

## Untersuchung der Innenströmung einer Taylorblase mit einem neuartigen PIV-System mit deformierbarem Spiegel

### Investigation of the flow inside a Taylor bubble with a new PIV-system with a deformable mirror

**F. Bürkle<sup>\*1</sup>, G. Lecrivain<sup>2</sup>, R. Maestri<sup>2</sup>, U. Hampel<sup>2,3</sup>, J. Czarske<sup>1</sup>, L. Büttner<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
Professur für Mess- und Sensortechnik  
Helmholtzstraße 18, 01062 Dresden, \*E-Mail: [florian.buerkle@tu-dresden.de](mailto:florian.buerkle@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden

<sup>3</sup> Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen,  
Professur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik  
George-Bähr-Straße 3b, 01069 Dresden,

Particle Image Velocimetry, adaptive Optik, Taylorblase, Partikelabscheidung  
Particle Image Velocimetry, adaptive optics, Taylor bubble, particle separation

#### Zusammenfassung

Aerosolpartikel liegen in vielen Gasen vor. Die Abscheidung dieser Partikel ist unter anderem bei der Reinigung von Luft von Feinstaub und Viren relevant. Auch in der Verfahrenstechnik reagieren beispielsweise Gase mit Feststoffen, wie bei der Gasphasenpolymerisation. Für Partikel im Größenbereich von (0,1 – 10)  $\mu\text{m}$  sind bisher aufgrund zu weniger empirischer Daten keine zuverlässigen Vorhersagen der Prozesse möglich.

In diesem Beitrag werden Messungen der Innenströmung einer Blase in verschiedenen, mit Wasser durchströmten Rohren gezeigt. Es wird ein Mehrebenen-PIV-System mit einem deformierbaren Spiegel zur Refokussierung genutzt. In einem Rohr mit konstantem Durchmesser ist ein langgezogener Wirbel sichtbar. Zur Beeinflussung der Blaseninnenströmung ist in einem Rohr eine Verjüngung eingebracht. Die Verjüngung erzeugt in der Blase einen zweiten Wirbel, welcher die gleiche Rotationsrichtung aufweist. Im Berührungsbereich zwischen beiden Wirbeln treffen entgegengesetzte Strömungen aufeinander. Der durch die Verjüngung neu erzeugte Wirbel soll für eine erhöhte Partikelseparation sorgen und damit zur zukünftigen Entwicklung eines miniaturisierten und tragbaren Aerosolabscheiders beitragen.

#### Einleitung

Der Transport von Aerosolpartikeln und deren Übergang in eine Flüssigphase spielen in verschiedenen Anwendungen eine wesentliche Rolle. Als Beispiel seien Nassabscheider für die Rückhaltung verschiedener Partikel wie Feinstaub, welcher bei der Verbrennung von Biomasse entsteht (Bianchini et al. 2016), und Viren (Mirzaee et al. 2016) genannt. Das mit Partikeln beladene Gas wird dazu in eine Flüssigkeit geleitet und steigt in Form von Blasen auf. Auch bei der Synthese von Polyethylen ist der Übergang von Feststoffpartikeln an Flüssig-

Gas-Phasengrenzflächen von großer Bedeutung (Zhu et al. 2000). Während des Herstellungsprozesses wird eine heiße Flüssigkeit in ein Gemisch aus Gas und suspendierten Katalysatorpartikeln zerstäubt. Die Abscheidung von Partikeln kleiner als  $0,1 \mu\text{m}$  kann theoretisch hinreichend genau beschrieben werden (Pich und Schütz 1991, Ghiaasiaan und Yao 1997). Bei diesen theoretischen Studien wurde die Innenströmung der Blase als entscheidenden Faktor bei der Rückhaltung von Partikeln identifiziert (Laker und Ghiaasiaan 2004). Für Partikel mit Durchmessern zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $10 \mu\text{m}$  weichen die Abscheideraten jedoch von der Vorhersage ab (Cadavid-Rodriguez et al. 2014). Grund dafür ist die in vorherigen Modellen nicht berücksichtigte, stark fluktuierende Blasenoberfläche, welche die Strömungsfelder sowohl in der Blase als auch in der umliegenden Flüssigkeit beeinflusst (Akbar und Ghiaasiaan 2006). Der dominierende Transportmechanismus für Partikel im Größenbereich  $0,1 \mu\text{m} < d_p < 10 \mu\text{m}$  ist nicht die molekulare Diffusion, wie für Partikel mit  $d_p < 0,1 \mu\text{m}$ , sondern trägheitsbedingte Impaktion. Daher hat die vorliegende Strömung einen größeren Einfluss auf diese Partikel. Zur detaillierten Untersuchung der Partikeldeposition im Trägheitsbereich stehen bisher zu wenige empirische Daten der Strömung zur Verfügung. Die Schwierigkeit liegt dabei in der Messung der Strömung durch gekrümmte und stark fluktuierende Phasengrenzen.

