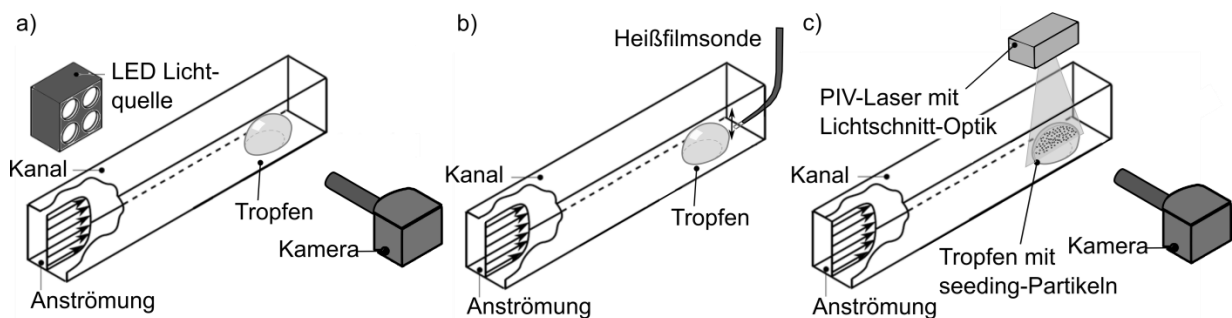


Abb. 4: Versuchsaufbauten für die Untersuchung der Konturoszillation (a), des Strömungsfelds im Nachlauf (b) und der Tropfeninnenströmung (c)

Untersuchungen zur Tropfenoszillation

Es wurde ein $15 \mu\text{l}$ -Tropfen für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten untersucht. Die Ergebnisse der Kantendetektion aus den Schattenaufnahmen sind exemplarisch in Abb. 5 gezeigt: für einen Oberflächenpunkt auf der Nachlaufseite des Tropfens (+) wurde die Bewegung in x- und y-Richtung extrahiert und das entstandene Zeitsignal der Konturposition mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) analysiert. Es zeigt sich, dass das Frequenzspektrum für die Oszillation in x- und y-Richtung ähnliche Peak-Frequenzen aufweist. Ganz ähnliche Verteilungen können für sämtliche Oberflächenpunkte des Tropfens identifiziert werden. Die detektierten Peak-Frequenzen korrespondieren mit den Eigenfrequenzen ω_R eines freien, oszillierenden Tropfens nach Lamb (1932):

$$\omega_R = \sqrt{\frac{\sigma}{3\pi m} l(l-1)(l+2)}$$

In dieser Formel sind l ein ganzzahliger Wert von 2 oder höher, σ ist die Oberflächenspannung und m die Masse des Tropfens. Diese Übereinstimmung der detektierten Frequenzen mit den Werten nach Lamb wurde bereits bei vorherigen Untersuchungen festgestellt und scheint eine grundsätzliche Eigenschaft zu sein, denn es verändert sich das Frequenzspektrum hinsichtlich der Peak-Frequenzen auch nicht, wenn der Tropfen nicht aus reinem Wasser besteht, sondern ein Glycerin-Anteil beigemischt wird, d.h. die Viskosität erhöht wird (vgl. Burgmann et al, 2018). Für einen $15 \mu\text{l}$ -Wasser-Tropfen ergeben sich nach der obigen Formel Werte von $\omega_{R,l=2} = 74 \text{ Hz}$, und $\omega_{R,l=3} = 145 \text{ Hz}$. Wie in Abb. 5 zu erkennen ist, korrespondiert der prominenteste Peak des Spektrums mit der ersten Eigenfrequenz. Eine weitere charakteristische Frequenz ergibt sich bei etwa $1/2 \omega_{R,l=2}$. Diese charakteristischen Frequenzen ändern sich auch mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit nicht, allerdings treten weitere höhermodige Frequenzen auf.

