

3D-PTV-Messung in einem oszillierenden Tropfen mittels Doppelhelix-Punktspreizfunktion (DH-PSF)

3D-PTV measurements inside an oscillating drop via Double-Helix Point Spread Function (DH-PSF)

C. Bilsing¹, L. Büttner¹, J. Czarske¹, U. Janoske², S. Burgmann^{2*}

¹ Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik (MST), TU Dresden, 01062 Dresden

² Lehrstuhl Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

* burgmann@uni-wuppertal.de

Doppel-Helix Punktspreizfunktion, Particle Tracking Velocimetry, Strömung in haftenden Tropfen, Loslösen von Tropfen

Double-Helix Point Spread Function, Particle Tracking Velocimetry, flow inside sessile drops, incipient motion of drop

Zusammenfassung

In Brennstoffzellen kommt es in Folge der elektrochemischen Reaktion zur Bildung von Flüssigwasser, wodurch wenige mikroliter-große Tropfen in den Kanälen gebildet werden. Es wurde bereits experimentell und numerisch untersucht, wie bei größeren Tropfen eine Luftströmung das Strömungsfeld in und um den Tropfen beeinflusst und schließlich zum Loslösen des Tropfens führt. Für kleinere Tropfen im Bereich weniger Mikroliter liegen dazu bislang widersprüchliche Daten vor.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von 3D-PTV-Messungen in einem oszillierenden haftenden 3,5- μl -Tropfen in einer Gas-Scherströmung gezeigt. Mittels eines Lasers werden dem Fluid hinzugegebene Fluoreszenzpartikel angeregt. Das verwendete 3D-PTV-System nutzt einen Flächenlichtmodulator (SLM, spatial light modulator), welcher in der Fourierebene der Abbildung steht und mit einer Spiralphasenmaske die so genannte Doppelhelix-Punktspreizfunktion (DH-PSF) in das System einprägt. Auf diese Weise können dreidimensionale Strömungsmessungen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen deutlich, dass in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit sich analog zu bisherigen Ergebnissen für größere Tropfen (Bondzahl $Bo > 1$) auch für kleine Tropfen ($Bo < 1$) unterschiedliche Strömungsmuster herausbilden. Bei kleinen Anströmgeschwindigkeiten ($Re_d < 800$) zeigt sich in der horizontalen Ebene eine symmetrische Doppelwirbelstruktur, wobei Flüssigkeit an der Tropfenoberfläche in Anströmrichtung transportiert wird. Durch die 3D-Messung des Strömungsfelds konnte hier erstmalig eine Verkipfung der Doppelwirbel quantitativ erfasst werden. Bei Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit ($Re_d \approx 1700$) verändert sich das Strömungsbild indem sich die Drehrichtung des Doppelwirbels umkehrt: nun bewegt sich Wasser an der oberen Grenzschicht entgegen der Luftströmungsrichtung. Die 3D-PTV-Methode erlaubt darüber hinaus die Bestimmung dieser charakteristischen Oszillationsfrequenzen und die Identifizierung typischer Strömungsstrukturen über eine Phasenmittelung. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass auch für kleine Tropfen ähnliche Mechanismen zur Tropfenablösung wie bei großen Tropfen führen, so dass entsprechende Strategien für den Brennstoffzellenbetrieb entwickelt werden können.

Abstract

Liquid water emerges in fuel cells due to the electrochemical reaction and eventually microliter-size drops penetrate into the gas channels. For larger size drops it has been analyzed experimentally and numerically how a gas-shear flow affects the flow structure inside and outside of such a drop. Eventually, the specific cohering inner and outer flow pattern leads to the incipient motion of the sessile drop. Concerning tiny microliter-size drops available data disagree concerning these effects.

This work presents the results of 3D-PTV measurements inside of an oscillating sessile 3,5 μl -drop in shear flow. Fluorescent particles inside the liquid drop are excited via Laser light. The 3D-PTV system applied here uses a spatial light modulator (SLM), that is positioned in the Fourier-plane of the image. A spiral phase mask was chosen for the SLM that introduces the Double-Helix Point Spread Function (DH-PSF) to the system. Hence, three-dimensional measurements of the flow can be performed.

The results reveal that as for larger drops (Bond number $Bo > 1$) the same flow pattern emerge for these tiny drops ($Bo < 1$). These patterns change with Reynolds number. At low air flow velocity ($Re_d < 800$) the flow pattern inside the drop exhibits a typical double-vortex structure, that leads to a clockwise rotation in the symmetry plane (air flow from the left). At higher air flow velocity ($Re_d \approx 1700$) the flow pattern changes in a way that the rotational direction of the vortex reverses: in the symmetry plane a counter-clockwise rotation can be observed. Additionally, the 3D-PTV method presented here allows for the identification of characteristic oscillation frequencies. Based on these frequencies, phase averaging can be performed and typical vortex structures can be identified. The results lead to the assumption that even for tiny drops similar fluid mechanical mechanisms apply as for larger drops concerning the incipient motion of the drop. Hence, it can be possible to develop adequate strategies for fuel cell operation.

Einleitung

In Brennstoffzellen kommt es in Folge der elektrochemischen Reaktion zur Bildung von Flüssigwasser, welches in den Mikrokanal der Brennstoffzellen-Kathode eintritt und einen wenige Mikroliter-großen Tropfen bildet. Wasseransammlungen sind insofern unerwünscht, dass sie die Gasverteilung behindern und somit lokal die elektrochemische Reaktion unterbinden können. Es ist daher zweckmäßig, das Wasser so frühzeitig aus dem Kathodenkanal zu befördern, dass keine größeren Wasseransammlungen in Form von Filmen oder Pfropfen entstehen können. Der Kathodenkanal wird mit Luft durchströmt und es wurde bereits experimentell und numerisch untersucht, wie bei größeren Tropfen, d.h. Tropfen mit einer Bondzahl $Bo > 1$, eine Luftströmung das Strömungsfeld in und um den Tropfen beeinflusst und schließlich zum Loslösen des Tropfens führt [1,2,3]. Dabei wurde eine Fluidbewegung im Tropfen festgestellt, deren Ausprägung von der Anströmgeschwindigkeit abhängt [3]. Bei kleineren Reynoldszahlen führt die Anströmung in der Symmetrieebene des Tropfens 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. 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 den Resonanzfrequenzen zuordnen lassen [6,7]. Es ist basierend auf jüngsten Ergebnissen [1,3] zu vermuten, dass die Konturoszillation des Tropfens das Strömungsfeld um den Tropfen beeinflusst und somit eine veränderte Druckverteilung hervorruft, welche zum Loslösen des Tropfens führt.

