

Validierung von Algorithmen zur Partikelcharakterisierung mit der Hydrodynamic Nuclei Concentration Technik

Validation of algorithms for particle characterization by the Hydrodynamic Nuclei Concentration technique

Eric Ebert & Nils Damaschke

Universität Rostock IEF, AE, OPS Albert-Einstein-Straße 2 18059 Rostock

Partikelcharakterisierung, Partikelsimulation, De-fokussierte Abbildung, Validierung
Particle characterization, particle simulation, defocussed imaging, validation

Zusammenfassung

Die Vermessung und Charakterisierung kleiner Partikel (speziell kleiner Blasen) spielt in einer Reihe von technischen Prozessen eine wichtige Rolle. Am Institut für allgemeine Elektrotechnik der Universität Rostock wird in einigen Forschungsvorhaben daran gearbeitet, eine Messtechnik zu entwickeln mit der kleine Bläschen im Mikrometerbereich vermessen werden können. Dazu wurde die Hydrodynamic Nuclei Concentration oder kurz HDNC-Technik aus der Interferometric Particle Imaging Technik entwickelt [9] & [10]. Die Technik verwendet eine komplexe spektrale Bildverarbeitung. Dadurch gibt es einen großen Parameterraum. Um auf diesem Komplexitätsgrad Probleme in der implementierten Software zu finden, ist eine Validierung der einzelnen Analyseschritte [3] notwendig. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Überprüfung.

Eine Messung an einem Referenzmessobjekt mit bekannten Eigenschaften sollte erfolgen. Zweitens sollte eine etablierte Messtechnik zu einer Referenzmessung verwendet werden. Beide messtechnische Varianten erlauben einen Rückschluss darauf, ob ein Messsystem sinnvolle Ergebnisse liefert.

Für eine Fehlersuche in Analyse-Algorithmen ist es zusätzlich sinnvoll, die Grundwahrheit zu kennen, die in den meisten Fällen messtechnisch nicht exakt bestimmt werden kann. Daher wird neben Validierungsmessungen auch Simulation eingesetzt. Die Simulation erlaubt es die Grundwahrheit zu kennen. Im Fall der HDNC-Partikelsimulation bedeutet das, dass die Partikelposition, Partikeltyp, Blasengröße, Laserstrahleigenschaften, Rauscheigenschaften optische Verzeichnungen, Modulationstiefe und Phasengang genau bekannt sind und gesteuert werden können.

Um dies zu realisieren wurde eine Simulationssoftware entwickelt, die in der Lage ist typische Interferenzmuster einer de-fokussierten Partikelabbildung im Laserlicht zu simulieren. Insgesamt wird auf der Grundlage des Partikel-Simulators und gezeigt, dass die spektralen Analysealgorithmen weitgehend zuverlässig arbeiten. Bei geringen Partikelkonzentrationen und damit wenig Überlappungen der de-fokussierten Partikelabbildungen wurden Detektionsraten im Bereich von bis zu 95% richtig detektierter Partikel erreicht. Für höhere Konzentrationen kommt es zu mehr Überlappungen und zu nicht erkannten Partikeln, was sich in einer Erkennungsrate von etwa 82% niederschlägt. Ähnlich verhält es sich bei Rauschen und Abbildungsfehlern.

Einleitung

Ein ungelöstes technisches Problem ist die Kavitation an Propellerblättern im Designprozess exakt vorherzusagen. Die Kavitation wird durch Kavitationskeime (kleine Bläschen) in der Propellerzuströmung verursacht. Auf der Saugseite des Propellers werden die Kavitationskeime im Unterdruckgebiet aufgeweitet. Zwischen der Saugseite und der Druckseite eines Propellers gibt es einen starken Druckgradienten, der dafür sorgt dass die Bläschen implodieren und Metallstücke aus dem Propeller herausschlagen können [1]

Dadurch verursacht Kavitation einige negative Effekte. Die Schiffseffizienz sinkt, wenn der Propeller in Dampfblasen anstelle von Wasser dreht und dadurch keinen Vorschub leistet. Daneben führt die Kavitationserosion zu Defekten Propellern und im schlimmsten Fall zur Manövrierunfähigkeit des Schiffes. Weitere negative Effekte sind die Geräusch- und Vibrationsbelastung von Passagieren und der Eintrag von Geräuschen die für Unterwasserlebewesen schädlich sind [2].