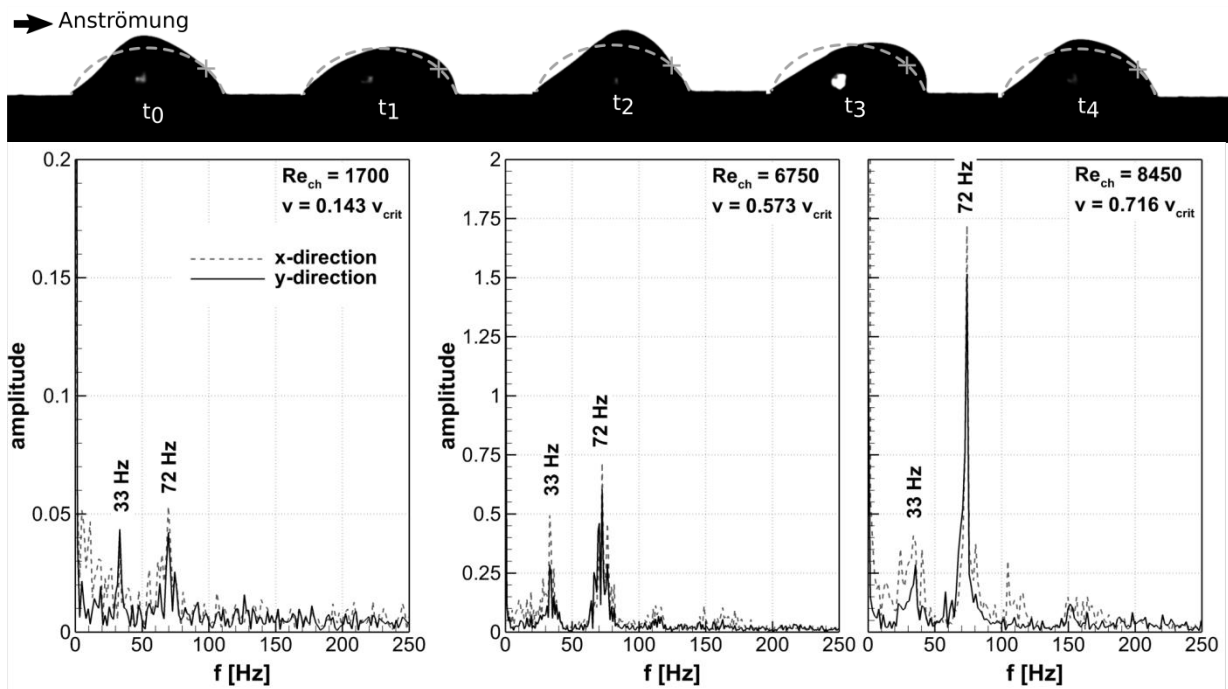


Abb. 5: Typische Sequenz der (sehr starken) Konturos-zillation eines Tropfens im Vergleich zum nicht-angeströmten Tropfen (graue gestrichelte Linie) bei Anströmgeschwindigkeiten kurz vor dem Loslösen des Tropfens (oben) und Frequenzspektrern der Tropfenoszillation basierend auf der Kantendetektion der Tropfenkontur an der oben markierten Stelle (+) für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten (unten)

Die Innenströmung des 15 μl -Tropfens wurde mittels des beschriebenen PIV-Verfahrens vermessen. Für ausgewählte Punkte des Geschwindigkeitsfeldes im Tropfen wurde aus den einzelnen flächigen Geschwindigkeitsdatensätzen für eine Anströmung von etwa 43 % der kritischen Geschwindigkeit ein Zeitschrieb der u- und v-Geschwindigkeit erstellt und eine FFT-Analyse durchgeführt. Das Ergebnis ist exemplarisch in Abb. 6 dargestellt. Man erkennt wiederum typische Frequenz-Peaks im Spektrum, welche sich wieder den bereits aus der Konturos-zillation bekannten Frequenzen $\omega_{cont} = 33 \text{ Hz}$ und $\omega_{cont} = 71\text{-}72 \text{ Hz}$ zuordnen lassen, wobei die Fluktuation in x-Richtung den dominanteren Peak bei 72 Hz aufweist, wohin-gegen die Fluktuation in y-Richtung der Frequenz von 33 Hz zugeordnet werden kann.

