

MESSTECHNIKEENTWICKLUNG FÜR KAVITATIONSUNTERSUCHUNGEN AM KAVITATIONSTUNNEL K21 DER UNIVERSITÄT ROSTOCK

MEASUREMENT TECHNIQUES FOR CHARACTERISATION OF CAVITATION IN CAVITATION TUNNEL K21 AT UNIVERSITY OF ROSTOCK

Kröger, W.*; Wolter, A.** Damaschke, N.*; Leder, A. **; Borchert, S.*; Höhne, S.*

* Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik (IAE), A.-Einsteinstr. 2

** Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik (LSM), A.-Einsteinstr. 2

Phasen-Doppler-Technik, Blasenmessung, Kavitation, Kavitationstunnel

Phase Doppler Technique, Bubble measurements, Cavitation tunnel

Zusammenfassung

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes *Korrelation von Kavitationseffekten unter Berücksichtigung der Wassereigenschaften* (KonKav I) wurde der Kavitationstunnel K21 der Universität Rostock modernisiert. Die Grundinstandsetzung wurde genutzt, um durch leichte Modifikationen die Qualität der Strömung zu verbessern. Wie die anschließende Vermessung per Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) zeigte, wird in der Messstrecke eine gleichmäßige und turbulenzarme Anströmung erreicht. In Vorbereitung auf systematische Messungen zur Wasserqualität bei den Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) und der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) wurde im K21 die Blasen- und Feststoffpartikelkonzentration mittels Phasen-Doppler und Zeitverschiebungsverfahren bestimmt. Es konnte u. a. zusammen mit kamerabasierten Kavitationsbeobachtungen nachgewiesen werden, dass der Tunnel nur eine sehr kleine Kavitationshysterese hat. Die Anlage ist damit sowohl für Kavitations- als auch strömungstechnische Untersuchungen sehr gut dokumentiert. Durch die vierseitig verglaste Messkammer lassen sich laseroptische Messtechniken gut einsetzen und der Tunnel ist zukünftig nutzbar.

Einleitung

Das Auftreten von Kavitation am Propeller und am Ruder eines Schiffes führt in vielen Fällen zu Schäden, die entscheidende Beeinträchtigungen des Schiffsbetriebs zur Folge haben können. Neben der Reduzierung des Wirkungsgrades des Propellers bzw. der Wirksamkeit des Ruders können auch starke Vibrationserregungen oder Erosionsschäden sowohl am Propeller als auch am Ruder auftreten. Die steigenden Anforderungen hinsichtlich Schiffsgröße, Antriebsleistung etc. bedingen eine verbesserte Verlässlichkeit der Kavitationsprognose anhand von Modellversuchen in den Schiffbau-Versuchsanstalten. Die Versuchsbedingungen in den verschiedenen Kavitationstunneln unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der Geometrie und Versuchsdurchführung sondern auch hinsichtlich der Eigenschaften der Anströmung in Form von Turbulenzgrad, Gasgehalt und Keimverteilung. Speziell der Keimgehalt wurde bisher in keinem Kavitationstunnel bestimmt, da die notwendige Partikelmess-

technik teuer und aufwendig ist und eine Differenzierung der Partikelarten (Feststoffpartikel, organische Rückstände, Blasen etc.) kaum möglich ist.

Im Rahmen des Projektes KonKav, welches in der ersten Phase 2010 startete, wurde begonnen den Einfluss der Wasserqualität, speziell die Keimkonzentration, auf die Kavitation zu verifizieren. Das Institut für Allgemeine Elektrotechnik (IAE) entwickelte und adaptierte im Rahmen von KonKav I hierzu eine Reihe von Messverfahren (Phasen-Doppler-Messtechnik, Zeitverschiebungsmesstechnik, Interferometric Particle Imaging, Schattenabbildung und Stereometrie) um sowohl die Keimkonzentration als auch die Kavitation in den Kavitationstunneln der Projektpartner K22 und HYKAT der Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstand (HSVA) und K15A der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) quantitativ zu erfassen. Die Daten bilden die Grundlage numerischer Modelle für die Kavitationsprognose, welche am Institut für Fluidodynamik & Schiffstheorie (FDS) an der Technischen Universität Hamburg Harburg, dem vierten Partner im Projekt KonKav I, entwickelt werden. In der zweiten Phase von KonKav wird derzeit versucht die Keimkonzentration und den Nachstrom an einer Großausführung zu bestimmen um Maßstabeffekte zu quantifizieren.

