

HDNC-Messtechnik zu optischen Partikelcharakterisierung

Eric Ebert¹, Nils A. Damaschke¹

¹ *Universität Rostock IEF Allgemeine Elektrotechnik, Albert Einstein Straße 2,
18059 Rostock, E-Mail: eric.ebert@uni-rostock.de*

Zusammenfassung

Mehrphasenströmungen mit Blasen und Tropfen im Mikrometerbereich sind in der Technik in vielen Bereichen anzutreffen. Häufig ist eine Messtechnik notwendig, die eine Bestimmung von der Partikelgröße, des Partikeltypes und der Partikelanzahlkonzentration erlaubt. Mit Hilfe der Hydrodynamic Nuclei Concentration (HDNC) Technik kann dies mit geringem Geräte- und Softwareaufwand realisiert werden. Sie ist eine abgewandelte Form des Interferometric Particle Imaging. Es gibt komplexere Messtechniken wie die Phasen Doppler Technik und Digitale Inlineholographie welche diese Messaufgaben bei höherem Aufwand ebenfalls umsetzen können. Speziell wird auf die Konzentrationsberechnung mit Detektionsvolumenkorrektur eingegangen. Anhand eines Beispiels werden die aktuelle Umsetzung der HDNC-Technik und die Eignung als Messtechnik in einer industriellen Umgebung an einem Kavitationskanal belegt.

Keywords: Partikelcharakterisierung, Größenmessung, Konzentrations schätzung, Partikeltypenklassifikation.

Einleitung

Die Charakterisierung von Blasen und Tropfen im Mikrometerbereich wird in einigen Anwendungsszenarien benötigt. Beispielsweise sind die Untersuchung von Einspritzvorgängen an Motoren, Trockenvorgängen von Sprays und Blasen in chemischen Prozessen häufige Anwendungsfelder. In der Medizintechnik kommen diese Verfahren bei der Überwachung von Inhalationsvorgängen und Wirkstoffbeschichtungen zum Einsatz. Ein weiterer Anwendungsfall ist die Untersuchung von Kavitationsvorgängen an Pumpen und Schiffspropellern.

Eine Reihe von Messtechniken erlauben Untersuchungen von Partikeln in Mehrphasenströmungen [1] & [9].

Die Schattenabbildung ist auf Grund des einfachen Aufbaus und des geringen Aufwandes eine verbreitete Technik für die Vermessung von Partikeln im Millimeterbereich.

Die Phasen Doppler (PD) Technik ist eine relativ aufwendig zu justierende, häufig verwendete Messtechnik für Partikel im Mikrometerbereich und bei hohen Partikelanzahlkonzentrationen. Das PD basiert auf sich in einem Punkt kreuzenden Laserstrahlen, deren Schnittvolumen das Messvolumen aufspannen. Die Partikelbeobachtung erfolgt mit mehreren Detektoren.

Ein Problem sind unebene Grenzflächen der optischen Zugänge und der durch sie hervorgerufene Linseneffekt.

Es handelt sich um eine Punktmesstechnik, bei der ein kleines Messvolumen aufgespannt wird. Bei geringen Konzentrationen ergeben sich so lange Messzeiten für eine ausreichend große Partikelstatistik.

Die Digitale Inline Holographie (DIH) basiert auf der Analyse von Wellenfronten, die das Messvolumen passiert haben. Aus diesem Grund sind Analysen dann sinnvoll möglich, wenn die Wellenfront nicht wesentlich durch die optische Ankopplung gestört wird. Insgesamt wird meist eine Messtechnik gefordert, die einen geringen Geräteaufwand bei gleichzeitig hochauflösender Messung und geringer Störanfälligkeit erlaubt.

Die Hydrodynamic Nuclei Concentration (HDNC) basiert auf der Interferometric Particle Imaging Technik [1] & [2] und erlaubt eine Messung mit den geforderten Eigenschaften, wenn eine geringe Partikelanzahlkonzentration vorliegt. Da es sich um eine defokussiert abbildende Messtechnik handelt, liegt eine Begrenzung in der Wahrscheinlichkeit von Partikelüberlappungen.

