

Simultane Messung des Geschwindigkeitsfeldes und der Blasen- trajektorien in einer ungeteilten Elektrolysezelle

Simultaneous measurement of the velocity field and bubble trajectories in an undivided electrolysis cell

D. Baczyzmalski¹, T. Weier², C.J. Kähler¹, C. Cierpka¹

*1: Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-
Weg 39, 85577 Neubiberg*

*2: Institut für Fluidodynamik, Abteilung Magnetofluidynamik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner
Landstraße 400, 01328 Dresden*

Schlagworte: Zweiphasenströmung, Gasblasen, Wasserstoffelektrolyse

Key words: two-phase flow, gas bubbles, water electrolysis

Zusammenfassung

Die Effizienz bei der Wasserstoffelektrolyse wird durch die Bedeckung der aktiven Elektrodenoberfläche durch die entstehenden Wasserstoff- und Sauerstoffblasen beeinträchtigt. Zur Effizienzsteigerung werden derzeit Strömungsbeeinflussungsmethoden untersucht, die zum beschleunigten Ablösen der Gasblasen von den Elektrodenoberflächen führen und so die Oberfläche schneller zur erneuten Reaktion freigeben. Zur Entwicklung solcher Strömungsbeeinflussungsmethoden müssen die hierdurch hervorgerufenen Strömungseffekte verstanden werden. Dies setzt die Kenntnis des Strömungsfeldes an der Elektrode und um die Gasblasen voraus. Im Sinne einer Machbarkeitsstudie zur gemeinsamen Messung von Gasblasenbewegung und umgebenden Strömungsfeld wurden hierzu im Rahmen der dargelegten Experimente in einer Wasserstoffelektrolysezelle simultane Messungen des Geschwindigkeitsfeldes und der Gasblasenbeladung durchgeführt. Zur Geschwindigkeitsmessung wurden fluoreszente Partikel mit einer sCMOS-Kamera beobachtet und deren Bewegung mittels PIV (Particle Image Velocimetry) ausgewertet. Die Gasblasen wurden hingegen durch Hintergrundbeleuchtung im Durchlichtverfahren mit einer weiteren sCMOS-Kamera aufgenommen und deren Bewegung mittels PTV (Particle Tracking Velocimetry) bestimmt. Zur Strömungsbeeinflussung wurden mit Hilfe eines Permanentmagneten Lorentzkräfte erzeugt. Abhängig von der vorherrschenden Stromstärke kann eine deutliche Beschleunigung der Strömung und Gasblasen durch die Lorentzkräfte festgestellt werden. Sowohl die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten als auch der Blasenbewegung in unmittelbarer Wandnähe war aufgrund der dort vorherrschenden hohen Gasbeladung mit großen Unsicherheiten behaftet. Außerhalb dieses Bereiches konnten die Blasenbewegungen bestimmt und deren Einfluss auf das umgebende Strömungsfeld visualisiert werden. In Abhängigkeit des Blasendurchmessers führen die Blasen eine wellenförmige Aufwärtsbewegung parallel zur Elektrode aus, die mit dem elektrodennahen wellenförmigen Blasenteppich zusammenhängen oder auf Nachlaufinstabilitäten zurückzuführen sein könnte.

Einleitung

Die effiziente Energiespeicherung gewinnt weltweit zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der hohen Energiedichte ist vor allem die Nutzung von Wasserstoff als chemischer Energieträger sinnvoll. Nachteilig gegenüber anderen Speicherformen sind jedoch die typischen Wirkungsgrade von lediglich 60%, die in modernen Wasserstoffelektrolyseuren erreicht werden (Pletcher et al. 2011). Ein Teil dieser Verluste ist auf die bei der Wasserstoffelektrolyse entstehenden Wasserstoff- und Sauerstoffblasen zurückzuführen. Diese verringern die Leitfähigkeit des Elektrolyts sowie die effektive Elektrodenoberfläche. Eine signifikante Effizienzsteigerung kann daher durch eine gezielte Verringerung der Gasbeladung an der Elektrodenoberfläche erreicht werden (Koza et al. 2011). Einer der zu diesem Zweck untersuchten Ansätze verfolgt das beschleunigte Abtragen der Gasblasen von den Elektrodenoberflächen durch erzwungene Konvektion. In diesem Zusammenhang wurde in der jüngsten Vergangenheit die Beeinflussung der wandnahen Konvektionsströmung durch elektromagnetische Volumenkräfte – d.h. Lorentzkräfte – untersucht (Weier et al. 2013, Koza et al. 2011, Fernández et al. 2014). Diese eignen sich insbesondere, da das elektrische Feld im Elektrolyseur bereits vorhanden ist und das magnetische Feld durch Permanentmagneten einfach und kostengünstig erzeugt werden kann.