Strömungsdaten können mit verschiedenen optischen Messtechniken erfasst werden. Verbreitete Methoden umfassen die Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV) und der darauf aufbauenden Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor (LDV-PS) (Bürkle et al. 2020). Diese nutzen sich kreuzende Laserstrahlen, welche im Kreuzungsbereich ein Streifenmuster erzeugen und das dopplermodierte Signal querender Partikel zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit nutzt. Dabei wird die Geschwindigkeit punktwise (LDV) bzw. eindimensional orts aufgelöst (LDV-PS) in einer Richtung (senkrecht zum Streifenmuster) gemessen. Die Größe des Messvolumens beträgt einige hundert Mikrometer bis zu mehreren Millimetern. Für die Messung in Blasen sind bildgebende Techniken jedoch besser geeignet, da die Strömung hier mehrdimensional ist und über einen Bereich von mehreren Zentimetern ausgedehnt ist.

Eine Methode zur mehrdimensionalen Messung der Strömung ist die Particle Image Velocimetry (PIV), welche in eine Strömung eingebrachte Partikel mit einer Kamera aufnimmt (Raffel et al. 2018). So können Ort und Geschwindigkeit von Partikeln in einer Ebene bestimmt werden (2D2C).

In diesem Beitrag wird die Innenströmung einer Luftblase, welche sich in einer Wasserströmung einem senkrechten zylindrischen Rohr befindet, vorgestellt. Dabei wird die Blaseninnenströmung einer Blase in einem geraden Rohr und in einem Rohr mit einer Verjüngung verglichen. Der deformierbare Spiegel wird zur Fokussierung auf die Lichtschnittebene genutzt.

## Experimenteller Aufbau

Der strömungsmechanische Aufbau besteht aus einem transparenten Rohr mit einem Innendurchmesser von  $d_1 = 6 \text{ mm}$ , in welchem eine Verjüngung auf  $d_2 = 5,4 \text{ mm}$  vorliegt. Das Rohr ist senkrecht zur Tischoberfläche eingespannt. Eine Pumpe erzeugt eine nach unten gerichtete Wasserströmung, deren Durchflussrate über ein Nadelventil gesteuert werden kann. Am unteren Ende des Rohrs verlässt das Wasser das Rohr. Zur Untersuchung der Blaseninnenströmung kann eine Blase mit definiertem Volumen in das Rohr eingebracht werden.

Zur Sichtbarmachung der Strömung wurden mittels eines Ultraschallzerstäubers Wassertröpfchen aus der die Blase umgebenden Filmströmung erzeugt. Die Strömung wird dadurch gestört. Nach wenigen Sekunden ist diese Störung relaxiert und es hat sich eine stationäre Strömung eingestellt. Die Wassertröpfchen halten sich einige Minuten in der Gasphase, wodurch die Messung der Strömung ermöglicht wird.

