

Untersuchung von Mikroblasen mit Hilfe eines optimierten interferometrischen Abbildungsverfahrens

Investigation of microbubbles using an optimized interferometric imaging technique

E. Ebert¹, A. Wolter², N. Damaschke¹, S. Grundmann²

1 Universität Rostock Lehrstuhl Optoelektronik und photonische Systeme, 18059 Rostock

2 Universität Rostock Lehrstuhl Strömungsmechanik, 18059 Rostock

Interferometrische Abbildungstechnik, HDNC, Blasengrößen und -Konzentrationsbestimmung
Interferometric imaging technology, HDNC, bubble sizes and concentration quantification

Zusammenfassung

Zur Charakterisierung von Mikroblasen wurde am Institut für Allgemeine Elektrotechnik die Hydrodynamic Nuclei Concentration (HDNC) Technik entwickelt, welche zur Größenbestimmung defokussierte Abbildungen nutzt. In diesem Beitrag wird ein optimiertes Analyseverfahren der HDNC-Technik vorgestellt, welches auf einer speziell angepassten Objektivapertur basiert. Diese Apertur ermöglicht eine vereinfachte und beschleunigte Auswertung der Bilddaten, verglichen mit der herkömmlichen Methoden die in [Ebert, E., 2017] beschrieben ist. Demonstriert wird die Leistungsfähigkeit des modifizierten Verfahrens am Beispiel einer Anlage zur Erzeugung von Mikroblasen am Lehrstuhl für Strömungsmechanik. Das Prinzip der Blasenenerzeugung ist aus schutzrechtlichen Gründen nicht Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen. Jedoch kann an dieser Stelle die Charakterisierung der Partikel (Größe, Klassifikation nach Feststoff und Blase & Konzentration) in Abhängigkeit von den Anlagenparametern mittels herkömmlicher und optimierter HDNC-Technik vorgestellt werden.

Die Analyse von defokussierten Partikel mit einer Rechteckapertur vereinfacht sich, da zur Detektion der Partikel kein Template-Matching mittels Korrelation notwendig ist, sondern die Auswertung auf Gradienten der Spaltensummen der aufgezeichneten Bilder basiert. Dies hat Vorteile bei der Programmlaufzeit und ist leicht in Hardware zu implementieren. Daneben wird das Signal-Rauschverhältnis der späteren spektralen Analyse günstig beeinflusst und die Detektionswahrscheinlichkeit für kleine Blasen erhöht.

Einleitung

Eine Reihe von Projekte am Institut für Allgemeine Elektrotechnik der Universität Rostock beschäftigen sich mit der Klassifizierung, Größen- und Konzentrationsbestimmung von Partikeln in Flüssigkeiten für maritime Anwendungen, speziell für Kavitationsuntersuchungen (z.B.

BMWi Projekte KonKav I, KonKav II, Hykops & HiOCav). Im Rahmen dieser Projekte wurde die Hydrodynamic Nuclei Concentration (HDNC) Technik entwickelt, die auf der defokussierten Abbildung von kohärent beleuchteten Partikeln und deren Glanzpunkten basiert. Zur Technik der defokussierten Abbildungen finden sich eine Reihe von Veröffentlichungen und Spezialisierungen [König, G., Anders, K. & Frohn, A., 1986], [Maeda, M., Kawaguchi, T. & Hishida, K., 2000] & [Damaschke, N., Nobach, H. & Tropea, C., 2002]. Abbildung 1a zeigt Beispiele typischer Partikelabbildungen mit kreisförmiger Apertur.

In [Ebert, E., 2017] wurde zur Reduktion der Überlappung der defokussierten Partikelabbildungen nur ein fokussierter Laserstrahl eingesetzt. Wesentliche Vorteile der Methode gegenüber anderen Einzelpartikelcharakterisierungstechniken wie Phasen-Doppler, Zeitverschiebung, (inline) Holographie ist der vergleichsweise einfache, robuste und günstige Aufbau. In [Ebert, E., 2017] wurde eine Auswertung implementiert, mit deren Hilfe man Feststoffe von homogen sphärischen Blasen unterscheiden kann und eine Konzentrationsbestimmung unter Berücksichtigung des partikelgrößen- und laserprofilabhängigen Detektionsvolumens möglich ist. Eine Erweiterung der Klassifikation von Partikeltypen mit Hilfe von Deep-Learning-Algorithmen wurde in [E. Ebert, N. Damaschke, 2018] vorgestellt.

