

MESSUNGEN DES SPEKTRUMS VON KAVITATIONSKEIMEN VOR STRÖMUNGSPROFILIEN MITTELS PHASEN-DOPPLER-TECHNIK

W. Kröger, S. Borchert, S. Höhne, N. Damaschke

Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, A.-Einsteinstr. 2

PDA, Phasen-Doppler-Technik, Blasenmessung, Kavitation, Kavitationskanal

PDA, Phase Doppler Technique, Bubble measurements, Cavitation Channel

Zusammenfassung

Vorgestellt werden Phasen-Doppler-Messungen zur Untersuchung der Wasserqualität von vier Kavitationskanälen mit mehreren Modellen und bei verschiedenen Strömungszuständen. Aus der Vielzahl der Messungen werden ausgewählte Ergebnisse präsentiert, die die Machbarkeit der Bestimmung von Blasenspektren mit der Phasen-Doppler Messtechnik sowie die Korrektur der Ergebnisse hinsichtlich eines Feststoffpartikelanteils demonstrieren. Die Messergebnisse finden Eingang in Simulationsrechnungen zur Blasendynamik an den verwendeten Versuchobjekten, die von der TU Hamburg Harburg, FG Fluidodynamik und Schifftheorie im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes KonKav I durchgeführt werden.

Die Messungen dienen auch dem Zweck, die Machbarkeit und Robustheit des Verfahrens für einen dauerhaften Betrieb zur Kontrolle der Wasserqualität zu ermitteln und Prozeduren zur Berücksichtigung des Einflusses unvermeidlicher Feststoffpartikel auf die Messwertstatistik zu entwickeln. Ein Korrekturverfahren für das gemessene Blasenspektrum und die Abschätzung der Anzahlkonzentration an Feststoffpartikeln werden vorgestellt.

Einleitung

Die Ergebnisse von Kavitationsexperimenten an Modellen von Schiffspropellern und Rudern werden stark von der Wasserqualität in der Versuchsanlage beeinflusst. Die Extrapolation des Kavitationsverhaltens vom Modell auf die Großausführung bedarf daher der Erfassung aller relevanten Parameter der Wasserqualität.

Die entscheidende Wassereigenschaft bezüglich Kavitation ist deren Zugspannungsfestigkeit. Sie wird durch Kavitationskeime herabgesetzt. Als solche gelten insbesondere Gasblasen im Größenbereich 10...250µm. Deren Konzentrations-Größenspektrum hängt einerseits von der Konzentration an gelösten Gasen, dem Absolutdruck und der Temperatur ab. Andererseits wirkt Kavitation am Modell oder an Teilen der Versuchsanlage auf das Blasenspektrum vor dem Modell. Hochwertige Kanäle haben zur Minimierung des Effektes eine große Umlauflänge und eine große Höhendifferenz zwischen Messstrecke und Umlaufpumpe. Dadurch sollen am Modell generierte Blasen Zeit bekommen um wieder in Lösung zu gehen und Kavitation an der Pumpe soll durch den höheren statischen Druck verhindert werden.

Die Schiffbauversuchsanstalten bemühen sich auf ihrer internationalen Konferenz ITTC u.a. seit vielen Jahrzehnten durch Empfehlungen Standards für die Versuchsdurchführungen durchzusetzen, die eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse, auch zwischen verschiedenen Kanälen, garantieren.

Weitgehend etabliert ist die Erfassung des Gasgehalts entweder mit der vanSlyke-Methode oder des gelösten Sauerstoffgehalts mit der Winkler-Methode sowie der rel. Sauerstoffsättigung mittels Clark-Sonde. Führende Versuchsanstalten verwenden außerdem Geräte zur direkten Zugspannungsfestigkeitsmessung. Diese Geräte arbeiten entweder im Strömungskanal und sind dann nicht rückwirkungsfrei oder sie untersuchen Wasser im Bypass und können durch die Probennahme bereits das Keimspektrum verändern.

