

Optische Rekonstruktion von Propellerspitzenwirbeln mit einem Multikamerasystem

Optical reconstruction of propeller tip vortices with a multi-camera system

Eric Ebert¹, Nils Damaschke¹, Frank Papenfuss², Sven Karsten², Frank Pagels², Egmont Woitzel²

¹ Universität Rostock, IEF, Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

² FORTech Software GmbH, Tannenweg 22m, 18059 Rostock

Abbildungstechnik, Mehrkamerasystem, Kamera-Kalibrierung, Spitzenwirbel, Kavitation
imaging technique, multi-camera system, camera calibration, tip vortex, cavitation

Zusammenfassung

Propeller erzeugen aufgrund der Interaktion zwischen Blattoberfläche, Strömung und Kavitation Druckschwankungen höherer Ordnung. Im Rahmen des vom BMWI geförderten Verbundforschungsprojektes HiOcav wurden optische Messtechniken zur Charakterisierung der Kavitationsdynamik entwickelt. Ziel war es, die Interpretation der akustischen Druckschwankungsmessungen zu verbessern. Das entwickelte Multi-Kamerasystem zur zeitlich und räumlich hochaufgelösten Bildaufnahme und die Rekonstruktion der Spitzenwirbelkavitation am Propeller sind Gegenstände dieses Beitrages. Das Messsystem besteht aus mehreren Kameras und gepulsten LED-Flächenbeleuchtungen um die Kavitationserscheinungen aus unterschiedlichen Perspektiven als Schattenabbildung aufzuzeichnen. Da Glanzpunkte von seitlichen Beleuchtungen die Schattenabbildungen stören würden, ist eine hochgenaue Synchronisation von zeitversetzten Aufnahmen zwingend notwendig. Die Synchronisation erfolgt im entwickelten Multikamerasystem durch eine eigens entwickelte FPGA-basierten Synchronisationseinheit. Mit dem System wurde die Spitzenwirbelkavitation am Propeller charakterisiert. Da eine extrinsische Kamera-Kalibrierung mit Targets im realen Kavitationskanal nicht möglich ist, wurde für die Spitzenwirbelkavitation ein Helix-Modell angesetzt, dessen Parameter anhand der aufgezeichneten Bilddaten geschätzt wurden.

Einleitung

Die hier vorgestellte Forschung und Entwicklung ist im Rahmen des Verbundforschungsprojektes HiOcav im Programm "Maritime Technologien der nächsten Generation" gefördert durch das Deutsche Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWI) entstanden. Ziel des HiOcav-Projektes war die Verbesserung des Entwurfsprozesses von Propellern. Die Projektpartner waren das Institut für Strömungslehre und Schiffstheorie der Technischen Universität Hamburg-Harburg, die Schiffbauversuchsanstalt Potsdam (SVA), die FORTech Software GmbH, die ThyssenKrupp Marine Systems GmbH, die Otto Piening GmbH, die Mecklenburger Metallguss GmbH, das Institut für Nachrichtentechnik (INT) und das Institut für Allgemeine

Elektrotechnik (IAE) der Universität Rostock. IAE und FORTECH entwickelten im HiOCav-Projekt ein abbildendes optisches Messsystem für die Charakterisierung der Spitzenwirbelkavitation, welches hier vorgestellt wird.

Nach ITTC (2017) und Berger (2018) erzeugen Propeller aufgrund der Interaktion zwischen Blattoberfläche, Strömung und Kavitation Druckschwankungen die akustisch registriert werden können. Für die Zuordnung von Kavitationserscheinungen zu den akustischen Signaturen, wurde die Kavitationsausdehnung parallel zu akustischen Messungen, durchgeführt vom Projektpartner INT, dynamisch erfasst (Krueger u.a. 2019). Hierzu wurde das im Folgenden beschriebene Multikamerasystem zur zeit- und orts aufgelösten Charakterisierung der Kavitationsdynamik vom Institut für Allgemeine Elektrotechnik zusammen mit dem Projektpartner FORTECH GmbH konzeptioniert und entwickelt. Das System wurde im Kavitationskanal K21 der Universität Rostock für ein festes Profil getestet und in den Kavitationskanälen der SVA u.a. für die Charakterisierung der Spitzenwirbelkavitation an Propellern eingesetzt.

Konzept der Kavitationsvolumenerfassung

Erfahrungen aus bisherigen Projekten haben gezeigt, dass eine quantitative Kavitationsvolumencharakterisierung nur möglich ist, wenn das Kavitationsvolumen rückwärtig beleuchtet und als Schattenstruktur abgebildet wird. Andernfalls kann die Gas-Wasser-Grenzschicht nicht abgebildet werden bzw. Glanzpunkte stören die Segmentierung in der Bildverarbeitung (siehe Abbildung 1).

