

Optische Messtechnik in der Kavitationsforschung im Schiffbauversuchswesen: Erfahrungen aus den Projekten KonKav I und II

Optical measurement techniques for cavitation research in ship building industry: Results of projects KonKav I and II

Willfried Kröger, Eric Ebert, André Kleinwächter, Robert Kostbade, Nils Damaschke
Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, A.-Einstein Str. 2, 18059 Rostock

Zusammenfassung

Die Verbundprojekte KonKav I und KonKav II dienten der Erforschung der Korrelation zwischen Kavitationseffekten und Wassereigenschaften sowie dem Nachstrom des Schiffumpfes. Das Institut für Allgemeine Elektrotechnik an der Universität Rostock hat im Rahmen des Verbundprojektes optische Messtechniken entwickelt und eingesetzt. Die Techniken wurden zur Messung von Blasenspektren und Feststoffkonzentrationen im Zustrom verschiedener Versuchsobjekte (2D-, 3D-Tragprofile, Propeller) in den Kavitationstunneln der Projektpartner, zur Vermessung und Charakterisierung der Kavitationsgebiete, zur Vermessung des Großausführungsnachstroms eines Ro-Ro Schiffs „Amandine“ (33960 GT) sowie zur Bestimmung des Keimpektrums im Propellerzustrom der „Amandine“ eingesetzt. Genutzt wurden die Phasen-Doppler-Technik, die Interferometric Particle Imaging (IPI) und die Particle Velocimetry (PIV/PTV).

1. Einleitung

Die Vorhersage von Kavitationseffekten für Schiffantriebe ist eine wichtige Fragestellung der Schiffbauversuchsanstalten, die in ausreichender Qualität nur anhand von Modellversuchen, numerischen Simulationen und unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten geleistet werden kann. Im Rahmen des Verbundprojektes KonKav (Forschung zur Korrelation von Kavitationseffekten und Erosion unter Berücksichtigung von Wassereigenschaften und Nachstrom) wurde der Einfluss der Wasserqualität (KonKav I) und des Nachstroms (KonKav II) auf die Kavitation und deren Erosionswirkung (KonKav III) untersucht. Das Institut für Allgemeine Elektrotechnik hat im Rahmen der Projekte KonKav I und KonKav II Messtechniken zur Keimkonzentrationsmessungen, zur Kavitationscharakterisierung sowie für Nachstrommessung an Großausführungen entwickelt und eingesetzt. Die Messergebnisse dienen einerseits der experimentellen Charakterisierung der Kavitationseinflüsse und der Kavitation sowie andererseits als Eingangs- und Validierungsdaten für numerische Verfahren (z.B. Maquil u.a. 2011). Ziel des Projektes war es, den beteiligten Schiffbau-Versuchsanstalten neue numerische und experimentelle Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, mit denen eine bessere Kavitationsprognose anhand von Modellversuchen erfolgen kann.

2. Keimpektrenbestimmung

Damit bei Modellversuchen Kavitation entstehen kann, müssen Keime in Form von Mikroblasen vorhanden sein. Einige Versuchseinrichtungen besitzen deshalb Blasengeneratoren auf Basis von Elektrolyse oder Druckluftzündung. In geschlossenen Kavitationskanälen bewegt

sich das Wasser in einem Umlauf. Tritt ab einem bestimmten Belastungszustand am Propeller Kavitation ein, so werden zusätzliche Blasen generiert, die nach dem Umlauf als zusätzliche Kavitationskeime wirken und dadurch das Kavitationsverhalten, insbesondere den Einsatzpunkt verändern. Bekannt ist, dass insbesondere Blasen im Durchmesserbereich 10...250µm als Keime wirken. Die ITTC (International Towing Tank Conference) empfiehlt daher neben dem Gehalt an gelösten Gasen auch das freie Gas möglichst in Form eines Blasenspektrums als Versuchsparameter zu erfassen. Vor Beginn des KonKav Projektes lagen nur sehr wenige bzw. keine systematischen Messungen zur Keimkonzentration in Kavitationskanälen vor (z.B. Tanger und Weitendorf 1992, Wang 2004) Im Rahmen des Projektes wurde die Phasen Doppler Technik sowie die Interferometric Partic Imaging (IPI) Technik für Keimkonzentrationsmessungen eingesetzt.

2.1. Keimspektrumbestimmung mittels Phasen-Doppler-Messtechnik (KonKav I)

Aufbauend auf Erfahrungen der HSVA (Hamburgische Schiffbauversuchsanstalt) wurden an den Kavitationskanälen K22 und HYKAT der HSVA, K15a der SVA Potsdam und K27 der TU-Berlin Blasenspektren am Einlauf der Messstrecke etwa in Höhe des Messobjektes mit einem Phasen-Doppler Messsystem (Dantec FiberFlow112) gemessen (Kröger u.a. 2011).