Um die Kavitationskeime unter Laborbedingungen im Kavitationskanal und auch in der Großausführung nach Größe und Konzentration vermessen zu können, wurde die Hydrodynamic Nuclei Concentration oder kurz HDNC-Technik entwickelt. Die HDNC-Technik verwendet einen einfachen Aufbau. Er besteht aus einem Laserstrahl der die Partikel beleuchtet und einer Kamera welche die Lichtstreuung der Partikel unter einem bestimmten Streuwinkel de-fokussiert abbildet. Aufwendig ist an der Technik die Signalaufbereitung und –auswertung, was sie Fehleranfällig macht. Eine Validierung der einzelnen Analysealgorithmen wird notwendig [3].

Die Algorithmen können auf unterschiedliche Weisen überprüft werden. Zum einen kann gegen ein Referenzmessobjekt mit bekannten Eigenschaften gemessen werden. Mit Hilfe eines piezoelektrischen Tröpfchengenerators wurden 75 μm große Tropfen erzeugt und mit der HDNC-Technik Vermessen. Die Tropfengrößenmessung weist dabei einen zufälligen Fehler mit einer Standardabweichung von etwa 0,5 μm auf [1].

Daneben ist es günstig eine zweite, etablierte Messtechnik für eine Referenzmessung anzuwenden. An einem Strömungskanal die Konzentration mit Hilfe der Phasen Doppler Technik und der HDNC-Technik bestimmt. Hier konnte gezeigt werden, dass sich ähnliche Ergebnisse bei geringerem Aufwand und in kürzerer Messzeit erzielen lassen [4].

Neben den beiden messtechnischen Möglichkeiten wurde eine Simulationssoftware für die Berechnung von typischen Partikelabbildungen implementiert. Sie ist in der Lage typische Interferenzmuster einer de-fokussierten Partikelabbildung von Blasen und Feststoffen zu simulieren und in einem Bild gezielt abzulegen. Daneben können die Intensitätsverteilung des Lasers, die Blasengrößenverteilung nach einer Vorgegebenen Verteilungsfunktion (Poisson-, Normal-, Gleichverteilung), Modulationstiefen, Partikelbewegungen im Laserstrahl, Abbildungsfehler, Partikelüberlappungen und Kamerarauschen in die Berechnung einbezogen werden.

Aus Sicht der Validierung von Analysealgorithmen hat die Simulation einen entscheidenden Vorteil. Die Grundwahrheit ist bei simulierten Partikelabbildungen anders als bei einer Messung bekannt. Dadurch kann die Empfängercharakteristik des Messsystems bewertet werden. Verteilt man 5 Blasen und 5 Feststoffe sollte der Algorithmus 10 Partikel im Bild detektieren und entsprechen 5 Blasen der Größen und Konzentrationsanalyse zuführen.

Wie gut das funktioniert hängt wesentlich von den eingestellten Parametern des Messsystems und davon wie gut beispielsweise überlappende Partikelabbildungen separiert werden können ab.

Material und Methoden

In [6], [7], [8] & [1] sind eine Reihe von Messtechniken untersucht worden, mit denen Partikeln in Mehrphasenströmungen vermessen werden können. So sind z.B. die Schattenabbildung und ihre Variationen auf Grund des einfachen Aufbaus und der vergleichsweise einfachen Analyse verbreitet für die Vermessung von Partikeln im Millimeterbereich.

Die Phasen Doppler Technik wird häufig für die Vermessung von Partikeln im Mikrometerbereich und hohen Partikelanzahlkonzentrationen verwendet. Probleme sind die aufwendige Justage und die komplexe Signalauswertung. Unebene Grenzflächen der optischen Zugänge und der durch sie hervorgerufene Linseneffekt sind ebenso ein Problem wie die hohen Messzeiten bei geringen Konzentrationen.

