

Hydrodynamische Instabilitäten eines Tropfens auf einer Platte unter Anströmung und Vibration

Hydrodynamic instabilities of a droplet on a plate influenced by flow and vibration

S. Burgmann, B. Barwari, T. Maurer, U. Janoske

Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42097 Wuppertal

Tropfenbewegung, Benetzung, Anströmung, Vibration, numerische Simulation
droplet movement, wettability, incoming flow, vibration, numerical simulation

Zusammenfassung

Eine Vielzahl von Maschinen und Anlagen wird unter Umweltbedingungen betrieben, bei denen es zu Kondensation von Wasser in Form von Tröpfchen auf oder in den Maschinenteilen kommen kann. Dabei können die Vibrationen der Maschinen und Anlagen zu einem Tropfentransport führen, wodurch eine Schädigung oder Blockade von Teilen der Maschine oder Anlage eintreten kann.

In diesem Beitrag wird über grundlegende Untersuchungen zum Verhalten von Tropfen auf Oberflächen berichtet, welche unter dem Einfluss einer Anströmung und einer Oberflächenvibration stehen. Der erweiterte Ansatz dieses Forschungsprojektes ist es, die Tropfenbewegung unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen (Geometrien, Strömung, Vibration, etc.) zu simulieren. Auf diese Weise kann eine Identifizierung gefährdeter Bereiche und Strukturen bereits im Auslegungs- und Konstruktionsprozess gelingen.

Die Versuche werden in einem Plexiglas-Kanal durchgeführt, der eine bewegliche Wand aufweist, die unter Vibration gesetzt werden kann. Die Wand kann zusätzlich aus unterschiedlich benetzbaren Materialien gefertigt werden. Die Kanalhöhe kann verändert werden, so dass der Einfluss des Geschwindigkeitsgradienten an der Wand im Verhältnis zur Tropfengröße untersucht werden kann. Das Strömungsfeld im Tropfen unter Anströmung wird mittels PIV-Technik vermessen.

Die Experimente zeigen, dass generell die kritische Geschwindigkeit v_{krit} zum Lösen eines Tropfens mit zunehmendem Volumen kleiner wird. Analysen verschiedener Kanalgeometrien unter Berücksichtigung von Messwerten aus der Literatur zeigen, dass die üblicherweise verwendete mittlere Geschwindigkeit, die sich rechnerisch aus dem Volumenstrom und der Kanalquerschnittsfläche ergibt, zur Beschreibung nicht ausreicht. Die entscheidende Geschwindigkeit zum Loslösen des Tropfens ist die Geschwindigkeit in Höhe der Tropfenoberkante, d.h. der Geschwindigkeitsgradient muss Berücksichtigung finden.

PIV-Messungen der Tropfeninnenströmung zeigen ausgeprägte Geschwindigkeitsfluktuationen. Für stark fluktuierende Tropfen kurz vor der Ablösung ergibt sich dabei im zeitlichen Mittel eine Rotation entgegen der Anströmung, die mit Steigerung der Anströmungsgeschwindigkeit ausgeprägter wird.

Einleitung

Viele Maschinen und Anlagen werden unter unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen eingesetzt, die in der Regel vom Betreiber nicht kontrolliert werden können. Ein typisches Problem ist dabei die Kondensation von Wasser in Form von Tröpfchen, die sich auf den Oberflächen der Maschine oder Anlage niederschlagen können. Oftmals treten beim Betrieb der Aggregate Vibrationen auf. Im Zusammenspiel mit einer Luftströmung über die Oberflächen kann es dazu kommen, dass die Tropfen bewegt werden und so an kritische Stellen der Maschine oder Anlage gelangen. Die Tropfen können so zu einer Schädigung oder Blockade von Funktionalitäten führen. Es ist bekannt, dass unter Anströmung Tropfen mit einer höheren Masse eine sichtbare oszillierende Konturdeformation aufweisen, im Gegensatz zu Tropfen mit deutlich kleineren Volumina (Lin et al. (2006)). Die kritische Geschwindigkeit, bei der ein Tropfen ablöst, hängt sowohl von der Kontaktwinkelhysterese als auch vom Tropfenvolumen ab (Fan et al. (2011)). Brunet et al. (2007) betrachten das Tropfenverhalten unter Einfluss ungleichförmiger Schwinganregung. Sie stellen fest, dass ein Tropfen auf Grund einer Vibrationsanregung nicht nur die Kontaktwinkelhysterese überwinden kann, sondern auch die Gravitationskraft. Dennoch ist das Verhalten von Tropfen unter Anströmung und Vibration noch nicht vollständig verstanden. Ziel muss es aber sein, die Tropfenbewegung unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen (Geometrien, Strömung, Vibration, etc.) zu simulieren, um so eine Identifizierung gefährdeter Bereiche und Strukturen bereits im Auslegungs- und Konstruktionsprozess zu ermöglichen.

Um die Tropfenbewegung simulieren zu können, ist eine Vielzahl von grundlegenden experimentellen Untersuchungen erforderlich, um zum einen das Tropfenverhalten zu beschreiben und zum anderen entsprechende Randbedingungen für eine Modellierung zu gewinnen. Neben dem statischen Kontaktwinkel, der sich unter Gleichgewichtsbedingungen ergibt, existiert auf realen Oberflächen aufgrund von z.B. Rauheit nicht nur ein (statischer) Kontaktwinkel, sondern ein mehr oder weniger großer Bereich an Kontaktwinkeln. Dieser Bereich wird als Kontaktwinkelhysterese bezeichnet und wird durch den Fortschritt- und den Rückschreitwinkel definiert. Eine Modellierung der Tropfenbewegung ist insbesondere innerhalb dieser Kontaktwinkelhysterese problematisch.