Das Messprinzip ist Partikel mit einem Laserstrahl zu beleuchten und mit einer Kamera mit Abbildungsoptik defokussiert aufzuzeichnen. Mit Hilfe der Mie-Theorie können die Streueigenschaften homogen

sphärischer Partikel berechnet, ein günstiger Streuwinkel (zwei Streuordnungen ähnlich intensiv) bestimmt und die gestreute Fernfeldintensität des Partikels ermittelt werden. Analog zum Doppelspaltexperiment von Young ergeben sich bei der defokussierten Abbildung der Glanzpunkte Interferenzstreifenmuster (Abb. 1) aus denen die gesuchten Informationen der Partikeleigenschaften ableiten lassen [1] & [2].

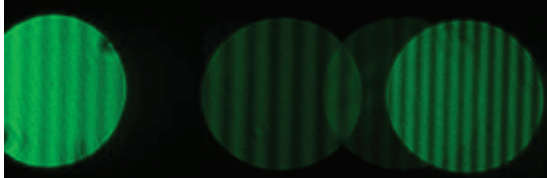


Abb. 1: Aufgezeichnete Interferenzstreifenmuster von Blasen in Wasser

Allen genannten Techniken gemein ist, dass die Partikelgröße bestimmt werden kann. Zusätzlich sind jedoch häufig auch andere Informationen über den Partikel von Belang. Im hier erwähnten Anwendungsfall

Eigenschaften zwischen Blasen und Feststoffen zu unterscheiden.

Neben dieser Trennung ist für eine Bewertung der Kavitationserscheinung auch die Konzentration der Blasen von Bedeutung, da auf diese Weise eine Vergleichbarkeit von Kavitationserscheinungen an verschiedenen Kanälen unter unterschiedlichen Messbedingungen hergestellt werden kann.

Messmethode

Die HDNC-Technik verwendet wie erwähnt einen Laserstrahl der um ein Vielfaches größer als der zu untersuchende Partikeldurchmesser sein muss. Im Vergleich zu einer Lichtschnittbeleuchtung bietet ein Laserstrahl zwei wesentliche Vorteile. Mehr Lichtenergie steht im Messvolumen zur Verfügung und sehr kleine Partikel können ausreichend hell beleuchtet werden. Weniger Partikelüberlappungen sind vorhanden und erlauben eine einfachere Zerlegung der Interferenzmusterabbildung. Tritt nun ein Partikel in den Laserstrahl werden die Lichtstrahlen an der Grenzfläche der Medien gebrochen. Es ergeben sich Glanzpunkte aus einem