Die Hydrodynamic Nuclei Concentration (HDNC) basiert auf der Interferometric Particle Imaging Technik oder vielen auch als ILIDS-Technik bekannt [9]. Bei geringen Partikelanzahlkonzentration kann sie für die Vermessung von Partikeln im Mikrometerbereich verwendet werden. Grund für diese Bedingung ist, dass HDNC eine de-fokussiert abbildende Messtechnik ist und damit bei zu vielen Partikelüberlappungen keine sinnvolle Auswertung möglich ist. Messprinzip ist bei der HDNC-Technik die Partikel mit einem Laserstrahl zu beleuchten und mit einer Kamera mit Abbildungsoptik unter einem bestimmten Streuwinkel de-fokussiert abzubilden. Mit Hilfe der Mie-Theorie kann vorhergesagt werden, wie die Partikel unter einem bestimmten Streuwinkel streuen. Dabei ist die Intensitätsverteilung des gestreuten Lichtes an der Partikeloberfläche beispielsweise abhängig vom Streuwinkel zwischen Laserstrahl und Kamera und der Partikelform. Unter 90° Streuwinkel bei Luftblasen im Bereich von einigen Mikrometern entstehen zwei etwa gleich helle dominante Glanzpunkte. Die Wellen dieser Glanzpunkte interferieren miteinander auf dem Detektor in de-fokussierter Abbildung. Es entsteht ein Interferenzstreifenmuster, dessen Streifenabstand proportional zur Partikelgröße ist. Hat man Feststoffpartikel im Laserstrahl entstehen mehr Glanzpunkte an der Partikeloberfläche aufgrund der Rauheit. Man erhält dann die typischen Speckle-Muster. Die HDNC-Technik implementiert eine spektrale Analyse, die es erlaubt die Streifenmuster von den Specklemustern zu unterscheiden [1] und dabei die Blasengrößen aus den Streifenabständen zu ermitteln. Die Feststoffgröße kann mit der Methode von [11] & [12] bestimmt werden. In [1] ist weiterhin eine Methode beschrieben, die es erlaubt eine Konzentrations-schätzung durchzuführen.

Insgesamt weist die HDNC-Technik gegenüber anderen Techniken einige Vorteile in der Anwendung Kavitationsforschung auf. Man kann Blasen von Feststoffen trennen, man hat einen sehr einfachen Hardwareaufbau und man kann Konzentrationen zeitlich aufgelöst bestimmen [5].

Für die Validierung wurde in Microsoft C# mit Hilfe von EmguCV (http://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page) und MPI.Net (<http://www.osl.iu.edu/research/mpl.net/>) ein Simulationssystem entwickelt, mit dem sich weitgehend realistische Bilder auf einem Rechen-Cluster erzeugen lassen. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für a) aufgezeichnete und b) Simulierte Partikelabbildungen.

Neben der Partikelabbildung werden die Partikelposition und die Partikeleigenschaften aufgezeichnet. Die implementierte Auswertung kann dann abgleichen, welche Partikel erkannt wurden und welche nicht. Ein Beispiel ist in Abbildung 2 dargestellt. Auf diese Weise lässt sich eine Statistik ermitteln, die bei vielen Abbildungen eine Aussage dazu ermöglicht wie gut Partikel gefunden und charakterisiert werden können.

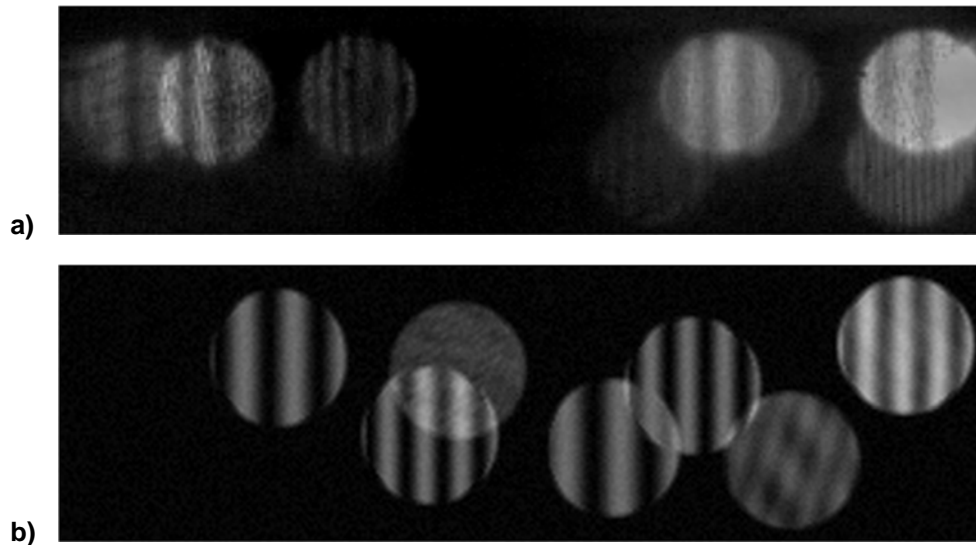


Abbildung 1: a) aufgezeichnete b) simulierte Partikelabbildung

Für die hier gezeigten Beispiele wurden 250 Partikelabbildungen mit jeweils zwei Blasen und einem Feststoff oder fünf Blasen und zwei Feststoffen simuliert.