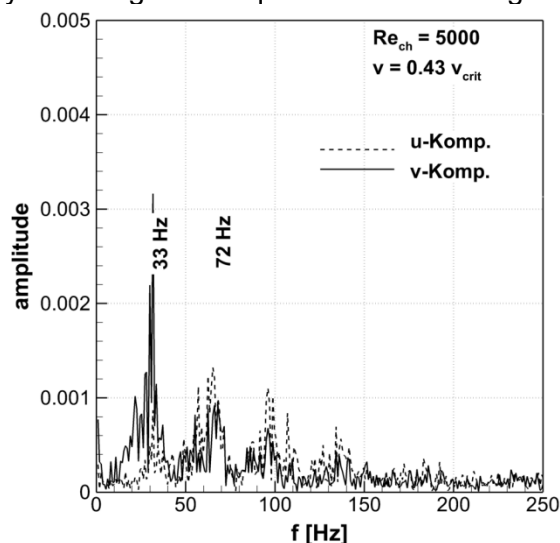


Abb. 6: Typische Frequenzspektrern der Geschwindigkeitsoszillation im Tropfen basierend auf den Ergebnissen der PIV-Messung

Die Detail-Ergebnisse der PIV-Messung sind exemplarisch in Abb. 7 dargestellt. Wie in den beispielhaften Bildsequenzen a) und b) zu erkennen ist, zeigt sich ein stark instationäres

Strömungsfeld im Tropfen, welches jedoch eine gewisse Periodizität aufweist: in der dargestellten Sequenz a) kann eine Wanderung eines Fluidpakets aus dem vorderen Bereich des Tropfens entlang der Kontur stromab beobachtet werden. Diese Wanderungsbewegung („Schwappen“) verläuft periodisch und ihr kann der Frequenz von etwa 33 Hz zugeordnet werden (Abb. 6 a). Außerdem ist aus dem Datensatz eine periodische horizontale Hin- und Her-Bewegung identifizierbar, die mit einer Frequenz von etwa 71 Hz abläuft (Abb. 6 b). D.h. die Bewegungsmuster können dem detektierten Frequenzspektrum in Abb. 6 eindeutig zugeordnet werden. Im zeitlichen Mittel ergibt sich aus diesen Bewegungsmustern eine rotatorische Bewegung im Tropfen, die entgegen dem Uhrzeigersinn läuft und an der Tropfenoberkante entgegen der Anströmrichtung verläuft (Abb. 6c).