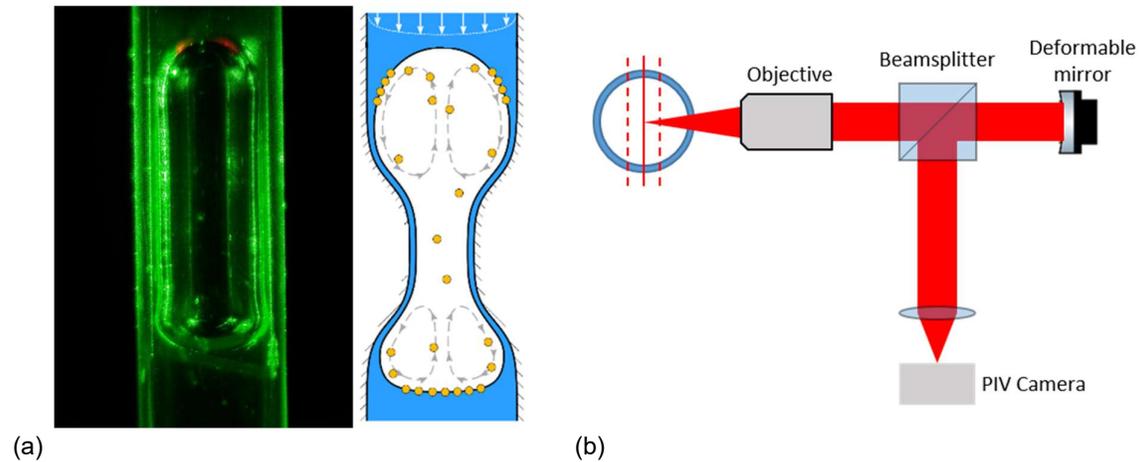


Abb. 1: (a) Bild einer Blase in einem geraden Rohr und Skizze einer Blase in einer Verjüngung. (b) Schematischer Aufbau des PIV-Systems mit deformierbarem Spiegel.

Zur Untersuchung der Blaseninnenströmung wurde ein PIV-Messsystem bestehend aus einem Mikroskop-Objektiv, einem Strahlteiler, einem deformierbaren Spiegel, einer Linse und einer Kamera aufgebaut (Abb. 1b). Der deformierbare Spiegel wurde dabei zum Fokussieren der Lichtschnittebene, welche von einer separaten Lichtschnittoptik erzeugt wurde, genutzt. Über einen Kippspiegel kann die Lichtschnittebene zur Mehrebenenmessung verschoben werden. Die Kamera hat bei einer Auflösung von  $280 \times 640$  Pixeln eine Bildrate von 336 Bildern pro Sekunde (Frames per second, fps).

### Messung der Blaseninnenströmung

Die gesamte Blaseninnenströmung wurde aufgenommen, indem Ausschnitte über die gesamte Länge der Blase aufgenommen wurden. Im Fall der Blase im Rohr ohne Verjüngung wurde für die Messung die Wasserströmung so eingestellt, dass sich die Blase langsam, aber konstant nach unten bewegt. So konnte die gesamte Blaseninnenströmung gemessen werden. Die bekannte Bewegung nach unten kann bei der Berechnung der Geschwindigkeiten herausgerechnet werden. Insgesamt wurden hierfür 5000 Bilder aufgenommen.

Im Fall der Blase in der Verjüngung musste die Blase stationär sein, da angenommen wurde, dass die Verjüngung die Blaseninnenströmung beeinflusst. In der Verjüngung wurde die Blaseninnenströmung in 6 Ausschnitte aufgeteilt. Die Ausschnitte überschneiden sich dabei um etwa ein Drittel. Das Rohr wurde vertikal verschoben, nachdem 1000 Bilder für einen Ausschnitt der Blaseninnenströmung aufgenommen wurden. Vor der Berechnung der Geschwindigkeiten wurden die einzelnen Bilder zu einem Bild der gesamten Blase zusammengefügt. Im Überlappbereich wurde dabei der Mittelwert der Bilder nach Abzug des Hintergrunds verwendet.

Die Ergebnisse beider Messungen sind in Abb. 2 dargestellt. Gezeigt ist die Blaseninnenströmung in der Mittelebene. Die Blasen erstrecken sich dabei von  $y = 0$  bis  $y \approx -20,5$  mm. Das Volumen beider Blasen ist annähernd gleich, da für beide Messungen die gleiche Blase verwendet wurde. Geringfügige Abweichungen können sich durch das Ablösen kleiner Bläschen bei der Verwendung des Ultraschallverneblers ergeben, wenn diese sich nicht alle wieder mit der großen Blase verbinden.