Aufgrund ihrer konstruktiven Unterschiede, bzgl. der Höhendifferenz zwischen Messort und Antrieb (7...11m), der Umlauflänge (30...130m), der freien Wasseroberfläche (0,5...30m²) und des zirkulierenden Wasservolumens (32...1500m³) zeigen sich Unterschiede im zeitlichen Verlauf und der Stärke der Rückwirkung vom Kavitationsgeschehen am Modell auf das Blasenspektrum im Zustrom.

Um den Einfluss dieser Besonderheiten auf die Ergebnisse von Kavitationsexperimenten zu untersuchen, wurden mit denselben Modellen (2D-Profil, 3D-Profil, Propeller im Freistrah, Propeller im Nachstrom) möglichst gleiche Versuchsserien in den verschiedenen Kanälen durchgeführt.

Zu Beginn jeder Messserie erfolgte die Voreinstellung einer bestimmten Gassättigung, gemessen als Sauerstoffsättigung bei Normaldruck (80%, 60%, 40%). Dann wurden durch Druckabsenkung verschiedene Kavitationszahlen realisiert und neben anderen Messgrößen die Kavitationserscheinungen an den Modellen erfasst.

Mit Ausnahme des K27, der für Experimente mit freier Wasseroberfläche konzipiert ist, haben Kavitationskanäle nur eine kleine freie Wasseroberfläche, über die ein geringer Gasaustausch erfolgen kann. Dadurch kann bei Druckabsenkung ein Punkt erreicht werden, bei dem in der Messstrecke über längere Zeit eine relative Übersättigung entsteht, d.h. vorhandene Blasen können dort durch Ausgasen wachsen, werden aber durch die Strömung weiter mitgeführt. Der Höhenunterschied zum Antrieb von mindestens 7m sorgt aber dafür, dass die Blasen auf dem Weg zum unteren Antriebsbereich teilweise wieder in Lösung gehen können und zumindest im Antriebsimpeller keine Kavitation bewirken. Am Ende der oben beschriebenen Versuchsreihe hat sich der zuvor eingestellte absolute Gasgehalt nur um wenige Prozent geändert.

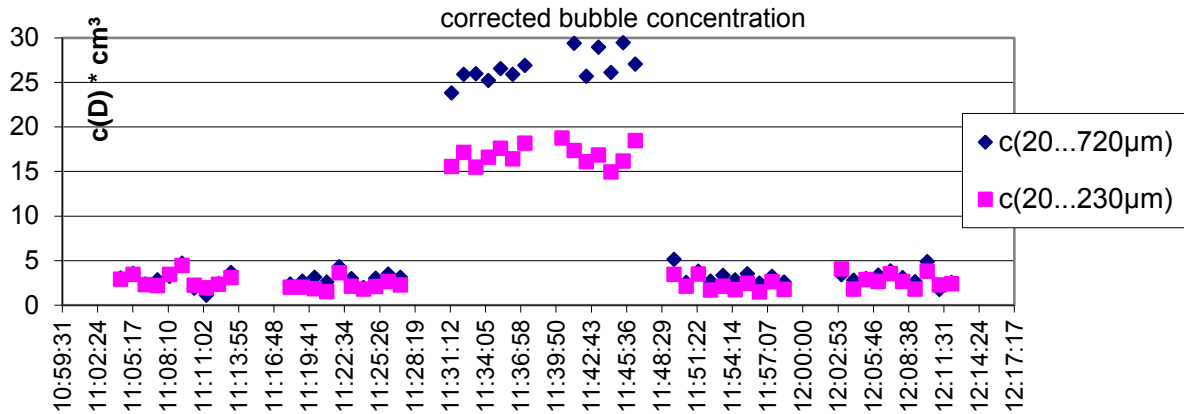
Als Beispiel für die zeitliche Variation der Blasenkonzentration im Zustrom sind nachfolgend Ergebnisse aus Druckhystereseexperimenten mit einem ebenen Profil NACA66₂415 mit 15° Anstellwinkel gezeigt (Abbildung 1 und 2).

Bei konstanter Geschwindigkeit von 5,5m/s wurde über den Druck jeweils ein Wert für die Kavitationszahl σ_n eingestellt und eine 10min-Phasen-Doppler-Messung gestartet. Beim Start war die Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s=57,9\%$.

Typisch für fast alle durchgeführten Hysterese-Versuchsreihen mit 2D-, 3D-Profilen sowie Propellern ist, dass der Kavitationseinsatz bei einer geringeren Kavitationszahl beginnt als er endet.

Das Kavitationskeimspektrum und die Gesamtblasenkonzentration sind in dieser Messreihe, wie auch in vielen anderen zum Kavitationsende wieder auf das Niveau wie beim Kavitationseinsatz abgefallen. Bei den später durchgeführten Messreihen wurde nach voller Kavita-

tion noch ein Punkt mit gleicher Kavitationszahl wie beim Kavitationseinsatz eingefügt. An diesem war dann in der Regel eine höhere Keimkonzentration gegenüber dem Startwert zu beobachten.