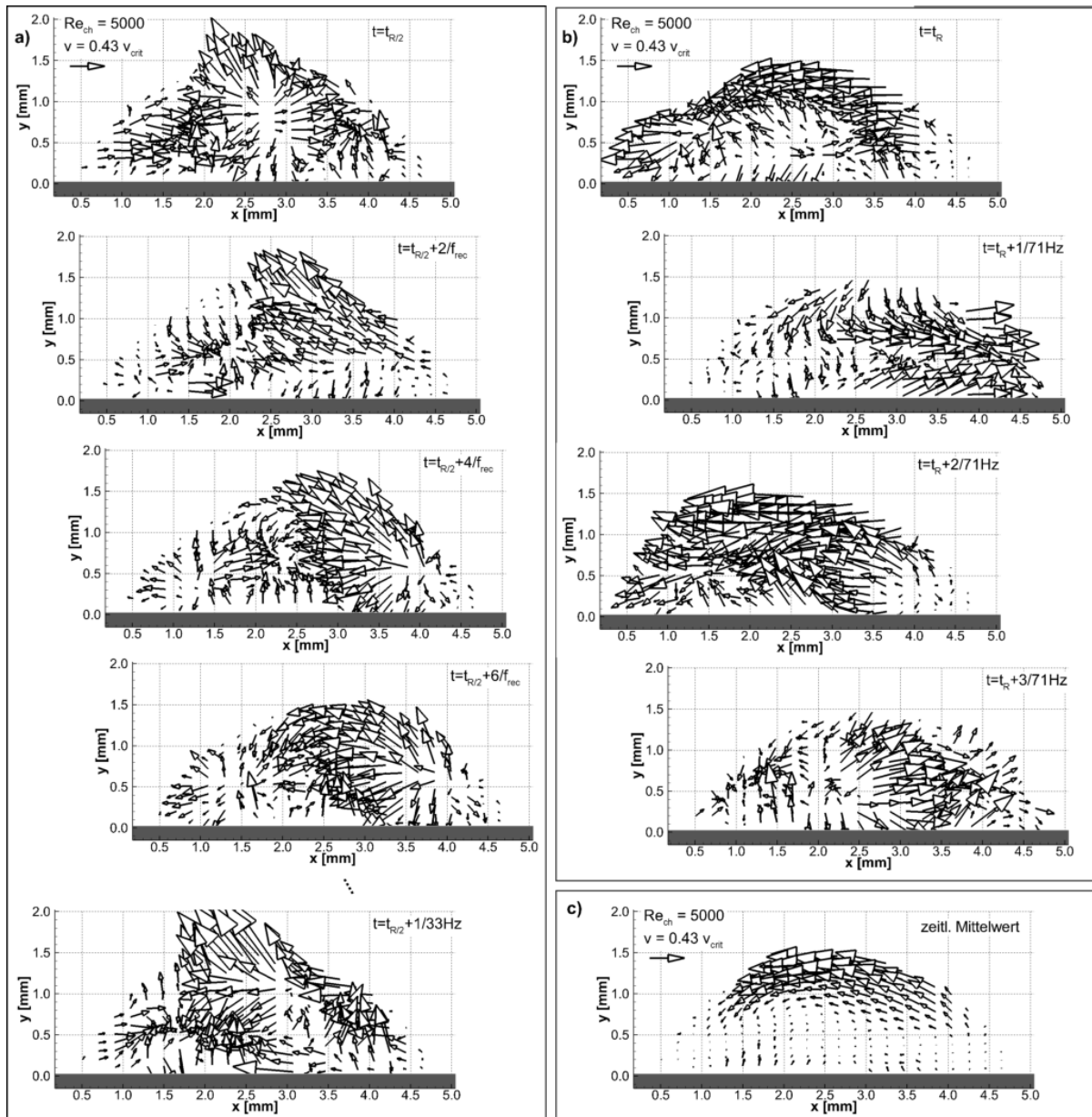


Abb. 7: Ergebnisse der PIV-Messung der Innenströmung eines 15 µl-Tropfens (Aufnahmefrequenz $f_{rec} = 922$ Hz): a) zeitliche Sequenz des „Schwappens“ mit etwa 33 Hz, b) Beispiele für die horizontale Oszillation mit 71 Hz, c) zeitlich gemitteltes Strömungsfeld im Tropfen.

Die PIV-Ergebnisse zeigen, dass sowohl das mittlere Strömungsbild als auch die Mehrzahl der Einzelaufnahmen des Geschwindigkeitsfeldes eine starke Strömung im Tropfen entgegen der Anströmung aufweisen (Abb. 7). Es ist daher zu vermuten, dass das Strömungsfeld um den Tropfen, wie auch in Wood et al. (2017) für eine flexible Halbkugel festgestellt, von

einem Ablösegebiet dominiert wird. Eine Vermessung des Strömungsfeldes um den Tropfen erfolgte mittels Heißfilmsonde. Die Ergebnisse werden im Folgenden gezeigt.

Untersuchungen zur Strömungsinstabilität

Zur genaueren Untersuchung des Nachlaufs der Tropfenumströmung wurden Heißfilm-Messungen durchgeführt. In Abb. 8 a) sind die gemessenen Geschwindigkeitsprofile vor dem Tropfen und 1 mm bzw. 3 mm nach dem Tropfen dargestellt. Man erkennt einen signifikanten Sprung im Geschwindigkeitsprofil, d.h. die Ausbildung einer Scherschicht, welche im weiteren Verlauf stromab vom Tropfen weniger stark konturiert ist. Die zugehörigen Turbulenzintensitäten sind in Abb. 8 b) gezeigt: im Bereich des Geschwindigkeitssprungs hinter dem Tropfen sind signifikant erhöhte Schwankungsintensitäten gemessen worden. Im weiteren Verlauf nach dem Tropfen ist ein Abklingen dieser Schwankungsintensitäten zu beobachten. Es ist zu vermuten, dass im Bereich der Tropfenoberkante eine Scherschicht ablöst, welche erhöhter Geschwindigkeitsfluktuation unterliegt.