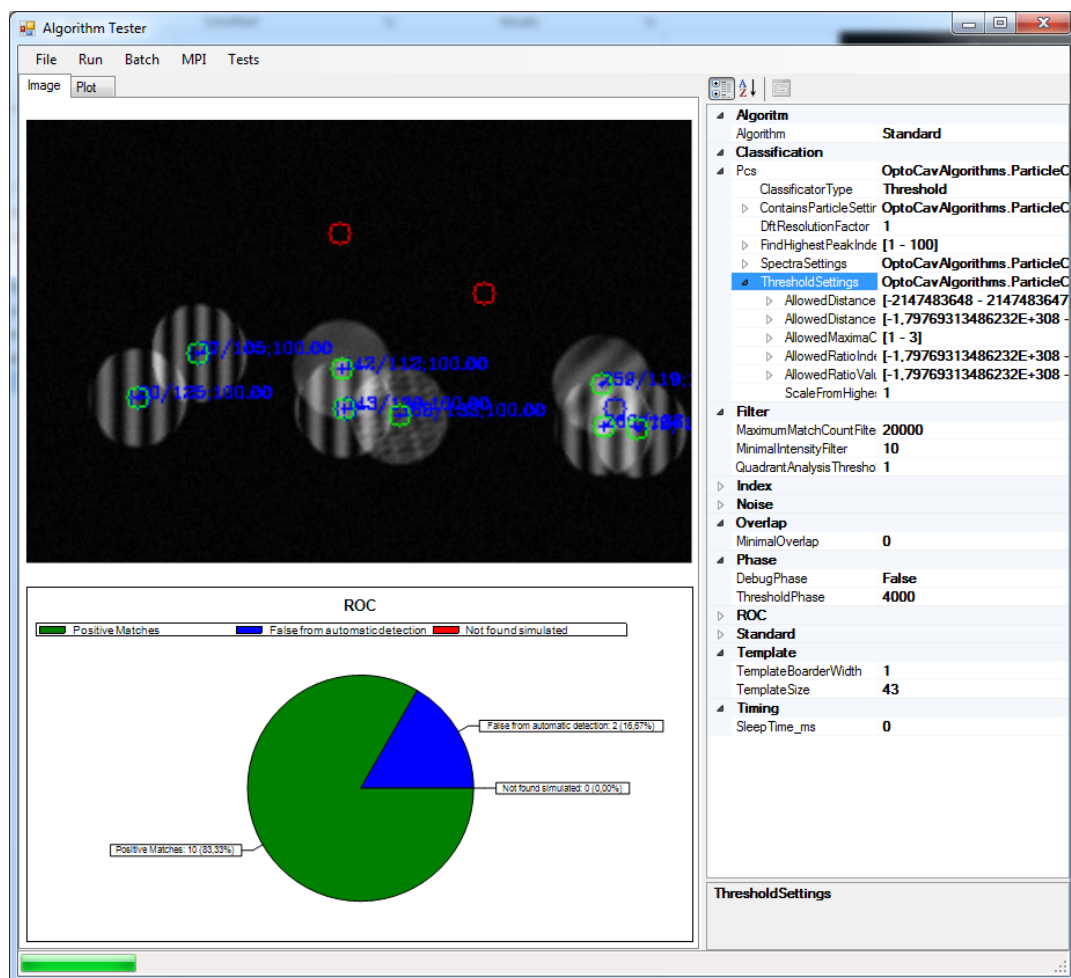


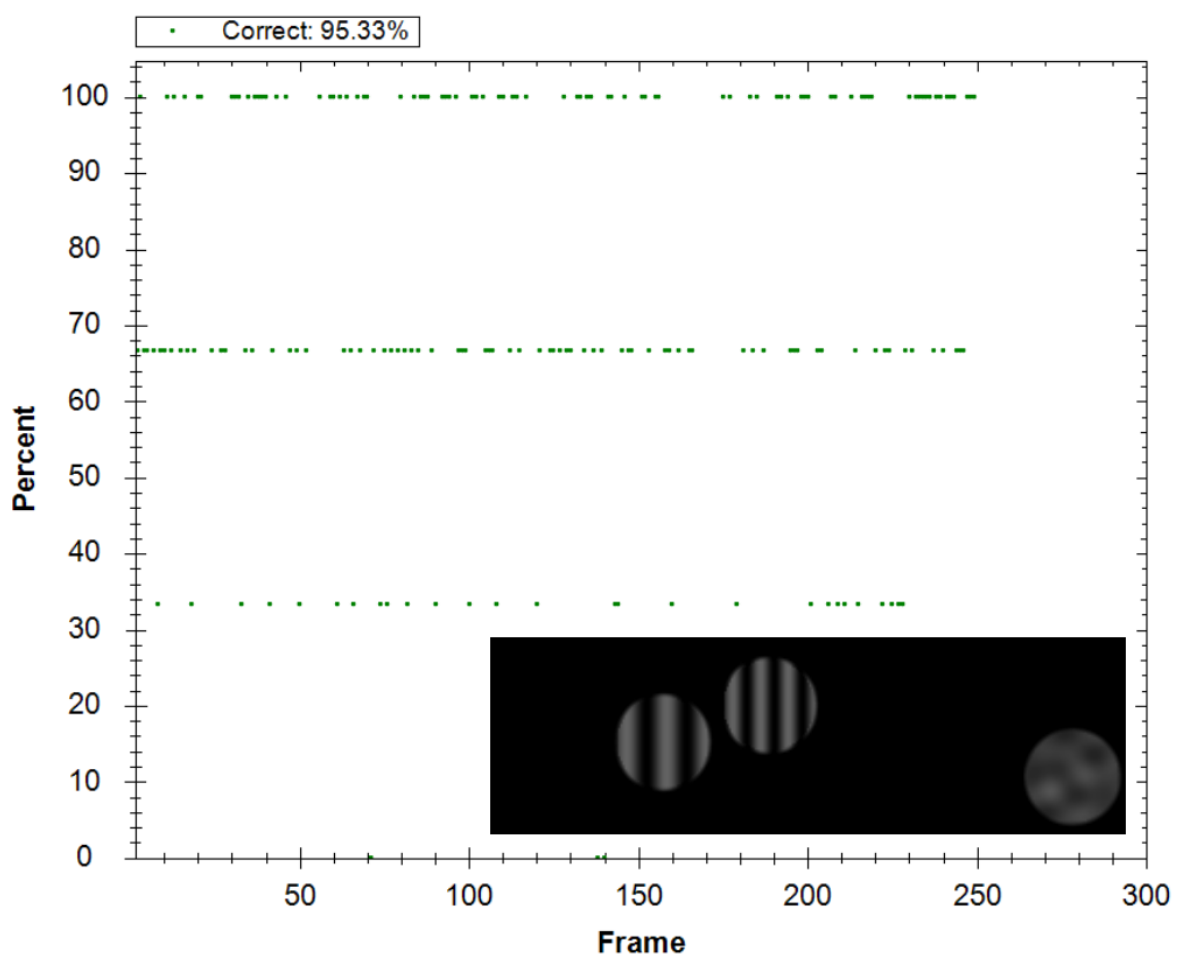
Abbildung 2: Beispiel des Algorithmus Tests für eine Partikelabbildung.

Bei Abbildungen mit mehr Blasen und Feststoffen kommt es häufiger zu Überlappungen, was zu Detektions- und Charakterisierungsproblemen führt, die nun durch den Simulator quantisiert werden können.