Die Anströmung des Tropfens bewirkt eine innere Strömung (Horton et al. (1965)). Darüber hinaus beginnt ein Tropfen aber schon allein unter Anströmung zu oszillieren. Es entstehen Instabilitäten, die zu einer zeitlichen Veränderung der Tropfengeometrie führen und eine Fluktuation der Strömung im Tropfen zur Folge haben. Um auch diese Phänomene in einer numerischen Simulation nachbilden zu können, sind Untersuchungen der Tropfeninnenströmung erforderlich, beispielsweise mit Hilfe laser-optischer Strömungsmessverfahren wie der Particle-Image Velocimetry (PIV).

Experimentelle Untersuchungen zur Tropfenbewegung

Um ein verbessertes Verständnis der Tropfenbewegung unter Anströmung und Vibration zu erreichen, sind grundlegende Untersuchungen erforderlich; es müssen folgende Fälle vermessen werden:

- Tropfen unter Gravitationseinfluss
- Tropfen im Scherfeld einer Anströmung
- Tropfen unter Vibration
- Überlagerung von Vibration und Anströmung

Bei der Tropfenbewegung, d.h. Tropfen unter Schwerkräfteinfluss oder auch unter Anströmung, deformiert der Tropfen und es bilden sich die bereits erwähnten Fortschritt- und

Rückschreitwinkel aus. In Neigeversuchen werden diese und der statische Kontaktwinkel für Tropfen verschiedener Größe bei Variation der Rotationsgeschwindigkeit bestimmt. Aus diesen Ergebnissen für den Tropfen unter Schwerkrafteinfluss werden die Randbedingungen für die Modellierung der Tropfenbewegung außerhalb der Kontaktwinkelhysterese definiert. Der Neigeversuch ist so aufgebaut, dass der Tropfen auf einer Acrylglasplatte appliziert werden kann, die an einem drehbar gelagerten Rohr befestigt ist. Das Rohr kann über Zahnscheiben und Zahnriemen mittels eines Schrittmotors gedreht werden, so dass sich die Neigung der Acrylglasplatte verändert. Der Tropfen kann durch das Rohr hindurch von hinten beleuchtet werden, so dass eine kontrastreiche Abbildung des Tropfens mit einer Kamera zwecks automatischer Kanten- und Kontaktwinkeldetektion erreicht werden kann (Maurer et al., 2016).

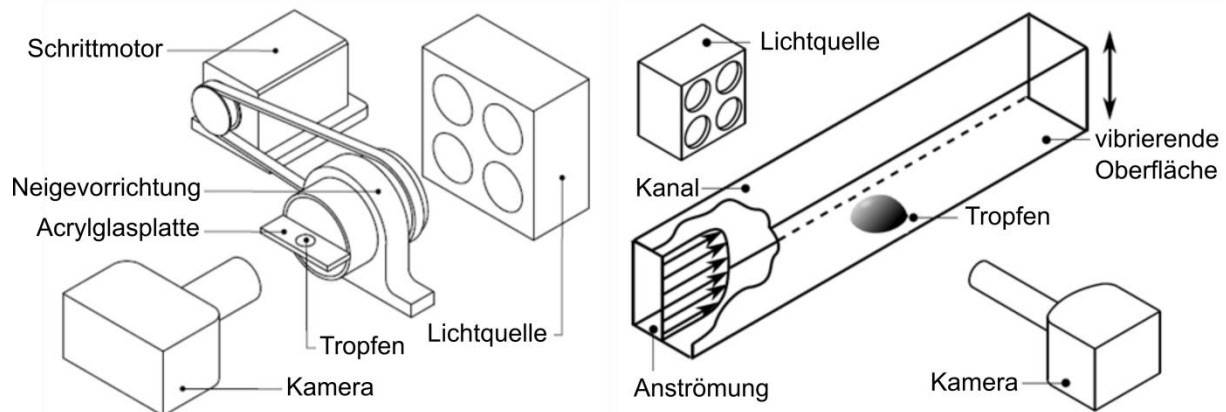


Abb. 1: Darstellung des Neigeversuchs und des Versuchsstand zur Vermessung des Tropfens unter Anströmung und Vibration

Darüber hinaus wird ein Versuchsstand aufgebaut, der aus einem Strömungskanal besteht, der eine bewegliche Wand aufweist, die unter Vibration gesetzt werden kann (Maurer & Janoske, 2015a). Der Kanal ist aus Plexiglas gefertigt, so dass das Tropfenverhalten unter Anströmung und Vibration mittels Kamera-Technik analysiert und beispielsweise das Geschwindigkeitsprofil der Anströmung oder die Strömung im Tropfen mittels PIV-Technik vermessen werden kann. Die Kanalhöhe kann dabei verändert werden, so dass der Einfluss des Geschwindigkeitsgradienten an der Wand im Verhältnis zur Tropfengröße untersucht werden kann. Zusätzlich kann die Wand ausgetauscht werden, so dass unterschiedliche Benetzungseigenschaften berücksichtigt werden können.

