

Blasengrößenbestimmung durch Interferometric Particle Imaging (IPI) in Vorwärts-, Seitwärts- und Rückstreuung

Bubble sizing with interferometric particle imaging (IPI) in forward, side and back scatter

Christian Sax, Maximilian Dreisbach, Jochen Kriegseis

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Strömungsmechanik (ISTM),
Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Interferometric Particle Imaging, Interferenzmuster, Rückstreuung, Blasengrößenbestimmung
Interferometric Particle Imaging, Interference pattern, Backscatter, Bubble sizing

Zusammenfassung

Die Messung der Größenverteilungen von Partikeln hat eine große Bedeutung in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen. Interferometric Particle Imaging (IPI) hat sich hierzu als Feldmessmethode zur Vermessung von Partikelgrößenverteilungen wie z.B. Tröpfchen und Bläschen bewährt. Allerdings wird die IPI-Methode derzeit maßgeblich im Vorwärts- und Seitwärtsstreuungsbereich verwendet, obwohl eine Vielzahl weiterer Strömungssituationen eine Anwendung der IPI im Rückstreubereich benötigen – z.B. aufgrund eines einzigen optischen Zugangs. Im Folgenden wird eine Sichtbarkeitsformulierung theoretisch hergeleitet, welche eine Anwendung von IPI im Rückstreubereich ermöglicht. In einem Experiment wird IPI im Vorwärts-, Seitwärts- und Rückstreubereich angewendet und die Sichtbarkeitsformulierung an einem generischen Bläschenerzeuger experimentell validiert.

Abstract

The measurement of particle size distributions is of great importance in a variety of applications. Interferometric Particle Imaging (IPI) has proven to be a convenient field measurement method for measuring particle-size distributions such as droplets and bubbles. However, the IPI method is currently used mainly in the forward and sideways scattering region, even though a variety of additional flow scenarios would require the application of IPI in the backscattering region – e.g., due to a single optical access. In the following, a visibility formulation is derived theoretically that enables an application of IPI in the backscatter region. In an experiment, the IPI approach is applied in the forward, sideways, and backscatter domains, and the visibility formulation is experimentally validated on a generic bubble generator.

Einleitung

Die Größenmessung der dispersen Phase in Mehrphasenströmungen hat große Bedeutung in einem weiten Feld an Anwendungen. Die Vermessung von Tröpfchen findet unter anderem Anwendung bei Sprays (Maeda *et al.* 2002), Tröpfchen in Verbrennung (Fujisawa *et al.* 2003), Wolken und atmosphärischen Phänomenen (Dunker *et al.* 2016, Quérel *et al.* 2009). Bläschengrößen in Fluiden sind ebenfalls von Interesse in Gebieten wie Kavitation (Lacagnina *et al.*

2011) und siedenden Flüssigkeiten, wie sie in Kraftwerken vorkommen. In diesem Zusammenhang stellt das Interferometric Particle Imaging (IPI) eine weit verbreitete optische Messtechnik für die Größenbestimmung von polydispersen sphärischen Partikeln wie Tröpfchen und Blasen dar; siehe z.B. Niwa *et al.* 2000, König *et al.* 1986 und Glover *et al.* 1995. Bei der IPI-Methode wird der Durchmesser eines Partikels aus dem Interferenzmusters des Partikelbildes bestimmt. Die Methode kann weiterhin direkt mit Particle Tracking Velocimetry verbunden werden, um darüber hinaus auch das Geschwindigkeitsfeld der Partikel zu bestimmen (Lacagnina *et al.* 2011). IPI findet vor allem dann Anwendung, wenn Felder von Partikeln vorliegen, welche zu klein sind, um diese ausreichend genau mit Schattenverfahren-basierten Methoden zu charakterisieren. Gleichzeitig bietet IPI die Möglichkeit, ein dreidimensionales Messvolumen simultan zu vermessen, was ein Vorteil gegenüber Punktmessmethoden wie z.B. der Phase Doppler Anemometry (PDA) darstellt; siehe z.B. Albrecht *et al.* 2007.