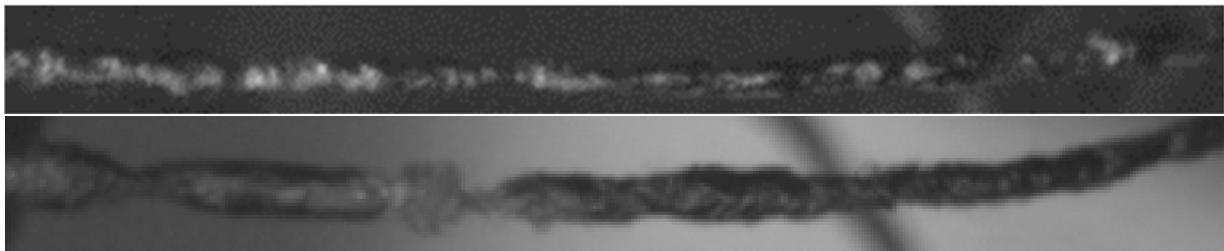


Abbildung 1: Spitzenwirbelaufnahmen. Oben: seitliche Beleuchtung, Unten: Schattenabbildung

Für die angestrebte dreidimensionale Rekonstruktion des Kavitationsvolumens sind mehrere Ansichten bzw. Schattenabbildungen aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen notwendig. Für die Beobachtung der räumlich stationären Spitzenwirbelkavitation an einem festen Profil im K21 wurden jeweils 6 Kameras mit 30° Rotation in zwei Ringen angeordnet (Abbildung 2 links) und es ergeben sich pro Ring 6 Projektionen des Kavitationsvolumens (Abbildung 3).

Das Kavitationsvolumen muss stets von der rückwärtigen Seite beleuchtet werden. Hierfür wurden LED-Flächenstrahler, jeweils für die Geometrien der Kavitationskanäle, entworfen und aufgebaut (Abbildung 4). Ein Flächenstrahler kann dabei die Hintergrundbeleuchtung für mehrere Kameras mit gleicher Blickrichtung erzeugen. Für die Messungen am feststehenden Profil im K21 sind dies die Kameras mit der gleichen Blickrichtung in den zwei Ringen (siehe Abbildung 2 links).

Bei zeitgleicher Beleuchtung durch alle Flächenstrahler würde das Kavitationsvolumen, von einer einzelnen Kamera aus gesehen, wiederum seitlich beleuchtet werden. Aufgrund der glatten Grenzschicht und des Übergangs von Wasser nach Luft tritt starke Reflexion bzw. Totalreflexion an der Kavitationsoberfläche auf und die abgebildete Oberfläche erzeugt starke Glanzpunkte. Wie erwähnt ist die notwendige Schattenabbildung so nicht möglich (siehe Abb. 1 oben). Daher müssen die 2×6 Kameras möglichst schnell nacheinander die jeweiligen