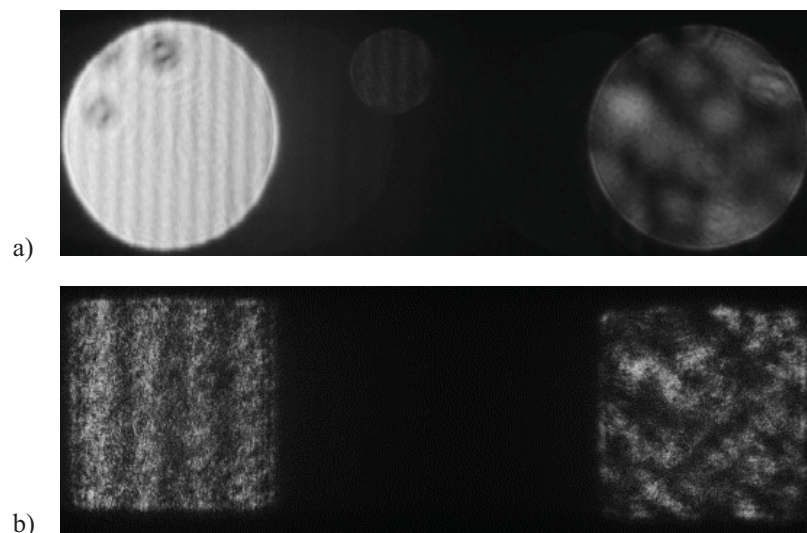


Abbildung 1: Beispiele interferometrischer Abbildungen a) runde Apertur links größere Blase; rechts Feststoff, b) rechteckige Apertur links kleine Blase; rechts Feststoff

Die hier vorgestellte Erweiterung verwendet die Idee, dass die Partikelabbildungsgeometrie durch die Aperturform bestimmt wird. In [Maeda, M., Kawaguchi, T. & Hishida, K., 2000] wird zur Reduktion der Überlappung der Partikelabbildungen eine optische Kompression mit Hilfe einer Zylinderlinse verwendet. Diese Kompression erleichtert auch die Detektion der Partikel, da diese entlang von Linien lokalisiert sind. Problem dabei ist, dass durch die Kompression wesentliche Informationen des Streulichts zur Beschaffenheit der Partikelstruktur verloren gehen. Die Paper von [Carrascal, G. P., Ruiz, S. G. & van Beeck, 2014] & [Ruiz, S.G., Vetrano, M.R. & van Beeck, 2014] zeigen eindrucksvoll, dass man mit Hilfe der Speckle-Struktur von Feststoffen auch deren Größe bestimmen kann. Durch die optische Kompression verliert man diese Möglichkeit.

Ein zweites Problem stellen leicht schräge Interferenzstreifen bei der optischen Kompression dar, die durch Linsenfehler und Justageprobleme zu Stande kommen können. Sie führen zu einer Verringerung der Modulationstiefe und können auch zum Verlust der Klassifizierbarkeit

führen. Vorteil der optischen Kompression ist, dass auch bei höheren Konzentrationen gemessen werden kann, ohne dass es viele überlappende Partikel gibt. Abhängig vom Anwendungsfall sollte bei geringen Konzentrationen eher auf die optische Kompression verzichtet werden.

Erweiterung HDNC-Technik

Die HDNC-Technik reduziert die Überlagerung der Partikelabbildungen bereits durch die Nutzung nur eines Laserstrahls. Im fokussierten Fall, werden die Partikel, ähnlich der optischen Kompression, in nur einer Linie abgebildet. Im defokussierten Fall bleiben die Streulichtmuster bei gleicher Überlappung jedoch erhalten.