Ergebnisse

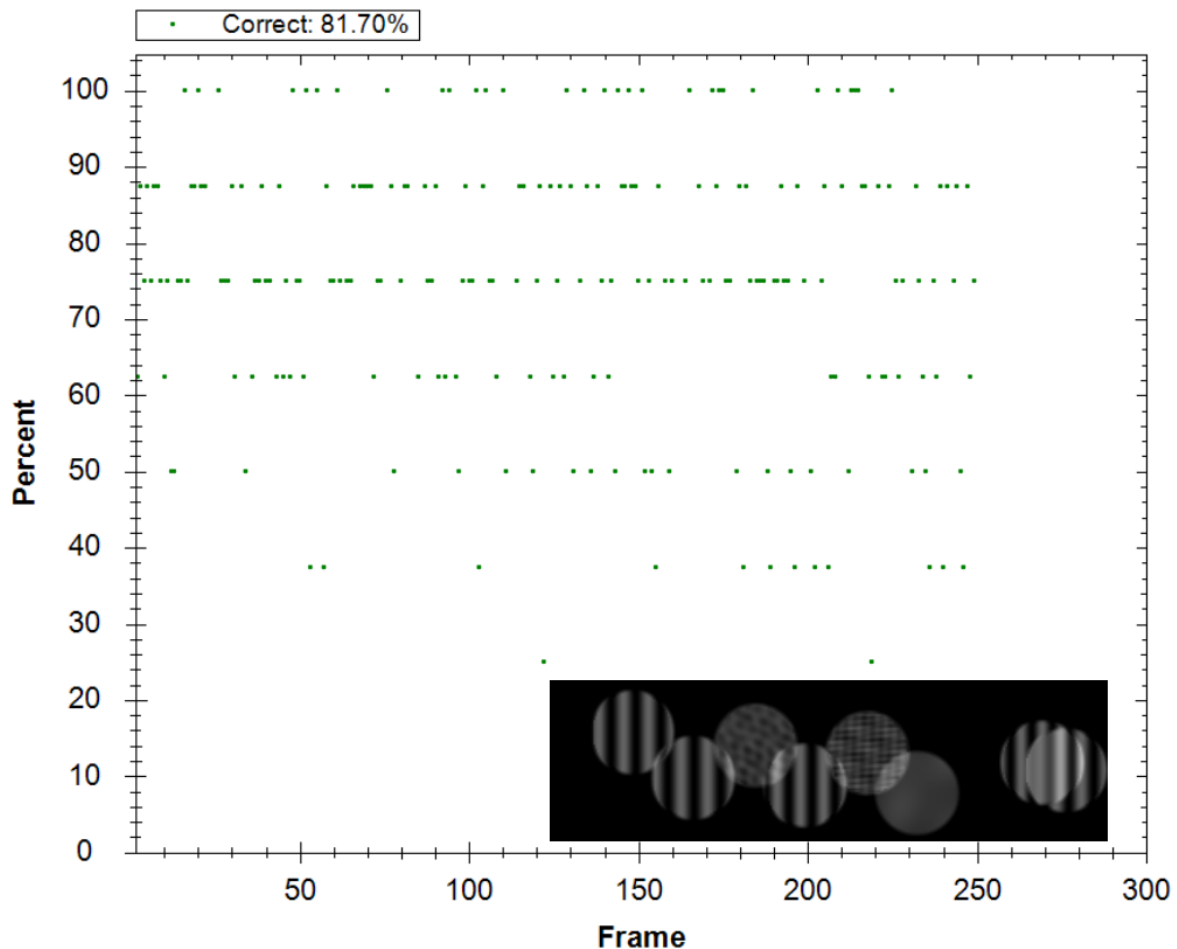
Wie in der Einleitung beschrieben, sind in [1] & [4] Ergebnisse zu finden, die beschreiben wie die messtechnische Validierung durchgeführt wurde. An dieser Stelle werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen vorgestellt.

Für die HDNC-Technik wurden Erkennungsraten im Bereich zwischen 80% und 95% richtig erkannter Partikel erzielt (bei Stichproben von 250 Bildern und 3 bis 7 Partikeln pro Bild, angepasste Detektionseinstellungen). Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für eine Konfiguration mit hoher Erkennungsrate bei geringer simulierter Konzentration von zwei Blasen und einem Feststoff pro Bild.



**Abbildung 3: Beispiel-Statistik über 250 Bilder mit je 3 Partikeln (2 Blasen und 1 Feststoff)
>95% der Partikel wurden an der richtigen Position erkannt**

Bei höheren Konzentrationen sind mehr Überlappungen zu finden, die Probleme bei der Partikeldetektion verursachen. Dadurch kommt es häufiger zu Fehlern, was in wie in Abbildung 4 dargestellt ist. Für eine reale Aufnahme ist die Abbildungsoptik also so auslegen, dass man möglichst wenige Überlappungen erhält.



