

UNTERSUCHUNG DES NACHSTROMFELDES UND KAVITATIONS- BEOBACHTUNGEN ALS GROßAUSFÜHRUNGSMESSUNG IM NACHLAUF EINER FÄHRE

WAKE AND KAVITATION INVESTIGATION AS FULL SCALE MEASUREMENT IN THE SLIPSTREAM OF A FREIGHT FERRY

Ebert, E.; Kleinwächter, A.; Kostbade, R.; Damaschke, N.
Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Lehrstuhl für Optoelektronik und photonische
Systeme, Universität Rostock

Schlagworte: Nachstromfeld, Geschwindigkeitsprofil, Partikelcharakterisierung
Key words: Slipstream, Particle characterization, Laser calibration

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt die Nachstromuntersuchung an einer Ro/Ro-Fähre im Rahmen des Projekts KonKav II vor. Die Bestimmung der Wasserqualität im Propellerzustrom ist eine entscheidende Größe bei Kavitationsuntersuchungen. Ziel dieses Projektes ist die orts aufgelöste Geschwindigkeits- und Blasengrößen-Messung an der Frachtfähre Amandine. Die Messdaten werden mit Hilfe einer auf PIV (Particle Image Velocimetry) und IPI (Interferometric Particle Imaging) basierenden Messtechnik aufgezeichnet. Die gewonnenen Daten verbessern die Erstellung belastbarer Modelle zur Kavitationsabschätzung. Interessante Aspekte des optischen Zuganges und Ergebnisse der ersten Messkampagne auf der Amandine werden vorgestellt.

1. Einleitung

Die Kavitation an der Propeller- und Ruderanlage beeinträchtigt die Schiffseffizienz und Sicherheit durch Vibrationen, Erosion und Materialverschleiß. Kavitation kann in extremen Fällen zum Verlust der Manövrierfähigkeit führen. Marine- und Schiffbau-Forschungsinstitute benötigen zuverlässige Kavitationsmodelle für die korrekte Vorhersage der komplexen Kavitationserscheinung am realen Schiff. Skalierungseffekte zwischen Untersuchungen im Modellmaßstab und der Großausführung sind nur schwer in Kavitationsmodellen abbildbar (Weitendorf 1978). Um diese Kavitationsvorhersage zu verbessern, wurde das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Projekt *Forschung zur Korrelation von Kavitationseffekten und Erosion unter Berücksichtigung von Wassereigenschaften und Nachstrom* (KonKav) initiiert. Die Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA), die Potsdamer Schiffbau-Versuchsanstalt (SVA), die Technische Universität Hamburg Harburg (TU-HH), die Flensburger Schiffbau-Gesellschaft (FSG) und die Universität Rostock sind Projektpartner.

Während der Schwerpunkt der ersten Projektphase (KonKav I) darin besteht, die Auswirkungen der Wasserqualität und des Gasgehaltes für die Ausprägung der Kavitation im Modellversuch mit Laser Doppler, Phasen Doppler und der Zeitverschiebungstechnik (ZVM) zu bestimmen, liegt der Fokus bei KonKav II in der Untersuchung eines realen Propellerzustroms an der Frachtfähre Amandine. Ziel ist es, Nachstromgeschwindigkeiten und Keimspektren

messtechnisch zu erfassen, um Validierungsdaten für die Erstellung zuverlässiger numerischer Modelle entwickeln zu können.

Für die Geschwindigkeitsmessung werden die Particle Image Velocimetry (PIV) (Raffel 2007) und vergleichend dazu die Ortsfilter-Messtechnik (Schaeper 2011) eingesetzt. Die Partikelcharakterisierung wird mit Hilfe von Interferometric Particle Imaging (IPI) (Damaschke 2005) durchgeführt. Die Untersuchungen finden auf der Route Rotterdam - Dublin statt.