Im Rahmen des Projektes KonKav I wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik an der Universität Rostock der Kavitationstunnel K21 modernisiert um die Messtechniken in der Entwicklungsphase testen zu können. Der folgende Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die Eigenschaften des instandgesetzten Kavitationstunnels sowie über die Charakterisierung der Keimkonzentration im K21 mittels Phasen-Doppler Technik.

Historie und Modernisierung des K 21

Der K21 ist ein geschlossener Kavitationstunnel mit horizontaler Messstrecke (Abbildung 1). Konzipiert und gefertigt 1959 von der Firma KEMPF & REMMERS (Hamburg) ging er 1963 an der Universität Rostock in Betrieb. Die damaligen Zielanwendungen des Kavitationstunnels waren Propelleruntersuchungen im Freistrom, Propeller- und Ruderuntersuchungen im Nachlauf und auch Untersuchung von Profilen und Modellkörpern bis zu einem Durchmesser von ca. 160 mm.

Die Messstrecke hat einen Querschnitt von 30 cm × 30 cm und einer Länge von 130 cm. Über vier Plexiglassichtfenster (20 cm × 110 cm) besteht im Bereich der Messstrecke eine gute optische Zugänglichkeit von allen Seiten. Eine „Nachstromkassette“, ermöglicht die Erzeugung definierter Strömungsprofile.

Der Druckkörpers des K21 ist in rostfreiem A4-Stahl gefertigt, dessen Systemdruck sich zwischen 0,4 und 2,0 bar einstellen lässt. Durch vier beschauelte Umlenkkrümmer sowie eine Düse mit dem Kontraktionsverhältnis von 6:1 wird eine hohe Strömungsqualität erreicht.

Über ca. 40 Jahre wurde der K21 intensiv genutzt, ab 1985 zeigten sich jedoch technische Verschleißerscheinungen. Im Jahr 2010 konnte der K21 im Rahmen des Projekts *KonKav I* instandgesetzt werden, um die am Institut für Allgemeine Elektrotechnik entwickelte Messtechniken zur Wasserqualitätscharakterisierung erproben zu können. Im Rahmen der Instandsetzungs- und Modernisierungsarbeiten wurde u. a. der Druckkörper komplett zerlegt, gereinigt und sämtliche Flanschdichtungen und Verschlüsse des Druckkörpers erneuert, die Impellerpumpe überholt und deren Antrieb durch einen 15 kW-Drehstromasynchronmotor mit FU-Drehzahlregelung modernisiert.

Nach fachlicher Konzeption des LSM wurde zudem die Strömungsführung in den Bereichen Vorkammer-Gleichrichter-Düse sowie Diffusor leicht modifiziert um ein gleichmäßigeres Blockprofil mit geringem Turbulenzgrad in der Anströmung zu erreichen. In Tabelle 1 sind die technischen Daten des K21 zusammengefasst



Abbildung 1: Details des geöffneten Tunnels: Impeller, Düse und ein Blick in die Messkammer

Dimension der Messkammer	L x B x T = 1200 × 300 × 300 [mm]
Optische Zugänge	Plexiglassichtfenster (4 Stck.) mit je: 200 mm × 1100 mm
Systemdruck	$p_{\text{Sys, abs}} = [0,4 \dots 2,0]$ bar
Max. Strömungsgeschwindigkeit	außerhalb der Eigenkavitation des Impellers - $u_{\text{max}} = 7,0$ m/s für $p_{\text{Sys, abs}} = 1,0$ bar - $u_{\text{max}} = 9,5$ m/s für $p_{\text{Sys, abs}} < 1,8$ bar
Dimension der Kernzone mit Blockprofil der Strömung	L x B x T = 900 × 170 × 170 [mm]
Turbulenzgrad in der Kernzone:	$Tu < 3,0$ % für $u = [1 \dots 3]$ m / s $Tu < 1,5$ % für $u = [3 \dots 9,5]$ m / s

Tabelle 1: Technische Daten des K 21

Untersuchung der Qualität der Anströmung durch LDA-Messungen

Nach Abschluss der Arbeiten wurde die Strömungsqualität mit Hilfe der Laser-Doppler-Messtechnik geprüft. Mit einem 2-C-Laser Doppler System wurde am leeren Tunnel die Hauptströmungs- und die Vertikalkomponente bestimmt, eine Querkomponente war aufgrund der Tunnelsymmetrie nicht zu erwarten.