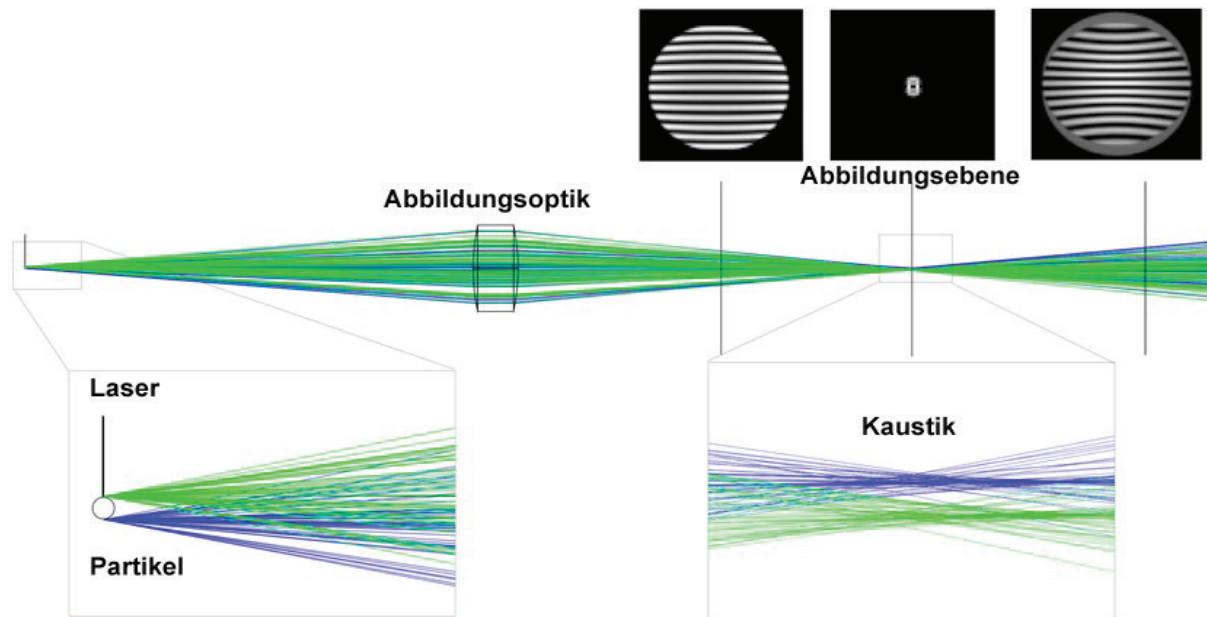


Abb. 2: Prinzip der HDNC-Technik übersetzt nach [5]

Kavitationsforschung ist es beispielsweise wesentlich, die Partikel in Partikeltypen wie Blasen und Feststoffe zu unterteilen. Speziell Blasen haben einen wesentlichen Einfluss auf das Kavitationsgeschehen und sind damit relevant für die Vermessung. Andere Partikel sind für die Auswertung nicht von Bedeutung und werden aussortiert.

Daher wurde für die HDNC-Technik eine Möglichkeit entwickelt, anhand spektraler

bestimmten Beobachtungswinkel. Meist wird bei Luftblasen in Wasser ein Streuwinkel von 90° eingestellt, da dieser einfach zu justieren ist und günstige Streueigenschaften bietet. Sind die Partikel homogen und sphärisch wie es Blasen im Mikromeerbereich unter den Bedingungen an Strömungskanälen normalerweise sind, ergeben sich zwei Glanzpunkte. Diese werden unscharf innerhalb der Brennweite der Abbildungsoptik abgebildet.

Durch die Kaustik ergeben sich Abbildungsfehler, die zu einer Verzeichnung der Interferenzmuster führen wie sie in (Abb. 2) dargestellt sind. Man erkennt ebenfalls die typischen Streifenmuster die sich aus der Interferenz der Wellen zweier Glanzpunkte ergeben.

Ist ein Partikel rau oder asphärisch (wie z.B. Sedimente/Algen) entstehen mehr Glanzpunkte an der Oberfläche. Bei defokussierter Abbildung entstehen dann so genannte Speckle Muster. Der spektrale Unterschied zwischen Streifen und Speckle Mustern wird zur Klassifikation ausgenutzt.

Die Partikeldetektion in der Abbildung erfolgt durch eine korrelationsbasierte Mustererkennung. Da die Form der Partikelabbildung nur von der Fokusposition und der Abbildungsoptik und nicht von der Partikelgröße bestimmt wird, ergibt sich die Möglichkeit bei einer kreisrunden Apertur mit einem kreisförmigen Template zu arbeiten. Dazu wird eine Kreismaske in Abbildungsgröße erzeugt und mit der Partikelabbildung korreliert. An Stellen wo ein Partikel im Bild liegt, entsteht im Korrelogramm ein lokales Maximum. Dieses Maximum gibt also die Partikelposition an.

Da die Partikelabbildungsgröße meist nicht exakt bekannt ist, kann mit einer Optimierungsrechnung der richtige Durchmesser ermittelt werden. Dazu werden verschieden große Templates mit der einer Anzahl von Beispiel-Partikelabbildungen korreliert. Das Template günstiger Größe zeigt die höchste Korrelation. Über eine verfeinerte Suche kann die Kreisgröße dann genauer bestimmt werden.