Die Partikel werden typischerweise anhand ihrer Kreisabbildung detektiert. Dies erfordert im Allgemeinen eine Korrelation der Abbildung mit einem Kreis oder einer Kreisfläche. Aufgrund der Lokalisierung der Partikel entlang der Laserstrahlachse konnte diese Korrelation in [Ebert, E., 2017] bereits vergleichsweise schnell als 1D-Korrelation erfolgen. Für eine angestrebte Echtzeit-Detektion der aufgenommenen Partikel ist die Korrelation mit einer Kreisapertur jedoch immer noch zu rechenintensiv.

Verwendet wurde daher in der aktuellen Untersuchung eine Rechteck-Apertur und es ergeben sich rechteckförmige defokussierten Abbildungen der Partikel mit Beugungserscheinungen an den Rändern (siehe Abbildung 1b). Die Detektion der Partikelabbildungen vereinfacht sich, indem das Bild vertikal aufsummiert wird. Es entsteht ein 1D-Signal in x-Bildrichtung. Für sphärische Partikel ist die einbeschriebene harmonische Intensitätsverteilung mit einem Rechteck gewichtet. Für nichtsphärische Partikel ergeben sich Rechteckfunktionen mit verrauschter Amplitude.

Da die Aperturgröße bzw. die Ausdehnung der Apertur in x-Bildrichtung bekannt ist, können Partikelüberlappungen vergleichsweise einfach durch Überschreiten einer Maximallänge detektiert werden. Eine Separation kann dann anhand der Frequenzanteile erfolgen.

Eine Unterschreitung der Signallänge in x-Richtung kann bei kleinen Partikel vorkommen. In diesem Fall ist für die Validierung die Frequenz der Streifen für eine Validierung der Detektion heranzuziehen. Im Extremfall ergibt sich nur ein Streifen als lokales Maximum.

Die Nutzung von Rechteckaperturen hat weitere Vorteile bei der Bestimmung der Streifenfrequenz. Die Amplitude des aufsummierten harmonischen Signals bleibt im Vergleich zur Kreisapertur konstant und das harmonische Signal ist mit einer einfachen Rechteckfunktion gefenstert. Weiterhin kann durch die Summation das Signal-Rausch-Verhältnis für die zur Bestimmung der Frequenz verbessert werden. Das Ergebnis entspricht der oben angegebenen optischen Kompression, wobei die Kompression erst nach der Bildaufnahme erfolgt und die Informationen der Interferenzstrukturen weiterhin auswertbar bleiben.

Aufbau und Messergebnisse

Der Aufbau besteht aus einer Messstrecke mit drei optischen Zugängen in welche die Düse eingesetzt wurde. Die IDS uEye Kameras blicken unter einem Streuwinkel von 90 Grad auf den Laserstrahl. Es handelt sich um einen kommerziellen 300mW Nd:YAG (532nm) Laser, der zum kohärenten Beleuchten der Partikel im Wasser dient (Abbildungen 2 und 3). Die Düse ist speziell entwickelt worden um sehr kleine Mikroblasen zu erzeugen (Abbildung 2). Die Kameras haben mit 72,38 Bildern pro Sekunde bei 1936 x 216 Pixeln in SW aufgezeichnet und die Abstände betragen zwischen Kamera & Scheibe 300mm und Laser & Scheibe 230mm wobei die Scheibe eine dicke von 5mm hatte. Der Abstand der Düse vom Boden betrug 80mm. Die Kamera mit der Kreisapertur war 100mm von der Unterkante des Kanals entfernt. Die Kamera mit der Rechteckapertur war 150mm von der Unterkante des Kanals entfernt. Der Streuwinkel, die Wellenlänge des Lasers und den geometrischen sowie optischen Eigenschaften des Auf-

baus lassen eine Messung mit der HDNC-Technik zu. Der Zusammenhang zwischen Streifenanzahl und Blasengröße wurde mittels Mie-Theorie bestimmt. Zu berücksichtigen ist, dass die Rechteckapertur effektiv kleiner ist als die Kreisapertur. Für gleich große defokussierte Abbildungen ist die Defokussierung für die Rechteckapertur stärker und die örtliche Frequenz der Streifen bei gleicher Partikelgröße geringer.