Für kleinere Tropfen im Bereich weniger Mikroliter, d.h. Tropfen mit einer Bondzahl $Bo < 1$, stellt sich die Frage, ob die Dominanz der Oberflächenspannung über die spezifische Volumenkraft hier zu einem anderen Verhalten des Tropfens führt. Bezüglich der Tropfeninnenströmung liegen Hinweise auf eine andere Strömungsstruktur vor. Minor et al. [8] führten selektiv μ PIV-Messungen in einem solchen Tropfen durch und konnten die in [3] festgestellte Strömungsumkehr im Tropfen nicht visualisieren. Es fehlt bislang an 3D-Strömungsinformationen zur Bewertung der strömungsphysikalischen Prozesse bei der Tropfenablösung für kleine Tropfen. Numerische Strömungssimulationen können hier grundsätzlich Abhilfe schaffen. In jüngsten Arbeiten des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Bergischen Universität Wuppertal wurde ein modifizierter Volume-of-Fluid-Ansatzes entwickelt, welcher die Kontaktwinkelhysterese modelliert und so die Anhaftung des Tropfens unter Anströmung beschreiben kann [9,10]. Mit Hilfe dieses Ansatzes konnte für größere Tropfen die Umströmung und die Innenströmung des Tropfens inklusive der Strömungsumkehr bei Auftreten eines Rezirkulationsgebietes im Nachlauf analysiert werden [3]. Problematisch ist dabei die räumliche Auflösung der Strukturen: je kleiner der Tropfen wird, desto feiner muss das Rechengitter aufgelöst werden. Da der Tropfen unter Anströmung oszilliert und schließlich in eine Gesamtbewegung stromab versetzt wird, sind hier eine hohe Anzahl von Gitterzellen über den gesamten abzubildenden Strömungsraum (Kanal und Tropfen) erforderlich. Dies erfordert sehr hohe Speicherkapazitäten und Rechenzeiten. Zweckmäßig ist es daher, auf eine experimentelle Methode zurückzugreifen, die eine dreidimensionale Erfassung der Strömungsstrukturen im Tropfen mit hoher räumlicher Auflösung ermöglicht. Daher wird eine 3D-PTV-Messung mittels Doppelhelix-Punktspreizfunktion durchgeführt. Die Details und Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

Versuchsaufbau

Die Tropfeninnenströmung wird in einem Plexiglas Kanal untersucht, bei dem auf der unteren Wand der Tropfen mittels Kanüle aufgesetzt werden kann. Untersucht werden Wassertropfen; der Kontaktwinkel eines solchen Tropfens liegt für Plexiglas bei $74,4^\circ \pm 0,3^\circ$. Der Kanal hat eine Gesamthöhe von 22 mm und eine Breite von 22 mm. Im Kanal wird mittels eines Seitenkanalverdichters (Elektor SD 540/FU) eine Luftströmung erzeugt. Der Kanal ist dabei ausreichend lang, um eine voll ausgebildete Kanalströmung am Ort der Messung zu gewährleisten. Die Strömungsgeschwindigkeit wird mittels Hitzdrahtmessung am Kanalausstritt verifiziert. Die hier untersuchten Reynoldszahlen (basierend auf der mittleren Luftgeschwindigkeit und dem hydraulischen Durchmesser des Kanals) liegen zwischen $Re_{ch} = 6100$ und 13800 . Die entsprechenden Reynoldszahlen bezogen auf den Tropfendurchmesser betragen $Re_d = 750$ – 1700 .

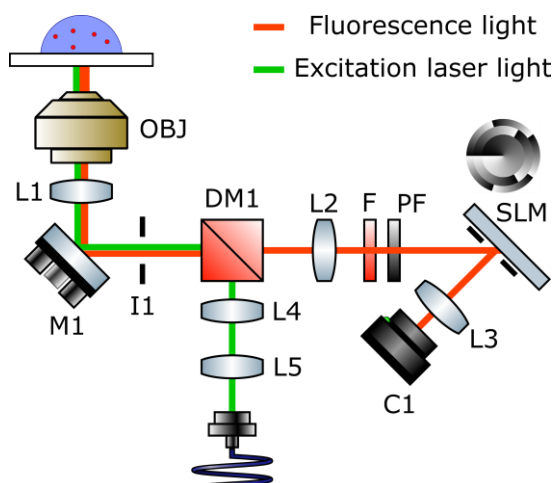


Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus für die 3D-Strömungsmessung im Tropfen. Der optische Aufbau entspricht im Wesentlichen einem inversen Fluoreszenzmikroskop, bei dem mittels einer Spiralphasenmaske eine Doppelhelix-Punktspreizfunktion (DH-PSF) eingepreßt wird. Das Laserlicht wird über eine Faser in das System eingekoppelt. L: Linse, M: Spiegel, DM: Dichroitischer Spiegel, F: Filter, PF: Polarisationsfilter, C: Kamera, SLM: Flächenlichtmodulator.

Für die 3D-PTV-Messungen wird ein Fluoreszenzmikroskop-Aufbau verwendet (Abb. 1). Ein 532-nm-Laser wird mittels eines dichroitischen Spiegels eingekoppelt, sodass die Partikel (PS-FluoRot-Fi317 / microparticles GmbH) im Tropfenvolumen beleuchtet werden. Das Fluoreszenzlicht wird anschließend auf eine Hochgeschwindigkeitskamera (EoSens 4CXP / Mikrotoron) abgebildet, die Bildraten von bis zu 1264 Hz ermöglicht. Die dreidimensionale Lokalisierung der Partikel wird mittels eines Flächenlichtmodulators ermöglicht, auf dem eine Spiralphasenmaske dargestellt wird [11,12] (Abb. 1).

Durch die Eigenschaften der DH-PSF wird ein Partikel auf der Kamera als zwei helle Punkte abgebildet, die um ihren gemeinsamen Mittelpunkt um den Winkel ψ orientiert sind. Der Mittelpunkt der Linie zwischen den beiden hellen Partikelabbildern repräsentiert die laterale Position und der Winkel ψ die axiale Position. Die Möglichkeit über die elektronisch einstellbare Phasenmaske die Eigenschaften des Messsystems zu modifizieren sowie das gute Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) über einen großen axialen Bereich sind Vorteile dieses Messsystems.

Die Auswertung der Partikelbilder wurde mit *PtvPy* durchgeführt, das auf dem Softwarepaket *TrackPy* basiert. Zur Darstellung der Strömungsfelder wurden alle Vektoren des betrachteten Zeitintervalls in die zu untersuchende Ebene projiziert.