Die Entwicklung solcher Strömungsbeeinflussungsmethoden erfordert eine genaue Analyse der hierdurch hervorgerufenen Strömungseffekte, weshalb die Vermessung des Geschwindigkeitsfeldes in der flüssigen Phase – insbesondere in unmittelbarer Umgebung der Gasblasen – von großer Relevanz ist. Um dies realisieren zu können, bedarf es der simultanen Messung des Geschwindigkeitsfeldes sowie der transienten Gasblasengeometrie und Trajektorie.

Bisher wurden nur sehr wenige experimentelle Untersuchungen zu den Strömungsphänomenen von Zweiphasenströmungen in Elektrolyseuren durchgeführt (Weier et al. 2013). Die Vermessung des Geschwindigkeitsfeldes mit laseroptischen Methoden wie PIV oder PTV in einer solchen Elektrolysezelle erweist sich insbesondere in Elektrodennähe als schwierig (Boissonneau et al. 2000). Die dort aufsteigenden Gasblasen bilden einen Blasenteppich, der in Abhängigkeit der vorherrschenden Gasbeladung das emittierte Licht der fluoreszenten Tracerpartikel teilweise bis vollständig absorbieren kann.

In einer Elektrolysezelle, in der aus früheren Experimenten (Weier et al. 2013) durch separate Messungen das Geschwindigkeitsfeld und die Form der Gasblasen bekannt sind, wurden im Rahmen der hier dargelegten Experimente am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf simultane Messungen des Geschwindigkeitsfeldes und der Gasblasenbeladung durchgeführt. Die Messungen wurden dabei sowohl mit als auch ohne Strömungsbeeinflussung durchgeführt, wobei für ersteres Lorentzkräfte durch Überlagerung des elektrischen Feldes mit einem Magnetfeld eines Permanentmagneten erzeugt wurden.

Messaufbau

In der Mitte eines Glasbehälters ($200 \times 170 \times 200 \text{ mm}^3$) wurden zwei Elektroden ($140 \times 25 \text{ mm}^2$ [H×B]) aus rostfreiem Stahl (1.4301), welche in aus PVC und PMMA bestehenden Plastikhaltern eingelassen waren, vertikal im Abstand von 30 mm platziert. Der Behälter war dabei mit einer 0.25 M NaOH Lösung gefüllt (Vgl. Abb. 1 links). Durch eine regulierbare Stromquelle konnten die Elektroden mit einer vorgegebenen konstanten Stromstärke beaufschlagt werden.

Zur Geschwindigkeitsmessung mittels PIV wurden der Strömung mit Rhodamin B versetzte Tracerpartikel beigegeben. Zwischen den beiden Elektroden wurde ein Laserschnitt durch einen Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 532nm aufgespannt. Der Laserstrahl wurde dabei von unten durch die Bodenplatte des Glasbehälters eingeführt (Vgl. Abb. 1). Die fluoreszenten Partikel wurden von einer sCMOS-Kamera (LaVision Imager sCMOS) mit einem

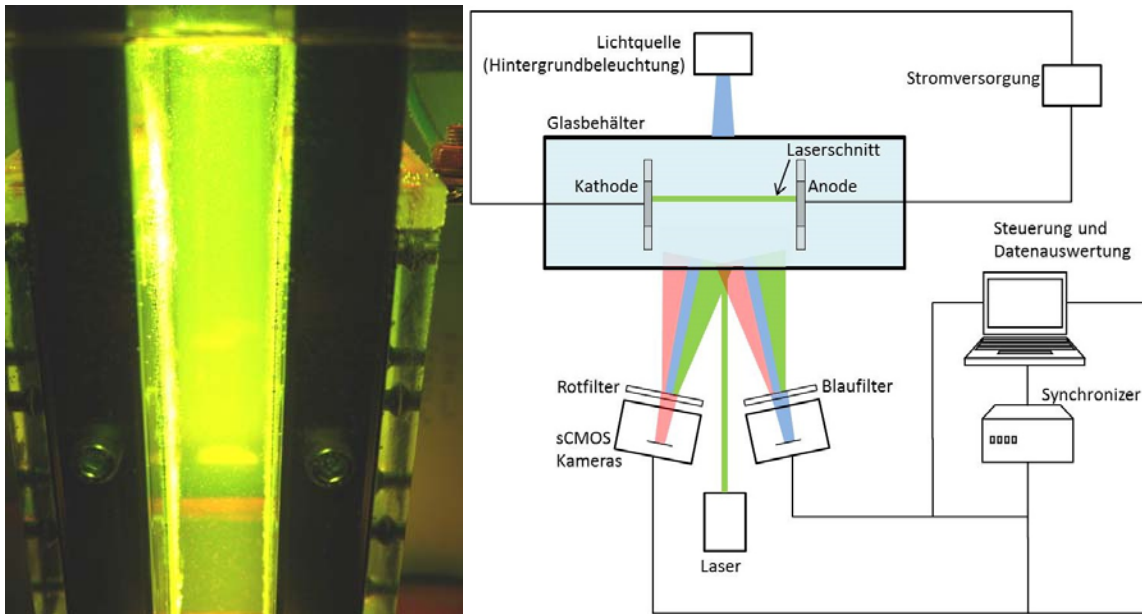


Abb. 1: links: Foto der Elektrolysezelle (Kathode links), rechts: Messaufbau (Sicht auf Glasbehälter und Elektrolysezelle von oben)