Zunächst wurde am Einlass der Messstrecke in Tunnelmitte bei $x = 0,05$ m für verschiedene Drücke die Drehzahlkennlinie ermittelt, Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse.

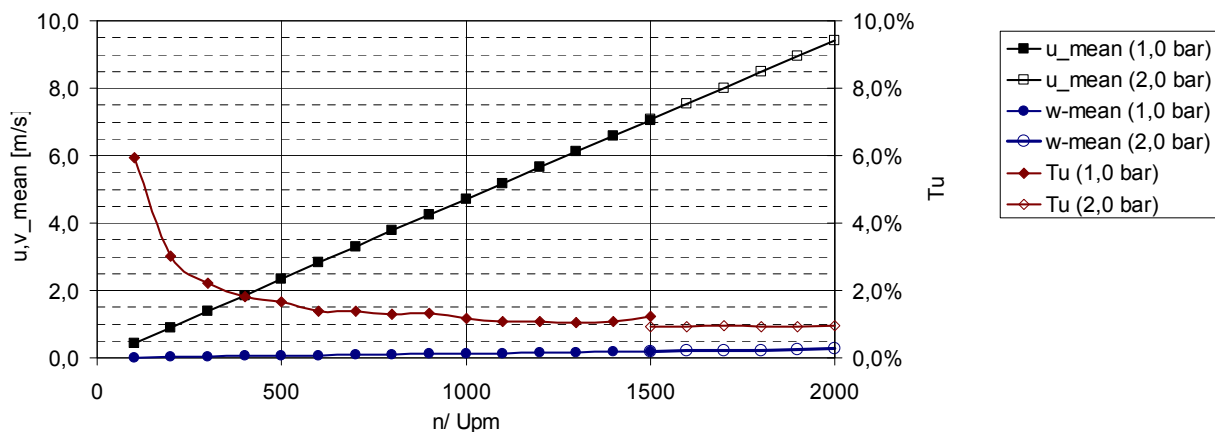


Abbildung 2: Drehzahlkennlinie des K 21 am Beginn der Messstrecke in Tunnelmitte

Wie die Grafik zeigt konnte der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Hauptströmungskomponente u und Antriebsdrehzahl mit hoher Genauigkeit verifiziert werden. Der Turbulenzgrad liegt ab mittleren Geschwindigkeit von 3 m/s unterhalb von 1,5% um bei Normaldruck (1.0 bar) ab 7 m/s durch einsetzende Eigenkavitation des Impellers anzusteigen.

Durch Erhöhen des Systemsdrucks auf bis zu 2.0 bar kann die Eigenkavitation wirksam unterdrückt und die Geschwindigkeit auf bis zu 9,5 m/s erhöht werden.

Zur Untersuchung der Strömungsentwicklung wurde für eine mittlere Geschwindigkeit von $u = 3,5$ m/s bei einem Systemdruck von 1,0 bar die Strömungsverteilung in der Messkammer an vier x-Positionen $X = 50, 300, 500$ und 700 mm jeweils über einen zentralen Querschnittsbereich von 190 mm \times 190 mm vermessen, Abbildung 3 stellt die Verteilung der drei Kenngrößen für ausgewählte Querschnitten dar.