2. Optische Ankopplung und Messaufbau

2.1 Optischer Zugang

Das Schiff wurde mit vier Bullaugen oberhalb des Propellers ausgerüstet, um den Schiffsnachstrom und die Kavitationserscheinungen zu beobachten. Eine schematische Darstellung liefert Abbildung 1. Die Beleuchtung unterschiedlicher Messvolumina im Messfeld und deren Positionsbestimmung erfolgt über einen Laseraufbau über Bullauge 3. Der Abbildungsaufbau befindet sich über Bullauge 2. Verschiedene Canon Hochleistungsobjektiven und eine HS-Kamera kommen zum Einsatz. Die nicht eingezeichneten Bullaugen 1 und 4 dienen der Stroboskop-Beleuchtung des Propellers zum Zweck der Messfeldkalibrierung.

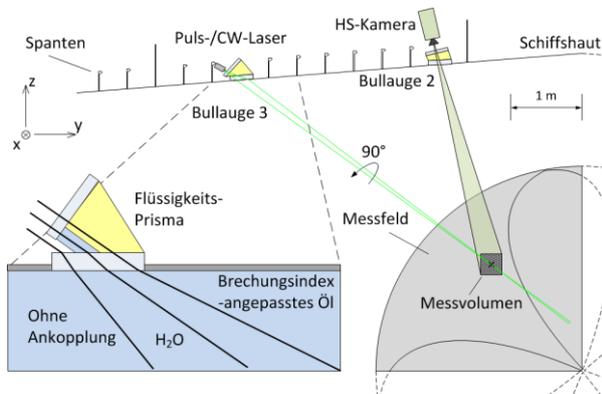


Abb. 1: Optische Ankopplung und Messaufbau



Abb. 2: Spantenkonstruktion um Bullauge 2

Da drei der vier Bullaugen in der gleichen vertikalen Ebene wie der Propeller angeordnet sind, die Messebene jedoch vor dem Propeller liegt, müssen die Messaufbauten über geeignete Traversierungen geneigt werden (Rotation um Y). Eine weitere Verkippung (Rotation um X) beider Aufbauten ist notwendig, um unterschiedliche Messvolumina im Messfeld zu untersuchen.

Um einen möglichst großen Beobachtungsbereich realisieren zu können, werden Flüssigkeitsprismen eingesetzt (Albrecht 2003). Sie bestehen aus einem flexiblen flüssigkeitsgefülltem Balg. Die obere und untere Abschlussplatte besteht aus Plexiglas. Da die Kamera bzw. der Laser senkrecht zu der oberen Scheibe montiert ist, können zusätzliche Brechungen innerhalb des optischen Weges vermieden werden.

Untersuchungen der Bildqualität wurden in einer Schwimmhalle unter realistischen Entfernungs- und Winkelbedingungen mit einem Luftausströmer (mittlere Blasengröße ca. 50 μm) durchgeführt. Weiterhin wurde ein Kalibriertarget zur Abschätzung des Aberrationsverhaltens der einzusetzenden Optiken genutzt.

Die starken Aberrationen bei großen Brechungswinkeln unter Verwendung von brechungsindexangepasstem Öl (Shell Gravex 917) als Füllmedium des Faltenbalges sind trotz des Erreichens größerer Beobachtungswinkel kritisch. Demgegenüber bewirkt das Verwenden von Salzwasser lediglich den erwarteten parallelen Strahlenverlauf zwischen eingestrahlem und

gebrochenem Strahl, die geringen Aberrationen erlauben jedoch eine bessere Auswertung der Abbildungen.

2.2 Objektive

Getestet wurden die Hochleistungs-Objektive Sigma 200-500 mm 2.8 EX DG, Canon EF 400 mm f/2.8L II und Canon EF 300 mm f/2.8L II. Faktoren wie Bildqualität, minimale Aberrationen, Lichtstärke und eine geringe Naheinstellgrenze bestimmten die Vorauswahl. Außerdem spielen geringe Abmessungen und ein geringes Gewicht auf Grund einer sehr engen Messumgebung und des Ziels die Messaufbauten automatisiert zu positionieren eine große Rolle.