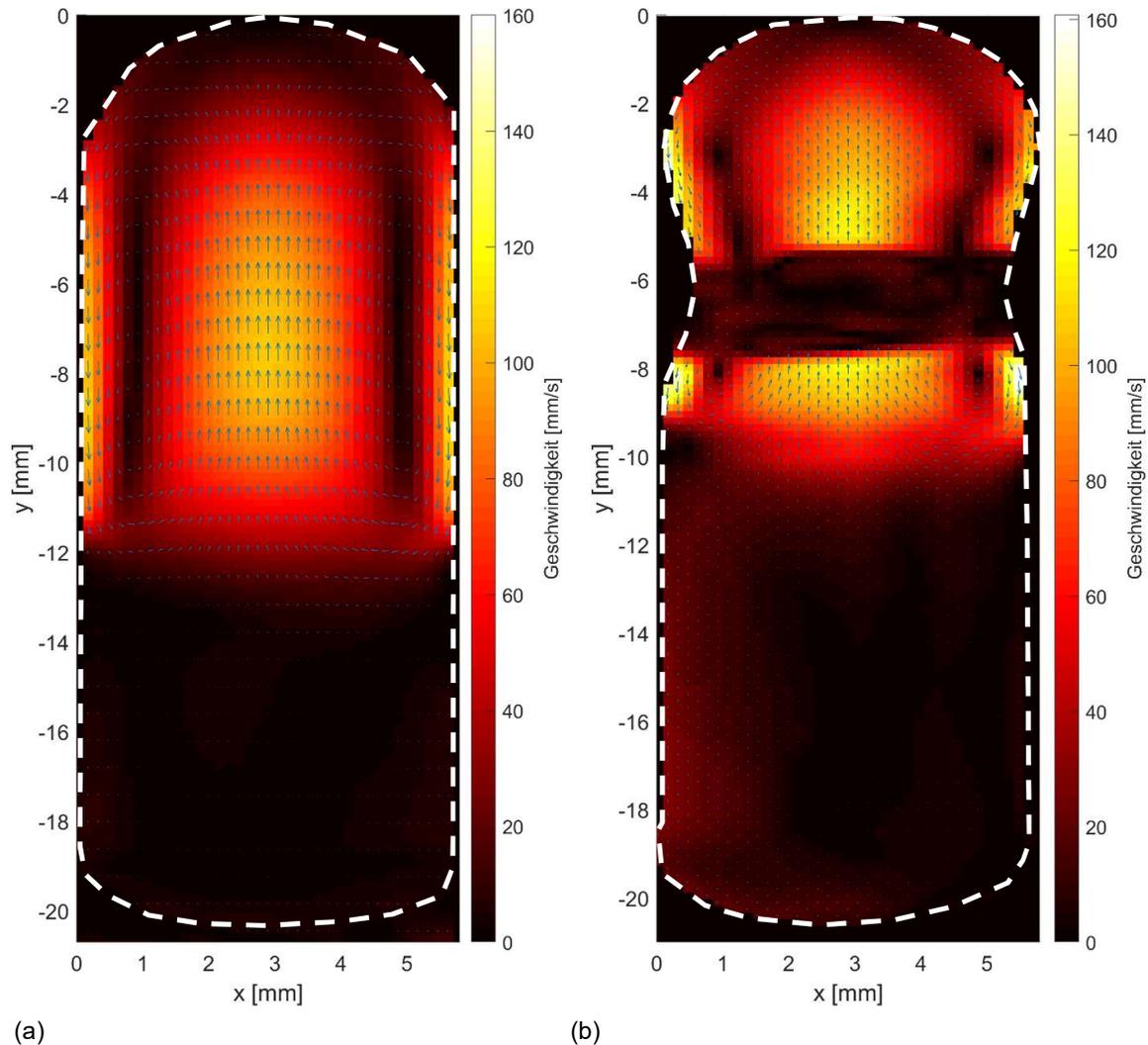


Abb. 2: Geschwindigkeitsfelder der Blaseninnenströmung (a) einer Taylorblase in einem Rohr ohne Verjüngung und (b) in einem Rohr mit Verjüngung. Die gestrichelte weiße Linie stellt die Blasenkontur dar

Die Blaseninnenströmungen beider Blasen werden zunächst als rotationssymmetrisch angenommen. Für die Blaseninnenströmung der Blase in Rohr ohne Verjüngung kann im Bereich von  $y > -12$  mm ein langgezogener, toroidaler Wirbel festgestellt werden. Die Geschwindigkeit in der Mitte der Blase beträgt maximal 106 mm/s, während die Geschwindigkeit an der linken bzw. rechten Phasengrenzfläche maximal 105 mm/s bzw. 109 mm/s beträgt. Im Bereich von  $y < -14$  mm, welcher folgend beschrieben wird, beträgt die Geschwindigkeit maximal 8 mm/s und ist damit um eine Größenordnung kleiner. An der Phasengrenzfläche verläuft die Strömung in der Schnittebene im Uhrzeigersinn und ist damit nicht rotationssymmetrisch. In der Mitte der Blase strömt die Luft mit einer mittleren Geschwindigkeit von 2 mm/s nach unten. Die Blaseninnenströmung der Blase in der Verjüngung zeigt insgesamt zwei toroidale Wirbel, wovon einer oberhalb und einer unterhalb der Verjüngung liegt. In der Mitte der Blase beträgt die Geschwindigkeit maximal 120 mm/s. Die Geschwindigkeit am Rand der linken Wirbel beträgt 151 mm/s für den oberen und 146 mm/s für den unteren Wirbel. Am rechten Rand betragen die Geschwindigkeiten 116 mm/s bzw. 161 mm/s. Unterhalb von  $y = -12$  mm beträgt die