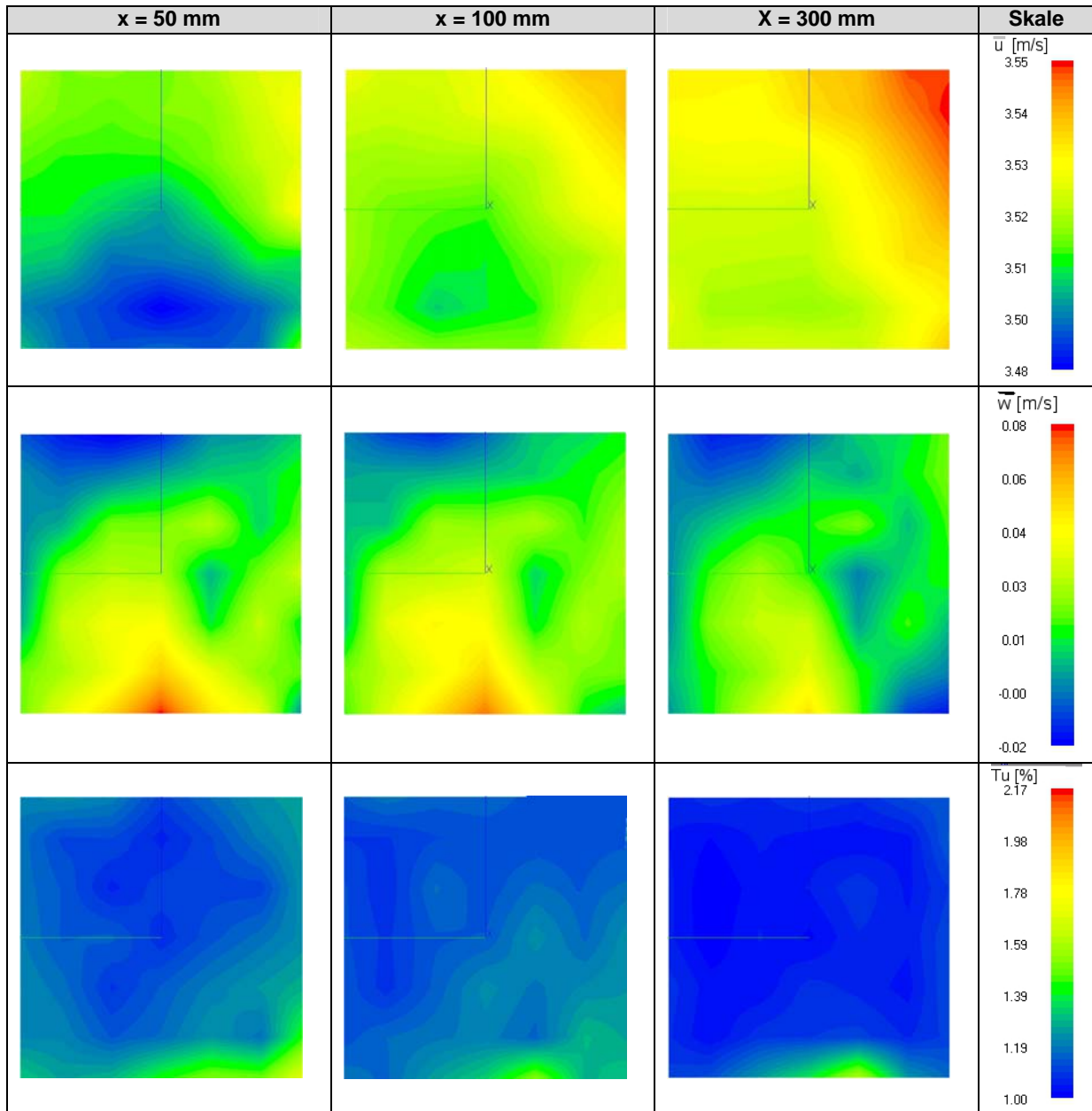


Abbildung 3: Strömungsprofile bei einer mittleren Geschwindigkeit von $u = 3,5$ m/s. Dargestellt sind die mittleren Geschwindigkeiten in Hauptströmungs- und in vertikale Richtung (u und w) sowie der Turbulenzgrad Tu . Das Messfeld umfasst einen Querschnittsbereich von je 190 mm \times 190 mm.

Wie die Ergebnisse zeigen, egalisiert sich das Strömungsfeld im Anfangsbereich der Messstrecke, so dass ab $x = 100$ mm die Strömung ein gleichmäßiges Profil der x-Komponente und einen geringen Turbulenzgrad aufweist. Die am Beginn der Messstrecke vorhandene Vertikalkomponente w baut sich im weiteren Verlauf der Strömung schnell ab. Weiterhin zeigt

die symmetrische Verteilung der z-Komponente (w), dass auch der vom Impeller eingebrachte Drall wirksam bis zur Messstrecke abgebaut ist.

Die vorhandene Restturbulenz im Kernbereich ist für Kavitations- und auch die meisten Strömungsuntersuchungen akzeptabel.