Mittels der HDNC-Technik wurde ermittelt, welche Blasengößenverteilung in welchem Abstand von der Düse vorhanden ist. Dazu wurde der Abstand der Düse gegen die Strömungsrichtung zwischen 430 und 130mm in vier Schritten variiert. Es wurden jeweils 1000 Partikel mit beiden Aperturformen, Kreis und Rechteck, aufgezeichnet und miteinander verglichen. Die Verteilungsfunktionen sind in Abbildung 4 jeweils als Vergleich von Kreisapertur und Rechteckapertur dargestellt.

Die Verteilung der Blasen im untersuchten Bereich unterscheidet sich in den einzelnen Abständen nicht sehr stark, so dass man eine gute Durchmischung entlang der Strömungsrichtung des Kanals annehmen kann.

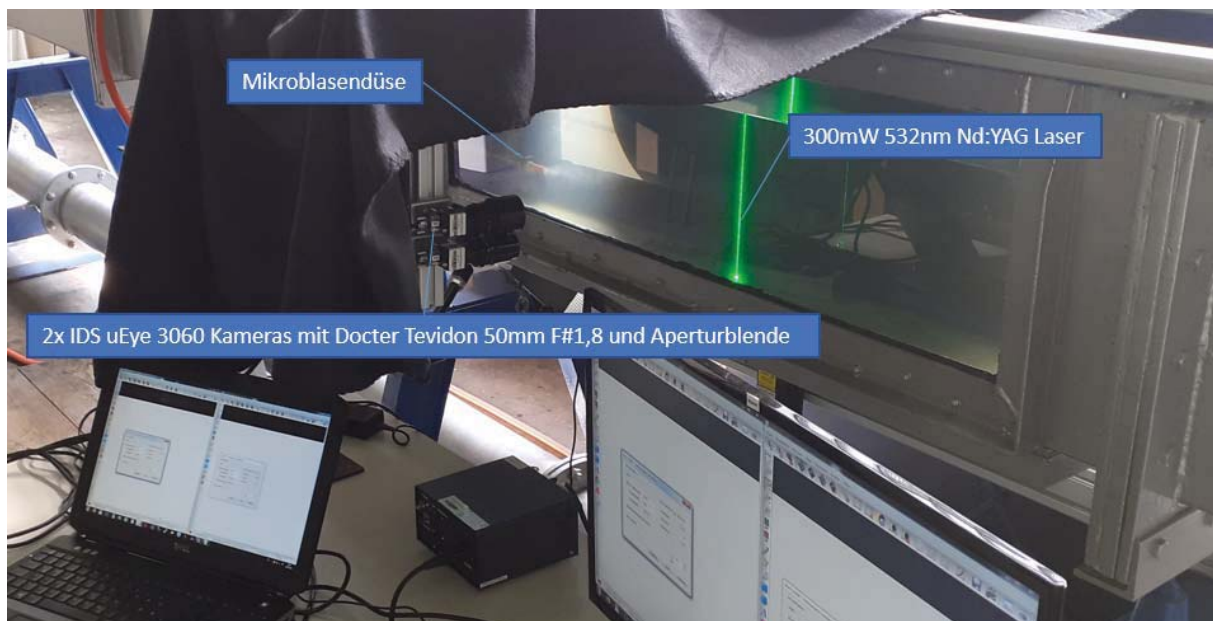


Abbildung 2: Versuchsaufbau mit Düse, Laserstrahl und Kameras

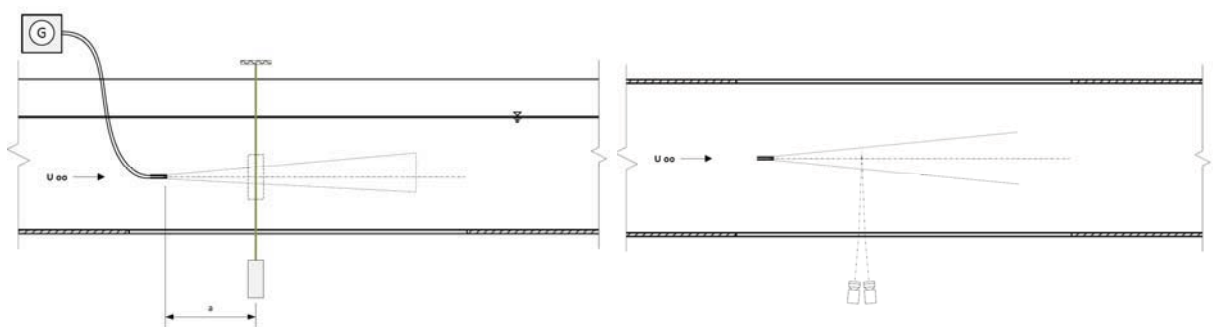


Abbildung 3: Ansichten des Versuchsaufbau. Links: Seitenansicht, Rechts: Draufsicht

Wesentlich Unterschied für die Untersuchung ist, dass die Auswertung mittels Rechteckapertur nicht auf eine Korrelation, speziell mit einer Kreisapertur, angewiesen ist. Hier reicht eine einfach spaltenweise Summation mit anschließender Flankenerkennung, ähnlich einem Trigger. Die Analyse des Spektrum erfolgt wie in [Ebert, E., 2017] beschrieben. Insgesamt lässt sich so der Rechenaufwand minimieren. Bei diesen Bilddaten wurden etwa 3 Sekunden pro Bild durch die Korrelation mit dem Kreistarget und die 150 DFTs pro Partikel benötigt. Die vereinfachte Rechnung mit Rechteckapertur benötigte weniger als einer Sekunde bei der Auflösung von 1936 x 216 Pixeln.