Geschwindigkeit maximal 30 mm/s. Diese Geschwindigkeiten werden an der linken Phasengrenzfläche erreicht, wo die Luft aufsteigt. Auch an der rechten Phasengrenzfläche steigt die Luft auf, allerdings mit maximal 7 mm/s. In der Mitte sinkt die Luft mit einer mittleren Geschwindigkeit von 3 mm/s ab. Der Bereich niedriger Geschwindigkeiten zwischen den Wirbeln zeigt die Verjüngung.

## **Diskussion**

In den meisten Studien zu Taylorblasen wurde die Strömung beidseitig der Phasengrenzfläche in einem mit Wasser durchströmten Rohr mit entweder konstantem zylindrischem oder quadratischem Querschnitt untersucht. In dieser Arbeit wurde eine Kanüle mit Verjüngung verwendet und die innere Gasströmung gemessen. Beim Vergleich der Blaseninnenströmungen der Blase im Rohr mit konstantem Querschnitt und in der Verjüngung ist die unterschiedliche Anzahl an Wirbeln hervorzuheben. Während die Blaseninnenströmung der Blase im ebenen Rohr nur einen Wirbel aufweist, zeigen sich in der Blaseninnenströmung der Blase in der Verjüngung zwei Wirbel. Daraus lässt sich folgern, dass die Verjüngung für das Entstehen des unteren Wirbels verantwortlich ist. Die Rotationsrichtung des unteren Wirbels ist dabei die gleiche wie die der oberen Wirbel, sodass im Berührungsbereich beider Wirbel die Geschwindigkeitsvektoren in entgegengesetzte Richtungen zeigen; dieser Bereich liegt innerhalb der Verjüngung. Die aufgrund der Verjüngung stark geänderte innere Gasströmung sollte den Transport von Aerosolpartikeln mit niedriger Trägheit an die Phasengrenzfläche begünstigen, wo sie an der Flüssigkeit gebunden und somit abgeschieden werden.

Weiterhin sind die Strömungsgeschwindigkeiten der Blaseninnenströmung in der Verjüngung größer. Dies lässt sich mit der Massenerhaltung und dem geringeren Durchmesser in der Verjüngung erklären. Unterhalb der Wirbel ist die Geschwindigkeit der Blaseninnenströmung der Blase in der Verjüngung ebenfalls höher, obwohl der Durchmesser hier gleich ist. Die Verjüngung scheint also auch hier einen Einfluss zu haben.

Die Asymmetrie der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten kann mit einer nicht senkrechten Ausrichtung des Rohres liegen. Die Gravitationskraft wirkt dann nicht entlang der Längsachse der Blase und ruft damit eine Asymmetrie der Strömung hervor, indem bspw. die Filmströmung auf einer Seite dicker ist, wodurch auch die Blaseninnenströmung beeinflusst werden kann.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Es wurde gezeigt, dass PIV-Messungen in einer Blase in einem zylindrischen Rohr möglich sind. Der deformierbare Spiegel wurde dabei zunächst für die Fokussierung einer Lichtschnittebene eingesetzt. Perspektivisch können damit mehrere Ebenen ohne Verschieben des Aufbaus vermessen werden. Mittels eines Algorithmus wird der deformierbare Spiegel so eingestellt, dass die jeweilige Ebene scharf abgebildet wird. Für die Korrektur der Verzeichnungen durch die Krümmung des Rohres und der Verjüngung sind weitergehende Untersuchungen notwendig; sie sind jedoch prinzipiell möglich (Radner et al. 2020, Bilsing et al. 2021, Bilsing et al. 2022). Bei statischen Verzeichnungen können so systematische Messabweichungen, bei dynamischen Verzeichnungen zufällige Messabweichungen reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz eines Flächenlichtmodulators, wodurch vornehmlich statische Verzeichnungen korrigiert werden können. Zusätzlich können mit Hilfe einer Spiralphasenmaske volumetrische Messdaten gewonnen werden (Teich et al. 2018). Dies ist erforderlich, da die Strömung zumindest unterhalb der Wirbel nicht rotationssymmetrisch ist und somit eine Messung der Mittelebene nicht ausreicht um die gesamte Strömung zu bestimmen.