Ist die Position gefunden, kann eine entsprechende Region of Interest definiert werden und ein Sub-Bild aus der Abbildung aller Partikel ausgeschnitten werden, was nur den aktuellen Partikel enthält.

Zur Analyse der Partikeleigenschaften wird diese Abbildung dann zeilenweise zerlegt und es wird eine Diskrete Fourier Transformation (DFT) durchgeführt. Anschließend wird das Leistungsdichtespektrum berechnet. Diese Zeilen-Spektren werden aufsummiert um lokale Maxima herauszuheben und Rauschen durch Mittelung zu unterdrücken.

Im Falle von Blasen ist an der Stelle der Streifenfrequenz im Leistungsdichtespektrum ein Maximum zu finden. Wird dieses Lokale Maximum detektiert hat man im Fall von homogenen sphärischen Partikeln ein proportionales Maß für die Partikelgröße.

Im Fall von Feststoffen ist die Partikelgröße über das Verfahren aus [7] zu bestimmen.

Die Klassifikation wird ebenfalls über die Spektren abgeleitet. Wichtigste Information ist

die Bestimmung der Anzahl dominanter Frequenzanteile.

Ist nur ein dominantes Maximum neben dem Gleichanteil vorhanden ergibt sich daraus, dass nur eine dominante Frequenz in der Partikelabbildung beobachtet wurde, was einem Streifenmuster entspricht.

Nach dem die Partikeltypen klassifiziert und die Blasengrößenstatistik aufgestellt ist, kann die Partikelanzahlkonzentration ermittelt werden. Dazu notwendig ist die Größe des durch den Laserstrahl und die Beobachtungsoptik aufgespannten Messvolumens.

Da der Laserstrahl aber nicht homogen verteilt ist und Partikel abhängig von ihrer Größe Licht streuen [8], gibt es abhängig vom Bereich des Laserstrahls durch den ein Partikel tritt unterschiedlich große Detektionsflächen. Das bedeutet, dass kleine Partikel nur im Zentrum des Laserstrahls bei einer begrenzten Kameradynamik sichtbar sind. Größere Partikel sind auch im Außenbereich des Laserstrahls sichtbar. Dadurch kommt es zu einer Unterbewertung der kleinen Partikel und einer Verfälschung der Größenstatistik.

Die Detektionsvolumenkorrektur der HDNC-Technik (genauer beschrieben in [9]) versucht diese Problematik zu entschärfen in dem zusätzliche Informationen zur Partikelintensität ausgewertet werden.

Es wird die minimale, mittlere und maximale Intensität der Partikelabbildung berechnet, um in Verbindung mit der Partikelgrößenklasse d_{pk} eine Statistik aufzustellen.

Hat man diese Statistik, können mit Hilfe eines Funktionsfittes Ausreißer erkannt und entfernt werden. Ausgehend von der Annahme dass die Gruppe der maximalen Intensität pro Partikelklasse $I_{ACmax}(d_{pk})$ sehr dünn besetzt ist, da es sehr unwahrscheinlich ist, dass ein Partikel genau zur richtigen Zeit durch das Zentrum des Laserstrahls geht, ist es günstiger die Statistik von der mittleren Intensität des Laserstrahls abhängig zu machen.