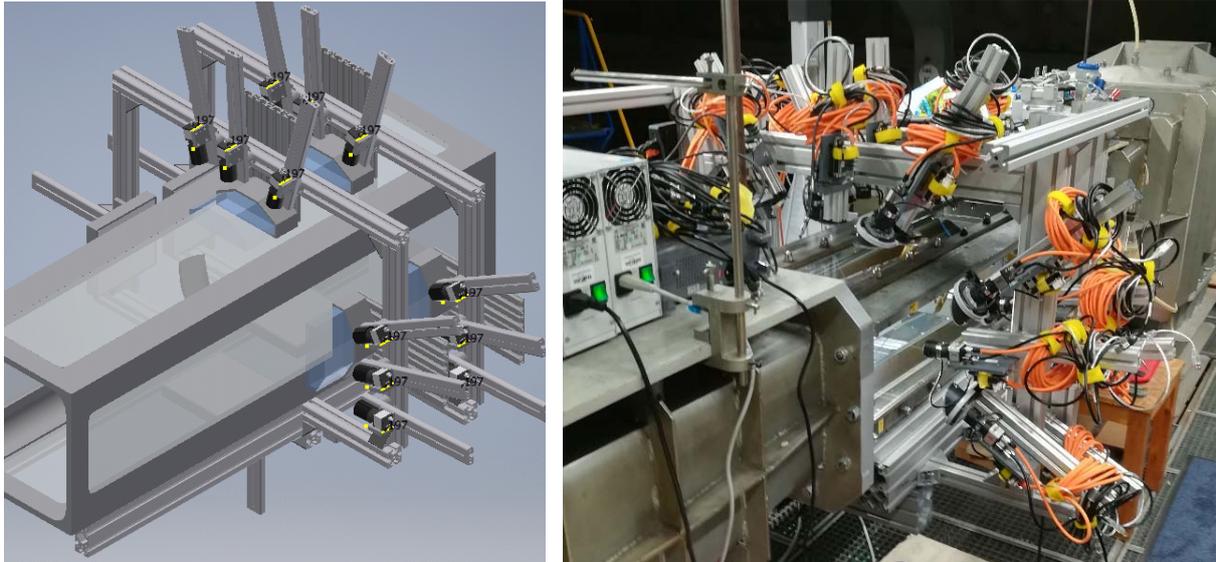


Abbildung 2: Optische Erfassung der Kavitation mittels Multikamerasystem. Links: Konzept, Rechts: Erste Realisierung (Version 1) am K21 der Universität Rostock

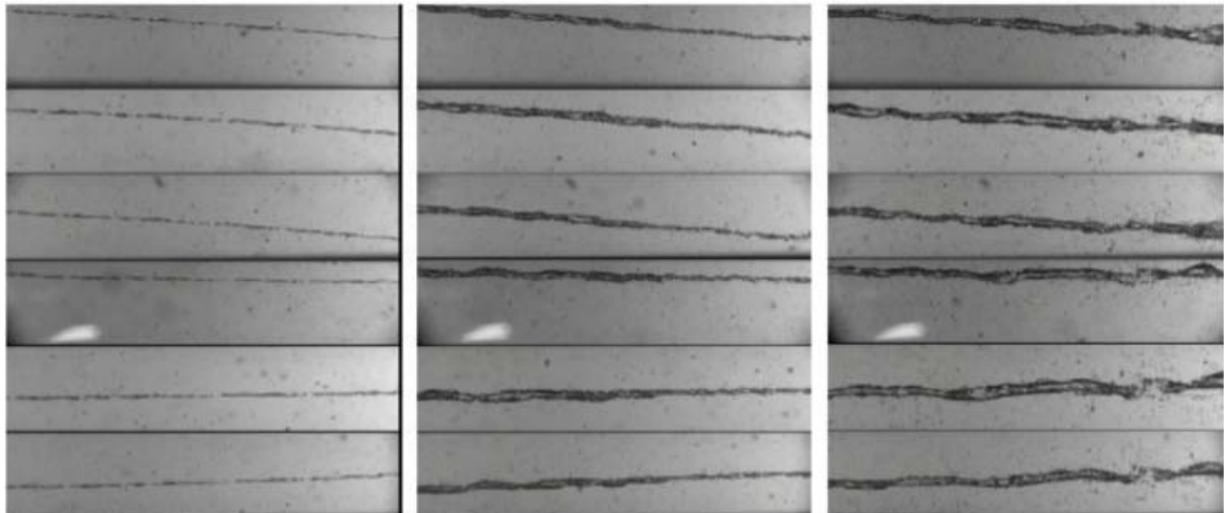


Abbildung 3: Aufnahme des Spitzenwirbels eines festen Profils im K21 aus 6 Perspektiven (1 Ring a 6 Kameras) (von oben nach unten) bei drei unterschiedlichen Kavitationszahlen (von links nach rechts).



Abbildung 4: Realisierte LED-Flächenstrahler. Links: dreigeteilte Beleuchtung für K21, Mitte: Flächenstrahler im K15A, Rechts: Synchronisationsschema für Kameras und LEDs

Schattenabbildungen aufnehmen und die rückwärtigen Beleuchtungen nacheinander synchron mit den Kameras pulsen, siehe Timing Diagramm in Abb. 4 rechts. Hierfür sind spezielle synchronisierbare Treiber für jede Kamera und für jede LED-Beleuchtung notwendig. Die LEDs müssen aufgrund der sehr kurzen Belichtungszeit mit einem sehr hohen Strom betrieben werden, so dass die Bildhelligkeit auch für Kurzaufnahmen gegeben war.

Derartige Aufnahmen des Spitzenwirbels sind in Abbildung 3 gezeigt. Der Zustand des Spitzenwirbels ist aus 6 unterschiedlichen Richtungen mit Hintergrundbeleuchtung aufgenommen worden, wobei die Aufnahmen um ca. $37\mu\text{s}$ zeitversetzt sind, damit keine störenden Reflexionen der anderen Beleuchtungseinheiten auftreten. Es treten zwar helle Bereiche innerhalb der Spitzenwirbelabbildung auf, jedoch ist die Ausdehnung des Spitzenwirbels stets durch einen kontraststarken hell-dunkel Übergang bestimmbar. Für eine Aufnahme werden die Kameras und LED Blitze nach einem festgelegten Zeitregime (Abb. 4 rechts) ausgelöst. Im folgenden Abschnitt wird das dafür entwickelte Multikamerasystem vorgestellt.