Mess#	Bem.	sigma.v	p.w/mmHg*	Start time	N.sel.	c.total[1/cm³]
R1		16,994	600	11:04:18	2104	3,518
R2	Kavitationseinsatz	5,384	-348,9	11:18:08	2226	2,962
R3		3	-544,3	11:31:19	7503	24,748
R4		2	-626	11:40:20	8122	27,8
R5	Kavitationsende	8,518	-92,7	11:49:29	2272	2,981
R6		16,994	600	12:03:10	2127	3,312

Abb.1: In 60s-Intervallen aufgelöster zeitlicher Verlauf der Gesamtkonzentration an Blasen für 2 Größenbereiche. Die Tabelle gibt dazu die eingestellten Drücke, die entsprechenden Kavitationszahlen, die Anzahl der in 10min aufgetretenen Phasen-Doppler-Messwerte und die daraus durch Hintergrundsubtraktion geschätzten Blasenkonzentrationen für $d=20...720\mu\text{m}$

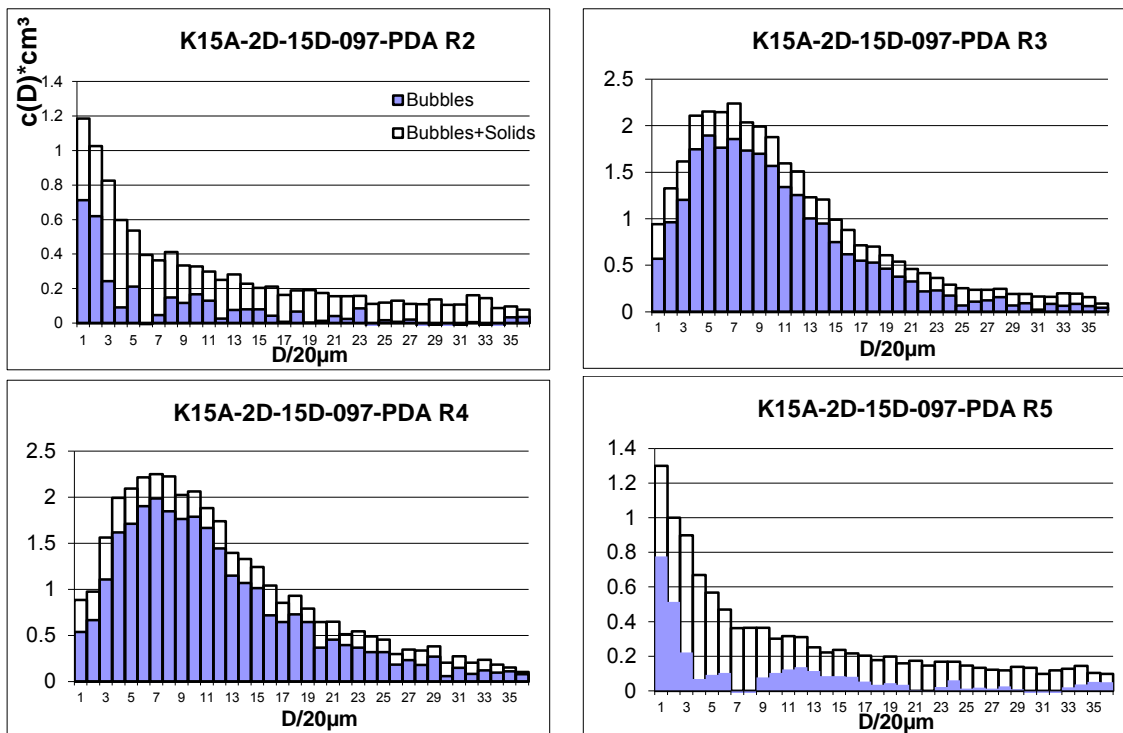


Abb.2: Blasengrößenkonzentrationsverteilungen für 4 Messungen der in Abb.1 charakterisierten Messreihe: R2: Kavitationseinsatz $\bar{\sigma}_n=5,4$, R3: Kavitation, $\bar{\sigma}_n=3$, R4: Kavitation, $\bar{\sigma}_n=2$, R5: Kavitationsende $\bar{\sigma}_n=8,3$

Die zeit-, arbeitspunkt- und vom Kavitationstunnel abhängige Anzahlkonzentration der Blasen, die als Kavitationskeime wirken, beeinflusst damit die Versuchsergebnisse, was sich im u.a. in einer Kavitationshysterese äußert. Um die Vergleichbarkeit von Modellversuchen bzgl. der Vorhersage für den Kavitationseinsatz am realen Objekt an verschiedenen Tunneln zu gewährleisten ist eine kontrollierte Einstellung bestimmter Blasenspektren durch Blasenerezeuger oder kurzzeitigen Kavitationsbetrieb sinnvoll. Dazu bedarf es allerdings einer echtzeitfähigen Blasenmesstechnik, die deutlich weniger als 10min benötigt, um eine statistische Sicherheit zu erlangen. Neben den eigentlichen Messdaten konnten mit den Phasen-Doppler Messungen die folgenden Aussagen verifiziert werden