Insgesamt reichen diese eingesetzten Messverfahren jedoch nicht aus um stets eine sichere Kavitationsprognose zu erzielen. Die Wasserqualität hinsichtlich Blasenkonzentration, Blasengrößenspektrum und Feststoffpartikelanzahl ist ein bisher nicht erfasster und entscheidender Parameter für den Kavitationseinsatz. Gerade die Partikelkonzentrationen variieren von Kanal zu Kanal und wurden bisher weder ausreichend experimentell erfasst noch in numerischen Simulationen berücksichtigt.

Im Rahmen des vom BMWI geförderten Verbundprojektes „Forschung zur Korrelation von Kavitationseffekten und Erosion unter Berücksichtigung von Wassereigenschaften und Nachstrom“ (KonKav) werden Wasserqualitätsmessungen primär hinsichtlich der quantitativen Bestimmung Keimgehaltsspektren an den vier Kavitationskanälen K21 am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Rostock, K15A der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA), K27 der TU-Berlin sowie HYKAT und K22 der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) durchgeführt.

Zur Blasengrößen- und Blasenkonzentrationsbestimmung wird die Phasen-Doppler Messtechnik eingesetzt. Die HSVA hat bereits 1992 (Tanger und Weitendorf 1992) demonstriert, dass das Phasen-Doppler-Verfahren die Messung des Blasenspektrums in der Weise ermöglicht, wie es 1972 von der ITTC gefordert wurde. Die Phasen-Doppler Technik ist jedoch aufgrund der experimentellen Rahmenbedingungen in den Kavitationakanälen anspruchsvoll in der Handhabung und wurde auch aus Kostengründen bisher kaum von den Versuchsanstalten praktiziert.

Neben nur sehr wenigen Blasenmessungen in Kavitationskanälen (Tanger und Weitendorf 1992) ist der Einsatz der Phasen-Doppler-Technik zur Bestimmung von Blasenspektren in Blasensäulen (Brenn et al. 2002; Lain et al. 1999), bei Wellen (Asher und Farley 1995) sowie von akustisch generierten Kavitationsblasen (Tsochatzidis et al. 2001) in der Literatur dokumentiert. Im Vergleich zu der Vielzahl von Phasen-Doppler Messungen in Sprays liegen für die Blasengrößenbestimmung jedoch weit weniger Erfahrungen im Hinblick auf prozessnahe Bedingungen vor. Dementsprechend wird nach der Beschreibung der Kavitationstunnel auf die spezifischen Anpassungen des Phasen-Doppler Systems eingegangen. Da neben den Blasen, die hauptsächlich die Kavitation induzieren, vergleichsweise viele Feststoffpartikel in den Kavitationskanälen vorhanden sind, ist eine Korrektur der gemessenen Größenverteilungen notwendig. Prinzipiell ist die Unterscheidung von Feststoffpartikeln und Blasen mit der Phasen-Doppler Technik nicht möglich, vorgestellt wird jedoch ein Vorgehen, welches unter den spezifischen Bedingungen der Kavitationstunnel die Feststoffpartikelsignale eliminiert und quantitative Blasengrößenspektren liefert. Abschließend sollen aus der Vielzahl von Messungen einige exemplarische Ergebnisse vorgestellt werden.

Wesentliche Merkmale der Versuchsanlagen und der Strömungsmodelle

Von den genannten Versuchsanlagen haben der K15A und der K27 austauschbare Mess-Stecken mit verschiedenen Querschnitten. Es wurden zum Zweck der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse gleiche Querschnitte wie beim K22 von ca. 600x600mm² gewählt. Tabelle 1 zeigt die im Projekt hinsichtlich der Wasserqualität untersuchten Kavitationskanäle. Sie unterscheiden sich deutlich hinsichtlich des in Umlauf befindlichen Wasservolumens, woraus bei gleichem Volumenstrom in der Mess-Strecke unterschiedliche Umlaufzeiten für

generierte Blasen resultieren. Außerdem unterscheiden die Kanäle sich in der Höhendifferenz zwischen Mess-Strecke und Pumpe (Pumpentiefe). Eine Besonderheit des K27 ist die große Beruhigungsstrecke mit einer großen freien Oberfläche, wodurch bei Unterdruck eine schnelle Entgasung erfolgt.