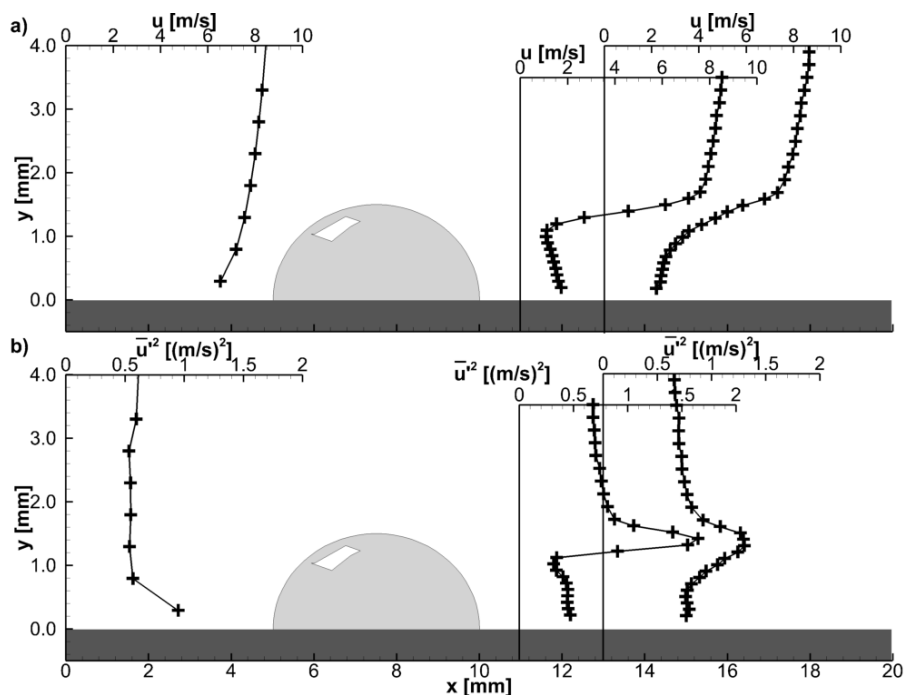


Abb. 8: a) Gemessene Geschwindigkeitsprofile und b) ermittelte zugehörige Turbulenzintensitäten für einen 15 μ l-Tropfen bei einer Anströmung von $v = 0,66 \cdot v_{\text{crit}}$ ($Re_{\text{ch}} = 7800$)