Untersuchungsergebnisse

Die 3D-PTV-Messungen ermöglichen die Bestimmung des zeitgemittelten Strömungsfelds sowie die Berechnung periodischer Strömungsfelder zu den ersten beiden Eigenfrequenzen des Tropfens. Ersteres ist in Abb. 2 und 3 für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten dargestellt.

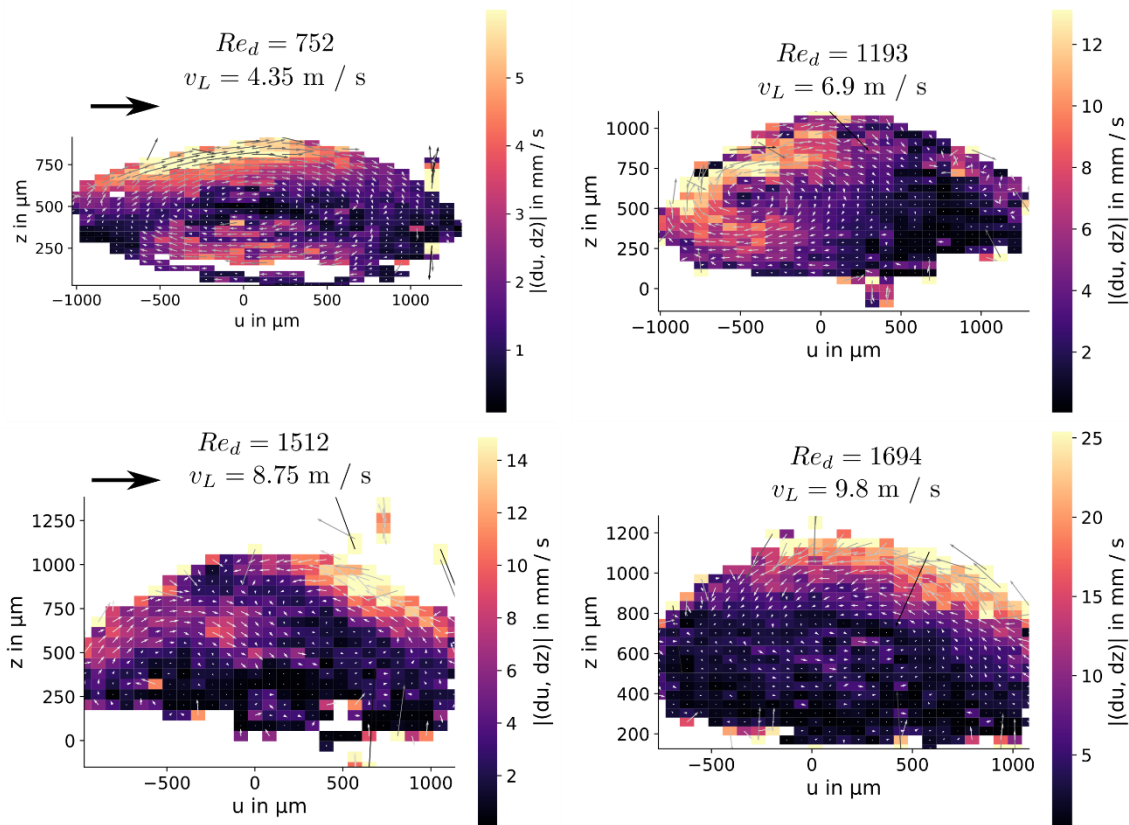


Abb. 2: Zeitgemitteltes Strömungsfeld im Tropfen in der u-z-Ebene. Die u-Achse zeigt in Richtung der Luftströmung. Es ist zu erkennen, wie sich bei niedrigen Reynoldszahlen ein Wirbel ausbildet, dessen Bewegungsrichtung an der Tropfenoberfläche parallel zur Luftanströmung verläuft. Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten bildet sich auf der stromabgewandten Seite ein Wirbel mit entgegengesetzter Rotationsrichtung aus.

Bei kleinen Anströmgeschwindigkeiten ($4,35 \text{ m/s}$, $Re_d = 750$ mit dem Auflagedurchmesser des Tropfens als charakteristische Länge) zeigt sich eine symmetrische Doppelwirbelstruktur, bei der Fluid an der Tropfenoberfläche stromab transportiert wird und am seitlichen Tropfenrand stromauf. Wie in Abb. 2 für die Symmetrieebene zu erkennen ist, verändert sich das mittlere Strömungsfeld mit steigender Anströmgeschwindigkeit (Reynoldszahl): an der stromabgewandten Seite des Tropfens entsteht eine starke Strömung am oberen Tropfenrand, die entgegen der Anströmung läuft. Bei weiterer Erhöhung der Anströmung bildet sich im Tropfen eine Wirbelstruktur, die entgegen dem Uhrzeigersinn läuft.

Betrachtet man das Strömungsmuster in einem horizontalen Schnitt durch den Tropfen (Abb. 3), erkennt man in allen untersuchten Fällen eine Doppelwirbelstruktur, deren Zentren links und rechts der Symmetrieebene liegen (die Anströmrichtung in Abb.3 ist von unten rechts). Auch hier kann beobachtet werden, dass sich die Drehrichtung des Wirbelmusters mit zunehmender Reynoldszahl umkehrt. Strömt das Fluid bei kleinen Reynoldszahlen in der Mitte des Tropfens zunächst stromab, wobei das Fluid an den Rändern dann wieder stromauf transportiert wird, strömt bei höherer Reynoldszahl das Fluid in der Mitte des Tropfens entgegen der Anströmung, dafür aber an den Tropfenrändern in Strömungsrichtung. D.h. das Wirbelmuster im horizontalen Schnitt korrespondiert mit dem Wirbelmuster im vertikalen Schnitt der Symmetrie-Ebene.