Die Methode wurde zunächst als sog. interferometric laser imaging for droplet sizing (ILIDS) eingeführt und war zunächst beschränkt auf Tropfen (König *et al.* 1986, Glover *et al.* 1995). Später wurde die Methode dann von Kawaguchi *et al.* (2002) auch auf Bläschen erweitert. IPI wird normalerweise im Vorwärtsstreubereich und seltener im Seitwärtsstreubereich (90°) verwendet. Typische Streuwinkel sind hierbei für Tröpfchen 66° und für Bläschen 45° bzw. 90° . In ihrem herkömmlichen Ansatz ist die IPI-Methode demnach vorwiegend auf Vorwärtsstreuung beschränkt und erfordert daher einen zweiten optischen Zugang, wodurch die Bandbreite der möglichen Anwendungen einschränkt wird.

Während physikalische Modelle in Versuchsständen zwar guten optischen Zugang liefern, treten oft nicht alle Vorgänge in diesen Versuchsständen so auf wie in der Anwendung. Messungen direkt an der Anwendung bieten meist bessere Daten, haben aber oft den Nachteil der beschränkten optischen Zugänglichkeit. Insbesondere in mehrphasigen Spaltströmungen wie beispielsweise in Schmierespalten zwischen Rotor und Stator gibt es oft nur eine einzige optische Zugangsmöglichkeit. Hier ist für die erfolgreiche Anwendung von IPI der Rückstreubereich unumgänglich. Im Folgenden wird daher eine mögliche Herangehensweise zur Durchführung von IPI im Rückstreubereich beschrieben.

Interferometric Particle Imaging

Es soll ein transparentes und nahezu sphärisches Partikel betrachtet werden, z.B. eine Luftblase in einem Fluid. Wenn das Partikel von kohärentem und monochromatischem Licht beleuchtet wird, befinden sich unter dem Beobachtungswinkel θ Glanzpunkte auf der Oberfläche des Partikels. Das Phänomen der Glanzpunkte kann mittels der geometrischen Optik beschrieben werden. Ein einfallender Lichtstrahl kann entweder direkt an der Oberfläche reflektiert werden (0te-Ordnung $p = 0$) oder in das Partikel transmittiert werden (p te-Ordnung $p \geq 1$) und das Partikel nach $p - 1$ internen Reflektionen wieder verlassen. Der Weg eines Lichtstrahls, welcher auf das Partikel trifft und dieses unter dem Beobachtungswinkel θ wieder verlässt, kann durch das Snelliussche Brechungsgesetz sowie durch das Reflexionsgesetz eindeutig beschrieben werden. Dadurch können die Glanzpunktpositionen für einen gegebenen Beobachtungswinkel auf dem Partikel eindeutig beschrieben werden. Der Abstand der Glanzpunkte ist folglich eine Funktion des Beobachtungswinkels und des Partikeldurchmessers.

Ziel der IPI-Methode ist, den Glanzpunktabstand zu bestimmen und daraus die Größe des Partikels abzuleiten. Aus der Analogie eines Partikels mit zwei Glanzpunkten zu einem Doppelspalt wie in Young's Fringe Experiment, kann der Zusammenhang des Interferenzmusters

mit der Glanzpunkt Abstand abgeleitet werden. Die Frequenz F des Interferenzmusters hängt über

$$\frac{1}{F} = \frac{\lambda S/n_2}{\Delta_{GP}} \quad (1)$$

von der Wellenlänge des Lichtes λ , des Abstands des Kamerachips zum Partikel S und des Glanzpunkt Abstandes Δ_{GP} ab, wobei n_2 der Brechungsindex des Mediums zwischen Partikel und Kamerachip ist (Born und Wolf 2019). Dieser Zusammenhang kann für beliebige optische Systeme zwischen Kamera und Partikel erweitert werden – vorausgesetzt, das optische System kann mittels einer sog. ABCD-Matrix entsprechend der Abhandlung von Shen *et al.* (2012) beschrieben werden. Dies setzt ein koaxiales System voraus und führt auf

$$\frac{1}{F} = \left| \frac{\lambda B_{tot}}{\Delta_{GP}} \right| \quad (2)$$

wobei $B_{tot} = M_{12}$ der Eintrag der Matrix M_{tot} ist, welcher die Defokussierung des Systems beschreibt. Diese Formulierung ist im Gegensatz zu anderen Formulierungen des Zusammenhangs zwischen Fringe-Frequenz und Glanzpunkt Abstand unabhängig vom Streuwinkel und verliert somit ihre Gültigkeit nicht im Rückstreubereich, wie es der Fall für andere Formulierungen ist. Folglich ist dieser Zusammenhang geeignet, um IPI im Rückstreubereich zu verwenden.