Rotfilter beobachtet, um Laserreflexionen an den Gasblasen und den Wänden auszublen- den. Zur Gasblasenvisualisierung wurde das Messvolumen im Durchlichtverfahren mit einer Mehrkanallichtquelle (Lumencor SPECTRA X light engine) im blauen Wellenlängenbereich beleuchtet. Zur Aufnahme der Gasblasengeometrie wurde eine weitere sCMOS-Kamera mit einem Blaufilter, der wiederum das Laserlicht und das Fluoreszenzlicht der Partikel ausblenden sollte, verwendet. Durch Messung mit beiden Kameras konnten sowohl die Partikel- bewegung als auch die Gasblasenbewegung zeitlich simultan aufgelöst werden, ohne dass sich die unterschiedlichen Signale auf den Bildern der Kameras überlagern. Es wurden Mes- sungen bei verschiedenen elektrischen Stromdichten mit und ohne Strömungsbeeinflussung durch Lorentzkräfte durchgeführt. Zur Strömungsbeeinflussung wurde ein Permanentmagnet ($20 \times 20 \times 15 \text{ mm}^3$ [$H \times B \times T$]) hinter der Kathode in einer Höhe von 51,5 mm vom unteren Elekt- rodenrand befestigt. Das Magnetfeld war parallel zur Elektrodenoberfläche ausgerichtet, so- dass die resultierenden Lorentzkräfte im ungestörten elektrischen Feld vertikal nach oben (Richtung des Blasenanstiegs) wirkten. Des Weiteren wurden Messungen mit verschiede- nen Messfenstern durchgeführt. In ersten Übersichtsmessungen wurde das gesamte Strö- mungsfeld zwischen den Elektroden abgedeckt (Auflösung ca. 14 pixel/mm, Vergrößerung 0,09, zeitliche Auflösung 60 Hz). Anschließend wurde ein kleinerer Ausschnitt gewählt, bei dem das Strömungsfeld im Bereich von 39-109 mm der Elektrodenhöhe betrachtet wurde (34 pixel/mm, Vergrößerung 0,22, zeitliche Auflösung 80 Hz). Für jede untersuchte Konfigu- ration wurden 4000-6000 Bilder aufgenommen. Die 2D-PIV Auswertung der Partikelbilder erfolgte mittels Kreuzkorrelation und adaptiven Analysefenstern mit einer finalen Größe von 24×24 Pixeln und einer Überlappung von 50%.

Ergebnisse

In Abb. 2 ist ein Ausschnitt eines im Durchlichtverfahren aufgenommenen Blasenbildes zu sehen. Auf der linken Seite (Kathode) entstehen aufsteigende Wasserstoffblasen, während sich auf der gegenüberliegenden Seite (Anode) Sauerstoffblasen bilden. Der wellige Bla- senteppich wird zur Elektrode hin schnell dichter, so dass lediglich am äußeren Rand einzel- ne Blasen unterschiedlicher Größe zu erkennen sind und weiter innen nahezu das gesamte Hintergrundlicht von den Blasen absorbiert wird. In einigen Fällen wandern Einzelblasen mit

deutlich größerem Durchmesser aus dem Teppich heraus (Vgl. Abb. 2 unten links). In Abb. 3 ist das zeitgemittelte Strömungsfeld zwischen den Elektroden für ansteigende elektrische Stromdichten dargestellt¹. In der Zellenmitte sind die Strömungsgeschwindigkeiten größtenteils sehr gering und steigen zu den Elektroden hin im Bereich der aufsteigenden Blasen an, da das Fluid hier durch die Blasen mitbewegt wird. Im Bereich unterhalb der Wasseroberfläche ($y = 180$ mm) ist ein im Uhrzeigersinn drehendes Rezirkulationsgebiet zu erkennen. Der Drehsinn geht auf das höhere Volumen der Wasserstoffblasen und den damit verbunden höheren Strömungsimpuls zurück (Weier et al. 2013). Das unter Anwendung eines Magnetfeldes resultierende Geschwindigkeitsfeld ist in Abb. 4 dargestellt. Im Bereich des angebrachten Magneten ist die durch die Lorentzkraft induzierte Konvektionsströmung deutlich erkennbar. Die erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten nehmen mit zunehmendem Abstand zur Kathode erkennbar ab, da die magnetische Flussdichte B und damit die erzeugten Lorentzkraft ($f = j \times B$) exponentiell mit dem Wandabstand abfallen.