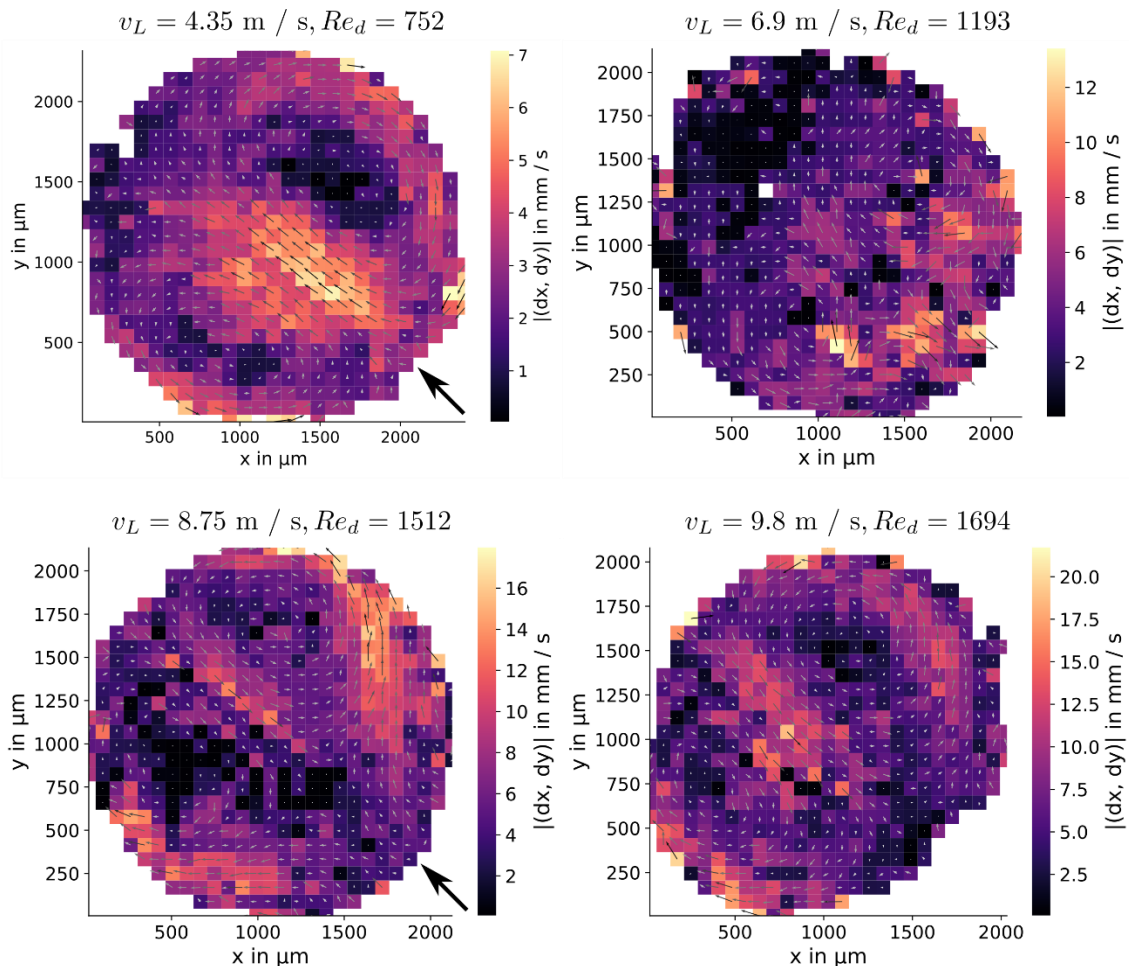


Abb. 3: Zeitgemittelttes Strömungsfeld in der horizontalen Ebene. Wie auch in Abb. 2 ist zu erkennen, wie sich bei Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit die Rotationsrichtung des Doppelwirbels umkehrt und sich dessen Mittelpunkt in Richtung der stromabgewandten Seite verlagert.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Verkipfung der Wirbelstrukturen in der y-z-Ebene gegenüber der vertikalen bzw. horizontalen Achse für den Fall $Re_d = 750$. Der linke Wirbel ist um ca. 30° zur vertikalen Achse verkippt, der rechte Wirbel um ca. 20° . Dieser Effekt konnte in diesem Beitrag erstmals messtechnisch erfasst werden. Da das Messverfahren eine dreidimensionale Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes erlaubt, kann aus den Daten die Orientierung der Wirbelachsen im Raum ermittelt werden. Diese Analyse ist aktuell Teil der Auswertung und wird im Rahmen des Konferenz-Vortrags vorgestellt werden.

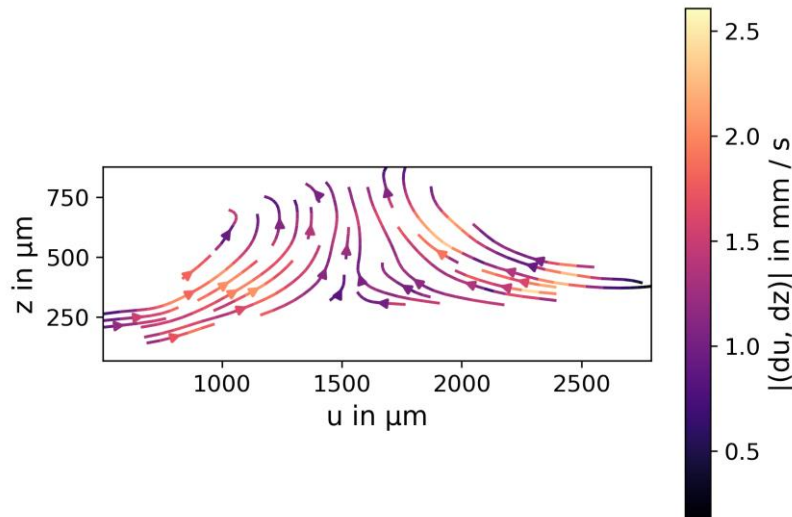


Abb. 4: Strömungsfeld orthogonal zur Anströmungsrichtung bei $4,35 \text{ m/s}$ ($Re_d = 750$) mit sichtbarer Verkipfung der beiden Wirbel zur horizontalen Ebene. Die z-Achse entspricht der Tropfenhöhe. Der linke Wirbel ist um ca. 25° zur vertikalen Achse verkippt, der rechte Wirbel um ca. 20° . Dieser Effekt konnte in diesem Beitrag erstmals messtechnisch erfasst werden.

Durch die hohe Bildrate von bis zu 1264 Hz erlaubt die 3D-PTV-Methode neben der Darstellung und Analyse der zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfelder auch die Identifizierung charakteristischer Oszillationsfrequenzen. Basierend auf einer Frequenzanalyse können typische Strömungsstrukturen über eine Phasenmittelung identifiziert werden. In Abbildung 5 sind die Spektren der mittleren Partikelgeschwindigkeit in den drei Raumrichtungen dargestellt. Es können typische charakteristische Frequenzen der jeweiligen Bewegungsrichtungen ermittelt werden. In der horizontalen Ebene oszilliert die Strömung in einem $3,5 \mu\text{m}$ -Tropfen mit einer Frequenz von etwa 80 Hz . In vertikaler Richtung dominiert eine Frequenz der Oszillation mit 163 Hz . Diese Frequenzen lassen sich der ersten und zweiten Eigenfrequenz des Tropfens zuordnen (vgl. Sharp et. al [6]). Es zeigt sich hier in Übereinstimmung mit eigenen vorherigen Untersuchungen für größere Tropfen [1,13], dass eine Auf- und Abbewegung des Tropfens der zweiten Eigenfrequenz zugeordnet werden kann.