Sichtbarkeitskriterien von Interferenzmustern

Mit dem Zusammenhang zwischen Fringe-Frequenz und Glanzpunkt Abstand kann jedoch lediglich der Glanzpunkt Abstand bestimmt werden. Die ist jedoch noch nicht hinreichend, um den Partikeldurchmesser zu bestimmen. Es muss zunächst bestimmt werden, unter welchen Streuwinkeln ein für IPI geeignetes Interferenzmuster zu beobachten ist. Weiterhin muss bekannt sein, welche Kombination von Glanzpunkt Ordnungen das Interferenzmuster erzeugt, um deren Position auf dem Partikel bestimmen zu können. Die Information über die Position der Glanzpunkte auf dem Partikel ist essentiell, da sie den Partikeldurchmesser mit dem Glanzpunkt Abstand verbindet. Im Folgenden wird ein Sichtbarkeitskriterium hergeleitet, welches Information über geeignete Beobachtungswinkel sowie Kombinationen von Glanzpunkten bereitstellt.

Für den Vorwärtsstreubereich bilden die $p = 0$ te und $p = 1$ te Ordnung das Interferenzmuster für Bläschen. Die nullte und erste Ordnung dominieren die Intensität I in diesem Winkelbereich. Für ein klar erkennbares Interferenzmuster müssen die beiden Glanzpunkte eine möglichst ähnliche Intensität haben. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Bereiche destruktiver Interferenz einen möglichst starken Kontrast zu den hellen Bereichen konstruktiver Interferenz im Partikelbild haben. Diese Bedingung kann in Anlehnung an Dehaeck und van Beeck (2008) entsprechend zu

$$V_{notw}^{(i,j)} = \frac{2\sqrt{I_i I_j}}{I_i + I_j} \quad (3)$$

Formuliert werde und ist die notwendige Bedingung für ein observierbares Interferenzmuster. Das Interferenzmuster gebildet aus Strahlordnung i und j besitzt eine hohe Sichtbarkeit, wenn $V_{notw}^{(i,j)} \rightarrow 1$ gilt.

Diese Formulierung ist hinreichend für den Vorwärtsstreubereich, da das Problem wie beschrieben von der nullten und ersten Ordnung dominiert wird. Für den Rückstreubereich, ist der Fall komplexer und das dominierende Glanzpunktpaar kann variieren, sodass eine weitere – hinreichende – Bedingung folglich benötigt wird. Diese hinreichende Bedingung quantifiziert, ob das gewählte Glanzpunktpaar das Problem dominiert, die Glanzpunkte i und j also deutlich heller sind als die anderen Glanzpunkte $k \neq i, j$. Die hinreichende Bedingung kann basierend auf Sax *et al.* (2023) wie folgt formuliert werden:

$$V_{hinr}^{(i,j)} = \frac{2\sqrt{I_i I_j}}{\sum_{k=0}^{\infty} I_k} \quad (4)$$

Die Glanzpunkte der Ordnung i und j besitzen eine deutlich höhere Intensität als die restlichen Glanzpunkte, wenn $V_{hinr}^{(i,j)} \rightarrow 1$.