Kanal	Betreiber	Meßstreckenquerschnitt	Wasservolumen	Pumpentiefe
K21	Uni Rostock	300x300mm ²	3,4m ³	1,8m
K22	HSVA	600x600mm ²	32m ³	8m
HYKAT	HSVA	2800x1600mm ²	1500m ³	11m
K15A	SVA Potsdam	600x600mm ² (850x850mm ²)	38m ³	7m
K27	TU Berlin	600x600mm ² (1000x700mm ²)	260m ³	8,4m

Tabelle 1: Untersuchte Kavitationskanäle

Als Versuchsobjekte wurden ein 2D-Tragprofil NACA66(2)-415 und ein 3D-Profil (Flügelspitze mit gleichem Profil) ausgewählt. Das Kavitationsverhalten solcher Profile wurde schon in früheren Arbeiten untersucht (Arndt et Maines 1994). Im K15A und im K27 wurden bzw. werden die Strömungsmodelle drehbar an einer 6-Komponenten-Waage montiert, so dass auch die Kräfte und Momente erfasst werden. Die Kavitationserscheinungen wurden durch Videoaufzeichnungen mit verschiedenen Beleuchtungs- und Kameraanordnungen dokumentiert. An den aufgenommenen Bildsequenzen wurden neu entwickelte statistische Auswertungsmethoden zur Ermittlung der Kavitationsschichtdicke getestet.

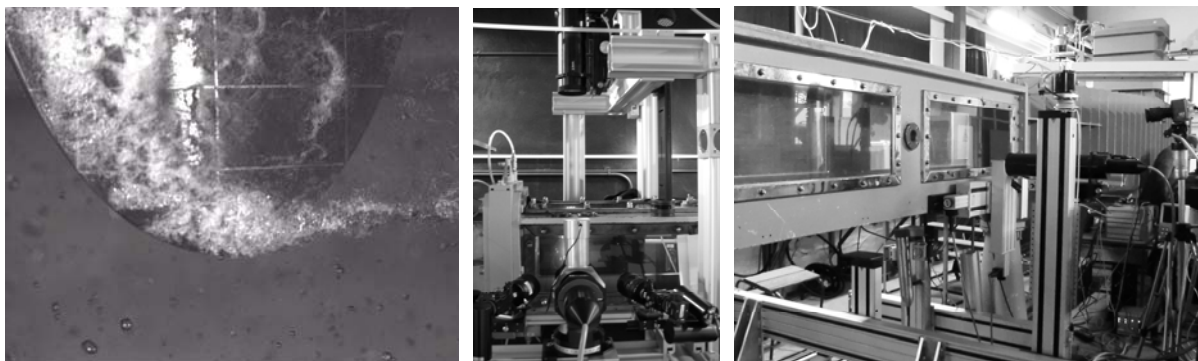


Abb. 1: Kavitation am 3D Profil (links), Messaufbau am K21 (Mitte), Messaufbau am K15A (rechts).