Eine Funktion (Eq. 1) für die Beschreibung der Detektionsfläche $A_d(d_{pk})$ findet sich in [8]. Die minimale Intensität I_d wird durch die Dynamik der Kamera bestimmt und durch die Statistik bestimmt.

$$A_d = A_d(d_{pk}) = \frac{A_0}{2} \ln \left(\frac{I_{ACmax}(d_{pk})}{I_d} \right)$$

Eq. 1: Detektionsflächenberechnung

Die maximal gestreute Intensität und die minimale Intensität ergeben sich aus der Ausreißer-bereinigten Statistik pro Größenklasse. Nimmt man für die Detektionsflächenberechnung eine Kreisform an, ergibt sich:

$$\pi r_d^2(d_{pk}) = \frac{\pi r_0^2}{2} \ln \left(\frac{I_{ACmax}(d_{pk})}{I_d} \right)$$

Eq.2: kreisförmige Detektionsfläche

Die Referenzfläche A_0 mit dem Radius

$r_0 = \sqrt{2}r_{wb}$ [8] an der Stelle der halben Intensität und dem Strahltaillenradius r_{wb} ergibt sich aus folgender Berechnung:

$$\begin{aligned} r_d(d_{pk}) &= \sqrt{\frac{(\sqrt{2}r_{wb})^2}{2} \ln\left(\frac{I_{ACmax}(d_{pk})}{I_d}\right)} \\ &= \sqrt{r_{wb}^2 \ln\left(\frac{I_{ACmax}(d_{pk})}{I_d}\right)} \end{aligned}$$

Eq 3: Berechnung des Radius der Detektionsfläche

Die mittlere gestreute gesamt Intensität eines Partikels im Laserstrahl kann nach [8] über die folgende Funktion berechnet werden:

$$I_{mittel}(d_{pk}) = \frac{I_{ACmax}(d_{pk}) \int_0^{r_d(d_{pk})} e^{-\frac{2r^2}{r_{wb}^2}} 2\pi r dr}{\pi r_d^2(d_{pk})}$$

Eq 4: Mittlere Intensität

Aus dem Flächenverhältnis der größenabhängigen Detektionsfläche und der Referenzfläche kann dann die Korrekturfunktion (Eq. 5) berechnet werden.

$$\begin{aligned} F_k^{-1}(d_{pk}) &= \frac{A_d(d_{pk})}{A_0} = \frac{\pi r_d^2(d_{pk})}{\pi(\sqrt{2}r_{wb})^2} \\ &= \frac{r_{wb}^2 \ln\left(\frac{I_{ACmax}(d_{pk})}{I_d}\right)}{2r_{wb}^2} \\ &= \frac{1}{2} \ln\left(\frac{I_{ACmax}(d_{pk})}{I_d}\right) \end{aligned}$$

Eq 5: Korrekturfunktion

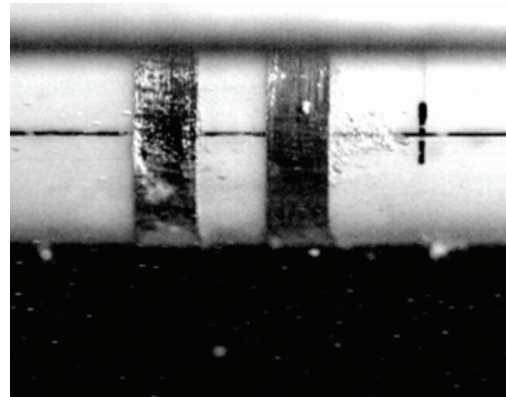
Wenn die Referenz- & Detektionsfläche also $r_d(d_{pk}) = r_0$ übereinstimmen ist keine Korrektur notwendig. Es ergibt sich für diesen Fall $I_{mittel}(d_{pk}) = I_{ACmax}(d_{pk}) \cdot 0.125$.

Ergebnisse

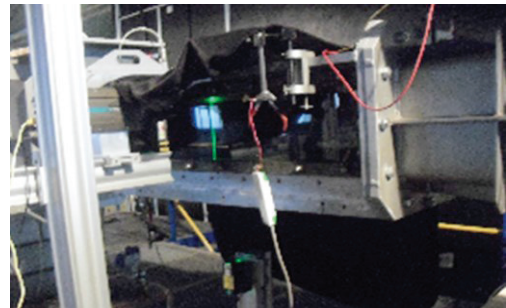
Die HDNC-Technik wurde bislang an einigen Versuchskanälen der Schiffbauversuchsanstalt Potsdam (SVA), der Hamburgischen Schiffbauversuchsanstalt (HSVA), bei Marin in den Niederlanden, am Kavitationskanal der Universität Rostock und auf dem Frachtschiff „Amandine“ eingesetzt [3], [4], [5] & [6]. Der für Kavitationserscheinungen als relevant ermittelte Blasengrößenbereich liegt zwischen 10 und 250 μm .