Für ein vollständiges Sichtbarkeitskriterium, müssen die notwendige und hinreichende Bedingung kombiniert werden. Da diese so formuliert werden, dass diese für eine ideale Sichtbarkeit gegen den Wert 1 streben, können die beiden Kriterien für eine vollständigere Formulierung entsprechend

$$V^{(i,j)} = V_{notw}^{(i,j)} V_{hinr}^{(i,j)} = \frac{4I_i I_j}{(I_i + I_j) \sum_{k=0}^{\infty} I_k} \quad (5)$$

multipliziert werden; siehe Sax *et al.* (2023) für weitere Details des Ansatzes. Wie die beiden Teilterme strebt das vollständige Kriterium ebenfalls für den entsprechenden Beobachtungswinkel gegen den Wert 1 für eine ideale Sichtbarkeit des Glanzpunktpaares i und j .

Mit dem vollständigen Sichtbarkeitskriterium können sowohl geeignete Beobachtungswinkel vorhergesagt werden, als auch die Glanzpunktpaarung, welche das Interferenzmuster erzeugt, bestimmt werden. Somit kann der Glanzpunktastand mit dem Partikeldurchmesser verbunden werden. Die Sichtbarkeit verschiedener Glanzpunktpaarungen sind in Abb. 1 für den Fall von Luftbläschen ($n = 1$) in Wasser ($n = 1.333$) und einer Beleuchtung mit Laserlicht bei der Wellenlänge $\lambda = 532$ nm, dargestellt. Gezeigt sind die für den Fall von Luftbläschen in Wasser dominanten Glanzpunktpaarungen (0,1), (0,2), (0,3) und (1,2).

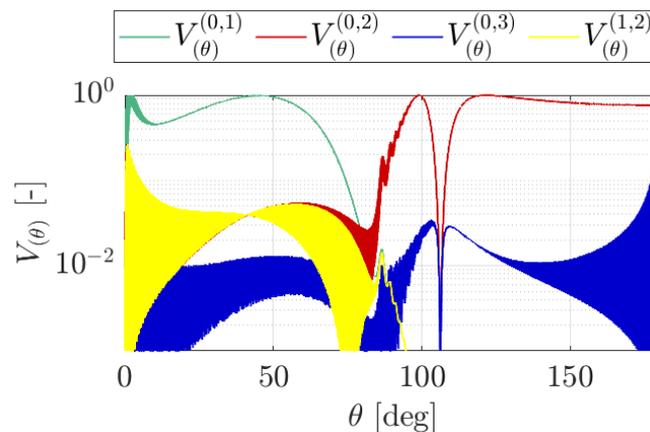


Abbildung 1: Sichtbarkeitsdiagramm für Luftbläschen in Wasser (Licht $\lambda = 532$ nm, parallel polarisiert). Eine Sichtbarkeit von eins stellt dabei eine ideale Sichtbarkeit dar. An der Farbe kann erkannt werden welche Glanzpunktkombination das Interferenzmuster bildet (adaptiert von Sax *et al.* 2023).

Experimentelle Validierung

Zur Validierung der Sichtbarkeitsbedingungen, wurde ein IPI-Experiment aus verschiedenen Beobachtungswinkeln durchgeführt. Die Gültigkeit der Bedingungen gilt als bewiesen, wenn für eine konstante Bläschengrößenverteilung unter verschiedenen Beobachtungswinkeln im Vorwärts-, Seitwärts- und Rückstreubereich Interferenzbilder zu erkennen sind und diese auf dieselbe Größenverteilung zurückführen.

Ein Versuchsaufbau wie in Abb. 2 schematisch dargestellt wurde konstruiert. Ein rechteckiger Wassertank (20 x 20 x 20 cm, Wanddicke 4 mm, Brechungsindex des Glases $n_{\text{Glas}} = 1.52$) wurde mit destilliertem Wasser gefüllt, um Schmutzpartikel in der Messung zu vermeiden. In dem destillierten Wasser wurde Natriumchlorid gelöst, um eine elektrisch leitfähige Lösung zu erzeugen. Anschließend wurden eine Kathode und Anode in Form von 5 mm dicken Stahlzylindern von oben in das Wasser getaucht. Beim Anlegen einer konstanten Spannung zwischen Anode und Kathode konnten in der Kochsalzlösung ($n_{\text{Wasser}} = 1.333$) Wasserstoffbläschen ($n_{\text{Bläschen}} = 1$) mit einer konstanten Größenverteilung erzeugt werden. Am unteren Ende der Anode, dort wo die Bläschen entstehen, wurde ein Draht (Dicke 0.5 mm) in Form eines u-förmigen Hackens befestigt, um für eine ungestörte Ablösung der Bläschen und einen ungestörten Aufstieg and die Oberfläche zu sorgen. Die Anode und Kathode wurden bis auf das Endstück mit schwarzem Isolierband abgeklebt, um sowohl Reflektionen des Laserlichtes als auch Blasenbildung abseits der Spitze des Hackens zu vermeiden.