In einer Reihe von Versuchen wurde zunächst das Ablöseverhalten von unterschiedlich großen Wassertropfen auf Acrylglas unter Anströmung ohne Vibration untersucht. Dabei wurde bei den Versuchen die Anströmgeschwindigkeit kontinuierlich erhöht. Ab einer bestimmten mittleren Anströmgeschwindigkeit v_{krit} löst sich der Tropfen und wird stromab transportiert. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Ergebnisse für einen 20 μ l großen Tropfen gezeigt. Wie in Abbildung 2 zu erkennen, setzt schon bei geringen Anströmgeschwindigkeiten eine Oszillation des Tropfens ein; dabei verändern sich sowohl der Fortschritt- als auch der Rückschreitwinkel. Gleichzeitig wird der Tropfen deformiert und der vordere und der hintere Konturpunkt bewegen sich. Eine Bewegung des Tropfens im Sinne eines Transports in Strömungsrichtung findet aber erst zu einem späteren Zeitpunkt statt; sie ist als der Zeitpunkt definiert, bei dem sich der vordere und der hintere Konturpunkt mit derselben Geschwindigkeit bewegen (Abb. 3). Für weitere detaillierte Ergebnisse sei auf die entsprechende Dissertationsschrift verwiesen (Maurer, 2017).

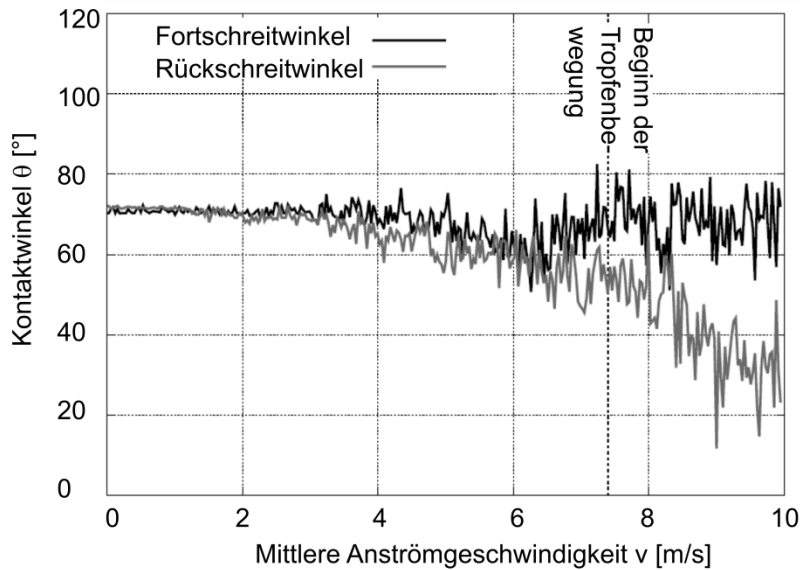


Abb. 2: Oszillation eines 20 μ l-Tropfens unter Anströmung

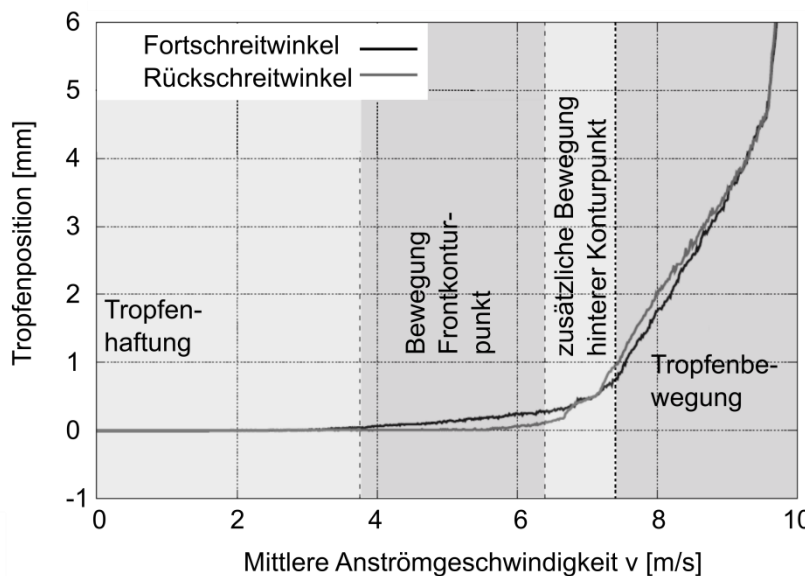


Abb. 3: Bewegungsprofil eines 20 μ l-Tropfens unter Anströmung

Festzuhalten bleibt, dass für zunehmende Tropfengröße die kritische Anströmgeschwindigkeit, die zum Loslösen des Tropfens führt, sinkt (vgl. Maurer & Janoske, 2015b). Dabei ist der Geschwindigkeitsgradient über die Tropfenhöhe von entscheidender Bedeutung. Typischerweise wird als Bezugsgröße die mittlere Geschwindigkeit verwendet, die sich rechnerisch aus dem Volumenstrom und der Querschnittsfläche des Kanals ergibt (vgl. Fan et al. (2011)). Dieser Wert reicht allerdings für eine präzise Beschreibung des Tropfenloslösen nicht aus. Daher wurde hier der Einfluss der Geschwindigkeitsprofile untersucht, in dem die Kanalhöhe verändert wurde. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für eine Kanalhöhe von 30 mm und 20 mm (die Kanalbreite ist in diesem Fall konstant bei 22 mm). Zusätzlich sind die Ergebnisse aus Fan et al. (2011) eingetragen, wo ein Kanal mit einer Höhe von 20 mm und einer Breite von 80 mm mit ähnlichen Benetzungseigenschaften verwendet wurde. Durch die unterschiedlichen Kanalquerschnittsflächen ist der kritische Anströmvolumenstrom \dot{V} , der zum Loslösen des Tropfens führt, verständlicherweise unterschiedlich und nimmt mit zunehmendem Kanalquerschnitt zu (Abb. 4 b). Wird nun gemäß $\dot{V} = v \cdot A$ die mittlere Geschwindigkeit v berechnet und als kritische Größe herangezogen, zeigt sich ein stark uneinheitliches Bild (Abb. 4 b): bei dem hier untersuchten 20 mm-Kanal erhält man so höhere kritische Geschwindigkeiten, als beim 30 mm-Kanal, was aufgrund der sich ausbildenden voll-