Abb. 2: Im Durchlichtverfahren aufgenommenes Blasenbild

Für die weitere Diskussion wurden die Messungen mit kleinerem Messfenster herangezogen (vgl. Messaufbau). In Abb. 5 sind die über der Höhe x gemittelten Geschwindigkeitskomponenten des zeitgemittelten Strömungsfeldes ohne Magneteeinfluss dargestellt. Abb. 6 zeigt die dazugehörigen über der Höhe gemittelten RMS-Werte der Schwankungsgrößen. Die in diesen Darstellungen eingezeichneten vertikalen Linien stellen die ungefähre Position der Blasenteppichgrenze dar, die aus zeitgemittelten Blasenbildern durch Definition eines Schwellenwertes für den Grauwert des Blasenteppichs bestimmt wurde. Die so ermittelte Blasenteppichdicken nehmen an beiden Elektroden ähnliche Werte an, wobei der Blasenteppich auf der Anodenseite mit steigender Stromdichte vergleichsweise

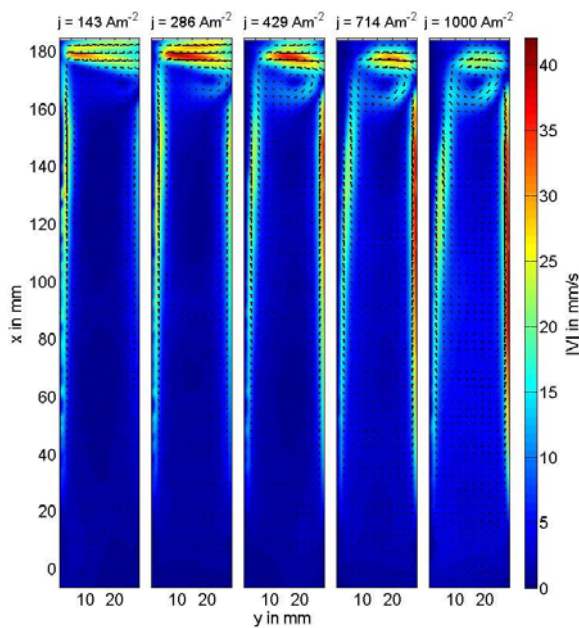


Abb. 3: Zeitgemitteltes Strömungsfeld bei verschiedenen Stromdichten ohne Lorentzkraft

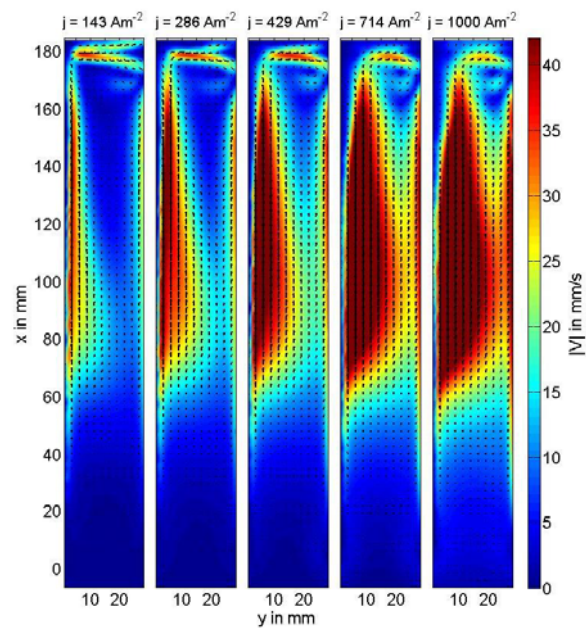


Abb. 4: Strömungsfeld bei verschiedenen Stromdichten mit Lorentzkrafteinfluss

¹ Ursprung liegt am unteren Rand der Kathode, oberer Rand der Elektroden bei $y=140$ mm.

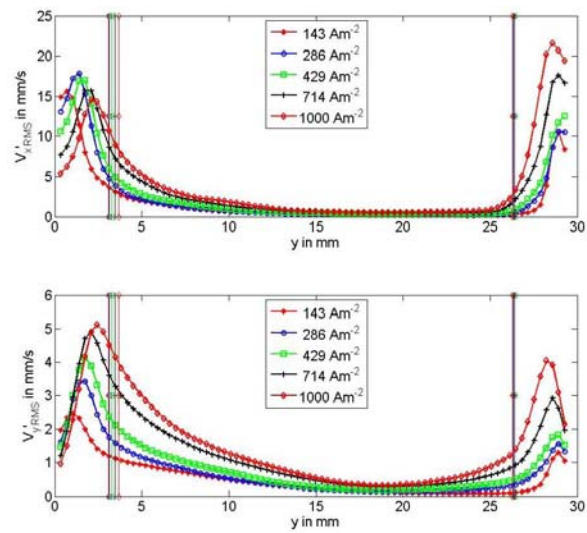
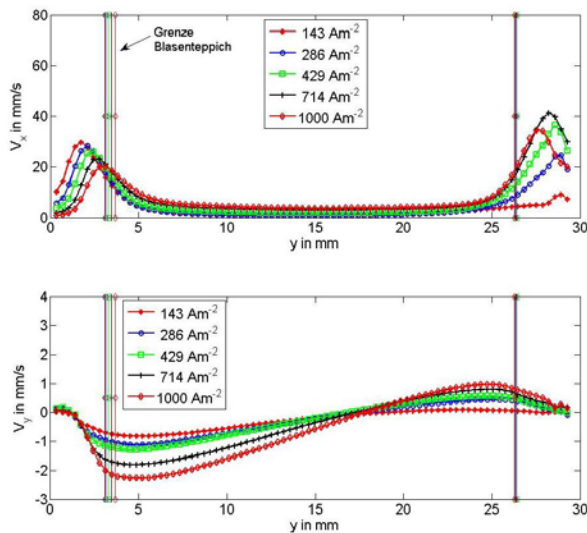