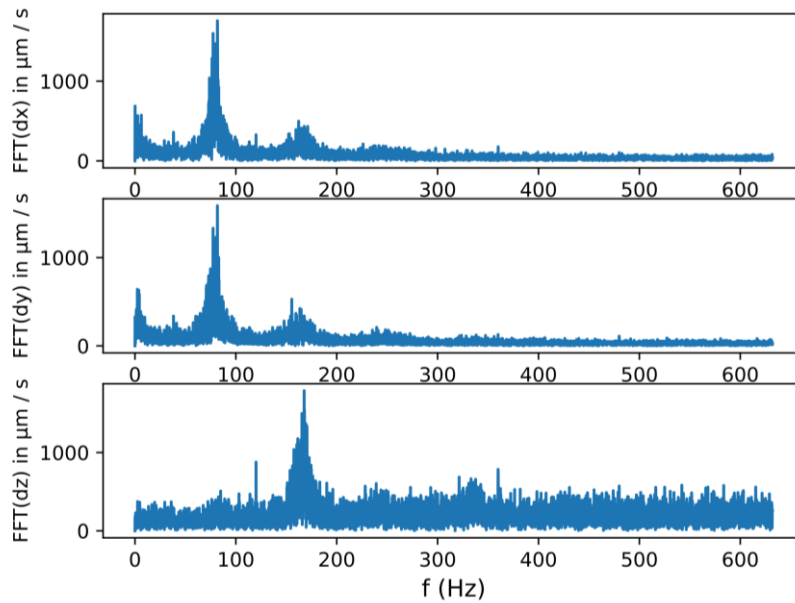


Abb. 5: Exemplarisches Frequenzspektrum der mittleren Partikelgeschwindigkeit bei einer Luftströmung von 9,8 m/s. In der horizontalen x-y-Ebene dominiert eine Oszillation mit 80 Hz, während in der vertikalen Ebene die Strömung überwiegend mit 163 Hz oszilliert.

Abb. 6 und 7 zeigen das phasengemittelte Strömungsfeld für die erste Eigenfrequenz von 80 Hz. Es ist eine komplexe Bewegung einer Wirbelstruktur erkennbar. In dem vertikalen Schnitt der Symmetrieebene in Abb. 6 bewegt sich das Fluid periodisch zwischen strömungszugewandter und –abgewandter Seite des Tropfens. Dabei findet eine Strömung entgegen der Anströmung entlang der Oberseite des Tropfens statt und in Anströmrichtung im unteren Bereich des Tropfens statt. Die Ausprägung der betragsmäßig maximalen Geschwindigkeit alterniert dabei zwischen oberem und unterem Bereich des Tropfens, d.h. dieses Phänomen kann mit einer vertikalen Verlagerung des Wirbelzentrums in Verbindung gebracht werden.

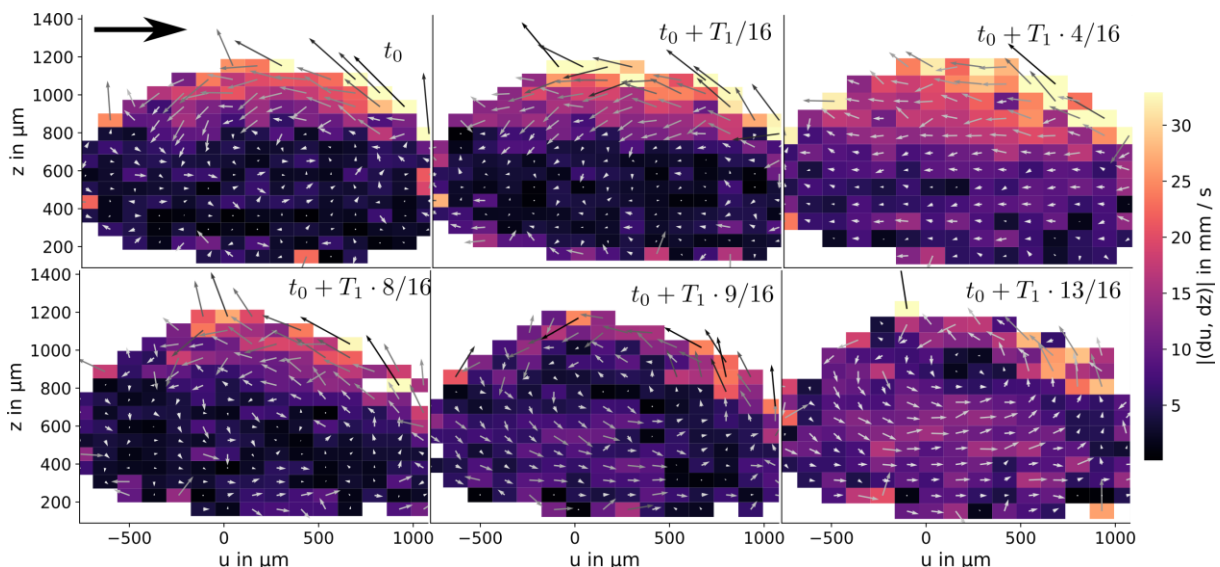


Abb. 6: Charakteristisches Strömungsfeld in der vertikalen Ebene für die Frequenz 80 Hz (Luftanströmung 9,8 m/s, $Re_d = 1694$). Die u-Achse zeigt in Richtung der Luftströmung. Es ist deutlich zu sehen, wie sich das Wasser periodisch zwischen strömungszugewandter und –abgewandter Seite bewegt. Dabei findet ersteres entlang der Oberseite des Tropfens statt und letzteres an dessen Unterseite.