turbulenten Geschwindigkeitsprofile im Kanal widersprüchlich erscheint. Nimmt man die Ergebnisse von Fan et al. (2011) noch mit hinzu, erhält man wiederum kleinere kritische Geschwindigkeiten. Entscheidend für das Loslösen des Tropfens kann nur die Geschwindigkeitsverteilung sein, die sich über die Höhe des Tropfens ausbildet. Hierzu muss für die unterschiedlichen Kanalformen das Strömungsprofil entsprechend gemessen werden. An dieser Stelle wird als kritische Geschwindigkeit für das Loslösen des Tropfens, die Geschwindigkeit interpretiert, die an einer Position auf Höhe der Tropfenoberkante mittels Hitzkugelsonde gemessen werden konnte. Wie Abb. 4 c) entnommen werden kann, nähern sich die Kurven für einen 20 mm- und einen 30 mm-Kanal wie zu erwarten an. Die verbleibenden Abweichungen liegen im Rahmen der Messgenauigkeit. Gerade hinsichtlich der Vibration der Oberfläche und der Oszillation des Tropfens selber sind jedoch weitere präzise Messungen erforderlich.

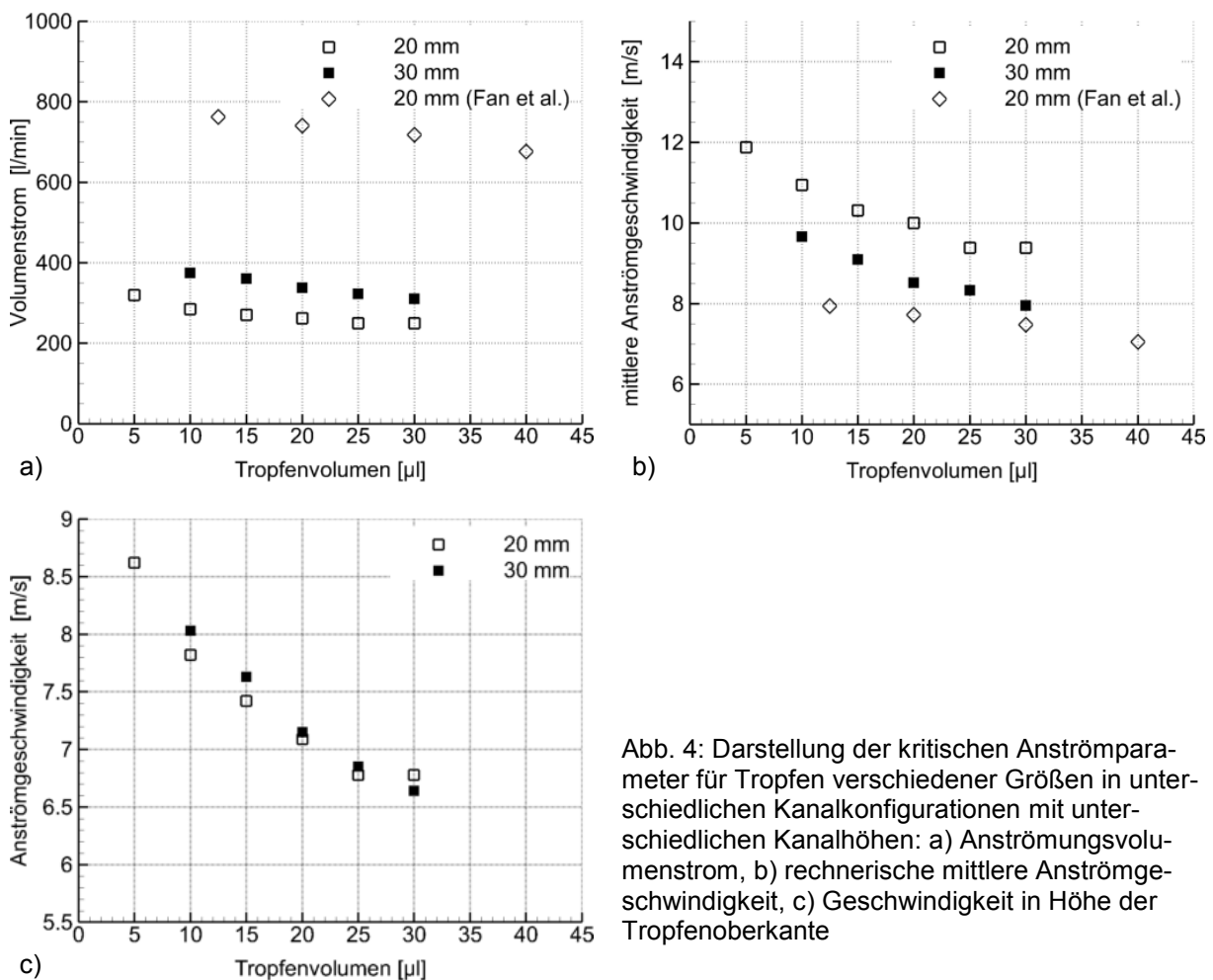


Abb. 4: Darstellung der kritischen Anströmparameter für Tropfen verschiedener Größen in unterschiedlichen Kanalkonfigurationen mit unterschiedlichen Kanalhöhen: a) Anströmungsvolumenstrom, b) rechnerische mittlere Anströmgeschwindigkeit, c) Geschwindigkeit in Höhe der Tropfenoberkante