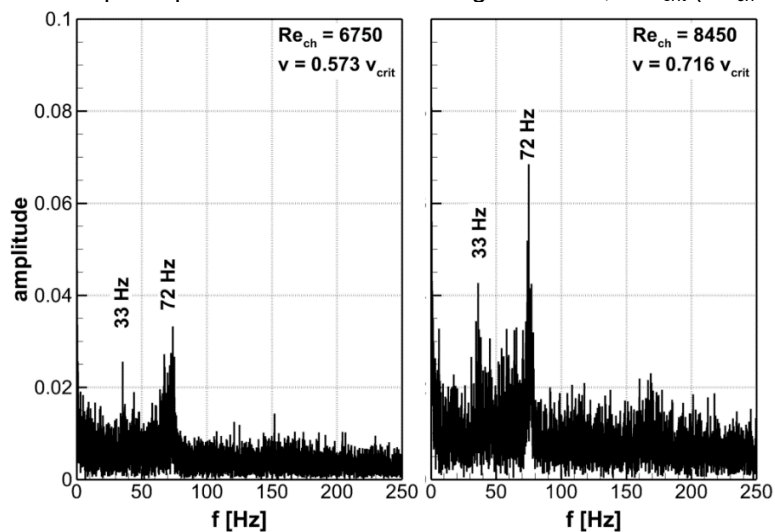


Abb. 9: Frequenzspektren des Heißfilmsignals hinter dem Tropfen

Das gemessene Geschwindigkeitssignal in Höhe der abgelösten Scherschicht, d.h. im Bereich der größten Turbulenzintensitäten wurde ebenfalls mittels FFT untersucht. Das Ergebnis ist in Abb. 9 dargestellt. Man erkennt auch hier deutlich die bereits in den Untersuchungen zur Konturoszillation und der Strömungsozillation im Tropfen festgestellten charakteristischen Frequenz-Peaks bei 33 Hz und 72 Hz. D.h. die Strömungsozillation in der Scherschicht erfolgt mit denselben Frequenzen wie die Oszillation des Tropfens selber. Berechnet man nun die Strouhal-Zahl dieser Oszillation mittels der Tropfenbreite d und der Geschwindigkeit in Höhe der Tropfenoberkante u ,

$$St = \frac{f \cdot d}{u}$$

erhält man die Werte $St_{33\text{ Hz}} = 0,021$ und $St_{72\text{ Hz}} = 0,046$. Diese Werte liegen deutlich unterhalb der Strouhalzahl von 0,13-0,2, wie man sie für die Umströmung eines festen Zylinders mit angebrachter Trennplatte in der Symmetrieebene im Nachlauf für diesen Reynoldszahlbereich erwarten würde (vgl. Abdi et al., 2017 oder Apelt et al. 1973, 1975).

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Strömungsinstabilitäten eines haftenden Tropfens unter Anströmung mit Hilfe verschiedener Methoden untersucht. Die Oszillation des Tropfens selbst wurde mittels zeitaufgelöster Konturvermessung untersucht, das korrespondierende Strömungsfeld im Tropfen mittels zeitaufgelöster PIV-Messungen analysiert und das Strömungsfeld im Nachlauf des Tropfens mittels Heißfilmsonde vermessen. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass sich im untersuchten Reynoldszahlbereich ein großes Rezirkulationsgebiet im Nachlauf des Tropfens bildet, d.h. dass die Strömung vermutlich an der Oberkante des Tropfens abgelöst. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Wood & Breuer (2016 und 2017) für die Umströmung einer starren und einer flexiblen Halbkugel. Es bildet sich also auch bei der Tropfenumströmung eine Scherschicht aus, die sich aufrollt, so dass im direkten Nachlauf des Tropfens eine Fluidbewegung entgegen der Anströmrichtung entsteht und so das Fluid im Tropfen entgegen der Anströmrichtung transportiert, so wie die Ergebnisse der PIV-Messung der Tropfeninnenströmung zeigen.

In allen drei Messungen (Konturoszillation, Tropfeninnenströmung und Nachlaufströmung) konnten dieselben typischen, charakteristischen Frequenzen der Oszillation gefunden werden. Es zeigt sich, dass der Tropfen eine „schwappende“ Bewegung vollführt, die mit etwa der halben Eigenfrequenz des Tropfens erfolgt. Darüber hinaus kann eine horizontale Oszillation festgestellt werden, die etwa die Eigenfrequenz des Tropfens aufweist. Beide Frequenzen sind ebenfalls charakteristische Frequenzen der Scherschichtoszillation im Tropfennachlauf. Im Gegensatz zu dem von Wood & Breuer (2017) untersuchten Fall der flexiblen Halbschale kann in diesem Fall für alle charakteristischen Frequenzen des Spektrums eine direkte Korrelation zwischen Strömungsschwankung im Nachlauf und der Konturoszillation gefunden werden. Die korrespondierenden Strouhal-Zahlen der Scherschichtoszillation liegen bei $St = 0,021$ und $St = 0,046$. Auch Wood & Breuer (2017) stellten für die flexible Halbschale fest, dass die Strouhalzahl mit $St = 0,165$ gegenüber der zu erwartenden Strouhalzahl der Umströmung eines festen Körpers ($St = 0,2$) reduziert ist. In diesem Falle liegt der Wert aber im Bereich der Strouhalzahl von 0,13-0,2, wie man sie für die Umströmung eines festen Zylinders mit angebrachter Trennplatte in der Symmetrieebene im Nachlauf für diesen Reynoldszahlbereich erwarten würde (vgl. Abdi et al., 2017 oder Apelt et al. 1973, 1975). In unserer Untersuchung sind die Strouhal-Zahlen noch einmal deutlich reduziert. Es ist zu vermuten, dass die starke Oszillation des Tropfens und unter Umständen auch die direkte Kopplung zwischen Außenströmung und innerer Strömung im Tropfen für eine Veränderung des Spektrums sorgt.