Abb. 5: Über x gemittelte Geschwindigkeitsprofile des zeitgemittelten Strömungsfeldes (keine Lorentzkräfte)

Abb. 6: Über x gemittelte Profile der RMS-Werte (keine Lorentzkräfte)

schwächer anwächst. Wie schon zuvor gezeigt wurde, nimmt die Geschwindigkeit der in der Zellenmitte nahezu ruhenden Strömung zu den Elektroden hin bis zu einem gewissen Punkt zu und fällt erwartungsgemäß aufgrund der Wandhaftbedingung wieder ab. Der Bereich um die Geschwindigkeitsmaxima der zur Elektrode parallelen Geschwindigkeitskomponente V_x liegt dabei innerhalb des Blasenteppichs. Eine korrekte Geschwindigkeitsmessung mittels PIV ist in diesem Bereich mit großen Unsicherheiten behaftet, da zum einen bei hoher Gasbeladung ein Großteil des emittierten Fluoreszenzlichtes absorbiert werden kann und zum anderen Reflexionen des Fluoreszenzlichtes an den Gasblasen mitgemessen werden, wodurch die Blasenbewegung auch einen signifikanten Anteil der gemessenen Geschwindigkeit ausmachen kann. Da bei höherer Stromdichte zunehmend mehr Blasen generiert werden, ist ein Anstieg der V_x -Geschwindigkeitskomponente zu erwarten. Während dies bei den moderaten Geschwindigkeiten in der Zellenmitte zu sehen ist, fallen die Geschwindigkeitsmaxima auf der Kathodenseite mit ansteigender Stromdichte ab und entfernen sich zudem von der Elektrode. Beides deutet darauf hin, dass der Bereich um das Geschwindigkeitsmaximum aufgrund der Gasbeladung (welche ebenfalls mit der Stromdichte steigt) in Elektrodennähe nicht korrekt gemessen werden kann. Die in diesem Bereich hohen RMS-Werte der elektrodenparallelen Geschwindigkeit bestärken zudem diese Vermutung (vgl. Abb. 6). Auf der Anodenseite entfernen sich die Geschwindigkeitsmaxima ebenfalls mit steigender Stromdichte von der Wand weg, der Abfall des Maximums findet jedoch erst bei einer Stromdichte von 1000 Am^{-2} statt. Die Lichtstreuung ist an der Anodenseite wegen des geringeren Gasvolumenstroms und der größeren Blasen des Sauerstoffs weniger intensiv, deshalb sind auch die Störeinflüsse vermindert. Eine genauere Bewertung der Messgenauigkeit in Wandnähe wird daher in Zukunft noch durch die Anwendung von PTV-Algorithmen erfolgen. Für die gemittelten Geschwindigkeiten in Wandnormalenrichtung ergeben sich an der Kathode negative und an der Anode positive Werte (vgl. Abb. 5 unten). Dies zeigt, dass die Strömung durch den Blasenteppich mitgerissen bzw. aufgenommen wird. Dementsprechend verursacht der fortlaufend wellige Teppich hohe Geschwindigkeitsschwankungen der V_y -Komponente in seiner näheren Umgebung (vgl. Abb. 6 unten). Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Stromdichte und ist in den Profilen der RMS Werte deutlich zu erkennen.