PIV-Messungen im angeströmten Tropfen

Wie bereits beschrieben, tritt beim angeströmten Tropfen bereits vor dem Loslösen eine Oszillation auf. Die Veränderung der Kontur des Tropfens konnte bereits gut in der numerischen Simulation beschrieben werden. Allerdings sind hier noch Fragestellungen offen. Von besonderem Interesse ist das instationäre Strömungsfeld innerhalb eines angeströmten Tropfens bei Auftreten von Oszillationen und dessen Interaktion mit der Anströmung. Die Strömung innerhalb eines (annähernd) sphärischen Tropfens wurde bislang nur von wenigen Forschergruppen quantitativ untersucht (Minor et al. (2008), Kang et al. (2004)). In diesem Projekt wurde ein erster Versuch unternommen, die Strömung in einem oszillierenden Tropfen

fen zu bestimmen. Das verwendete PIV-Messsystem besteht aus einem Infrarot-Diodenlaser mit $\lambda=805$ nm und 50 W Leistung sowie einer 8 bit HCC1000 CMOS-Hochgeschwindigkeits-Kamera mit 1024 x 1024 Pixeln. Das Laserlicht wird über einer Zylinderlinsen-Optik zu einem Lichtschnitt geformt und über ein Prisma umgelenkt. Der Lichtschnitt hat dabei eine Dicke von unter 1 mm. Die für die PIV-Technik erforderlichen Tracerpartikel werden vor Versuchsbeginn in die Flüssigkeit (Wasser) gemischt. Es werden Polystyren-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. So kann gewährleistet werden, dass trotz des relativ dicken Lichtschnitts im Verhältnis zur Tropfengröße auf die Mittelebene des Tropfens fokussiert werden kann. Die Partikel auf der Tropfenoberfläche sind außerhalb des Fokus und können über Bildbearbeitung eliminiert werden. Es verbleiben jedoch überstrahlte Bereiche auf der Tropfenoberfläche, die die Partikeldetektion im Tropfen behindern (ausgeblendete Bereiche in der Tropfenmitte in Abb. 7).

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der zeitlichen Mittelung der Tropfeninnenströmung über jeweils 1022 Einzel-Vektorbilder. Man erkennt deutlich, dass innerhalb des Tropfens eine Rotationsbewegung entsteht. Bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten entsteht im zeitlichen Mittel eine großskalige Rotation im Uhrzeigersinn (bei Anströmung von links).