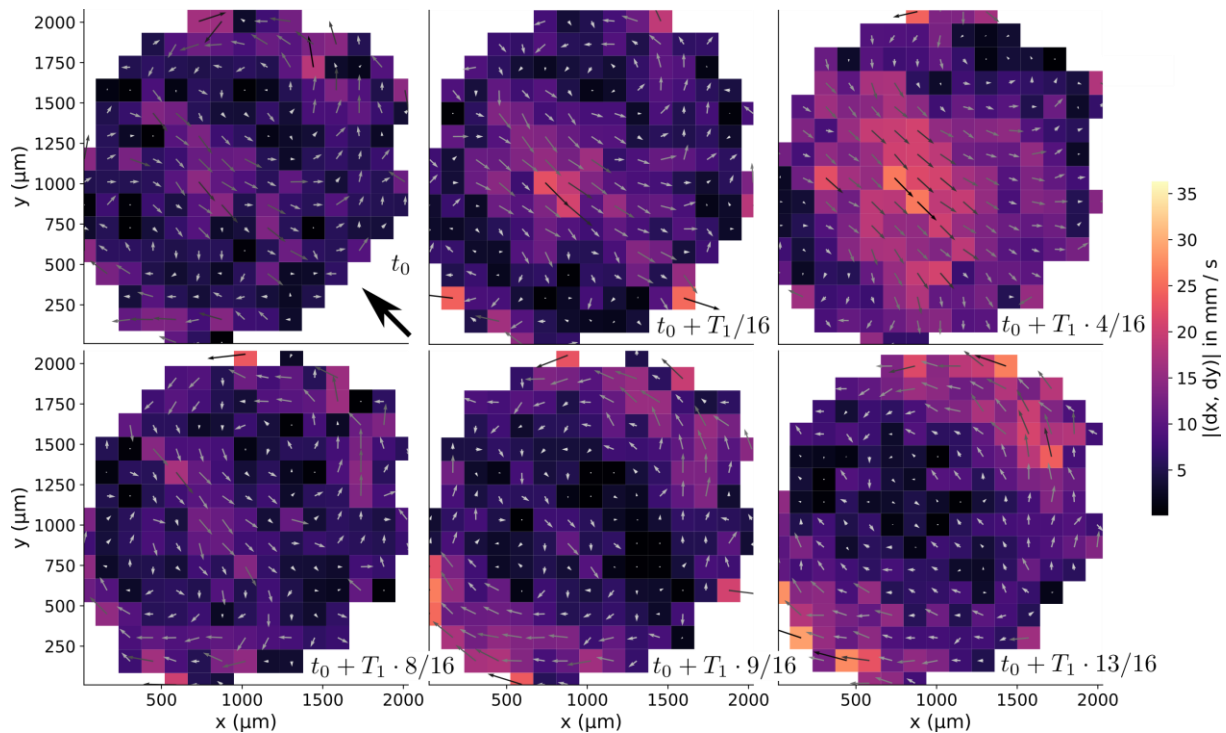


Abb. 7: Charakteristisches Strömungsfeld in der horizontalen x-y-Ebene für die Frequenz 80 Hz (Luftanströmung 9,8 m/s, $Re_d = 1694$). Die Richtung der Luftanströmung ist durch einen Pfeil markiert. Zusätzlich zu Abb. 6 ist erkennbar, wie das Wasser überwiegend mittig in Richtung der strömungsgewandten Seite fließt und sich überwiegend am Rand zurückbewegt.

Abb. 7 zeigt dazu passend die Bewegungsmuster in der horizontalen Ebene. Deutlich zu erkennen ist hier in der Tropfenmitte die alternierende Strömung entgegen der Anströmungsrichtung; die geringen Geschwindigkeiten bei $t_0 + T_1 \cdot 13/16$ passen zu der in Abb. 6 detektierten Verlagerung der Wirbelstruktur nach oben. Entsprechend ändert sich periodisch auch das Strömungsmuster im Randbereich des Tropfens: verlagert sich der Wirbel nach oben (geringe Geschwindigkeiten am oberen Tropfenrand im Mittelschnitt) erhöht sich entsprechend die Geschwindigkeit (in Strömungsrichtung) am seitlichen Tropfenrand.

Abb. 8 und 9 zeigen das phasengemittelte Strömungsfeld zur charakteristischen Frequenz von 160 Hz. Grundsätzlich ist die gleiche Wirbelstruktur erkennbar wie in Abb. 6 und 7 zu erkennen. Das Bewegungsmuster ist jedoch ein anderes. In dem vertikalen Schnitt der Symmetrieebene in Abb. 8 bewegt sich das Fluid insbesondere an der angeströmten (linken) Seite des Tropfens periodisch zwischen oberem und unterem Bereich des Tropfens in Form einer periodisch auftretenden starken Abwärtsströmung. Das Grundmuster einer Strömung entgegen der Anströmung entlang der Oberseite des Tropfens bleibt dabei erhalten. Auch dieses Phänomen kann mit einer Verlagerung des Wirbelzentrums in Verbindung gebracht werden, in diesem Falle jedoch in horizontaler Richtung. Abb. 9 zeigt dazu passend die Bewegungsmuster im horizontalen Schnitt im oberen Bereich des Tropfens. Deutlich zu erkennen ist hier wieder die Doppelwirbelstruktur, welche zu einem Transport in der Tropfenmitte entgegen der Anströmung führt. Zu erkennen ist hier eine periodische Verlagerung der Zone hoher Geschwindigkeit in der Tropfenmitte von hinten nach vorne (Anströmung erfolgt in der Darstellung von unten rechts). Dieses Verhalten passt zu der in Abb. 8 detektierten Verlagerung der Wirbelstruktur von hinten nach vorne.

Weitere Analysen des periodischen Strömungsfeldes im Tropfen bei geringeren Anströmgeschwindigkeiten sind zurzeit Gegenstand der Arbeiten und werden im Konferenzvortrag präsentiert.