Wasserqualität und Kavitation

Im Rahmen des Projektes KonKav I wurden am K21 verschiedene Messtechniken zur Bestimmung der Wasserqualität getestet und so auch die Eigenschaften des instandgesetzten Kavitationstunnels bestimmt. Hauptaugenmerk lag auf Messtechniken die die Bestimmung der Keimkonzentration ermöglichen. Es ist bekannt, dass die Keimkonzentration einen entscheidenden Einfluss auf die Entstehung der Kavitation hat. Sie wurde aber bisher weder bei Kavitationsversuchen noch bei der numerischen Vorhersage berücksichtigt. Grund hierfür ist, dass Messtechniken zur Bestimmung der Anzahl und Größenverteilung in Abhängigkeit von den Betriebsparametern des Kavitationstunnels fehlen, zu aufwendig oder zu unzuverlässig sind. Hinzu kommt, dass sich die Keimkonzentration von Tunnel zu Tunnel unterscheidet und für einen Tunnel auch von den zuvor durchgeführten Versuchen abhängen kann.

Getestet wurde zunächst die Phasen-Doppler Technik zur Bestimmung der Keimkonzentration, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden. In den Abbildung 4 und 5 sind beispielhaft die Ergebnisse eines Hystereseversuches dargestellt. Der Kavitationstunnel wurde mit 71% Sauerstoffsättigung und einem statischen Druck von 0,45bar betrieben. In der Versuchsstrecke war mittig ein 2D-Tragflügelprofil horizontal montiert. Gemessen wurde im Zustrom des Profils mittig im Tunnel. Der Drehzahl wurde in den ersten 250s rampenförmig von 750min^{-1} auf 1500min^{-1} hochgefahren was einer mittleren Geschwindigkeitsänderung von $3,53\text{m/s}$ auf $7,063\text{m/s}$ entspricht. Anschließend wurde die Drehzahl für 50s stabil bei 1500min^{-1} gehalten und wieder innerhalb von 250s linear auf 750min^{-1} reduziert.

Die Geschwindigkeitsmesswerte sind in der oberen Teilgrafik der Abbildung 4 zu sehen. Grau eingezeichnet sind die ca. 50000 Einzelmesswerte aus denen, mit einer zeitlichen Auflösung von 5s, Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit berechnet wurden. Weiterhin sind im oberen Teil der Abbildung 4 die Soll-Geschwindigkeitskurve eingezeichnet sowie die durch Beobachtung bestimmten Punkte des Kavitationseinsatzes und des Kavitationsendes gekennzeichnet. Zu erkennen ist, dass nach Kavitationseinsatz und für hohe Geschwindigkeiten die gemessene Geschwindigkeit von der Soll-Geschwindigkeit um maximal 2% abweicht. Der Grund hierfür ist nicht bekannt könnte aber Ursachen im Profil der Zuströmung und der verwendeten Messposition haben (siehe Abbildung 3), durch den eingebauten Tragflügel induziert werden oder aufgrund der höheren Blasenkonzentration am Impeller entstehen.

Im der unteren Teilgrafik der Abbildung 4 sind die bezogene Datenrate und die Partikelanzahlkonzentration aufgetragen. Die mit 5s zeitaufgelöste Datenrate (Signale pro Sekunde) wurde auf die mittlere Geschwindigkeit bezogen. Damit ergibt sich eine längenbezogene Partikelanzahl, die sich durch die Projektionsfläche des Phasen-Doppler Messvolumen bewegt (Albrecht et al. 2003). Weiterhin wurde die Gesamtanzahlkonzentration der Partikel (pro cm^{-3}) mit einer zeitlichen Auflösung von 1min dargestellt.

Die Phasen-Doppler Technik kann den Durchmesser homogener sphärischer Partikel, im vorliegenden Fall den Blasendurchmesser von sphärischen Einzelblasen, bestimmen. Problematisch bei der Bestimmung der kavitationsrelevanten Keimkonzentration war jedoch, dass sowohl Blasen als auch Feststoffpartikel in der Strömung vorhanden sind. Deshalb wurde in Höhne et al. (2012) eine Strategie zur statistischen Korrektur der Durchmesserverteilungen vorgestellt, mit deren Hilfe Signale von Feststoffpartikeln und Blasen hinsichtlich der Anzahlkonzentration separiert werden können.