- Die Blasenkonzentrationen ($d=10\dots250\mu\text{m}$) im Messstreckeneinlauf ändern sich abhängig vom Druck und der Kavitationsintensität um Größenordnungen.
- Je größer das zirkulierende Wasservolumen, der Höhenunterschied zur Antriebseinheit und die Umlauflänge sind, desto geringer ist die Rückwirkung der Kavitation am Messobjekt auf die Blasenkonzentration im Messstreckenzulauf und desto geringer sind die Blasenkonzentrationen insgesamt.
- Trotz Vermeidung von Verunreinigungen des Tunnelwassers und Einsatz von Filteranlagen zur Reinhaltung des Wassers sind immer sehr viele Feststoffpartikeln vorhanden, die die Messung der geringen Anzahlkonzentration der Blasen mit optischen Methoden erheblich erschweren.
- Kommerzielle Phasen-Doppler-Messsysteme sind für Spraymessungen mit hohen Tropfenkonzentrationen optimiert und verwenden ein möglichst kleines Messvolumen. Selbst mit dem größtmöglichen Volumen (hier $0,2\text{mm}^2$ Anströmfläche) waren nur Signalaraten für Blasen in der Größenordnung 1/s zu erreichen. Eine ausreichende Statistik erforderte Messzeiten von mindestens 10min. Die Zeitkonstanten der Kavitationstunnel sind in der geringer.

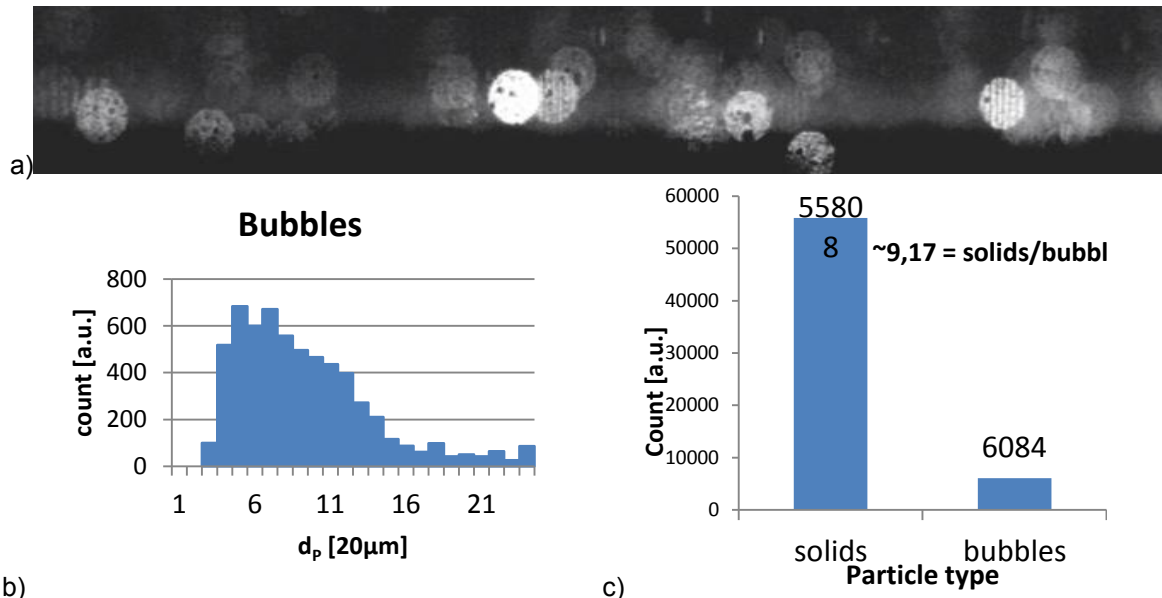
2.2 Keimspektrumbestimmung mittels Interferometric Particle Imaging (IPI)

Aufgrund der Beschränkungen der Phasen-Doppler Technik für die Anwendung der Keimkonzentrationsmessung in Kavitationskanälen wurde in KonKav II die Interferometric Particle Imaging (IPI) parallel zum Phasen-Doppler-System eingesetzt.