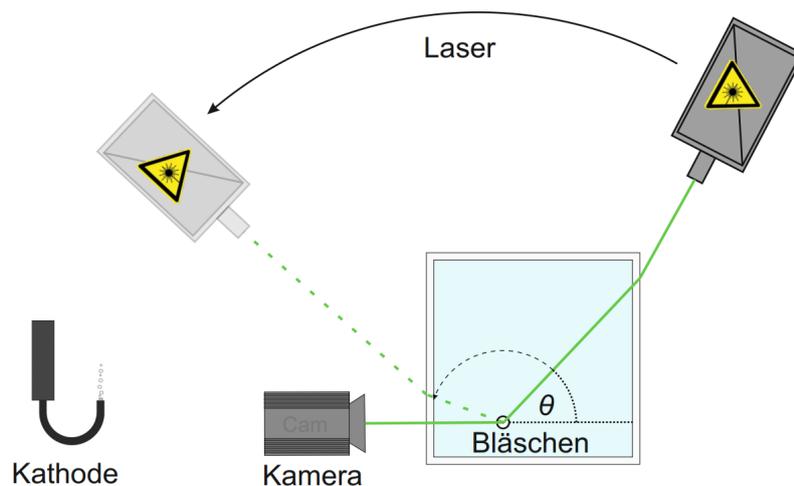


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Validierungsexperiments zur Blasengrößenbestimmung unter verschiedenen Streuwinkeln im Vorwärts-, Seitwärts- und Rückstreubereich (adaptiert von Sax *et al.* 2023).

Der Aufbau wurde so konstruiert, dass die Lichtquelle zum Wasserbehältnis und der Kamera um 180° gedreht werden konnte, um Beleuchtung im Vorwärts, Seitwärts und Rückstreubereich zu ermöglichen. Die Bläschen wurden mit einem Quantel Evergreen Nd:YAG Laser ($\lambda = 532$ nm, 200 mJ/Puls) beleuchtet und die Bilder wurden mit einer PCO Pixelfly Kamera (CCD-Chip, 1392 x 1040 Pixel, Pixelgröße $6.45 \times 6.45 \mu\text{m}^2$) aufgenommen. Die Kamera wurde mit einem Nikon Micro-Nikkor Objektiv (Brennweite 105mm und Blendenzahl 4) ausgerüstet.

Aus den Sichtbarkeitsbedingungen für Luftbläschen in Wasser entsprechend Abb. 1 wurden die in Tab. 1 aufgelisteten Beobachtungswinkel ausgewählt.

Tabelle 1: Ausgewählte Beobachtungswinkel für das Validierungsexperiment im Vorwärts-, Seitwärts- und Rückstreubereich. Aufgelistet sind die Winkel sowie die dazugehörigen Sichtbarkeiten des Interferenzmusters sowie die Strahlordnungen, welche das Interferenzmuster formen.

Beobachtungswinkel	Sichtbarkeit	Strahlordnung
45°	100%	0 & 1
99°	100%	0 & 2
116°	90%	0 & 2
122°	100%	0 & 2
135°	90%	0 & 2
154°	80%	0 & 2

Für jeden Beobachtungswinkel wurden ca. 12.000 – 20.000 Bläschen aufgenommen. Die Bläschen wurden mit einer konstanten Spannung zwischen Anode und Kathode erzeugt, um möglichst reproduzierbare und konstante Größenverteilung der Bläschen zu gewährleisten. Die aufgenommenen Bilder wurden mit einem Min-Image Abzug bearbeitet, um den Einfluss des Hintergrundrauschens zu verringern. Anschließend wurde ein Laplace-Filter angewendet, um die sichtbaren Kanten der Interferenzmuster hervorzuheben, ohne deren Position und damit die Fringe-Frequenz zu verändern.