Zur Interpretation der Konzentrationsdaten sind in Abbildung 5 die Phasendifferenzdiagramme für die in Abbildung 4 gekennzeichneten ausgewählten Punkt (A) bis (I) dargestellt. Homogene sphärische Partikel erzeugen Phasendifferenzsignale nahe der Sphärizitätsgeraden (Albrecht et al. 2003), wie sie in Abbildung 5 (D) zu erkennen sind.

Beim Hochfahren der Geschwindigkeit bis ca. 160s sind im Tunnel keine oder nur sehr wenige Blasen vorhanden. Die Partikelanzahlkonzentration mit knapp 100cm^{-3} ist durch Feststoffpartikel (Schmutz, Staub, Abrieb, Tracerpartikel etc.) dominiert, was anhand der statistische Verteilung der Phasendifferenzsignale an den Punkten (A) und (B) belegt wird.

Mit Einsetzen der Kavitation am Profil werden im Tunnel Blasen erzeugt, die nach einem Umlauf zusätzliche Streusignale erzeugen (C). Mit steigender Drehzahl und stärkerer Kavitation wächst die Blasenkonzentration im Tunnel stark an (D) und erreicht das Maximum zusammen mit der maximalen Kavitation bei maximaler Geschwindigkeit.

Mit dem Reduzieren der Geschwindigkeit nach 300s Versuchszeit gehen die Blasen nur langsam in Lösung, was u.a. einer kavitationsinduzierten Hysterese mit hoher Blasenkonzentration entspricht (E), da Blasen oberhalb von $20\mu\text{m}$ wiederum als Kavitationskeime wirken. Allerdings bricht die Kavitation bei etwa der Geschwindigkeit und der Umdrehungszahl des Kavitationseinsatzes zusammen (F), womit nur eine sehr kleine Gesamthysterese vorhanden ist. Mögliche Ursache hierfür könnten auch Blasen sein, die zusätzlich am Impeller entstehen, da der Tunnel nur eine Gesamthöhe von $1,8\text{m}$ hat. Die kleine Hysterese wurde auch in allen anderen Versuchen bestätigt und betrug im Mittel nur 15min^{-1} ($\Delta v = 0,07\text{m/s}$).