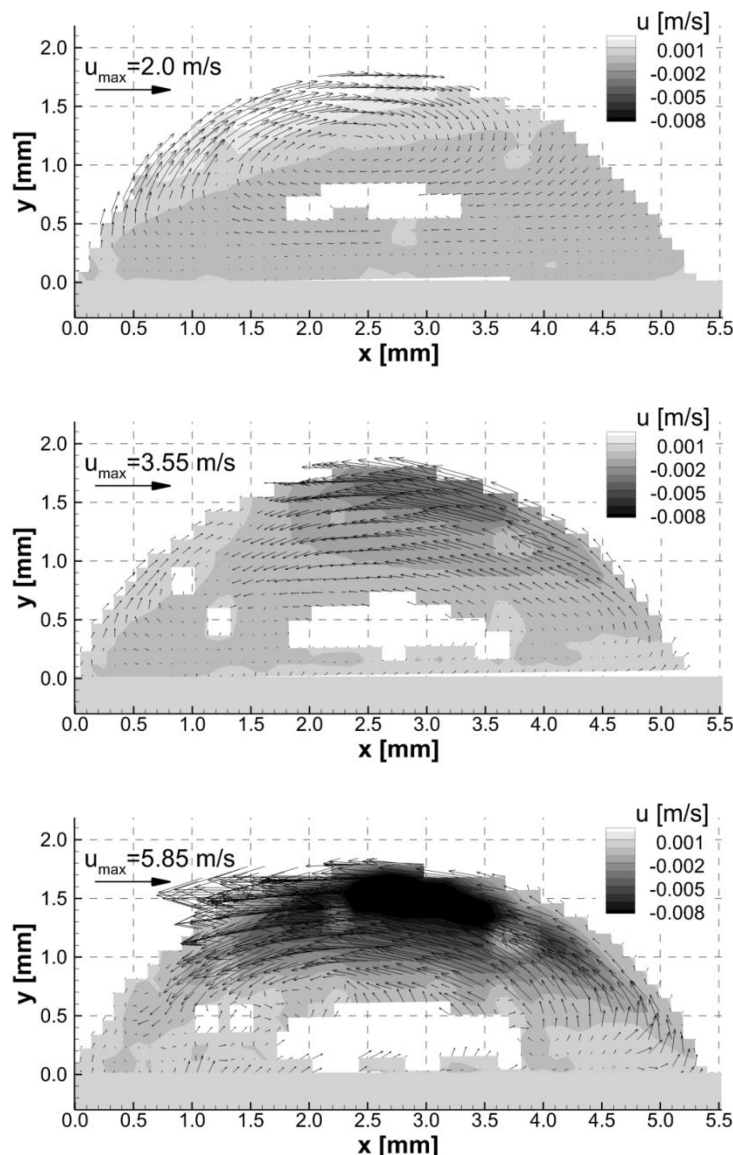


Abb. 7: zeitlich gemittelte Strömungstopologie in der Mittelebene eines angeströmten $20 \mu\text{l}$ -Tropfens für steigende Anströmgeschwindigkeiten: bei 27% (oben), bei 48% (Mitte) und bei 80% (unten) der Ablösegeschwindigkeit

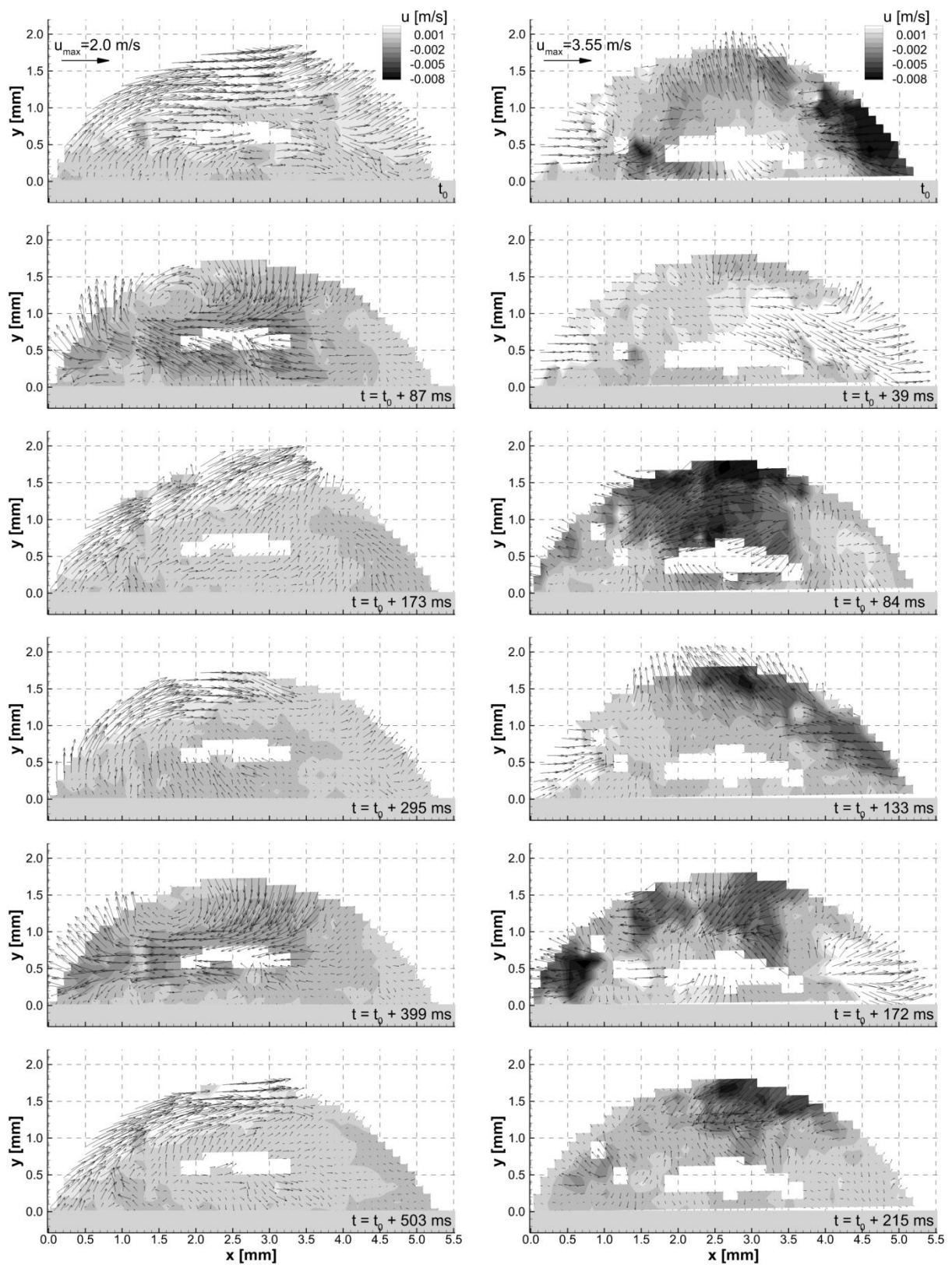


Abb. 8: Einzelbilder der Geschwindigkeitsverteilung in der Mittelebene eines angeströmten 20 μ -Tropfens für steigende Anströmgeschwindigkeiten: bei 27% (links) und bei 48% (rechts) der Ablösegeschwindigkeit