Die Fringe-Frequenz wurde aus den Interferenzmustern mittels einer Fouriertransformation mit Low-Pass-Filter im Frequenzspektrum extrahiert. Es wurde lediglich die Basismode des Frequenzspektrums ausgewählt, um den Einfluss überlagerter Frequenzen von parasitären Glanzpunkten auszuschließen. Die Frequenz der Basismode wurde anschließend mit einer Fourier-Funktion erster Ordnung gefittet, um die Frequenz genauer zu bestimmen. Als Ground-Truth wurde die Messung unter 45° verwendet, da dies der Standardwinkel ist, welcher in der Literatur verwendet wird.

Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, sind unter den durch die Sichtbarkeitsbedingung vorhergesagten Beobachtungswinkeln Interferenzbilder klar zu erkennen. Ebenfalls fallen die Häufigkeitsverteilungen (PDF) der gemessenen Bläschengrößen zusammen, wenn die Glanzpunktpaarungen zur Berechnung verwendet werden, welche durch die Sichtbarkeitsformulierung prognostiziert wurden. Die theoretisch hergeleitete Methode konnte folglich erfolgreich für Bläschen angewendet werden.

Schlussbemerkungen

Die Interferometric Particle Imaging (IPI) Methode wurde auf den Rückstreubereich erweitert. Dazu wurde das Sichtbarkeitskriterium um ein notwendiges Kriterium erweitert, um eine vollständige Sichtbarkeitsformulierung herzuleiten. Diese Formulierung gilt für alle Winkelbereiche und strebt für eine ideale Sichtbarkeit des Interferenzmusters gegen den Wert 1. Weiterhin kann auch das dem Interferenzmuster zugrundeliegende Glanzpunktpaar ermittelt werden, was die Berechnung der Partikelgröße aus dem Glanzpunktabstand ermöglicht. Die theoretisch hergeleitete Formulierung wurde experimentell validiert. Es wurde gezeigt, dass IPI mit dieser Methode auch im Rückstreubereich angewendet werden kann. Hierdurch eröffnen sich neue Anwendungsbereiche der IPI-Methode, was vor allem von großem Vorteil für Versuchsszenarien mit nur einem optischen Zugang ist. Die vorgestellte Methode ermöglicht auch diesen Anwendungen die Verwendung der IPI im Rückstreubereich durch einen einzigen optischen Zugang.