Bei der klassischen IPI-Technik wird das Streulicht von Partikeln in einem Laser-Lichtschnitt oder Laserstrahl durch eine defokussierte Abbildungsoptik erfasst. Durch die Interferenz zweier Streuwellen (z.B. Brechung und Reflexion) entsteht auf dem Kamerachip ein Interferenzmuster. Im Fall einer sphärischen Blase ergeben sich parallele Interferenzstreifen. Die Apertur des Objektivs führt zu einer kreisförmigen Berandung des Interferenzmusters. Der Blasendurchmesser ist direkt proportional der Streifenanzahl in den defokussierten Abbildungen (siehe z.B. Damaschke u.a. 2005). Die IPI Technik wurde im Rahmen von KonKav II auf Blasenspektren- und Blasenkonzentrationsmessungen in Kavitationskanälen angepasst. Folgende Erkenntnisse sind dabei hervorzuheben:

- Anstelle eines Pulslasers mit Lichtschnitt wurde für die Charakterisierung der homogenen Zuströmung ein cw-Laser mit rundem Strahlprofil eingesetzt. Als Kamera kam eine Industriekamera mit kurzer Belichtungszeit zum Einsatz. Die optische Anordnung ist damit sehr einfach und robust.
- Für einen großen Dynamikumfang bedarf es einer starken Defokussierung was zu großen defokussierten Abbildungen mit starken Überlappungen führt. Aufgrund des verwendeten Laserstrahls konnten jedoch die Bildüberlappungen erheblich reduziert werden.
- Zur Minimierung des Speicher- und Rechenaufwandes ist die Verwendung eines schmalen Bildformates entlang des Laserstrahls vorteilhaft.
- Feststoffpartikel erzeugen komplexe Streumuster. Durch Entwicklung angepasster Auswertelgorithmen konnte eine effektive Klassifizierung verschiedener Partikelarten erfolgen, was essentiell für die Messung der geringen Blasenkonzentration ist.

Neben Messungen in Kavitationskanälen wurden mit der IPI-Technik auch Blasenspektren in der realen Propellerzustrom bei Messfahrten mit MS Amandine durchgeführt. Verwendet wurde hier ein Teleobjektiv Canon 400/2,8. Bei einem Arbeitsabstand von 1,18m konnten Blasen ab 30µm Durchmesser bestimmt werden. Die Keimkonzentrationsmessungen zeigten, dass bei der Großausführung die Feststoffpartikelkonzentration (Schwebstoffe im Wasser) die Blasenkonzentration in der Regel um das 10fache übersteigt (siehe Abb. 3).



b) Abb.3: a) Beispielbild zu einer IPI-Aufnahme während der Messfahrt mit „Amandine“, b) Größenverteilung der erkannten Blasen und c) Partikelverhältnis (Ebert u.a. 2014).

3. Charakterisierung der Kavitation

Kavitation tritt in verschiedenen starken Formen auf (Einzelblasen, Wolkenkavitation, Schichtkavitation). Dies wird in der Regel durch einzelne Fotos teilweise kombiniert mit Handskizzen bei den Versuchen dokumentiert. Zur Objektivierung dieses Vorgangs wurde eine statistische Auswertung einer größeren Bildfolge vorgenommen, um insbesondere den Einsatz und Ausdehnung der Schichtkavitation und die Wolkenkavitation genauer quantifizieren zu können (Borchert u.a. 2012). Dies hat insbesondere bei Schattenabbildung der Kavitationsblasen gute Ergebnisse gebracht (Abb. 4).

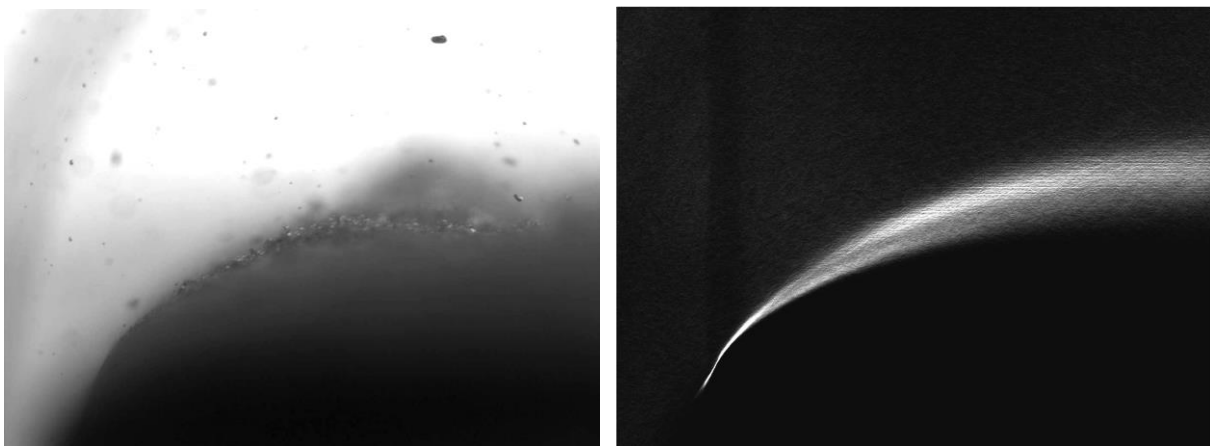


Abb.4: Links: Einzelbild einer Videosequenz von Wolkenkavitation auf der Druckseite eines ebenen Profils NACA66₂415 bei 10° Anströmwinkel, Rechts: Maximale Ausdehnung der Wolkenkavitation nach Detektion von Blasen in der Bildfolge

Messergebnisse dieser Art wurden mit Simulationsrechnungen an der TUHH verglichen. (Abdel-Maksoud u. a. 2013). Ähnlich wie in Abbildung 4 konnte auch mit Schattenabbildungen Spitzenwirbelkavitation statistisch ausgewertet und in Projektionen dargestellt werden. Abb.5 zeigt dazu ein Ergebnis, für die Häufigkeit der Kavitation im Spitzenwirbel eines Propellers. in Farbcodierung.