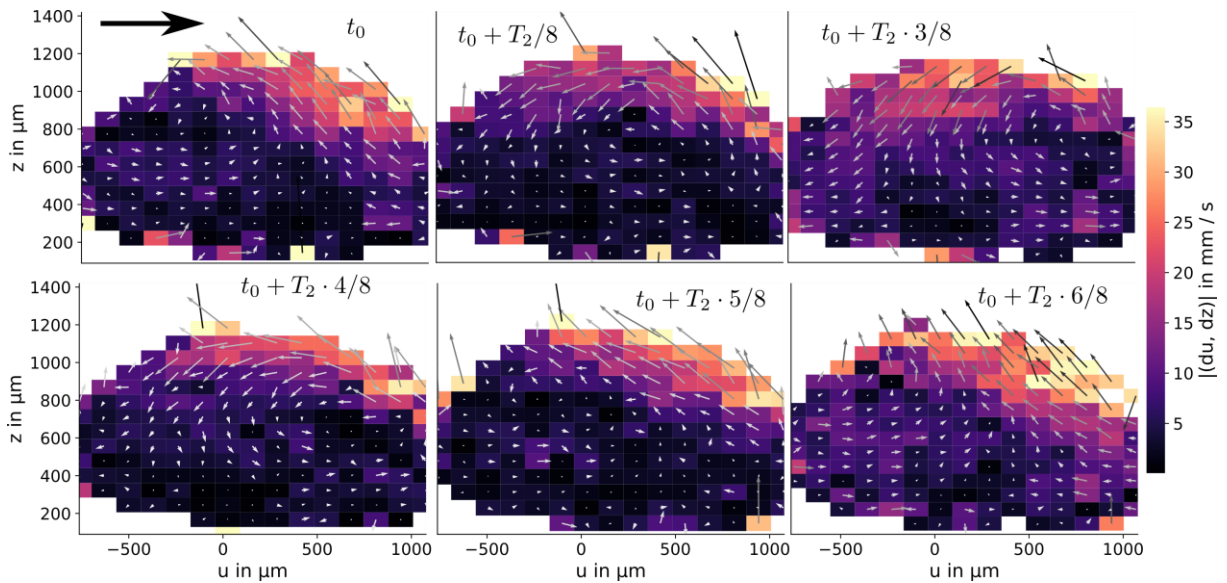


Abb. 8: Charakteristisches Strömungsfeld in der vertikalen Ebene für die Frequenz 160 Hz (Luftanströmung 9,8 m/s, $Re_d = 1694$). Die u-Achse zeigt in Richtung der Luftströmung. Es ist gut erkennbar, wie Wasser periodisch von der Unterseite zur Oberseite fließt und wieder zurück. Dabei findet die Strömung in Aufwärtsrichtung überwiegend an der strömungsabgewandten Seite statt. An der strömungszugewandten Seite bewegt sich das Wasser hingegen überwiegend nach unten. In der Mitte wechselt die Bewegungsrichtung periodisch.

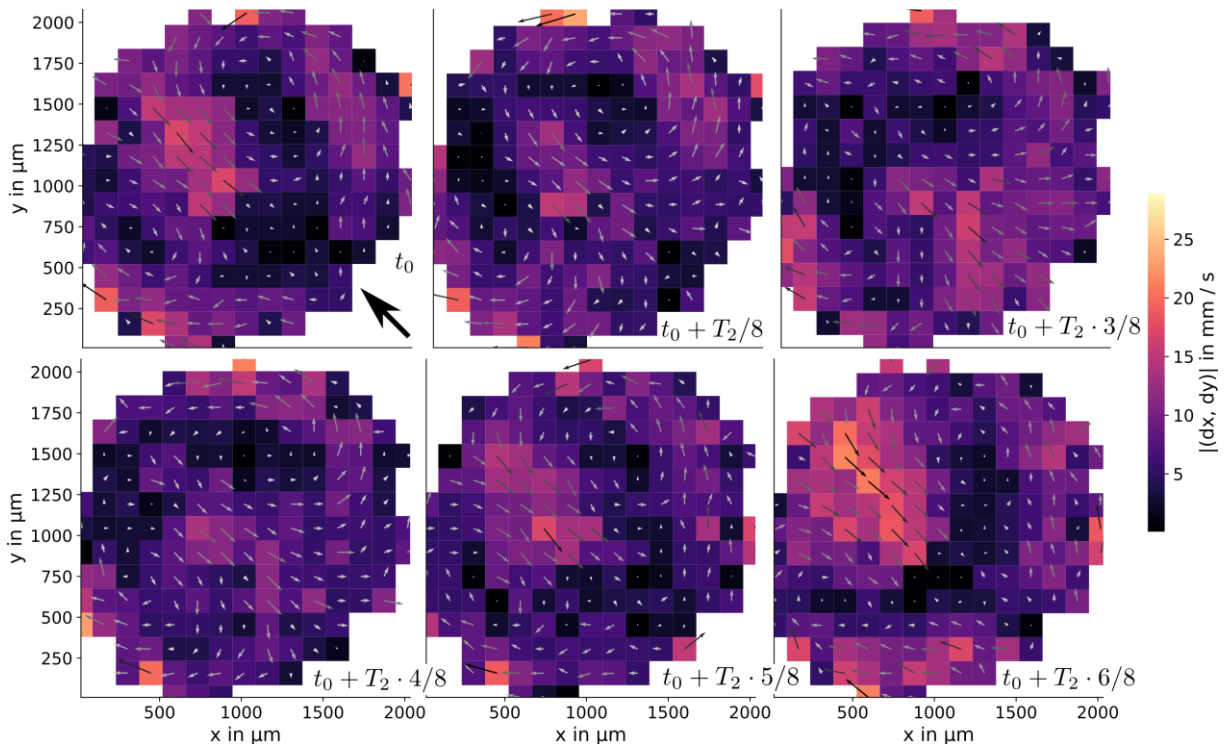


Abb. 9: Charakteristisches Strömungsfeld in der horizontalen x-y-Ebene für die Frequenz 160 Hz (Luftanströmung 9,8 m/s, $Re_d = 1694$). Die Richtung der Luftanströmung ist durch einen Pfeil markiert. Zusätzlich zu Abb. 8 ist erkennbar, wie sich das Wasser pulsierend von der strömungsabgewandten zur –zugewandten Seite bewegt.

Zusammenfassung und Ausblick

Das räumlich und zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsfeld in angeströmten, haftenden Tropfen bei kleinen Bondzahlen konnte durch die hier angewendete 3D-PTV-Technik mit Doppelhelix-Punktspreizfunktion (DH-PSF) im Detail analysiert werden. Die Ergebnisse bestätigen zunächst die Erkenntnisse für größere Tropfen ($Bo > 1$), dass es bei steigender Anströmgeschwindigkeit zu einer Umkehr der Rotationsrichtung der Wirbelstruktur im Tropfen kommt. Dies lässt vermuten, dass auch für kleine Tropfen ähnliche Mechanismen zur Tropfenablösung führen wie bei großen Tropfen, denn numerische Simulationen zeigen, dass auch bei $3,5\text{-}\mu\text{l}$ -Wassertropfen bei höheren Anströmgeschwindigkeiten eine Rezirkulationszone im Tropfennachlauf entsteht.

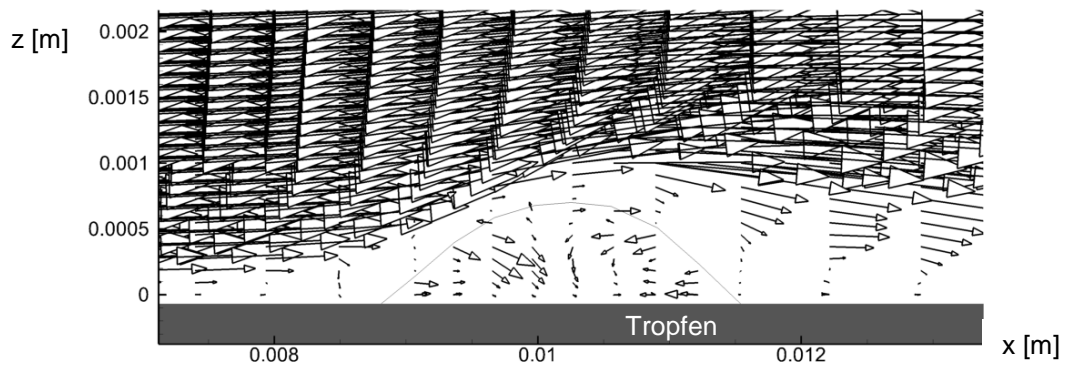


Abb. 10: Exemplarisches Ergebnis einer Strömungssimulation mit der Methode nach [9, 10] für mittlere Reynoldszahlen: Rezirkulationszone im Tropfennachlauf und Ausbildung einer Strömungsumkehr im hinteren Bereich des Tropfens; Darstellung der Geschwindigkeiten im Innen- und Außenbereich des Tropfens über ungleich skalierte Vektoren