In sind die gemittelten Geschwindigkeitsprofile unter dem Einfluss der Lorentzkraft dargestellt. Deutlich zu sehen sind die im Vergleich zu Abb. 5 stark angestiegenen Geschwindig-

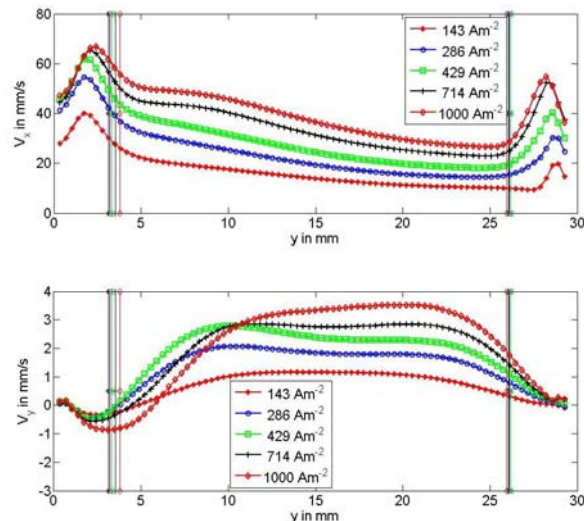


Abb. 7: Über x gemittelte Geschwindigkeitsprofile des zeitgemittelten Strömungsfeldes (mit Lorentzkräften)

keitswerte der wandparallelen Komponente. Im Gegensatz zu den Messungen ohne Lorentzkrafteinfluss ist auch durchgängig ein Anstieg der Maxima mit zunehmender Stromdichte zu sehen. Die gemessenen Geschwindigkeiten in unmittelbarer Wandnähe sind jedoch deutlich größer als Null, so dass hier die Blasenbewegung vermutlich einen Großteil des gemessenen Wertes ausmacht. In Wandnormalenrichtung scheint der Lorentzkrafteinfluss die Strömung von der Kathode wegzubewegen. Aufgrund des überwiegend positiven Verlaufs der wandnormalen Geschwindigkeitskomponente spielen hier – die Massenerhaltung in Betracht ziehend – offensichtlich dreidimensionale Effekte eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Zur Vermessung der Blasen trajektorien wurden auf die Blasenbilder verschiedene Bildfilter angewandt, mit denen einzelne Blasen isoliert bzw. extrahiert werden konnten (s. Abb. 8). Aus den resultierenden Bildern lässt sich die Blasenbewegung mit geeigneten PTV-Algorithmen leicht verfolgen. Bei der verwendeten Vergrößerung und Bildauflösung konnten mit diesem Vorgehen nur relativ große Blasen ($d > 1\text{ mm}$), die mit einem geringen Abstand zum Blasen Teppich aufsteigen, zuverlässig identifiziert und verfolgt werden. Abb. 9 zeigt für eine anliegende elektrische Stromdichte von 143 Am^{-2} sowohl für die Konfiguration mit Magneten als auch ohne einige Blasen trajektorien für Blasen unterschiedlicher Durchmesser. Auffällig ist die wellenförmige Aufwärtsbewegung, die jedoch bei der kleineren Blase mit Lorentzkrafteinfluss ($d = 1.8\text{ mm}$) kaum mehr wahrnehmbar ist. Wie an der mittleren Aufstiegs geschwindigkeit V_x erkennbar ist, steigen größere Blasen erwartungsgemäß – aufgrund des kleineren Oberflächen-Volumenverhältnisses und dem damit verbundenen geringeren Widerstands-Auftriebsverhältnis – schneller auf. Des Weiteren zeigt ein Vergleich der Aufstiegs geschwindigkeit der beiden Blasen mit $d = 2.0\text{ mm}$, dass die Lorentzkraft induzierte Konvektionsströmung den Blasen aufstieg beschleunigt. Die wellenförmige Bewegung wird im Verlauf der Blasen geschwindigkeit in Wandnormalenrichtung sichtbar. Die größte Blase ($d = 2.7\text{ mm}$) weist hier erneut die höchsten Beträge auf. Aus dem Vergleich der beiden Blasen mit $d = 2.0\text{ mm}$ ist zudem keine Lorentzkraftabhängigkeit ersicht lich. Eine FFT-Analyse

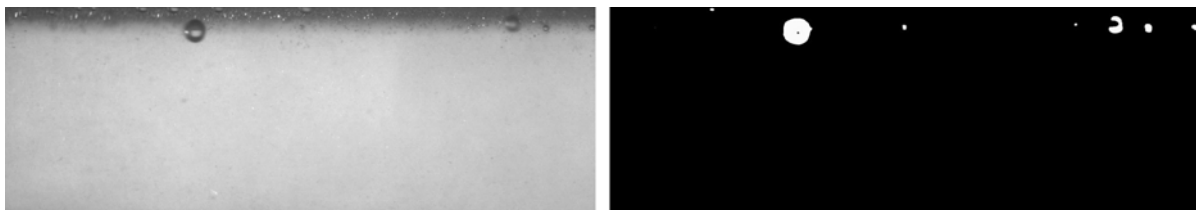


Abb. 8: Blasenbild vor (links) und nach (rechts) Anwendung von Filtern zur Blasenextraktion