Die Tatsache, dass mit anzustrebenden großen Brennweiten für die Identifizierung kleiner Bläschenströme auch die Naheinstellgrenze der Objektive steigt, ist ebenso nachteilig wie die Vergrößerung dieser bei einer Partikelbeobachtung in Wasser um den Faktor 1.33 verglichen mit Luft.

Das Sigma Objektiv ermöglicht die Anpassung der Naheinstellgrenze über die Regulierung der Brennweite. Die große Brennweite von 500 mm steht jedoch erst ab einer Messentfernung von 4 m zur Verfügung. Die interessantesten Messvolumina liegen jedoch deutlich dichter im Bereich der Nachstromdelle. Außerdem lässt sich die Fokussierung nicht durch die High-Speed Kamera automatisieren. Die Abmaße (Länge = 700 mm) und das Gewicht von 15 kg sprachen ebenfalls gegen eine Verwendung. Aus diesem Grund wurde sich für zwei Objektive mit Festbrennweite entschieden. Das Canon f = 400 liefert unter Zuhilfenahme eines Zwischenringes hochaufgelöste Bilder ab einer Entfernung von 2.5 m und das Canon f = 200 bis zu dieser Grenze.

2.3 Beleuchtung

Bei der Großausführungsmessung können Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s (Schiffsgeschwindigkeit) auftreten. Bei einem minimalen Beobachtungsbereich von 20 cm (Brennweite 200 mm; Abstand 1 m) ist ein zeitlicher Bildabstand von maximal 10 ms notwendig, um noch Korrelation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern zu erreichen. Eine gepulste Beleuchtung oder Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit kontinuierlichem Lichtenergieeintrag sind denkbar.

Da gepulste Quellen einen hohen Lichteintrag liefern, kommt ein Doppelpulslaser zum Einsatz. Sowohl Laser als auch HS-Kamera werden basierend auf dem Wellenimpuls getriggert und synchronisiert. Die Doppelbilder lassen sich im Bereich weniger Mikrosekunden und einer Repititionsrate von 15 Hz aufnehmen. Damit wird die Aufnahme propellerblattaufgelöste Doppelbilder möglich (Propellerdrehzahl 103/min). Eine stroboskopische Blitzlampen-Beleuchtung (Drelloskop 7,5 J in 10 μ s) wurde aufgrund der notwendigen und sehr aufwendigen Kollimation der Lichtenergie in das Messvolumen nicht weiter verfolgt. Das monochromatische Licht des Lasers (532 nm, Nd:YAG) bedingt darüber hinaus geringere chromatische Aberrationen. Da sowohl die Kalibrierung als auch die Beleuchtung über einen Laser erfolgt, kann für beide Prozesse derselbe optische Zugang (Bullauge 3) genutzt werden.

2.4 Automatisierung

Die Traversierung der Messaufbauten erfolgt automatisiert über schrittmotorgesteuerte präzise Linear- und Rotationsachsen, um wiederholgenaue Messergebnisse zu generieren. Die Ausrichtung erfolgt über einen Kreuzlinienlaser. Das erzeugte kartesische Koordinatensystem bezieht sich auf die Wasserlinie des Schiffs. Dadurch ist das Messvolumen starr an das Schiff gekoppelt, unabhängig von dessen Wasserlage. Die Schiffsneigung und auftretende

Vibrationen werden aufgezeichnet, um deren Einfluss auf die Messdaten auszuwerten bzw. herauszurechnen. Der Messaufbau ist modular entworfen, sodass ein Austausch der Aufbauten von Bullauge 2 und 3 in wenigen Minuten möglich ist, um auch eine 3D-Geschwindigkeitsbestimmung durchzuführen. Weiterhin werden u.a. die Parameter Schiffsgeschwindigkeit über Grund, GPS-Geschwindigkeit, Propulsionsdaten, Kurs und Windrichtung aufgezeichnet. Darüber hinaus wird ein Videoüberwachungssystem auf der Brücke eingesetzt, um Unregelmäßigkeiten in der Propellerzuströmung zu identifizieren. Mögliche Quellen können kreuzende Schiffe, Regenwasser oder bestimmte Neigungswinkel des Schiffes sein.