Messungen an Tropfen mit unterschiedlichem Glyzeringehalt, d.h. stark veränderlicher Viskosität, zeigten (Burgmann et al., 2018), dass die erhöhte Zähigkeit die Amplituden der Tropfenoszillation dämpfen, das Spektrum allerdings hinsichtlich der charakteristischen Frequenzen nicht ändern. Hier sind daher weitere Untersuchungen zum Strömungsnachlauf hinter

dem Tropfen notwendig, um den Einfluss der Amplituden der Konturoszillation auf die Strömungsfluktuation zu analysieren.

Literatur

- Abdi, R., Rezazadeh, N., Abdi, M., 2017:** „Reduction of fluid forces and vortex shedding frequency of a circular cylinder using rigid splitter plates”, European Journal of Computational Mechanics, 26(3), 225-244
- Apelt, C.J., West, G.S., Szewczyk, A.A., 1973:** “The effects of wake splitter plates on the flow past a circular cylinder in the range $10^4 < R < 5 \cdot 10^4$,” J. Fluid Mech. 61, 187
- Apelt, C.J., West, G.S., 1975:** “The effects of wake splitter plates on bluffbody flow in the range $10^4 < R < 5 \cdot 10^4$: Part 2” J. Fluid Mech. 71, 145
- Barwari, B., Burgmann, S., Bozkurt, F., Janoske, U., 2018a:** „Untersuchung der Dynamik von Tropfen in einem Rechteckkanal unter Einfluss von Anströmung und Vibration“, Jahrestreffen ProcessNet Fachgruppe „Mehrphasenströmungen“, Bremen, 6.-7. März 2018
- Barwari, B., Burgmann, S., Janoske, U., 2018b:** “Deformation and movement of adhering droplets in shear flow”. 5th Int. Conf. on Experimental Fluid Mechanics, München, 2.-4. Juli 2018
- 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
- Burgmann S., Barwari B., Maurer T., Janoske U., 2017:** „Hydrodynamische Instabilitäten eines Tropfens auf einer Platte unter Anströmung und Vibration“, Fachtagung “Experimentelle Strömungsmechanik”, GALA17, Ettlingen bei Karlsruhe, 5.–7. September 2017
- Lamb, H., 1932:** Hydrodynamics. Cambridge University Press, UK
- Lin, Z., Peng, X., Wang, X., 2006:** Oscillation characteristics of droplets on solid surfaces with air flow. Heat Transfer - Asian Research, 35(1): 13–19
- Maurer, T., 2017:** „Experimentelle und numerische Untersuchung der Tropfenbewegung unter Einfluss von äußeren Kräften“, Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik, 978-3-8440-5135-3, Shaker Verlag
- Seevaratnam, G.K., Ding, H., Michel, O., Heng, J.Y.Y., Matar, O.K., 2010:** “Laminar flow deformation of a droplet adhering to a wall in a channel”, Chemical Engineering Science, 65(16): 4523-4534
- Wood, J.N., Breuer, M., 2016:** “Complementary Experimental–Numerical Investigation of the Flow past a Rigid and a Flexible Hemisphere in Turbulent Flow: Part I: Experimental Measurements”, Fachtagung “Experimentelle Strömungsmechanik”, GALA16, Cottbus, 6.–8. September 2016
- Wood, J.N., Breuer, M., 2017:** “Studies on the Fluid-Structure Interaction of a Pressurized Membranous Hemisphere in Turbulent Flow”, Fachtagung “Experimentelle Strömungsmechanik”, GALA17, Ettlingen bei Karlsruhe, 5.–7. September 2017