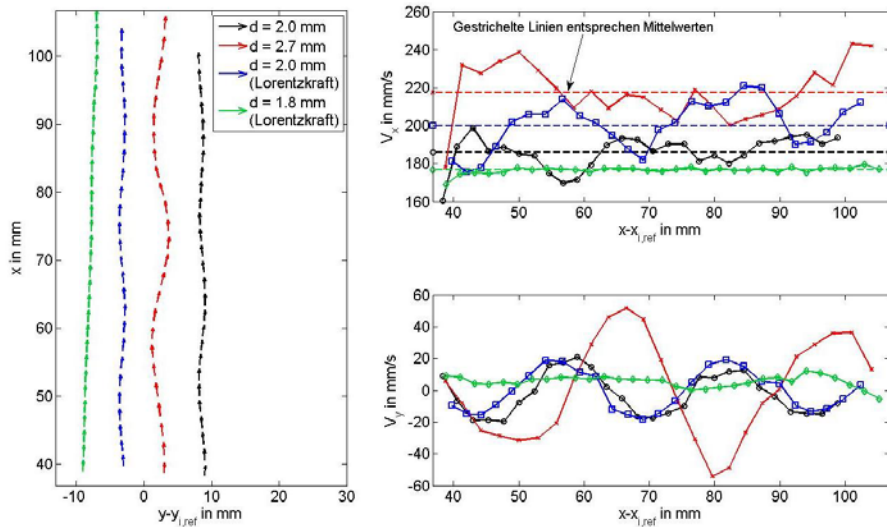


Abb. 9: Basentrajektorien für $j=143 \text{ Am}^{-2}$

der Signale (nicht dargestellt) zeigt für alle gezeigten Fälle einen dominierenden Bewegungsanteil bei einer Wellenlänge von ungefähr 33 mm. In Folgeuntersuchungen wäre zu klären, ob hier ein Zusammenhang mit der Welligkeit des Blasenteppichs besteht. Die wellenförmige Blasenbewegung könnte auch durch Nachlaufinstabilitäten verursacht worden sein, die bei den vorherrschenden Reynoldszahlen von 300-600 (ermittelt mit der relativen Aufstiegs geschwindigkeit der untersuchten Blasen) zu erwarten wären.

Die gemessenen Blasengeschwindigkeiten sind insgesamt um ein Vielfaches größer als die in den mittleren Strömungsfeldern dargestellten Geschwindigkeiten (Vgl. Abb. 3-). Der Aufstieg von Blasen dieser Größe findet aber auch relativ selten statt. Abb. 10 zeigt für drei aufeinanderfolgende Zeitschritte die Bewegung der Blase aus Abb. 9 mit $d = 2.0 \text{ mm}$ (ohne Lorentzkrafteinfluss) gemeinsam mit dem umgebenden Strömungsfeld. Die Umströmung der Blase ist vor allem im mittleren und linken Bild gut erkennbar. Neben der Beschleunigung der Strömung stromauf der Blase ist die Verdrängung zu den Seiten und die beiden gegenläufig rotierenden Rezirkulationsgebiete im Nachlauf erkennbar. Innerhalb der Blasen werden ebenfalls Geschwindigkeitsvektoren berechnet, da zum einen die Blasenbewegung aufgrund des reflektierten Fluoreszenzlichts ebenfalls in die Korrelation eingeht und zum anderen die Blase sich nicht zwangsläufig mittig im Laserschnitt oder sogar außerhalb des Laserschnitts bewegt. Letzteres ist vermutlich im rechten Bildteil der Fall, bei dem sich die Strömung innerhalb der Blasenabmessungen entgegengesetzt zur momentanen Richtung der Blase be-

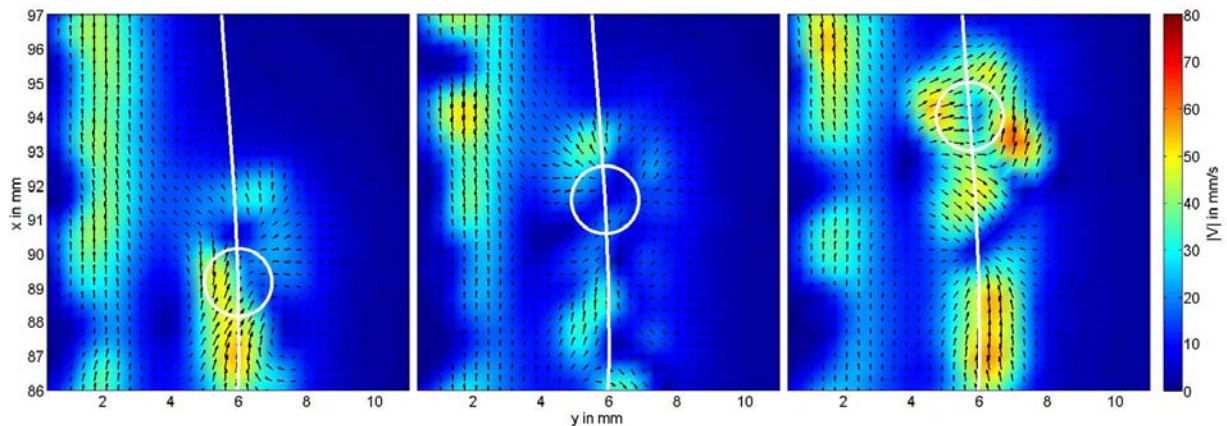


Abb. 10: Blasentrajektorie im Strömungsfeld für drei aufeinanderfolgende Zeitschritte mit $\Delta t = 12.5 \text{ ms}$ ($j = 143 \text{ Am}^{-2}$, keine Lorentzkräfte, Blasendurchmesser $d = 2.0 \text{ mm}$)