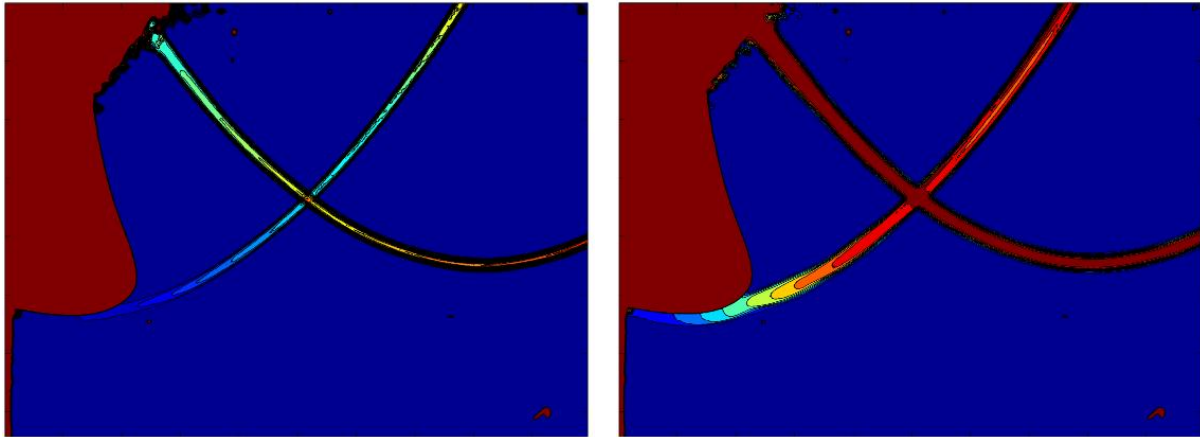


Abb.5: Statistische Auswertung der Häufigkeit der Spitzenwirbelkavitation von Kavitationsblasen in einem Stroboskop-Video vom Nachstrom eines Verstell-Propellers VP1304 (Potsdamer Propeller Test Case). Links: Kavitationseinsatz, Rechts: Kavitationszahl $\sigma=2$.

4. Nachstrommessung an Großausführung

In der Literatur sind nur sehr wenige Nachstrommessungen an realen Schiffen (Großausführung) zu finden. Große Entfernungen zu den Messpunkten unterhalb der Schiffshaut (bis zu 10m), hohe Strömungsgeschwindigkeiten und widrige Messplatzbedingungen (Vibrationen, Lärm, Staub, hohe Luftfeuchte, eingeschränkter Platz, etc.) sind hierfür die Hauptgründe. Für den Einsatz optischer Messverfahren bedarf es weiterhin der Abstimmung mit dem Schiffeigner, dem Schiffbetreiber und der Klassifikationsgesellschaft, da schon beim Bau des Schiffes Fenster in die Schiffshaut eingelassen werden müssen.

Das ConRo Schiff Amandine wurde im Rahmen des Projektes KonKav II durch den Projektpartner Flensburger Schiffbaugesellschaft (FSG) mit 4 Fenstern in unmittelbarer Nähe der Propellerebene für Nachstrommessungen und gleichzeitige Kavitationsbeobachtung ausgestattet. Ziel der Messungen war die Validierung von numerischen Berechnungen zur Bewertung des Kavitationsverhaltens innerhalb des Entwurfsprozesses für Schiffsantriebe. Das Nachstromgeschwindigkeitsfeld stellt die wesentliche Berechnungsgröße für die hydrodynamische Bewertung von Propulsoren dar. Demzufolge ist die Prognosegenauigkeit unmittelbar mit der Genauigkeit des berechneten Nachstroms verbunden.

Aufbauend auf die Erfahrungen früherer Laser-Doppler-Messungen durch die HSVA (Kux 1990) wurde im Projekt KonKav II erstmals PIV/PTV für Großausführungsmessungen eingesetzt (Kleinwächter u.a. 2012). Für die Beleuchtung der Szene wurde ein Nd:Yag Puls laser mit Laserlichtschnittoptik und einer maximalen Repititionsrate von $15s^{-1}$ eingesetzt. Die Beobachtung erfolgte mit einer High Speed Kamera und lichtstarken Objektiven, wie z.B. dem Canon EF 400 mm f/2.8L IS II. Die Ankopplung an die Fenster erfolgte durch ein mit Wasser gefülltes Flüssigkeitsprisma, dessen Eintrittsfenster mittraversiert wurde. Beide Aufbauten wurden über ein Profilsystem starr mit dem Schiff verbunden und anhand eines Kreuzlinienlasers im Schiff ausgerichtet. Anhand von motorisierten Linear- und Rotationsachsen können die Winkel beider Strahlengänge variiert werden, um unterschiedliche Positionen im Messfeld anzufahren. Abbildung 6 zeigt die Messorte, die mit dieser Anordnung erreicht werden konnten.