Hardwareentwicklung

Für die Messungen am festen Profil im K21 der Universität Rostock wurde eine erste Version des Messsystems aufgebaut (Ebert und Damaschke 2019, 2019A). Für die Messungen am Propeller im K15A der SVA (Heinke 2020) wurden die Hard- und Softwarekomponenten von IAE und FORTEch optimiert. Ein Systemüberblick des aktuell realisierten Multikamera-Messsystem (Ebert u.a. 2021) ist in Abbildung 5 gezeigt. Hell dargestellt sind die Hardwarekomponenten, dunkler gestrichelt verbunden sind Softwarekomponenten.

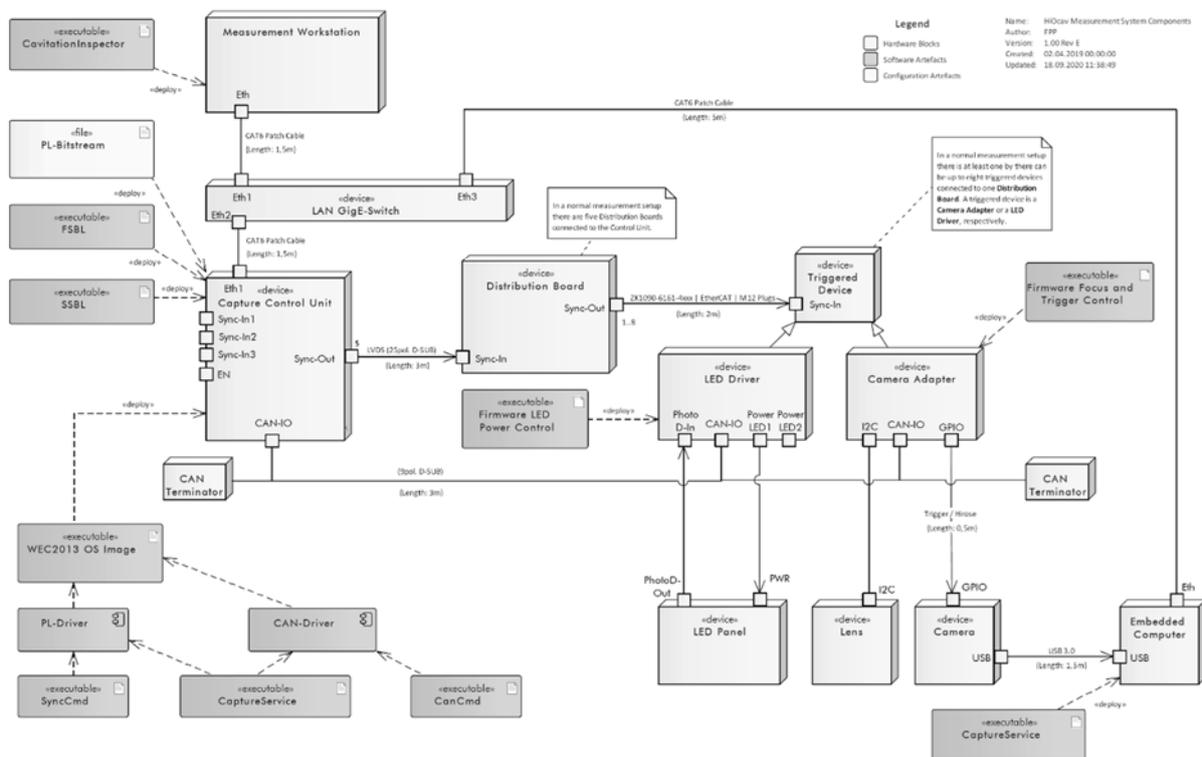


Abbildung 5: Systemüberblick des Multikamerasystem (Softwarekomponenten gestrichelt verbunden)

In Abbildung 6 ist die Installation einiger Komponenten am K15A des Projektpartner SVA zu sehen. Sämtliche Hardwarekomponenten wurden für die Montage auf Hutschienen vorgesehen, damit sich die Installation am Kavitationskanal des Projektpartners SVA vereinfacht. Verwendet wurden ausschließlich industrietaugliche Kabelverbindungen mit Verschraubungen

um ein versehentliches Lösen oder mangelnde Steckverbindung auszuschließen. Die Fertigung der Komponenten erfolgte extern, da Bestückung und Montage aufgrund des Umfangs von ca. 20 Kamera Adaptern und ca. 15 LED Treiberschaltungen incl. Kabel nicht mehr im Hause erfolgen konnte.