Für den Test des Gesamtkonzeptes wurden Versuchsträger vom Projektpartner FSG angefertigt (Abbildung 2), welche die Schiffsspantenkonstruktion des Messplatzes wiedergibt. Zwei dieser Sektionen werden später auf einem Ponton zusammengeschweißt und in der Schlepprinne des Projektpartners SVA getestet. Dabei stehen die Kalibrierung des optischen Pfades und die Bestimmung der Messgenauigkeiten im Vordergrund.

3. Geschwindigkeitsmessungen

PIV ist geeignet um im Nachstrom des Schiffes eine Messung der Blasengeschwindigkeiten vorzunehmen. Hierzu wird mit Hilfe des 200 mJ 15 Hz 523 nm Nd:YAG Puls-Laser ein 1°-divergierender Lichtschnitt mit Hilfe einer drehbaren Zylinderlinse entlang der Hauptströmungsrichtung erzeugt. Der Lichtschnitt beleuchtet das Messvolumen und begrenzt es gleichzeitig in X und Z. In Y ist die Apertur des eingesetzten Objektivs ausschlaggebend. Die Messpunkte sind im Bereich starker Gradienten der Nachstromdelle angeordnet.

Vor den PIV-Messungen erfolgt eine Kalibrierung der Messaufbauten. Die Kalibrierung erfolgt in zwei Schritten. Zum einen müssen die Messpositionen mit einer Genauigkeit von ca. 5 cm definiert werden. Dazu wird der Propeller basierend auf dem Wellenimpuls stroboskopisch beleuchtet und über eine Phasenschiebung in unterschiedlichen Winkeln scheinbar stehend positioniert. Danach definiert ein auf den Propeller projiziertes CW-Laserkreuz einen Messpunkt. Damit existiert in unmittelbarer Nähe vom späteren Messvolumen ein Kalibrierungspunkt für die Berechnung weiterer Messvolumina über Triangulationsbeziehungen.

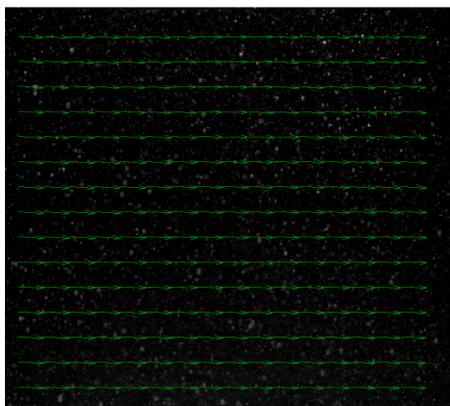


Abb. 3a.) Beispiel des adaptiven Korrelationsalgorithmus: zu erkennen sind die Summenvektoren der Interrogationsbereiche von 400 Bildern. Gemessen wurde mit 3200 Bildern/Sekunde

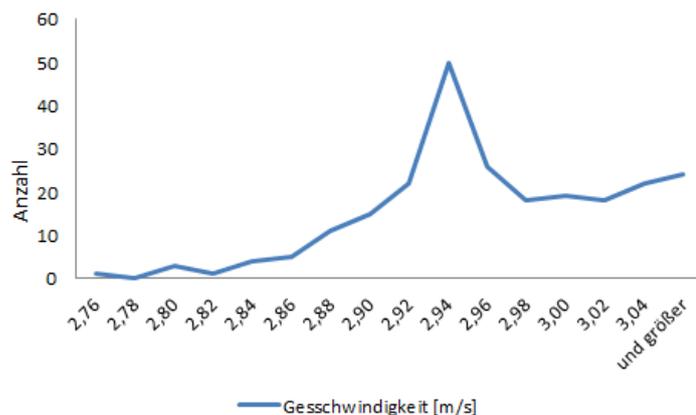


Abb. 3b.) zugehöriges Geschwindigkeitshistogramm in maximaler Ausbreitungsrichtung

Die Parameter der Verfahrachsen für den Laser und den Beobachtungsaufbau werden während der Kalibrierung geloggt und anschließend für die Aufzeichnung der Messwerte automatisch angefahren.