Für die Kalibrierung des PIV Messsystems wurden an jedem Messvolumen parallele Laserstrahlen mit definiertem Abstand eingestrahlt. Auf Basis der Kalibrierbilder konnte eine Entzerrungsmatrix für die Geschwindigkeitsbilder generiert werden.

Die Kamera erfasst in einer durch den Laserlichtschnitt vorgegebenen Ebene ein Messfeld von im Mittel $20 \times 32 \text{ cm}^2$. Zwei Geschwindigkeitskomponenten werden senkrecht zur optischen Kameraachse phasenaufgelöst aufgezeichnet. Durch eine örtliche und über alle Frames zeitliche Mittelwertbildung wird aus der lokal orts aufgelösten 2D2C-Messung eine 0D2C Geschwindigkeitsmessung. Hierin liegt der Vorteil der eingesetzten PIV Technik gegenüber der Laser Doppler Technik für Großausführungsmessungen. In einer Messzeit von 2min konnten ca. 10000 unabhängige Geschwindigkeitsmesswerte erfasst werden. Diese statistische Sicherheit konnte aufgrund der geringen Datenrate bei Laser-Doppler-Messungen an Großausführungen nicht erreicht werden

Durch ein Vertauschen des Kamera- und des Laseraufbaus konnte für ein Messvolumen durch die Gewinnung der zweiten Beobachtungsrichtung eine 0D3C Messung durchgeführt werden.

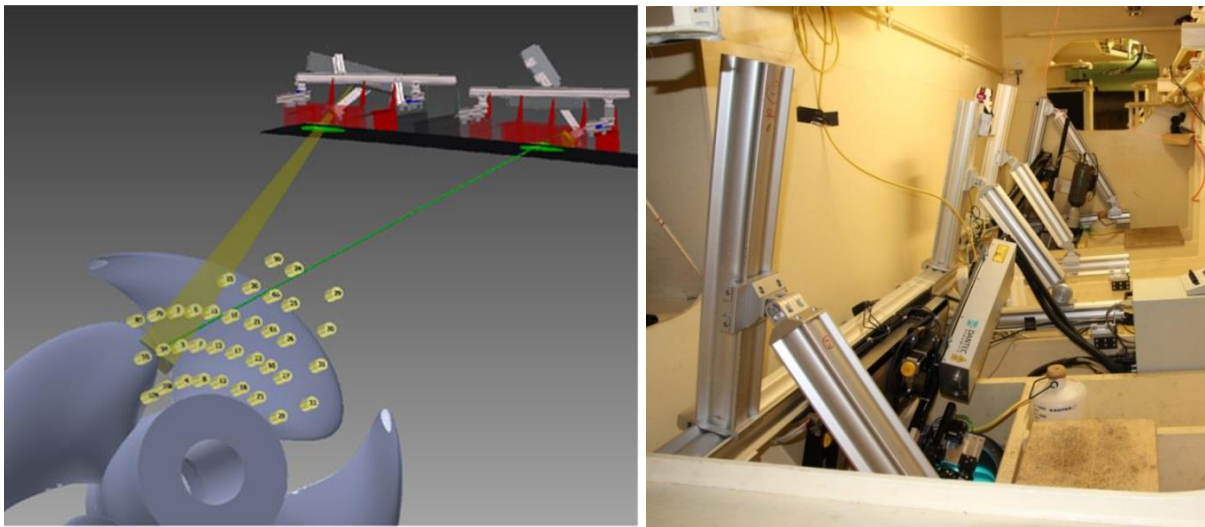


Abb.6 Links: Veranschaulichung der PIV-Messanordnung für die Geschwindigkeitsmessungen. Die Winkel des Beobachtungs- und Beleuchtungsaufbaus bestimmten die 36 Messvolumina vor dem Propeller, Rechts: PIV Installation im Rudermaschinenraum des ConRo Schiffes Amandine. Im Vordergrund ist der gepulste Lichtschnittlaser mit Traversiereinrichtung und im Hintergrund ist die tarvierbaren HS-Kamera mit dem lichtstarken Festbrennweiten-Teleobjektiv zu sehen.

Während einer Fahrt von Rotterdam nach Dublin und zurück standen in der Irischen See und im Englischen Kanal jeweils ca. 12 Stunden Messzeit zur Verfügung. Die Messorte wurden durch die Sichtbarkeit im Wasser bestimmt.