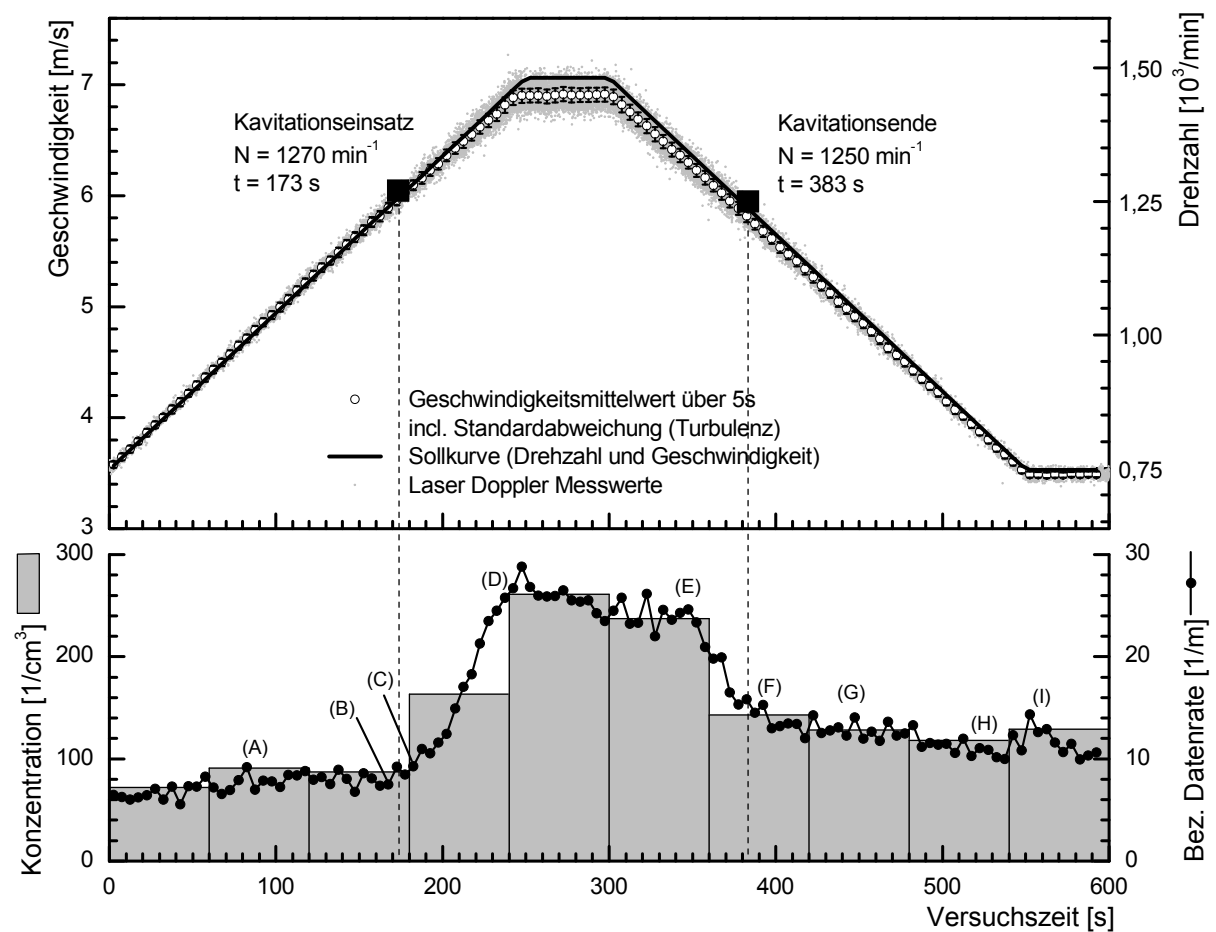


Abbildung 4: Geschwindigkeit (oben) und Partikelkonzentration (unten) für einen Hystereseversuch am K21