Für die Umrechnung von Bildkoordinaten in Objektkoordinaten ist ein zweiter, genauerer Kalibrierungsschritt notwendig. Hierfür wird über eine Traversierung ein definiertes Raster aus parallelen Laserstrahlen erzeugt. Deren Beobachtung gibt Aufschluss über die örtlichen Größenverhältnisse und die sphärischen Aberrationen. Die Bilder werden mit einem adaptiven Korrelationsverfahren ausgewertet (Abbildung 3a und b).

4. Bestimmung der Keimspektren

Zur Bestimmung der Keimkonzentration wird die IPI Technik eingesetzt. Die IPI-Technik für Blasen basiert auf der Interferenz der Glanzpunkte von Reflexion und Brechung die durch die Laserbeleuchtung hervorgerufen wird.

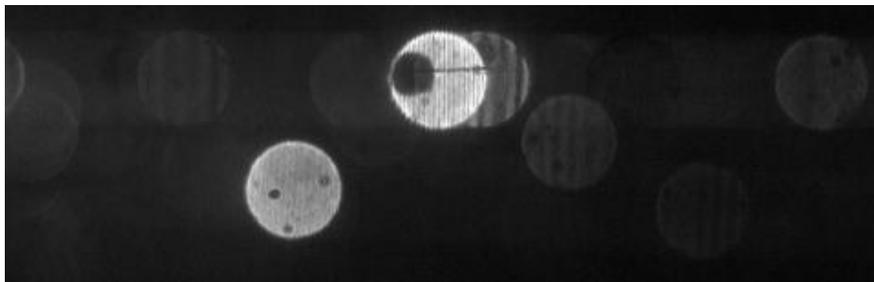


Abb. 4 Beispiel für IPI Messung von Blasen

Insbesondere bei kleinen Blasen ist die IPI Technik in der Lage, die Partikelgröße über einen großen Messbereich zu bestimmen. In Laborversuchen wurde der Einsatz von IPI in Bezug auf Robustheit, Kalibrierung und Aufwand ausgewertet und mit den Time-Shift- und Phasen-Doppler-Techniken verglichen. Es stellte sich heraus, dass ein sehr viel geringerer Justage- und Materialaufwand notwendig ist. Das Verfahren wurde in der Potsdamer Schiffbauversuchsanstalt bei einer Vergleichsmessung im Mai 2012 erprobt (Kleinwächter 2012). In Abbildung 4 und Abbildung 5 sind beispielhafte Ergebnisse dargestellt.

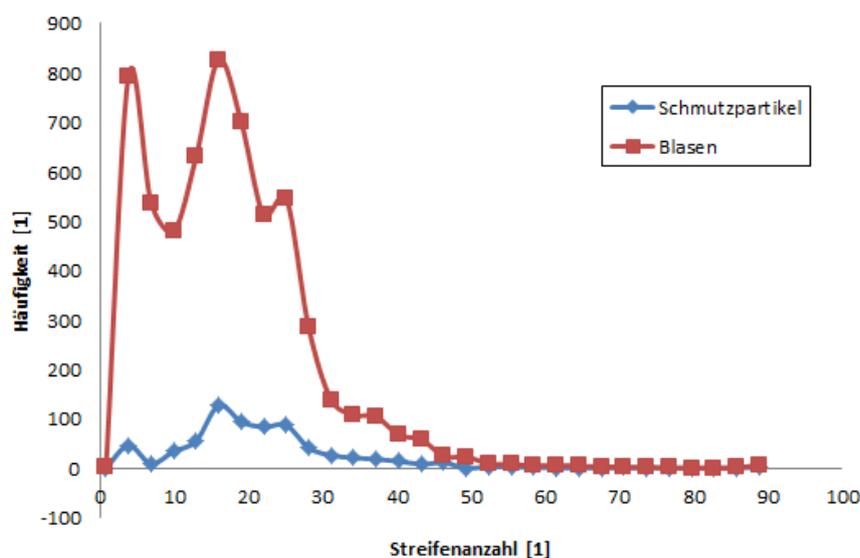


Abb. 5: Histogramm zu IPI mit 300 mW 532 nm CW-Laser (1369 Bilder bei 3200 Bildern/Sekunde) mit angewendeter Klassifikation für Partikel- und Blasenspektren