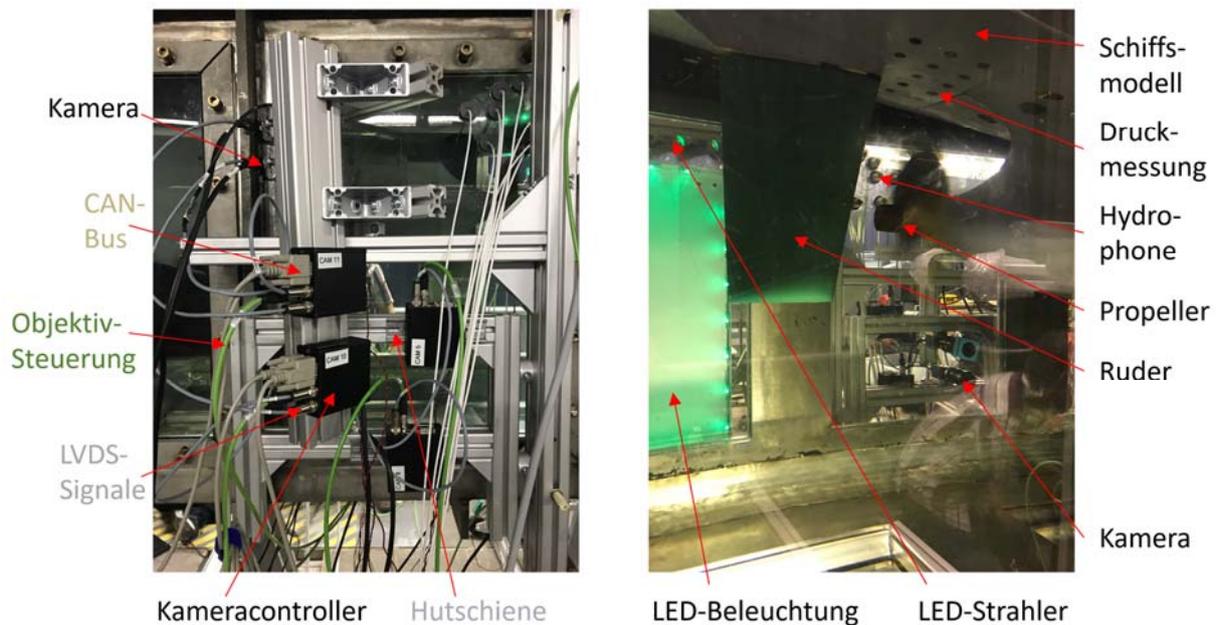


Abbildung 6: Multikamerasystem zur Erfassung der Propeller-Spitzenwirbelkavitation am K15A der SVA. Links: Kamerainstallation, Rechts: Blick durch Kavitationskanal auf LED-Panel

Herzstück des Systems ist die zentrale Synchronisationseinheit auf Basis eines Xilinx Zynq 7020 FPGA auf einem MicroZed mit eigens entwickelter Elektronik samt LVDS Signalgenerierung und Programmierung (Abb. 5 links: Capture Control Unit, CCU). Diese steuert das zeitkritische Verhalten des Gesamtsystems. Sie kann bis zu 40 Synchronisationssignale für verschiedene Geräte (Abb. 5 rechts mittig: Triggered Device) wie Kameras, Objektive, LED-Blitze und externe Systeme (z.B. Akustik) mit zeitlicher Auflösung von 10ns echtzeitfähig generieren. Die Signale werden über LVDS-Leitungen (Abb. 6 links) an die einzelnen Teilsysteme weitergeleitet um EMV-Störungen zu vermeiden. Die zeitunkritische Parametrisierung der Komponenten erfolgt über einen CAN-Bus (Abb. 5 und 6: CAN). Für die Verteilung der LVDS Signale und die Reduktion des erheblichen Verkabelungsaufwandes (Abb. 2 rechts) werden Distributions Boards (Abb. 5 mittig) genutzt.

Gesteuert wird das Gesamtsystem über einen zentralen Rechner (Abb.5 links oben: Measurement Workstation) der über LAN mit der Synchronisationseinheit und den verteilten Messrechnern verbunden ist.