Phasen-Doppler-Messanordnung

Der Einsatz der Phasen-Doppler Technik zur Bestimmung von Blasengrößen ist aufgrund des optischen Zugangs zur Messposition schwieriger als für Messungen in Sprays. Die vermessenen Kavitationskanäle unterscheiden sich hinsichtlich der optischen Zugänglichkeit, bzw. der Position der optischen Fenster. Da die Phasen-Doppler Empfangsoptik unter ca. 90° Streulichtwinkel positioniert werden muss, sind jeweils zwei Fenster notwendig. Am K21, K22 und K15A sind großflächige optische Zugänge vorhanden, die auch eine Traversierung bzw. Auswahl der Messposition erlaubten. Im Gegensatz zu einer horizontal angeordneten Sendeoptik und einer über dem Kanal positionierten Empfangsoptik am K21 und K22 musste die Sendeoptik am K15A und am K27 aufgrund der verwendeten Wagen für die Kraftmessungen unter dem Kanal und die Empfangsoptik horizontal positioniert werden. Am K27 ist aufgrund des verstellbaren Bodens eine zusätzliche Plexiglasscheibe im Strahlengang der Sendeoptik vorhanden. Am HYKAT mussten die Sendestrahlen von oben durch ein zentrales kleineres rundes Fenster vor der Messstrecke geführt werden. Damit war der Abstand zwischen Messvolumen und Empfangsoptik vorgegeben. Aufgrund der großen Abmessungen von 2,6m Breite stellte diese Messung u.a. auch die höchsten Anforderungen hinsichtlich

Streulichtintensität. Grundsätzlich wurde vor dem Modell oder sogar vor der eigentlichen Messstrecke gemessen, da die Wasserqualität in der Zuströmung bestimmt werden sollte. Die Strömungsgeschwindigkeitsfelder im Bereich des Modells wurden teilweise mit einem zweiten Laser-Doppler-System oder separat vor und nach den Phasen-Doppler Messungen bestimmt.

Verwendet wurde für alle Blasenmessungen ein 2C Phasen-Doppler System der Firma Dantec Dynamics, wobei die optischen Parameter wie Brennweiten der Sende- und Empfangsoptik, Empfängermasken, Laserleistung und Sensitivität der Detektoren jeweils an die optischen Zugänge und Messbedingungen angepasst werden mussten.

Die Sendeoptik wurde außerhalb des Kanals mit Leistungsmessgerät, Beams Scanner und Abbildung des Messvolumens justiert und das Messvolumen anschließend in den Kanal verfahren. Dabei war zu beachten, dass lokale Verunreinigungen und Kratzer auf den Scheiben den Strahlengang nicht beeinflussen durften. Aufgrund der verschiedenen optischen Medien (Luft, Plexiglas, Wasser) und deren Grenzflächen sowie der Messpositionen war eine Optimierung des Systems hinsichtlich Brennweite, Messvolumengröße notwendig. Hinzu kamen lokale Inhomogenitäten in den Scheiben aufgrund von Spannungsdoppelbrechung, vorhandene Dickenänderungen der Plexiglasscheiben, Wölbung der Scheiben bei Betrieb der Kanäle mit Unter- und Überdruck sowie die chromatische Dispersion der Medien. Insgesamt konnte jedoch festgestellt werden, dass sich die Justage der Sendeoptik bei ausreichender Laserleistung und moderater Größe des Messvolumens einfacher zeigte als erwartet.

Empfangsseitig wurde eine HiDense PDA Optik eingesetzt, bei der das örtliche Filter zur Definition der Detektionsvolumina (Slits und Pinholes) verändert werden kann und damit eine Optimierung hinsichtlich Partikelkonzentration, Datenrate, Bereich der Signalgenerierung und Genauigkeit der Konzentrationsmessungen möglich ist. Gemessen wurde mit einer 3-Detektor-Standardanordnung, da die Koninzenz zwischen den beiden Geschwindigkeitskanälen aufgrund der Aberrationen und chromatischen Dispersion nicht immer gewährleistet werden konnte. Dementsprechend war das verwendete Phasen-Doppler System nicht sensitiv auf nicht-sphärische Blasen. Das Blasengrößenspektrum zeigt jedoch, dass nur sehr wenige große deformierte Blasen in der Strömung vorhanden sind. Als Aperturmaske für die Empfangsoptik wurde eine unsymmetrische Maske gewählt, um durch den Gausstrahleffekt gestörte Signale nicht zu validieren. Laut Albrecht et al. 2003 Abb. 8.3a ist für Blasen in Luft ein Streuwinkel von 88° bei paralleler Polarisierung vorteilhaft. Unter Berücksichtigung der Brechung aus dem Kanal heraus wurde der Empfänger unter $87,3^\circ$ positioniert.