Auf die Bilder wurden zunächst mehrere Bildverarbeitungsschritte angewendet:

- Vorverarbeitung mit Hintergrundsubtraktion
- Morphologische Operationen, um die Muster zu trennen
- Objekterkennung / Flächenberechnung
- Filter- und Mittelpunktserkennung

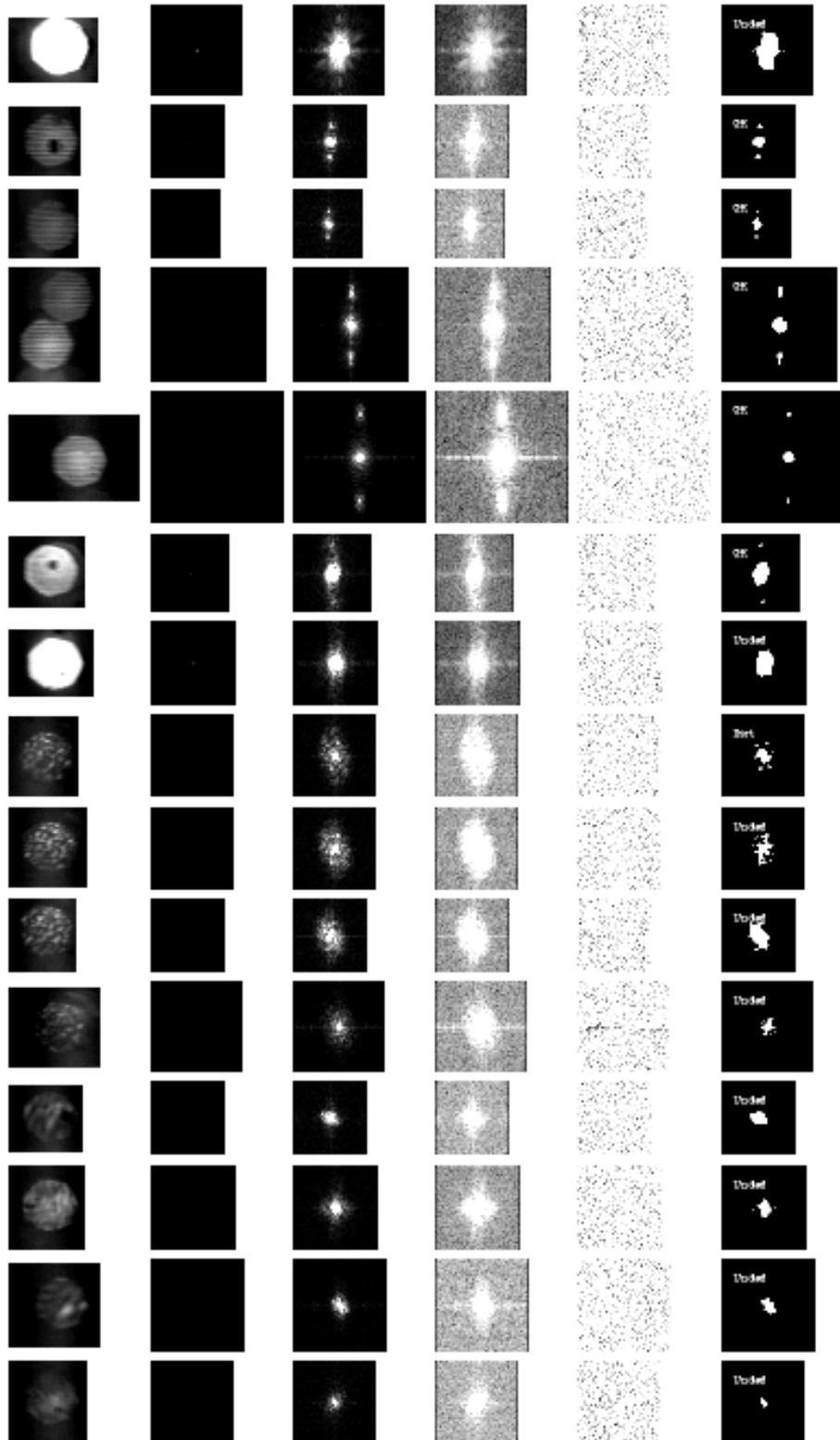


Abb. 6: Reale Partikel und deren Spektren

Nach der Partikelerkennung wird eine Fourier Analyse durchgeführt und für jeden einzelnen Partikel ein Leistungsdichtespektrum berechnet. Anhand dieser Methode lassen sich dann über die Beziehungen aus Albrecht (2003) die eigentlichen Blasengrößen für den speziellen Aufbau ableiten. Die Untersuchung zeigt das Potenzial der IPI für die Großausführungsmessung.

Eine Übersicht der zu erwartenden defokussierten Partikelmuster und deren Spektren sind in Abbildung 6 dargestellt. Es sind in der ersten Spalte die defokussierten Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera bei 3200 Bildern/Sekunde dargestellt. In der zweiten Spalte findet man das unskalierte Betragsspektrum. In Spalte drei und vier sind die linearen und logarithmisch skalierten Betragsspektren dargestellt. Spalte fünf zeigt das Phasenspektrum der Fourier Transformation. In Spalte sechs ist das Ergebnis der Klassifikation angegeben. Die Erkennungsroutine klassifiziert die Abbildungen in 1. saubere Streifenmuster, 2. zu dichtes Streifenmuster oder Feststoffpartikel und 3. Feststoffpartikel. Bei Partikel 1, 6 und 7 handelt es sich wahrscheinlich um Blasen, die so groß sind, dass keine einzelnen Streifen von der Kamera aufgelöst werden konnten. Bei Partikel Nummer 2, 3, 4, und 5 handelt es sich um runde Blasen, welche ein gut auswertbares Streifenmuster enthalten.