Beispielhaft soll hier ein Versuch am Kavitationskanal K21 gezeigt werden.

Bei dem Versuch wurden Blasen im unteren Blasengrößenbereich mit Hilfe von Elektrolyse an einem Schiffsmodell erzeugt und mit der HDNC-Technik vermessen (Abb. 3).



a)



b)

Abb. 3:

a) Ausschnitt Schiffsmodell mit Elektrolyse
b) Foto vom Versuchsaufbau mit K21, Schiffsmodell, Kamera (Pantom V310), Laser (532nm Nd:YAG 300mW) und Traversierungen

Ein Ergebnis der Auswertung der durch die Elektrolyse abgelösten Partikel direkt unter dem Rumpf bei 200 ist Abb. 4 dargestellt.

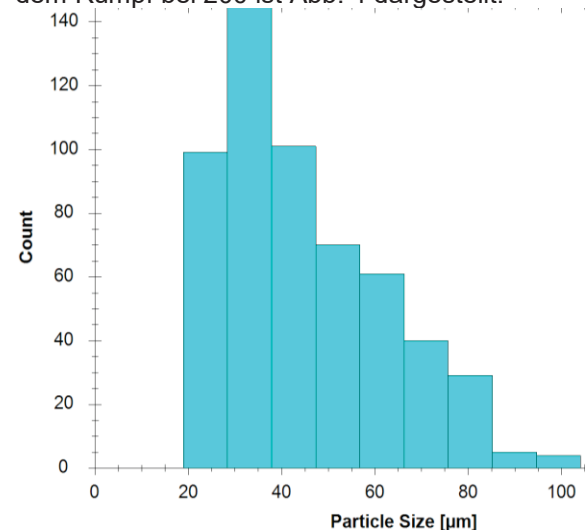


Abb. 4: Ergebnis einer HDNC-Messung

Ähnlich der in Abbildung 4 dargestellten Messung wurde für 3 verschiedene Messorte und 4 verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten die korrigierte Partikelanzahlkonzentration bestimmt.

Dabei wurde (wie erwartet) in der Nähe der Elektroden die höchste Partikelanzahlkonzentration gemessen. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit wirken stärkere Scherkräfte auf die Blasen und sie werden schnelle von den Elektroden abgerissen. Daher ist bei steigender Strömungsgeschwindigkeit mit einer Abnahme der Partikelanzahlkonzentration (Abb. 5) zu rechnen und dies wurde ebenfalls durch die Messungen bestätigt.

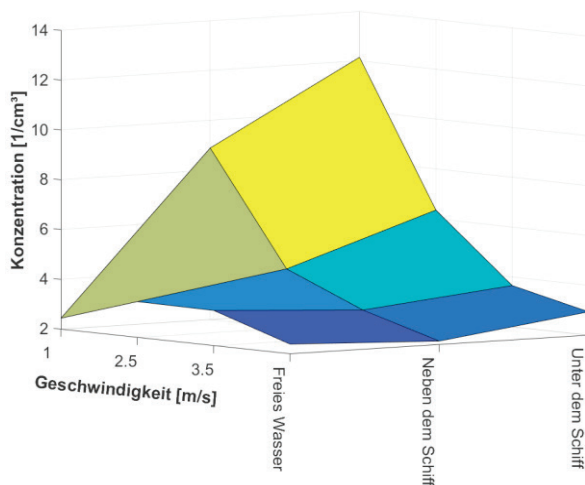


Abb. 5: Ergebnis einer HDNC-Messung

Die Partikeltypenklassifikation spielt in der realen Anwendung eine wesentliche Rolle, da bei dieser Messung im Durchschnitt 14,4 mal mehr Feststoffpartikel im Wasser festgestellt wurden als Blasen. Die Abb. 6 zeigt eine typische Blase in Bild a) und einen Feststoffpartikel in b).