Erhöht man die Anströmgeschwindigkeit verstärkt sich die Tropfenoszillation und die Strömung im Tropfen verändert sich. In der Mittelebene entsteht ein Wirbelpaar: Auf der Anströmseite ein Wirbel im Uhrzeigersinn, auf der Abströmseite ein gegenläufiger Wirbel, welcher mit zunehmender Geschwindigkeit immer größer wird und den Wirbel auf der Anströmseite verdrängt. D.h. es entsteht im Tropfen eine signifikante oberflächennahe Strömung, die der Anströmrichtung entgegengesetzt ist. Einzelaufnahmen des zeitlichen Strömungsverlaufs im Tropfen (Abb. 8 und 9) zeigen, dass im Tropfen eine zyklische Bewegung entsteht, wobei bei höheren Geschwindigkeiten eine deutliche Zunahme der Dynamik zu beobachten ist. Neben einer horizontalen Oszillation nimmt für höhere Anströmgeschwindigkeiten auch die vertikale Oszillation zu, was sich auch im Geschwindigkeitsfeld bemerkbar macht. Insgesamt lässt das Strömungsbild im Mittelschnitt des Tropfens vermuten, dass es sich um eine ausgeprägte dreidimensionale Strömung im Tropfen handelt. Weitere Untersuchungen sind notwendig, auch um die Interaktion des Strömungsfeldes um den Tropfen mit der Tropfenoszillation bzw. -innenströmung in einen Zusammenhang zu bringen.

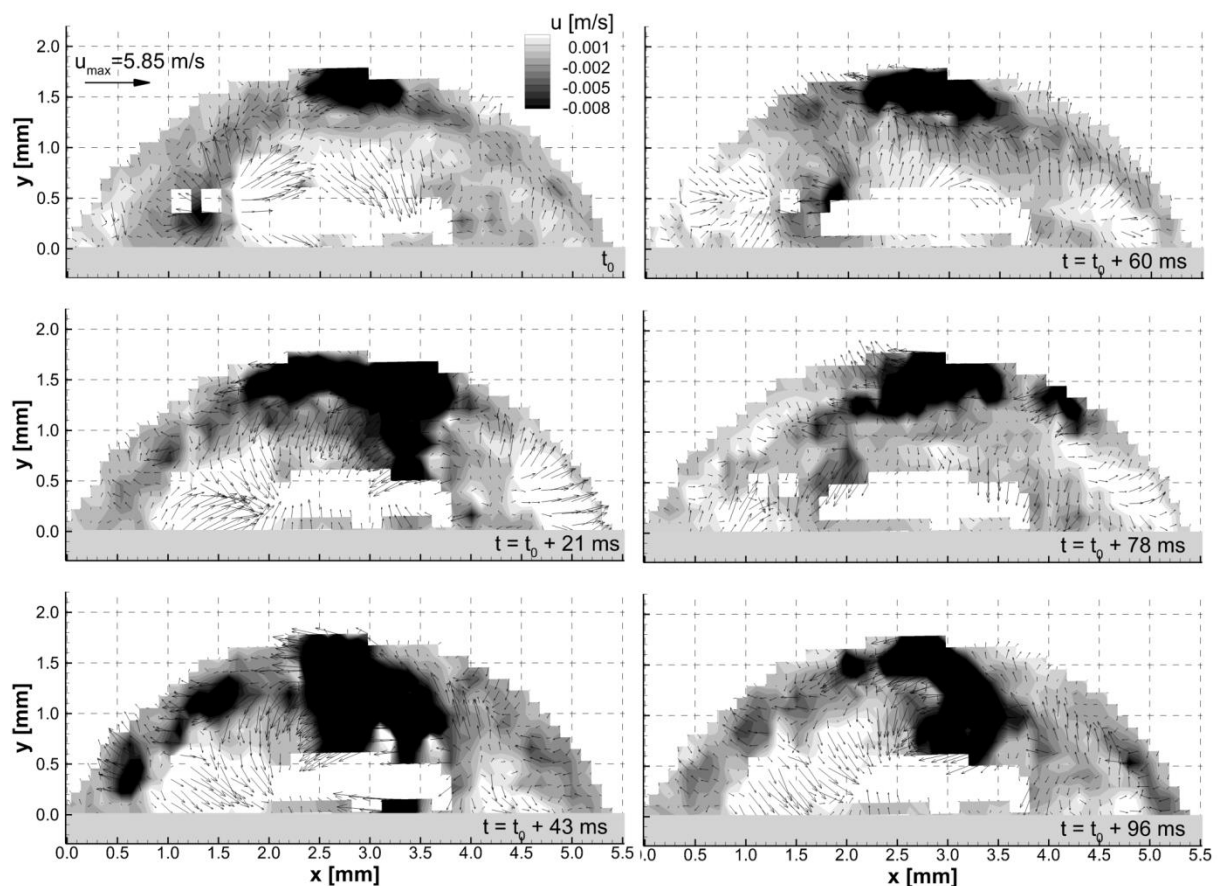


Abb. 9: Einzelbilder der Geschwindigkeitsverteilung in der Mittelebene eines angeströmten 20 μ -Tropfens für 80 % der Ablösegeschwindigkeit

Zusammenfassung und Ausblick

In grundlegenden Untersuchungen wird das Verhalten von Tropfen auf Oberflächen unter dem Einfluss einer Anströmung und einer Oberflächenvibration analysiert. Die Messungen dienen zum einen einem verbesserten Verständnis der Tropfenbewegung und zum anderen zur Identifikation von Eingangsparametern für eine numerische Modellierung und zur Validierung der Simulation. Ziel ist es, die Tropfenbewegung unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen (Geometrien, Strömung, Vibration, etc.) zu simulieren, um bereits im

Auslegungs- und Konstruktionsprozess Tropfenwanderungen zu berücksichtigen und so eine Identifizierung gefährdeter Bereiche und Strukturen zu ermöglichen.