Dieses Streifenmuster ist das am häufigsten auftretende Muster bei der beschriebenen Nachstrommessung und bei Kavitationserscheinungen. Bild Nummer 19 zeigt eine Überlagerung mehrere Blasen. Die restlichen Bilder zeigen Feststoffpartikel, wobei Bild Nummer 8, 9, 10 und 11 denselben Partikel zu unterschiedlichen Zeitpunkten zeigen. Damit einhergehend zeigt sich auch eine Veränderung in den Spektren. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Spektrum eines Streifenmusters sicher von einem Spektrum eines Feststoffpartikels getrennt werden kann. Aus der Klassifikation kann man einen Rückschluss ziehen, welcher Anteil die Feststoffpartikel und welchen die Blasen am Gesamtspektrum einnehmen.

5. Ergebnisse der ersten Messfahrt

Die erste Messkampagne fand im Oktober 2011 statt. Es wurde sich mit den örtlichen Gegebenheiten an Board vertraut gemacht und erste Partikelbeobachtungen angestellt. Im Messvolumen (Abstand = 0,45 m, 12-Uhr-Messfeldposition, Propeller-Ebene) konnten die aus dem Modell bekannten und erwarteten Geschwindigkeiten festgestellt werden (HSVA Nachstrombericht 2012). Weiterhin wurden Kavitationserscheinungen auf dem Propeller, gezeigt in Abbildung 7, aufgezeichnet. Darüber hinaus werden spezielle Filter-Methoden zur Kontrastverbesserung für die spätere Auswertung angewendet.