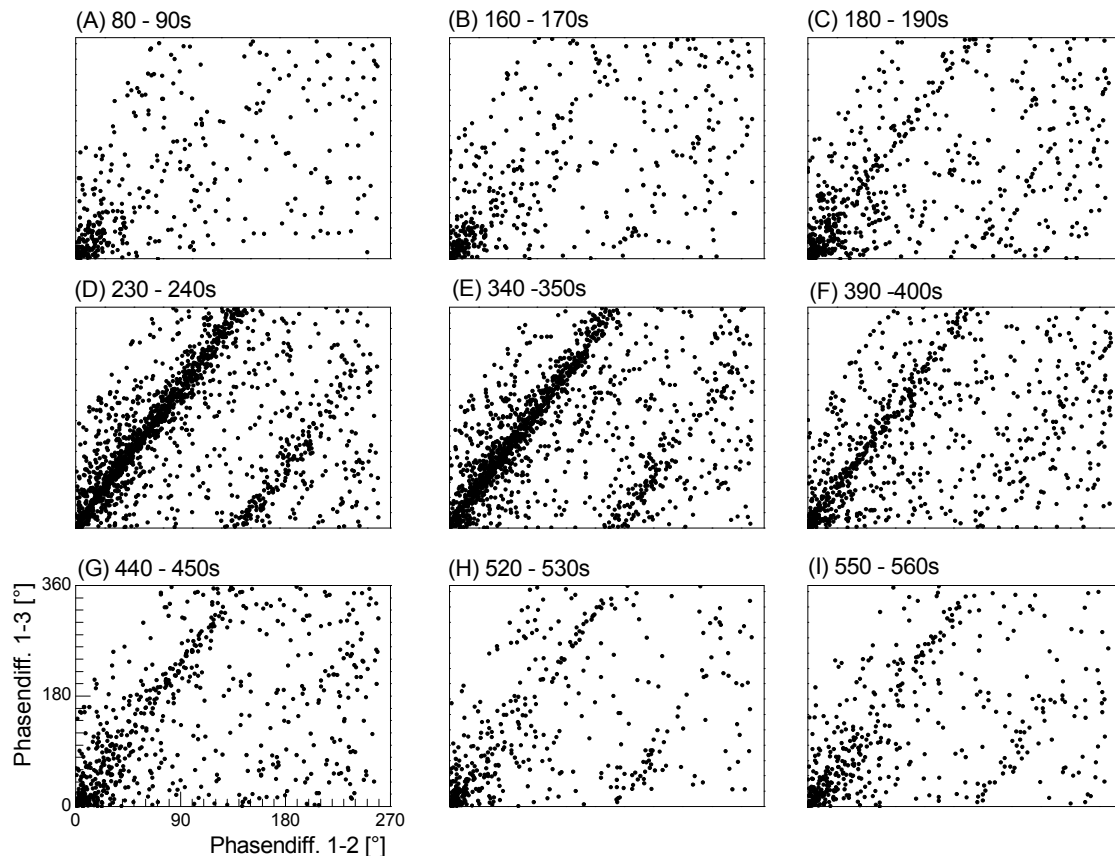


Abbildung 5: Phasen Doppler Signale in der Phaseebene für ausgewählte Zeiten in Abbildung 4

Im weiteren Verlauf (G) – (I) ist die Blasenkonzentration im Tunnel höher als zu Versuchsbeginn und nimmt nur langsam ab, bzw. bleibt nahezu stabil. Somit ist die Wasserqualität im Hinblick auf die Blasenkonzentration von den Vorversuchen abhängig. Insgesamt weist der Tunnel jedoch, im Vergleich zu anderen Kavitationskanälen eine sehr geringe Hysterese auf. Neben den vorgestellten Phasen-Doppler Messungen wurde im Rahmen des Projektes KonKav I auch die Zeitverschiebungstechnik für die Keimkonzentrationsbestimmung genutzt (Höhne et al. 2011). Vorteil der Zeitverschiebungstechnik ist, dass sie nur einen optischen Zugang benötigt. Darüber hinaus werden derzeit Messtechniken entwickelt, welche eine echtzeitfähige kontinuierliche Überwachung der Keimkonzentration als Wasserqualitätsparameter am Kavitationstunnel ermöglichen.

Des Weiteren wurden die Kavitationserscheinungen mittels Schattenabbildung, Stereometrie und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen quantifiziert (Borchert et al. 2012). Im Ergebnis liegen umfangreiche Datensätze zu allen untersuchten Kanälen K21 (Universität Rostock), K15A (SVA), K27 (TU Berlin), K22 und HYKAT (HSVA) für 2D, 3D Profile sowie Propellerversuche vor, die derzeit ausgewertet werden. Im Ergebnis soll ein quantitativer Vergleich der Kanäle möglich sein.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes KonKav I konnte der Kavitationstunnel K21 am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Rostock instandgesetzt und modernisiert werden. Die Eigenschaften des Tunnels wurden im Hinblick auf Anströmung und Wasserqualität umfangreich quantifiziert. Speziell die Bestimmung der Keimkonzentration, die in Feststoffpartikelkonzentration und größenabhängige Blasenkonzentration separiert werden kann, wurde erstmals für einen Kavitationstunnel verlässlich und nachvollziehbar dokumentiert. Damit

steht der Kavitationstunnel K21 für zukünftige Strömungs- und Kavitationsuntersuchungen zusammen mit umfangreicher Messtechnik zur Druck- und Kraftbestimmung sowie optischer Strömungsmesstechnik zur Verfügung.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung des Vorhabens KonKav I und dem Projektträger Jülich für die laufende Unterstützung, sowie den am Projekt beteiligten Partnern, der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA), der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) und dem Institut für Fluidodynamik & Schiffstheorie (FDS) an der Technischen Universität Hamburg Harburg (TU-HH). Ein weiterer Dank geht an Dr. Weitendorf für kontinuierliche und kompetente Unterstützung bei der Versuchsplanung.

Literatur

Albrecht H.-E., Borys M., Damaschke N., Tropea C. (2003) Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Springer-Verlag.

Borchert S., Kröger W., Höhne S., Damaschke N., Zhou, Z. (2012) On Optical Quantification of Cavitation Properties. In Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation (CAV2012), Singapore. 14-16 Aug 2012

Höhne S., Kröger W., Borchert S., Damaschke N. (2012) Optical methods for nuclei spectra characterization in cavitation tunnels. In Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation (CAV2012), Singapore. 14-16 Aug 2012.

Höhne S., Kretschmer A., Kröger W., Borchert S., Damaschke N. (2011) Erweiterung der Zeitverschiebungstechnik auf Blasenmessungen an Kavitationskanälen. In Proceedings der 19. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Ilmenau Germany 6.-8. September 2011.