Aufgrund des komplexen mechanischen Aufbaus des Gesamtsystems, der umfangreichen Verkabelung sowie des vergleichsweise geringen Bauraums bei den Versuchen (siehe Abb. 2 rechts) war eine händische Zugänglichkeit für eine manuelle Fokuseinstellung der Objektive nicht mehr gegeben. Genutzt wurden daher Flüssiglinsenobjektive Corning Varioptic C-C-39N0-160 (Abb. 5 unten: Lens), die eine spannungsgesteuerte und vor allem schnelle (20ms) und reproduzierbare Fokuseinstellung ermöglichten. Die Fokusse aller Objektive können vom zentralen Rechner einzeln eingestellt werden. Aufgrund der hohen Dynamik der Kavitation war im Projekt angedacht die Fokuseinstellungen während des Prozesses dynamisch zu ändern. Dies war jedoch für keine der Messungen nicht notwendig, ist aber prinzipiell beim Systemdesign vorgesehen.

Für die Synchronisation (via LVDS) und die Parametrisierung (via CAN) der Kameras und Flüssiglinsenobjektive wurden Kamera/Objektiv-Controller realisiert (Abb. 5 rechts: Camera Adapter, Abb. 6).

Die zu den Blitzern synchronisierten global Shutter-Kameras IDS UI-3060CP-M-GL Rev. 2 (Abb. 5 rechts unten) basieren auf einem Sony IMX174 1/1,2" Bildsensor und können per USB 3 Bilder bei 5Gbps ausgeben. Die maximale Auflösung des 2,35 Megapixelsensors beträgt dabei 1936x1216 Pixel. 166 Bilder/Sekunde können bei voller Auflösung ausgegeben werden. Bei reduzierter Auflösung sind Bildraten im Kilohertzbereich möglich.

Zum Teil sind Kamera und Objektiv zusammen mit einem Flüssigkeitsprisma auf einem Item-8-Profil aufgebaut. Mittels der Flüssigkeitsprismen wird erreicht, dass die Kameras auch bei schräger Blickrichtung stets senkrecht auf die Grenzflächen schauen und so die Aberrationen in der Abbildung reduziert werden.

Für die LED-Blitzeinheiten wurden spezielle LED-Controller entwickelt (Abb. 5 mittig: LED Driver). Diese haben die Aufgabe einen hohen Strompuls (ca. 11,4A bei 24V) definierter zeitlicher Länge (ca. 10 μ s) für einen LED-Flächenstrahler (Abb. 5 unten: LED Panel) zu erzeugen. Die LED-Controller werden über die LVDS-Signale synchronisiert und über den CAN-Bus parametrisiert.

Für die flächige, möglichst homogene Hintergrundbeleuchtung wurden eigens an die Strömungskanäle angepasste LED-Flächenstrahler realisiert (Abb. 4). Die LEDs sind stirnseitig an den diffus streuenden Plexiglasscheiben angebracht. Links in Abbildung 4 ist eine drei-Segment Beleuchtung zu erkennen.

Die Bilddatenströme der Kameras werden von Embedded Computern (Abb. 5 links unten) entgegengenommen und zwischengespeichert. Diese sind via LAN mit dem zentralen Steuerrechner verbunden. Die Bildverarbeitung erfolgt offline nach der Bildakquise.

Die Hard- und Software wurde in mehreren Iterationen zwischen den Messkampagnen angepasst und optimiert. Nach Projektende wurden weitere Verbesserungen am System vorgenommen, so dass das Kamera-System derzeit vom Projektpartner SVA routinemäßig eingesetzt wird und auch für andere Anwendungen zur Verfügung steht.

Messkampagnen

Durchgeführt wurden mehrere Messkampagnen in Rostock als auch beim Projektpartner SVA. Die ersten Messungen wurden an der Universität Rostock im Kavitationskanal K21 für die Charakterisierung der Spitzenwirbelkavitation an einem feststehenden Profil durchgeführt (z.B. Abb. 3). Eingesetzt wurden hierfür 14 Kameras incl. 14 Flüssiglinsenobjektiven, 14 Kamerasteuereinheiten, 7 LED-Steuereinheiten, 7 LED-Flächenstrahlern, 7 Datenerfassungsrechnern, die zentrale Synchronisationseinheit und der zentrale Messrechner. Für die Auswertung wurden die Spitzenwirbel segmentiert (Abb. 7) und das zeit- und ortsabhängige Volumen für unterschiedliche Kavitationszahlen aus den unterschiedlichen Perspektiven bestimmt.