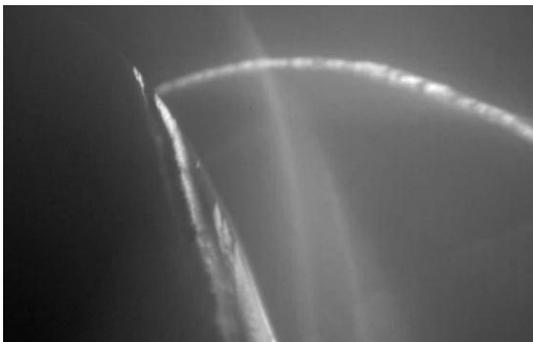


Abb. 7: Propeller-Blatt mit Blatt und Spitzenwirbel-Kavitation unter der Amandine in der Irischen See



Abb. 8: Blasen unter der Amandine in der Irischen See

Weitere Ergebnisse der ersten Test-Fahrt sind:

- Die maximale Messzeit ist durch die Aufenthaltszeit von ca. 12 Stunden in der Irischen See vorgegeben und ermöglicht etwa 50 Messpunkte.
- Die Beleuchtung des Messvolumens durch die Blitzlampe war ausreichend kombiniert mit kontrastverstärkenden Bildverarbeitungsalgorithmen.
- Während Spitzenwirbelkavitation immer vorhanden ist, tritt Blatt-Kavitation nur auf, wenn das Schiff voll beladen ist und sich mit maximaler Geschwindigkeit bewegt.
- Die Wasserqualität in der Irischen See im Oktober ermöglicht gute Sichtbedingungen für PIV-Messungen. In der Nordsee und im Ärmelkanal sind hingegen keine Aufnahmen möglich.
- Unter den Bullaugen gibt es keine störenden Luftblasenansammlungen oder Algenablagerungen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das Paper stellt die Entwicklung eines Systems zur Messung von Eigenschaften des Nachstromfeldes in der Großausführung vor. Die bisherigen Versuche haben die Machbarkeit von PIV-Messungen unter optischen Gesichtspunkten bei der Großausführungsmessung gezeigt. Die Kalibrierung, Beleuchtung und das Kamera-Setup befindet sich derzeit in der Entwicklung und werden während einer zweiten Testfahrt auf dem Fracht-Schiff Amandine vom 13. bis 17. Juli 2012 getestet. IPI-Labortests sind erfolgreich abgeschlossen und an Messungen in der SVA Potsdam im Mai validiert worden. Die angewendeten Auswerteverfahren werden im Hinblick auf deren Robustheit weiterentwickelt. Ein Schlepprinntest in der SVA wird Auskunft über die Messfehler und die optischen Verzeichnungen des abbildenden Systems geben. In Verbindung mit den Kavitationsmessungen der HSVA werden die Messungen Daten für ein numerisches Kavitationsvorhersage-Modell der TU Hamburg liefern.

Dankesworte

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung des Projekts KonKav II. Ein weiterer Dank geht an die Projektpartner SVA, HSVA, den Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Schiffstheorie an der Technischen Universität Hamburg Harburg, die Flensburger Schiffbau-Gesellschaft und Herrn Dr. Weiterdorf für die Unterstützung bei der Erforschung von Kavitationserscheinungen am Propeller einer Ro-Ro-Fähre.

Literatur

- Weitendorf, E.A., Keller, A.P. (1978) A Determination of the Free Air Content and Velocity in Front of the "SYDNEY EXPRESS"-Propeller in Connection with Pressure Fluctuation Measurements, Twelfth Symposium on Naval Hydrodynamics
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J. (2007) Particle Image Velocimetry, Springer-Verlag
- Schaeper M., Damaschke N., Kühn V., Pöggel S. (2011) Particle image velocimetry by using optical spatial filtering method. Proceedings of PIV'11 - Ninth International Symposium on Particle Image Velocimetry, 21-23 July 2011, Kobe, Japan.
- Damaschke N., Nobach H., Nonn T. I., Semidetnov N., and Tropea C. (2005) Multi-dimensional particle sizing techniques. Exp. Fluids 39: 336-350.
- Albrecht, H.-E., Borys, M., Damaschke, N., Tropea, C. (2003) Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques, Springer-Verlag
- Hamburg Ship Model Basin, 3D Slipstream report: project Off-Design; report number N046-10
- Kleinwächter, A., Ebert, E., Kostbade, R., Damaschke, N., (2012) Concept for optical full-scale measurements of ship propeller inflow and bubble size distribution, CAV2012