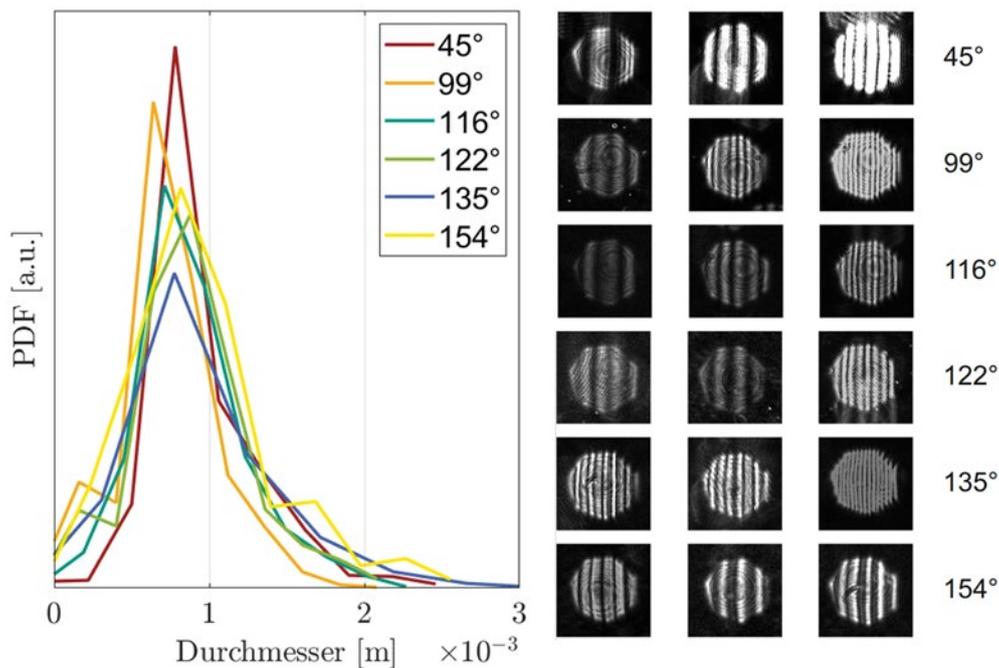


Abbildung 3: Ergebnis der Blasengrößenbestimmung des verwendeten Blasenerzeugers unter verschiedenen Streuwinkeln. Gezeigt sind die ermittelten Blasengrößenverteilungen für jeden verwendeten Streuwinkel, sowie beispielhaft Partikelbilder aus jeder Messreihe (adaptiert von Sax *et al.* 2023).

Literatur

Albrecht, H.E., Borys, M.; Damaschke, N., Tropea, C., 2003: Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques (Springer, Berlin, Heidelberg 2003)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8>

Born, M., Wolf, E., 2019: Principles of Optics: 60th Anniversary Edition (Cambridge University Press).

<http://dx.doi.org/10.1017/9781108769914>

Dehaeck, S., van Beeck, J., 2008: Multifrequency interferometric particle imaging for gas bubble sizing. *Exp. Fluids* 45, 823–831.

<https://doi.org/10.1007/S00348-008-0502-8>

Dunker, C., Roloff, C., Grassmann, A., 2016: Interferometric laser imaging for in-flight cloud droplet sizing. *Meas. Sci. Technol.* 27, 124004.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/12/124004>

Fujisawa, N., Hosokawa, A., Tomimatsu, S., 2003: Simultaneous measurement of droplet size and velocity field by an interferometric imaging technique in spray combustion. *Meas. Sci. Technol.* 14, 1341–1349.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/8/320>

Glover, A. R., Skippon, S. M., Boyle, R. D., 1995: Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems. *Appl. Opt.* 34, 8409–8421.

<https://doi.org/10.1364/AO.34.008409>

Kawaguchi, T., Akasaka, Y., Maeda, M., 2002: Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique. *Meas. Sci. Technol.* 13, 308.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/3/312>

König, G., Anders, K., Frohn, A., 1986: A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets. *J. Aerosol Sci.* 17, 157–167.

[https://doi.org/10.1016/0021-8502\(86\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0021-8502(86)90063-7)

Lacagnina, G., Grizzi, S., Falchi, M., Felice, F. D., Romano, G. P., 2011: Simultaneous size and velocity measurements of cavitating microbubbles using interferometric laser imaging. *Exp. Fluids* 50, 1153–1167.

<https://doi.org/10.1007/S00348-011-1055-9>

Maeda, M., Akasaka, Y., Kawaguchi, T., 2002: Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray. *Exp. Fluids* 33, 125–134.

<https://doi.org/10.1007/s00348-002-0453-4>

Niwa, Y., Kamiya, Y., Kawaguchi, T. & Maeda, M., 2000: Bubble sizing by interferometric laser imaging. 10th Int. Symp. on Appl. Laser Tech. to Fluid Mech.

<https://citeseerx.ist.psu.edu/document>

Quérel, A., Lemaitre, P., Brunel, M., Porcheron, E. & Gréhan, G., 2009: Real-time global interferometric laser imaging for the droplet sizing (ilids) algorithm for airborne research. *Meas. Sci. Technol.* 21, 015306.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/1/015306>

Sax C., Dreisbach M., Kriegseis J., 2023: Interferometric Particle Imaging for Particle Sizing in the Front-, Side-, and Back-Scatter Region. Preprint available via arXiv.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.16013>

Shen, H., Coëtmellec, S., Grehan, G. & Brunel, M., 2012: Interferometric laser imaging for droplet sizing revisited: elaboration of transfer matrix models for the description of complete systems. *Appl. optics* 51 22, 5357–68.

<https://doi.org/10.1364/AO.51.005357>