Kern der Versuche ist ein Plexiglas-Kanal, der eine bewegliche Wand aufweist, die unter Vibration gesetzt werden kann. Die Wand kann zusätzlich aus unterschiedlich benetzbaren Materialien gefertigt werden. Die Kanalhöhe kann verändert werden, so dass der Einfluss des Geschwindigkeitsgradienten an der Wand im Verhältnis zur Tropfengröße untersucht werden kann. Das Strömungsfeld im Tropfen unter Anströmung wird mittels PIV-Technik vermessen.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die kritische Geschwindigkeit v_{krit} zum Lösen eines Tropfens mit zunehmendem Tropfenvolumen kleiner wird. Weitere Ergebnisse der entsprechenden Dissertation (Maurer, 2017) zeigen, dass die kritische Geschwindigkeit v_{krit} außerdem mit steigender Vibrationsbeschleunigung sinkt und im Bereich der Eigenfrequenz des Tropfens die kritische Geschwindigkeit v_{krit} am geringsten ist.

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass die entscheidende Geschwindigkeit zum Loslösen des Tropfens die Geschwindigkeit in Höhe der Tropfenoberkante ist, d.h. der Geschwindigkeitsgradient Berücksichtigung finden muss. Hier sind jedoch weitere Untersuchungen mit höherer örtlicher Auslösung notwendig. PIV-Messungen der Tropfeninnenströmung zeigen ausgeprägte Fluktuationen und eine Rotation entgegen der Anströmung für stark fluktuierende Tropfen kurz vor der Ablösung. Wie schon in Minor et al. (2008) und Kang et al. (2004) beschrieben, ist ein besonderes Problem der PIV-Messung in einem Tropfen die Lichtbrechung an der Tropfenoberfläche, wodurch sich die detektierte Partikelverschiebung im Tropfen von der realen Verschiebung unterscheidet. Möglich ist der Einsatz einer Ray-Tracing-Korrektur, wie sie von den genannten Autoren bereits für runde Tropfen entwickelt wurde. Bei oszillierenden Tropfenoberflächen gestaltet sich eine solche Korrektur ungleich schwieriger. An dieser Stelle kann die numerische Strömungssimulation unterstützen, falls es gelingt, die Tropfenoszillation abzubilden. So kann die Tropfenkontur rekonstruiert werden und eine Ray-Tracing-Korrektur für jede Phase der Oszillation entwickelt werden.

Des Weiteren sind zusätzliche Untersuchungen geplant. Wenn der Tropfen in Bewegung gerät, flacht die Kontur ab, d.h. er wird anders angeströmt. Inwieweit sich dadurch Veränderungen ergeben, z.B. hinsichtlich der Bewegungsgeschwindigkeit, muss noch untersucht werden. Zusätzlich soll das Anströmprofil mittels laser-optischer Verfahren vermessen werden, um zu untersuchen, inwieweit Schwankungen der Anströmung (z.B. durch Turbulenz oder großskalige Fluktuationen) sich auf die Tropfenoszillation und das Ablösen auswirken. Auch der Einfluss der Oszillation der Wand auf die Anströmung soll untersucht werden.

Darüber hinaus soll der Einfluss der Oberflächenspannung und der Viskosität des Flüssigkeitstropfens untersucht werden, indem Beimischungen von Xanthan bzw. Wasser-Glycerin-Mischungen zum Einsatz kommen.

Literatur

Brunet, P.; Eggers, J.; Deegan, R. D. (2007) "Vibration-Induced Climbing of Drops", Physical Review Letters, Bd. 99(14), S. 144501.1–144501.4

Fan, J.; Wilson, M.; Kapur, N. (2011) "Displacement of liquid droplets on a surface by a shearing air flow", Journal of Colloid and Interface Science, Bd. 356(1), S. 286–292

Horton, T. J., Fritsch, T. R., Kintner, R. C. (1965) "Experimental determination of circulation velocities inside drops" Can. J. Chem. Eng. 43 143

Kang, K.H., Lee, S.J., Lee, C.M., Kang, I.S. (2004) "Quantitative visualization of flow inside an evaporating droplet using the ray tracing method", Meas. Sci. Technol. 15, 1104–1112

Lin, Z.; Peng, X.; Wang, X. (2006) "Oscillation characteristics of droplets on solid surfaces with air flow", Heat Transfer - Asian Research, Bd. 35(1), S. 13–19

Maurer, T., Janoske, U. (2015a) "Experimental study of water drop motions induced by superposition of vibrations and shear flows", Computational Methods in Multiphase Flow VIII 89: 399-409

Maurer, T., Janoske, U. (2015b) "Displacement of Water Droplets Induced by the Superposition of Shear Flows and Mechanical Vibrations", Proceedings of the 2nd International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'15), Ottawa, Canada, April 30 – May 1, 2015

Maurer, T., Mebus, A., Janoske, U. (2016) "Water Droplet Motion on an Inclining Surface", Proceedings of the 3rd International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'16), Ottawa, Canada – May 2 – 3, 2016

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

Minor, G., Djilali, N., Sinton, D., Oshkai, P. (2009) "Flow within a water droplet subjected to an air stream in a hydrophobic microchannel", Fluid Dynamics Research, 41, 045506