**Abbildung 4: Beispiel-Statistik über 250 Bilder mit je 7 Partikeln (5 Blasen und 2 Feststoffe)
>81% der Partikel wurden an der richtigen Position erkannt**

Bezieht man 5% Intensitäts-Rauschen mit in die Betrachtung ein, ergibt sich ebenfalls eine Reduktion der Erkennungsleistung im Prozentbereich. Etwa 87% der Partikel wurden bei der Berechnung richtig detektiert. Bei einer starken Kissenverzeichnung, Rauschen und vielen Überlappungen wurde die Erkennungsleistung für den Template-Matching-Algorithmus auf >80% reduziert.

Schlussfolgerungen & Ausblick

Insgesamt können auf der Grundlage des Partikel-Simulators verschiedene Probleme, die in einer realen Messung auftreten können, unabhängig voneinander betrachtet werden. Sie können ebenfalls im Zusammenspiel und mit deren gegenseitigem Einfluss untersucht werden. Auf dieser Basis ist es möglich, gezielter Korrektur- und Verbesserungsstrategien zu erarbeiten, als dies mit realen Messdaten möglich wäre. Man kann durch die bekannte Grundwahrheit ebenfalls Parameterstudien durchführen, die es erlauben, für einen speziellen Fall optimale Einstellungen für die Analysealgorithmen zu finden. Dadurch wird man zukünftig abschätzen können, welche Parameter bei welchen Eigenschaften der Messung ausgewählt werden sollten. Weiterhin soll die Simulation neben der Bewertung der Detektionsalgorithmen auch dazu genutzt werden, die Vermessungsalgorithmen zu bewerten.

Literatur

- [1] E. Ebert (2017): Optische Messtechnik zur Charakterisierung maritimer Kavitationskeime, http://rosdok.uni-rostock.de/metadata/rosdok_disshab_0000001710, Dissertation, Universität Rostock
- [2] A. Kleinwächter, E. Ebert, R. Kostbade & N. Damaschke (2012): Concept for opticalfull-scale measurements of ship propeller in flow and bubble size distribution, Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation CAV2012, Submission No. 256, August 14-16, DOI 10.3850/978-981-07-2826-7_256, Singapore
- [3] E. Ebert, A. Kleinwächter, R. Kostbade & N. Damaschke (2014): Interferometric Particle Imaging for particle characterization in the wake flow of a ferry ship and in cavitation tunnels, Proceedings of the Lisbon 17th 2014 International Symposium On Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon
- [4] E. Ebert, W. Kröger & N. Damaschke (2015): Hydrodynamic Nuclei Concentration Technique in Cavitation Research and Comparison to Phase-Doppler Measurements, Proceedings of the 9th International Symposium on Cavitation, CAV2015, Lausanne
- [5] E. Ebert, W. Kröger, A. Kleinwächter, R. Kostbade & N. Damaschke: HDNC - A Novel Technique for Cavitation Nuclei Characterization and Particle Count Concentration Measurements, Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, ISROMAC 2016, Honolulu, 2016
- [6] Black, D. L., McQuay, M. Q. & Bonin, M. P. (1996): Laser-based techniques for particlesize measurement: A review of sizing methods and their industrial applications. In: Progress in Energy and Combustion Science, 22, 3: 267 306. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128596000081>
- [7] Dehaeck, S. (2007): Development of Glare Point, Shadow and Interferometric Planar Techniques for Gas Bubble Sizing. Dissertation, Universiteit Gent.
- [8] Honkanen, M. (2006): Direct Optical Measurement of Fluid Dynamics and Dispersed Phase Morphology in Multiphase Flows. Dissertation, Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu - Tampere University of Technology Institute of Energy and Process Engineering. URL <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-200810021070>
- [9] 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: L13L18. URL <http://iopscience.iop.org/0957-0233/11/12/101>
- [10] Damaschke, N., Nobach, H. & Tropea, C. (2002c): Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics. In: Exp. in Fluids, 32: 143 p152. URL http://download.springer.com/static/pdf/532/art%253A10.1007%252Fs00348-001-0371-x.pdf?auth66=1390854755_9fb0de37a76c33f1ce36756c4bab0147&ext=.pdf
- [11] Ruiz, S. G., Vetrano, M. R. & van Beeck, J. (2014): Feasibility of using glory and speckle patterns for sizing spherical and irregular particles. In: Appl. Opt., 53, 21: 4722 - 4728. URL <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-53-21-4722>.
- [12] Carrascal, P. G., Ruiz, S. G. & van Beek, J. (2014): Irregular particle sizing using specklepattern for Continuous Wave Laser applications. In: Exp. Fluids.