Sende- und Empfangsoptik waren auf einer 5-Achsen-Traversierung montiert und konnten senkrecht zur Hauptströmungsrichtung unabhängig voneinander positioniert werden. Die unabhängige Positionierung ist aufgrund der Reduzierung der optischen Weglängen innerhalb des Kanals notwendig.

Für jeden Betriebspunkt der Kanäle wurden maximal 20000 validierte Phasen-Doppler Signale in einer maximalen Messzeit von 10min aufgenommen. Diese Messungen konnten wegen des rel. großen Zeitbedarfs nur für ausgewählte Parameter durchgeführt werden. Variiert wurden dabei die Sauerstoffsättigung, der Druck, der Anstellwinkel sowie die Anströmgeschwindigkeit.

Signal- und Datenverarbeitung

Das Blasenspektrum hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kavitation. Es unterscheidet sich jedoch von Kanal zu Kanal. Ziel der Messungen sind daher quantitative Aussagen zur Keim- bzw. Blasenkonzentration und zur Blasengrößenverteilung innerhalb der Zuströmung um eine Vergleichbarkeit der Kanäle anzustreben. Hinzu kommt, dass neben den strömungsinduzierten Blasen kleine Feststoffpartikel (Abrieb, organische Partikel) in allen Kanä-

len vorhanden sind. Diese unterscheiden sich ebenfalls von Kanal zu Kanal je nach Sauberkeit des Wassers hinsichtlich der Konzentration. Sie haben aber aufgrund Ihrer Größe und konstanten Konzentration innerhalb eines Kanals nur einen geringen Einfluss auf z.B. Hystereseeffekte der Kavitation.

Prinzipiell ist die klassische Phasen-Doppler Technik nicht in der Lage zwischen Blasen und Feststoffpartikel zu unterscheiden. Bei fast allen kommerziellen Phasen-Doppler Systemen steht jedoch für eine Messbereichserweiterung und eine zusätzliche Validation ein dritter Empfänger zur Verfügung. Entsprechend können zwei linear unabhängige Phasendifferenzwerte und damit Partikeldurchmesser berechnet werden. Stimmen beide Messwerte in vorgegebenen Grenzen überein wird von einem sphärischen Partikel ausgegangen. Entsprechend ergibt sich in der Phaseebene der beiden Systeme eine „Sphärizitätsgerade“ in deren Bereich die plausiblen Messwerte entsprechend validiert werden können. In Abbildung 2 (links) ist ein typischer Phasenplot für eine Messung bei geringer Geschwindigkeit und Umgebungsdruck dargestellt. Jeder Punkt entspricht einem Phasen-Doppler Signal. Zu erkennen ist, dass die Phasendifferenzpaare, bis auf eine Häufung im Bereich $(0^\circ, 0^\circ)$ statistisch verteilt sind. Im Bereich der Sphärizitätsgeraden tritt keine signifikante Häufung auf. Die Daten können als Feststoffpartikel interpretiert werden, die aufgrund Ihrer irregulären Oberflächenstruktur keine korrelierte Phasenbeziehung zwischen den Phasen-Doppler Empfängern generieren. Die Häufung im Bereich $(0^\circ, 0^\circ)$ ist typisch für sehr kleine Partikel ($<2\mu\text{m}$). Dieses Ergebnis entspricht auch dem visuellen Eindruck. Die Laserstrahlen sind aufgrund von kleinen Streuzentren im Wasser stets sichtbar. Bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten sind darüber hinaus einzelne Streulichtsignale zu erkennen.