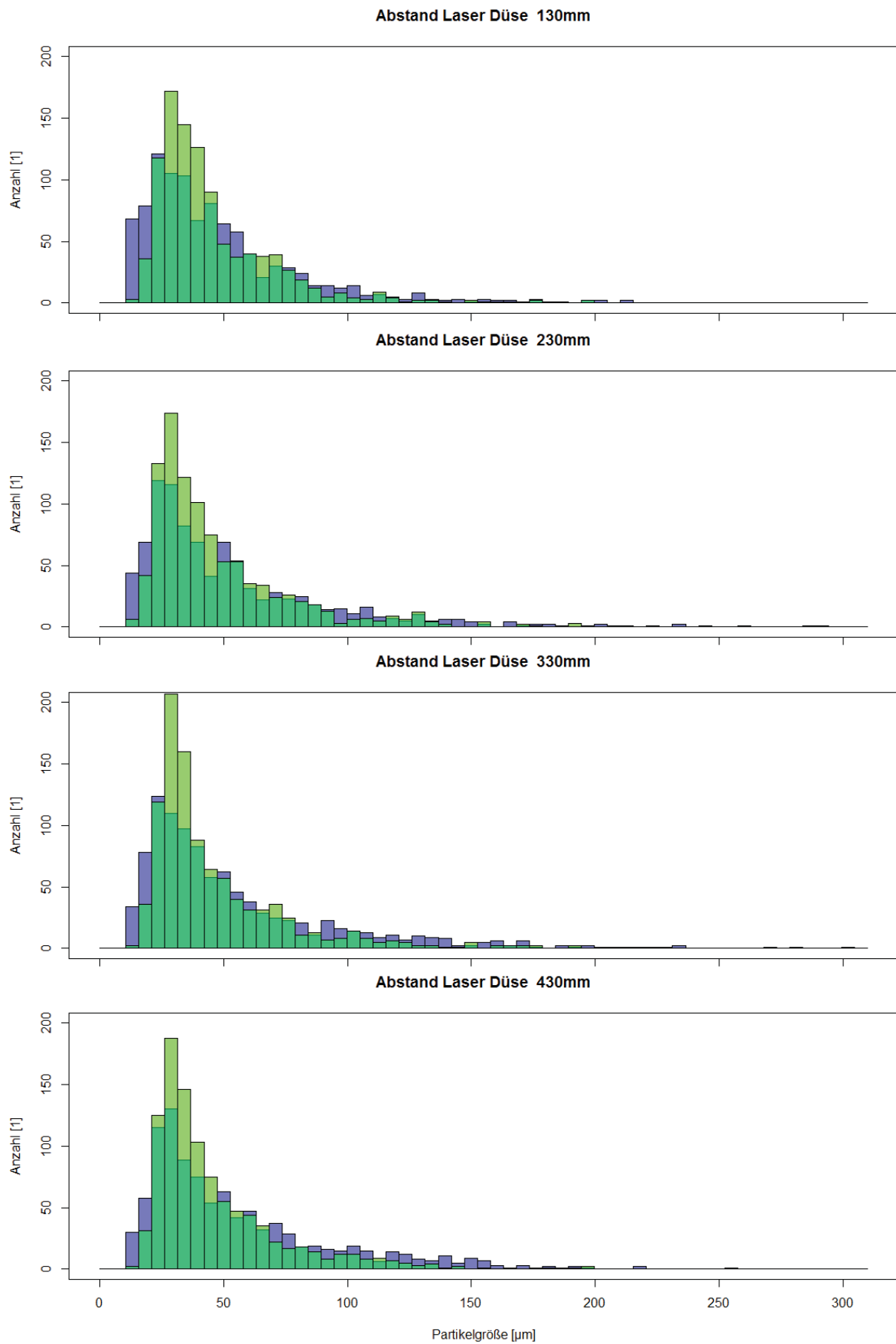


Abbildung 4: Messergebnisse für die vier Abstände (130mm, 230mm, 330mm, 430mm) zwischen Laserstrahl und Düse bei verschiedenen Aperturformen (grün Rechteck, blau Kreis).

Zu erkennen ist in den Verteilungen, dass beide Aperturformen die Größenverteilung für große Blasen ($>50\mu\text{m}$) ähnlich schätzen. Die Rechteckapertur (grün) detektiert jedoch häufiger kleinere Partikel im Bereich von $25\mu\text{m}$ bis $50\mu\text{m}$ Durchmesser als die Kreisapertur (blau). Kleinere Partikel weisen weniger Streifen auf und die Kreisform der defokussierten Abbildung ist je nach Phasenlage der Streifen teilweise stark gestört. Für solche Abbildungen versagt die Kreiskorrelation. Die implementierte Detektion mittels Rechteckapertur ist dagegen auch sensitiv für wenige Streifen.

Weiterhin wird durch die Rechteckform die Ausdehnung der freien Apertur in Richtung der Laserstrahl um den Faktor 0,7 eingeschränkt und der minimal detektierbare Partikeldurchmesser entsprechend um den Faktor von ca. 1,4 größer. Auch dies ist in den Verteilungsfunktionen zu erkennen. Das untere Detektionslimit liegt für die Kreisapertur bei ca. $10\mu\text{m}$ für die Rechteckapertur bei ca. $15\mu\text{m}$ Blasendurchmesser.

Literatur

Carrascal, G.P., Ruiz, S.G. & van Beeck, 2014, "Irregular particle sizing using speckle pattern for continuous wave laser applications", J. Exp Fluids 55: 1851.

Damaschke, N., Nobach, H. & Tropea, C., 2002: "Optical limits of particle concentration for multidimensional particle sizing techniques in fluidmechanics." In: Exp. in Fluids, 32: 143 - 152.

Ebert, E., 2017: „Optische Messtechnik zur Charakterisierung maritimer Kavitationskeime“, Dissertation Rostock : Universität , 2017, https://doi.org/10.18453/rosdok_id00001888, <http://purl.uni-rostock.de/rosdok/id00001888>

E. Ebert, N. Damaschke, 2018: "Particle Classification for Interferometric Particle Imaging by Convolutional Neuronal Networks"

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

Maeda, M., Kawaguchi, T. & Hishida, K., 2000: "Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows." In: Meas. Sci. Technol., 11: L13-L18.

Ruiz, S.G., Vetrano, M.R. & van Beeck, 2014: "Feasibility of using glory and speckle patterns for sizing spherical and irregular particles." In: Appl. Opt., 53, 21: 4722-4728.