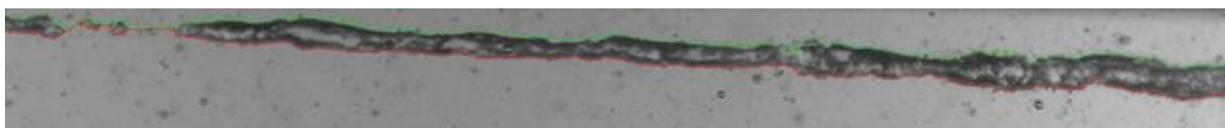


Abbildung 7: Segmentierter Spitzenwirbel mit oberer und unterer Begrenzung

In zwei Messkampagnen beim Projektpartner SVA (Abb. 6) sollte u.a. die Spitzenwirbelkavitation charakterisiert werden. Für die rückwärtige Beleuchtung wurde nur ein LED-Panel verwendet und die helixförmigen Spitzenwirbel der fünf Propellerblätter mit mehreren Kameras

abgebildet (Abb. 8 links). Für eine zweite Projektion der Spitzenwirbelhelices von unten wurde die Unterseite des Schiffmodells mit gepulsten LED-Strahlern beleuchtet, so dass auch eine Schattenabbildung entsteht (Abb. 6 rechts).

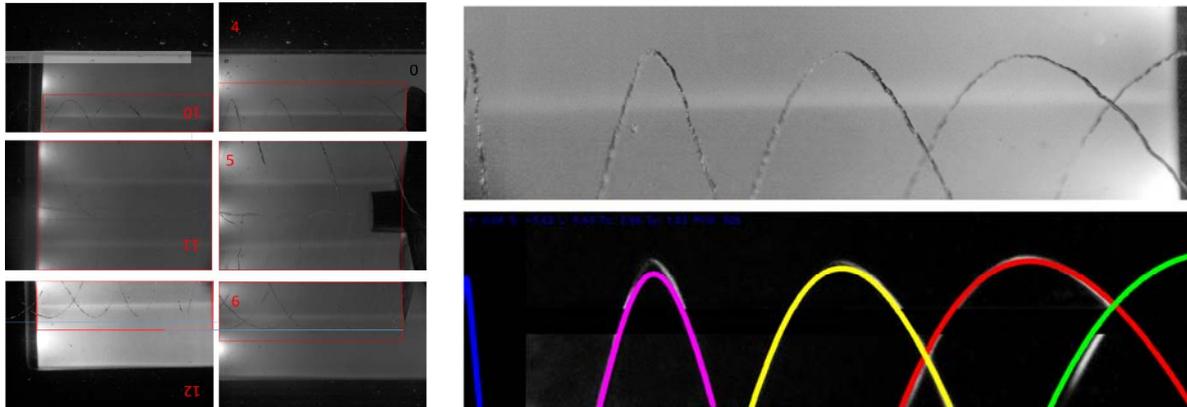


Abbildung 8: Charakterisierung der Spitzenwirbelkavitation. Links: Übersicht über Abbildungen, Rechts oben: Einzelaufnahme, Rechts unten: Auftrettswahrscheinlichkeit des Spitzenwirbels (Hintergrund-Graustufenbild) und Propellerblattzuordnung mittels Modell-Anpassung (Linien)

Da der Kavitationskanal während des Betriebs geschlossen ist, Unterdruck aufweist und ein direkter Zugang zum Messbereich durch das Schiffmodell blockiert wird, war eine extrinsische und intrinsische Kalibrierung der Kameras mittels eines Targets im Betrieb nicht möglich. Für die Charakterisierung des Spitzenwirbels wurde daher ein Helix-Spitzenwirbelmodell angesetzt. Jedes der 5 Propellerblätter $n = 1, 2, 3, 4, 5$ erzeugt eine, sich in z -Strömungsrichtung ausbreitende Spitzenwirbelhelix mit einem abnehmenden Radius $R(z)$ und einer von der Propellerblattstellung abhängigen Anfangsphase φ_n .

$$H_n(x, y, z) = \begin{bmatrix} R(z) \sin(kz + \varphi_n) \\ R(z) \cos(kz + \varphi_n) \\ z \end{bmatrix} \text{ mit z. B. } R(z) = R_0 \left[1 + r \left(\exp\left[-\frac{z}{l}\right] - 1 \right) \right]$$