D.h., dass entsprechende Strategien zum Loslösen von Tropfen auch für den Brennstoffzellenbetrieb entwickelt werden können, bei dem kleine Tropfen mit $Bo < 1$ typischerweise auftreten. Gleichzeitig zeigt Abb. 10 aber auch die aktuellen Limitierungen bei der Strömungssimulation, da die Strömung im Tropfen nicht detailgenau wiedergegeben werden kann. Hier können die in diesem Beitrag vorgestellten räumlich hochaufgelösten Daten zur Strömung im Tropfen auf Basis der 3D-PTV-Technik mit Doppelhelix-Punktspreizfunktion helfen, das Strömungsmuster besser zu verstehen. Es ergibt sich im Tropfen eine quer zur Anströmung orientierte gebogene Wirbelstruktur, deren seitliche Enden gegenüber der Senkrechten bzw. Horizontalen verkippt sind und somit seitlich schräg aus dem Tropfen „ragen“ (Abb. 11, hier dargestellt für höhere Reynoldszahlen). Durch die phasengemittelten Strömungsfeldern wird deutlich, dass sich diese Wirbelstruktur periodisch mit der ersten und zweiten Eigenfrequenz des Tropfens nach oben und unten bzw. nach vorne und hinten verlagert. Auf diese Weise entsteht die auch bereits für größere Tropfen detektierte periodisch oszillierende Strömung in Strömungsrichtung und in Vertikalenrichtung [14].

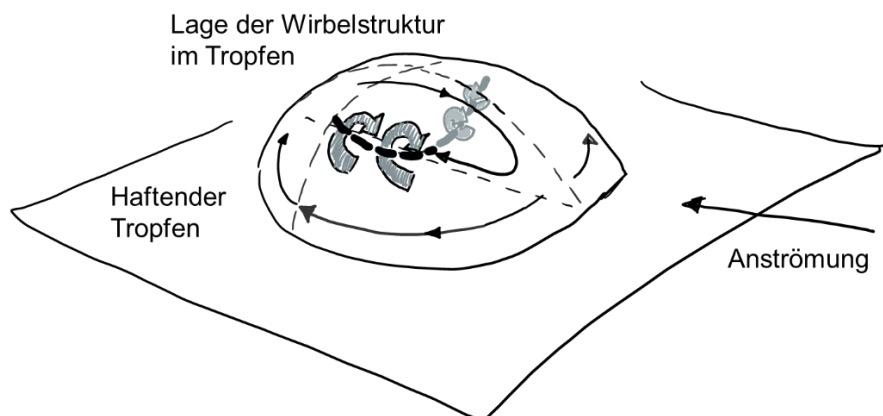


Abb. 11: Skizze der Strömungsverhältnisse im Tropfen bei höherer Anströmgeschwindigkeit und Lage des Doppelwirbels im Tropfen

Offen bleibt, inwieweit sich die Strömungsverhältnisse in und um den Tropfen ändern, wenn der Tropfen aus einer Pore der Gasdiffusionslage austritt bzw. auf einer typischen Gasdiffusionslage (teflonisiertes Graphitgeflecht) haftet. In diesem Fall ist eine Beobachtung der Strömung im Tropfen durch das Substrat (wie in diesem Beitrag durchgeführt) nicht mehr möglich. Um auch in diesem Fall eine Strömungsmessung durchführen zu können, ist die Verwendung von adaptiver Optik zur Korrektur der dynamischen Aberrationen (virtuelle Turbulenz) aussichtsreich. Erste Messungen an einem flachen, oszillierenden großen Tropfen zeigten, dass 3D3C-Messungen durch fluktuierende Phasengrenzflächen über eine dynamische Aberrationskorrektur möglich sind [12].

Diese Arbeit ist im Rahmen des IGF-Projekts 21190 der Forschungsvereinigung DECHEMA entstanden. Das IGF-Projekt 21190 der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik (TU Dresden) sowie dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik (Bergische Universität Wuppertal) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Des Weiteren gilt unsere Danksagung den im Projektausschuss beteiligten Firmen.

Literatur

- [1] 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
- [2] Burgmann S, Krämer V, Dues M, Steinbock J, Büttner L, Czarske J, Janoske, U (2022). Flow-measurements in the wake of an oscillating sessile droplet using laser-Doppler velocity profile sensor, *tm - Technisches Messen*, 89:3, 178-188.
- [3] Burgmann S, Krämer V, Rohde M, Dues M, Janoske U (2022) Inner and outer flow of an adhering droplet in shear flow, *International Journal of Multiphase Flow*, 153, 104140
- [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] 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
- [9] Maurer T (2017) Experimentelle und numerische Untersuchung der Tropfenbewegung unter Einfluss von äußeren Kräften, Ph.D. thesis, Bergische Universität Wuppertal
- [10] Kraemer V, Barwari B, Burgmann S, Rohde M, Rentschler S, Holz knecht C, Gmelin C, Janoske U (2021) Numerical analysis of an adhering droplet applying an adapted feedback deceleration technique, *International Journal of Multiphase Flow*, 145, 103808
- [11] Teich M, Mattern M, Sturm J, Büttner L, Czarske J (2016) Spiral phase mask shadow-imaging for 3D-measurement of flow fields. *Optics Express*, 24(24), 27371–81
- [12] Bilsing C., Radner H., Burgmann S., Czarske J., Büttner L. (2022) 3D Imaging with Double-Helix Point Spread Function and Dynamic Aberration Correction Using a Deformable Mirror, *Optics and Lasers in Engineering*, 154, 107044
- [13] Barwari B., Rohde M., Wladarz O., Burgmann S., Janoske, U. (2021). Motion of adhering droplets induced by overlapping of gravitational and periodical acceleration. *International Journal of Multiphase Flow*, 135, 103537.
- [14] Barwari B., Burgmann S., Janoske U.: Strömungsinstabilitäten eines haftenden Tropfens unter Anströmung, Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", Rostock, 4.-6. September 2018