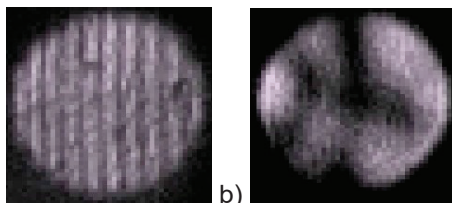


Abb. 6: Interferenzmuster a) einer Blase b) eines Feststoffpartikels

Man erkennt an den beiden Beispielen, dass es im Fall a) ein Streifenmuster mit einem weitgehend einheitlichen Streifenabstand und damit einer dominanten Frequenz im Spektrum gibt. Im zweiten Fall sind diese Streifen nicht vorhanden, statt dessen ist ein grobes Specklemuster zu sehen, was darauf hin deutet, dass mehr Glanzpunkte vorhanden sind und es sich daher um einen Feststoffpartikel handelt.

Zusammenfassung

Die HDNC-Technik bietet einige Vorteile gegenüber etablierten Techniken. Zum einen ist der geringe Geräteaufwand und die einfache Justage ein großer Vorteil. Gleichzeitig können Messergebnisse in kurzer Zeit, bei ähnlicher Auflösung und statistischer Sicherheit wie beispielsweise beim PDA erzielt werden [6]. Wesentliche Unterschiede zur etablierten Interferometric Particle Imaging Technik ist der Verzicht auf eine Lichtschnittoptik, die Möglichkeit Partikeltypen zu klassifizieren und Konzentrationen mit einer Detektionsvolumenkorrektur zu bestimmen. Messungen an Schiffen und Kavitationskanälen wurden dadurch ermöglicht.

Literatur

- [1] N. Damaschke, H. Nobach, T. I. Nonn, N. Semidetnov, and C. Tropea, "Multi-dimensional particle sizing techniques," *Experiments in Fluids*, vol. 39, pp. 336-350, 2005
- [2] T. Kawaguchi, Y. Akasaka, and M. Maeda, "Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique," *Measurement Science and Technology*, vol. 13, pp. 308-316, 2002.
- [3] A. Kleinwächter, E. Ebert, R. Kostbade, and N. Damaschke, "Concept for optical full-scale measurements on ship propeller inflow and bubble size distribution," presented at the 8th International Symposium on Cavitation (CAV2012), Singapore, 2012.
- [4] E. Ebert, K. Domke, W. Kröger, and D. Nils, "Particle characterization system for industrial and naval applications," in 8th International Conference on Sensing Technology, Liverpool, UK, 2014.
- [5] E. Ebert, A. Kleinwächter, R. Kostbade, and N. Damaschke, "Interferometric Particle Imaging for cavitation nuclei characterization in cavitation tunnels and in the wake flow," presented at the 17th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2014.
- [6] E. Ebert, W. Kröger, N. Damaschke, "Hydrodynamic Nuclei Concentration Technique in Cavitation Research and Comparison to Phase-Doppler Measurements", accepted at 9th International Symposium on Cavitation, CAV 2015, Lausanne 2015.
- [7] Carrascal, P. G.; Ruiz, S. G. & van Beek, J. "Irregular particle sizing using speckle pattern for Continuous Wave Laser applications" *Exp. Fluids*, 2014
- [8] Albrecht, H.-E.; Borys, M.; Damaschke, N. & Tropea, C. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques* Springer-Verlag, 2003
- [9] Eric Ebert „Optische Messtechnik zur Charakterisierung maritimer Kavitationskeime“ Dissertation, Universität Rostock eingereicht Nov. 2015