Weitere Untersuchungen sollen den Einfluss der Stärke der Gegenströmung zeigen. In Vorexperimenten wurde festgestellt, dass die Gasströmung zum Erliegen kommen kann, wenn der Wasserstrom einen gewissen Wert unterschreitet. Dies war jedoch nur für Rohre mit einem Durchmesser von 8 mm reproduzierbar. Daher soll auch der Einfluss des Rohrdurchmessers auf die Blaseninnenströmung untersucht werden. Mittels numerischer Strömungsmechanik und integraler Messung der Partikelabscheiderate soll der Einfluss der Verjüngung weiter herausgestellt werden.

## Dankesworte

Die Autoren danken der DFG für die Förderung im Rahmen der Projekte BU 2241/6-1 und LE 3303/7-1.

## Literatur

- I. Mirzaee, M. Song, M. Charmchi, H. Sun, 2016:** "Microfluidics-based on-chip impinger for airborne particle collection", *Lab on a Chip* 16, 2254-2264
- A. Bianchini, F. Cento, L. Golfera, M. Pellegrini, C. Sacconi, 2016:** "Performance analysis of different scrubber systems for removal of particulate emissions from a small size biomass boiler", *Biomass and Bioenergy* 92, 31-39
- C. Zhu, X. Wang, L. S. Fan, 2000:** "Effect of solids concentration on evaporative liquid jets in gas–solid flows", *Powder Technology* 111, 79-82
- J. Pich, W. Schütz, 1991:** "On the theory of particle deposition in rising gas bubbles: the absorption minimum", *Journal of Aerosol Science* 22, 267–272
- S. M. Ghiaasiaan, G. F. Yao, 1997:** "A theoretical model for deposition of aerosols in rising spherical bubbles due to diffusion, convection, and inertia", *Aerosol Science and Technology* 26, 141-153
- M. C. Cadavid-Rodriguez, A. Charvet, D. Bemer, D. Thomas, 2014:** "Optimization of bubble column performance for nano-particle collection", *Journal of Hazardous Materials* 271, 24-32
- T. S. Laker, S. M. Ghiaasiaan, 2004:** "Monte-carlo simulation of aerosol transport in rising spherical bubbles with internal circulation", *Journal of Aerosol Science* 35, 473-488
- M. K. Akbar, S. M. Ghiaasiaan, 2006:** "Monte Carlo simulation of aerosol transport in rising gas bubbles undergoing shape deformation", *Journal of Aerosol Science* 37, 735-749
- F. Bürkle, F. Moyon, L. Feierabend, J. Wartmann, A. Heinzl, J. Czarske, L. Büttner, 2020:** "Investigation and equalisation of the flow distribution in a fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, 448, pp. 227546
- H. Radner, J. Stange, L. Büttner, J. Czarske, 2020:** "Field programmable system-on-chip based control system for real-time distortion correction in optical imaging," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68 (4), 3370-3379
- C. Bilsing, H. Radner, S. Burgmann, J. Czarske, L. Büttner, 2022:** "3D Imaging with Double-Helix Point Spread Function and Dynamic Aberration Correction Using a Deformable Mirror", *Optics and Lasers in Engineering*, 154, 107044
- C. Bilsing, H. Radner, L. Büttner, S. Burgmann, A. Metzmacher, J. Czarske, 2021:** "Particle Tracking Velocimetry mit dynamischer Aberrationskorrektur für 3D-Strömungsmessungen in Tropfen mit dynamischer Oberfläche", 28. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, Bremen, 7
- Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., Kompenhans, J., 2018:** "Particle Image Velocimetry", Springer, ISBN: 978-3-319-68851-0
- M. Teich, L. Büttner, J. Czarske, 2018:** „Adaptives Helix Partikel Tracking in verdunstungsinduzierten Wassertropfenströmungen“, 26. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, Rostock, 20