Um den starken Einfluss des Propellers auf die Nachstromgeschwindigkeiten zu identifizieren, wurden die Geschwindigkeiten phasenaufgelöst zur Propellerstellung aufgezeichnet. Die Datenrate konnte weiterhin erhöht werden, indem 4 Messungen pro Propellerblatt anstelle von einer Messung pro Umdrehung durchgeführt wurden.

30 valide Vektoren in jedem Doppelframe stellen eine gute statistische Sicherheit für die Geschwindigkeitsbestimmung dar und resultieren in 10000 validen PIV-Vektoren für jedes Messvolumen und jede Propellerstellung. 341 Doppelframes wurden jeweils in nur 50 s aufgezeichnet.

In der SVA Postdam wurde das totale Nachstromfeld (Schiffsrumpf+Propeller) für die Betriebsbedingungen der Messfahrt mittels CFD-Rechnungen (RANS/ANSYS-CFX) numerisch simuliert. Ein Vergleich mit den Messdaten zeigte, dass ein Großteil der gemessenen Nachstromgeschwindigkeiten sehr geringe Abweichungen von weniger als 2% zeigen. Im sehr interessanten, aufwendig zu berechnenden und für das Kavitationsverhalten maßgebenden

Bereich der Nachstromdelle wurden jedoch systematische Abweichungen von fast 10% aufgedeckt. Dies deutet auf derzeitige Ungenauigkeiten in den Simulationstools hin

5. Ausblick

Nachstrommessungen an einem weiteren Schiff sind derzeit in Vorbereitung. Es besitzt zwei Antriebsstränge und es besteht erstmals die Möglichkeit den nominellen Nachstrom als entscheidende Berechnungsgrundlage für das Design von Schiffspropulsoren in der Großausführung zu messen. Die IPI-Technik soll durch Einsatz spezieller Auswertehardware zur Echtzeitauswertung befähigt werden. Das ermöglicht z.B. in Verbindung mit einem Blasen-generator oder durch kurzzeitige Einstellung eines Kavitationszustandes am Messobjekt das Keimpektrum im Kanal auf einen gewünschten Wert einzustellen, mit dem dann der Kavitationseinsatzpunkt reproduzierbar ermittelt werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung der Projekte Konkav I und II (Förderkennzeichen: 03SX286A). Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren. Ein weiterer Dank geht an die Projektpartner SVA, HSVA, den Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Schiffstheorie an der Technischen Universität Hamburg, die Flensburger Schiffbau-Gesellschaft und Dr. Weitendorf für wertvolle Beratung.

Literatur

- Abdel-Maksoud, M., Rung, T., Yakubov, S., Cankurt, B., Schiller, P. (2013) Schlussbericht KonKav I, Korrelation von Kavitationseffekten unter Berücksichtigung der Wassereigenschaften: Numerische Integration, Hamburg 2013
- Borchert, S., Kröger, W., Höhne, S., Damaschke, N.A. and Zhou, Z. (2012) On Optical Quantification of Cavitation Properties, Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation, Singapore
- Ebert, E., Kleinwächter, A., Kostbade, R., Damaschke, N (2014) Interferometric Particle Imaging for cavitation nuclei characterization in cavitation tunnels and in the wake flow; 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2014
- Damaschke N., Nobach H., Nonn T.I., Semidetnov S., and Tropea C. (2005) Multi-dimensional particle sizing techniques," Experiments in Fluids, vol. 39, pp. 336-350, 2005
- Kleinwächter, A., Ebert, E., Kostbade, R. and Damaschke, N.A. (2012): Concept for Optical Full-Scale Measurements of Ship Propeller Inflow and Bubble Size Distribution, doi:10.3850/978-981-07-2826-7_256, CAV2012 13 - 16 August 2012, Singapore
- Kröger, W., Borchert, S., Höhne, S. Damaschke, N.A., 2011: Messung des Spektrums von Kavitationskeimen vor Strömungsprofilen mittels Phasen-Doppler-Technik, GALA 2011, Ilmenau
- Kux, J. (1990) Full Scale LDV Measurements of Ship-Stern Flow Field, Proceedings of the 19th ITTC Conference, Group Discussion 2: Full Scale Measurements, Madrid
- Maquil, T., Abdel-Maksoud, M., Cankurt, B., Rung, T., Schiller, P. and Yakubov, S. (2011) Simulation of Water-Quality Effects for Cavitating Engineering Flows. WIMRC 3rd International Cavitation Forum 2011. Warwick, Great Britain. 2011
- Tanger, H. und Weitendorf, E.-A., 1992: Applicability tests for the phase Doppler anemometer for cavitation nuclei measurements. Journal of fluids engineering 114(3): 443-449.
- Wang, H., 2004: Experimental Study of Water Bubbly Hydrofoil Wakes. MS Thesis (University of Minnesota, Minnesota 2004)