wegt. Eine dreidimensionale Blasen- und Partikelgeschwindigkeitsmessung wäre in solchen Fällen daher sinnvoll. Des Weiteren sind die in der Blasenumgebung gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten deutlich geringer als die Geschwindigkeit der Blase selbst (vgl. Abb. 9). Mit einer höheren zeitlichen und örtlichen Auflösung sollte eine genauere Messung der Geschwindigkeiten und deren Gradienten in der näheren Blasenumgebung möglich sein.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des dargelegten Experiments wurden das Geschwindigkeitsfeld mittels PIV sowie die Blasentrajektorien mittels Hintergrundbeleuchtung und PTV-Algorithmen in der Zweiphasenströmung einer ungeteilten Elektrolysezelle simultan gemessen. Die Messungen dienen in erster Linie zur Untersuchung der Machbarkeit der gemeinsamen Messung von Gasblasenbewegung und umgebenden Strömungsfeld, dessen Kenntnis zur Entwicklung von Strömungsbeeinflussungsmethoden in Elektrolysezellen von Bedeutung ist. Im dichten Bereich des an der Elektrode angrenzenden Blasenteppichs wird aufgrund der starken Absorption durch die Blasen sowohl die Messung des Geschwindigkeitsfeldes der flüssigen Phase als auch die Erkennung und Verfolgung von Einzelblasen recht unsicher. Eine weitere Messverfälschung erfolgt dadurch, dass die Blasenbewegung selbst aufgrund der Reflexion des emittierten Fluoreszenzlichts einen signifikanten Anteil der gemessenen Geschwindigkeit ausmachen kann. In Folgeauswertungen wird daher eine genauere Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes in Wandnähe durch PTV-Algorithmen untersucht werden. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die durch einen Permanentmagneten erzeugten Lorentzkräfte eine starke Beschleunigung der wandnahen Strömung zur Folge haben und einen schnelleren Blasenanstieg ermöglichen. Zudem konnte festgestellt werden, dass unter dem Einwirken von Lorentzkräften zusätzlich dreidimensionale Effekte entstehen. Die Auswertung der Blasentrajektorien zeigt eine wellenförmige Aufwärtsbewegung der Blasen, die mit steigender Blasengröße größere Auslenkungen und Geschwindigkeiten in Wandnormalenrichtung erreicht. Die Wellenlänge dieser Bewegung war dabei für die untersuchte Stromdichte für alle ausgewerteten Blasentrajektorien in etwa gleich und könnte mit der Welligkeit des Blasenteppichs zusammenhängen oder auf Nachlaufinstabilitäten zurückzuführen sein. Zuletzt wurde eine Blasentrajektorie gemeinsam mit dem Strömungsfeld der flüssigen Phase gezeigt. Die Auswirkungen der aufsteigenden Blase auf das umgebende Strömungsfeld sowie der Nachlauf sind zwar deutlich sichtbar, eine Auswertung wird jedoch dadurch erschwert, dass die Blase sich im Allgemeinen nicht unbedingt im Laserschnitt bewegt. Ob die Messung der 3D Trajektorie im Volumen Aufschluss über die gesamte Bewegung gibt, müssen weiterführende Untersuchungen zeigen.

Dankesworte

Dieses Projekt wurde im Rahmen der Emmy-Noether Nachwuchsgruppe CI-185 von der DFG gefördert.

Literatur

- Boissonneau, P., Byrne, P., 2000: „An experimental investigation of bubble-induced free convection in a small electrochemical cell“, *Journal of Applied Electrochemistry*, Volume 30, Issue 7, pp. 767-775
- Fernández, D., Maurer, P., Martine, M., Coey, J. M. D., Möbius, M. E., 2014: „Bubble Formation at a Gas-Evolving Microelectrode“, *Langmuir*, im Druck, [dx.doi.org/10.1021/la500234r](https://doi.org/10.1021/la500234r)
- Koza, J.A. et al., 2011: “Hydrogen evolution under the influence of a magnetic field”, *Electrochimica Acta* 56, pp. 2665-2675
- Pletcher, D. Li, X., 2011: “Prospects for alkaline zero gap water electrolyzers for hydrogen production”. *Int. J. Hydrogen Energy* 36, pp. 15089-15104
- Weier, T., Landgraf, S., 2013: “The two-phase flow at gas-evolving electrodes: Bubble-driven and Lorentz-force-driven convection”, *Eur. Phys. J. Special Topics* 220, pp. 313-322