R_0 ist der Propellerradius, r das Schrumpfungsverhältnis der Helix $r = R/R_0(z \rightarrow \infty)$ und l die typische Einschnürungslänge der Helix. Die Kavitation soll entlang des Spitzenwirbels bzw. der lokalen Phasen der Helices $\varphi = kz$ charakterisiert werden. Alle fünf Helices n werden durch jede Kamera abgebildet. Unter Annahme eines Lochkameramodells und einer senkrechten Beobachtungsrichtung ergeben sich in der Bildebene (X_p, Y_p) Kurven mit den auf die Pixelgröße (Index P) normierten Helixparametern $R_p, r, l_p, k_p, \varphi_n$, Kamera-Translationsparametern T_{Yp}, T_{Zp} und der Abbildungsskalierung F_p .

$$X_{Pn} = F_p \frac{\frac{\varphi}{R_p k_p}}{\frac{T_{Zp} + 1}{R_p} + \left[1 + r \left[\exp\left(-\frac{\varphi}{l_p k_p}\right) - 1 \right] \right] \cos(\varphi + \varphi_n)}$$

$$Y_{Pn} = F_p \frac{\frac{T_{Yp}}{R_p} + \left[1 + r \left[\exp\left(-\frac{\varphi}{l_p k_p}\right) - 1 \right] \right] \sin(\varphi + \varphi_n)}{\frac{T_{Zp} + 1}{R_p} + \left[1 + r \left[\exp\left(-\frac{\varphi}{l_p k_p}\right) - 1 \right] \right] \cos(\varphi + \varphi_n)}$$

Die Modellparameter können iterativ bestimmt werden. Hierfür wird von den Helixabbildungen (Abb. 8 rechts oben) das Hintergrundbild ohne Kavitation abgezogen und die Häufigkeit des

Auftretens des Spitzenwirbels als Graustufenbild dargestellt (Abb. 8 rechts unten s/w-Hintergrund). Die Helligkeitssumme entlang der Modellkurven (Kurven in Abb. 8 rechts unten) werden maximiert. Es ergibt sich eine Näherung für die Lage der Helices und eine Zuordnung zu den Propellerflügeln im Raum. Vorteil dieses Modells ist es, dass den Bildpunkten des Spitzenwirbels auch bei perspektivischer Abbildung Phasen der Helices $\varphi = kz$ zugeordnet werden können. Durch abwickeln der Spitzenwirbelhelices kann so die Spitzenwirbelwahrscheinlichkeit $W(\varphi)$ und Spitzenwirbelausdehnung $d(\varphi)$ als Funktion des Propellerstellung und Nachstromposition ermittelt werden.

Danksagung

Egmont Woitzel, ehemaliger Inhaber und Geschäftsführer der Firma FORTech Software GmbH, ist während der Projektlaufzeit leider verstorben. Er hat entscheidend an der Konzeption des realisierten Multikamerasystems mitgewirkt und ist daher Co-Autor dieses Beitrages.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Förderung des Verbundvorhabens. Weiterhin gilt dem Projektträgers Jülich (PTJ) Dank für die administrative Unterstützung von HiOcav.

Literatur

ITTC, 2017: "ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines Procedure Description of Cavitation Appearances" 7.0-02-03.03.2, 05/2017

Berger, S., 2018: "Numerical Analysis of Propeller-Induced Higher-Order Pressure Fluctuations on the Ship Hull", Chapter 2.5 & 2.6, p. 26 ff., Dissertation, Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2018

Krueger, C., Spors, S., Wolter, A., 2019: "Pattern Recognition in Hydroacoustic Cavitation Measurements", Sixth International Symposium on Marine Propulsors smp'19, Rome, Italy, May 2019

Ebert, E., Damaschke, N., 2019: "Cavitation Observation by a Multi-Perspective Camera System for Correlation with Hydrophone Measurements", AMT'19 The Sixth International Conference on Advanced Model Measurement Technology for The Maritime Industry, 9-11 October 2019, Rome Italy

Ebert, E., Damaschke, N., 2019 A: "Synchronized Multi-camera and LED-illumination system for multi perspective cavitation observation and 3D reconstruction" Sixth International Symposium on Marine Propulsors smp'19, Rome, Italy, May 2019

Heinke, H.-J., 2020: "Kennwerte des Propellers P1724 im Nachstrom des Dummymodells DM110FS in den optischen Messungen der Universität Rostock (IAE) Propeller P1724", Dummymodell DM110FS Teilbericht zum FuE-Vorhaben „HiOcav“ Bericht 4971.1 Potsdam, November 2020, German

Ebert, E., Pagels, F., Papenfuss, F., Karsten, S., Damaschke, N., 2021: "Optical Cavitation Inspection System (OCIS) for Higher Order Pressure Fluctuations", CAV2021 11th International Symposium on Cavitation May 10-13, 2021, Daejeon, Korea