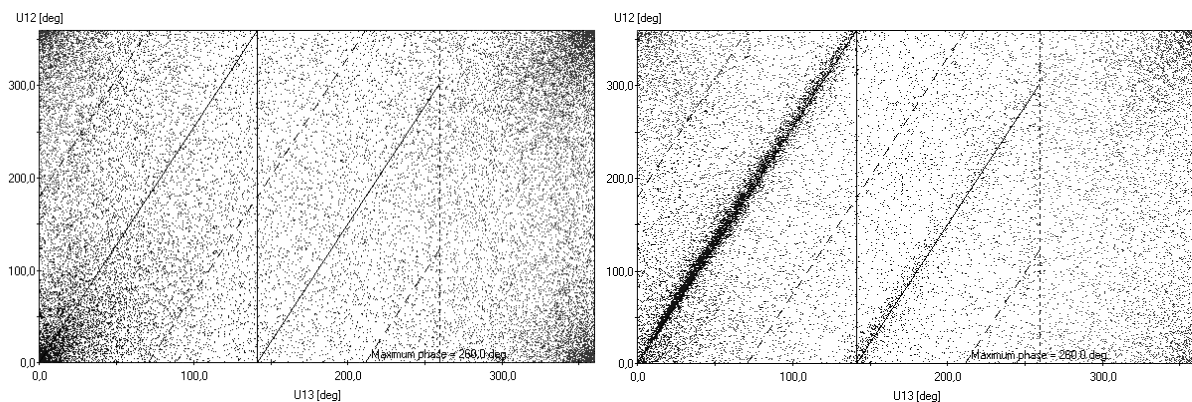


Abb. 2: Phasen-Doppler Phasendiagramme. links: ohne Kavitation, rechts: mit Kavitation am Modell

Abbildung 2 rechts zeigt ein typisches Phasendiagramm der gleichen Messreihe mit Kavitation. Zu erkennen sind die wieder die statistisch verteilten Hintergrundsignale der Feststoffpartikel. Darüber hinaus tritt im Bereich der Sphärizitätsgeraden eine Signalhäufung auf, die die Blasen in der Strömung repräsentiert. Bei der Standardauswertung, die lediglich Signale aus dem Sphärizitätsband berücksichtigt, ergeben sich falsche Größenverteilungen aufgrund der Hintergrundsignale. Aus diesem Grunde wurde eine neue Datenverarbeitung zur Korrektur der Blasengrößenverteilungen entwickelt.

Für eine quantitative Bestimmung der Konzentration müssen die gemessenen Größenverteilungen korrigiert werden. Kleine Partikel streuen weniger Licht, dementsprechend ist die Detektionsfläche kleiner und sie werden weniger häufig detektiert. Große Partikel dagegen werden von der Anzahl überschätzt. Die Korrektur erfolgte anhand der Signallänge. Das Vorgehen ist in Albrecht et al. 2003 erläutert. Aus zeitlicher Burstlänge und Geschwindigkeit kann eine Detektionslänge bestimmt werden, die für eine Partikelgröße bei Durchtritt durch das Messvolumenzentrum maximal wird. Die Signale der Feststoffpartikel stören diese Verteilungsfunktion, weshalb die partikelgrößenabhängige Korrekturfunktion mittels Regression

bestimmt wurde. Im Ergebnis ergibt sich unter Annahme eines quadratischen Anstiegs der Streulichtleistung mit der Partikelgröße ein partikelgrößenabhängiger Korrekturfaktor. Mittels des Korrekturfaktors kann der größenabhängige Partikelfluss bzw. die Partikelkonzentrationsverteilung bestimmt werden.

Nach Anwendung dieser Datenverarbeitung auf die Partikelsignale in einem 10%-Sphäritätsband ergeben sich die hellgrauen Durchmesserverteilungsfunktionen in Abbildung 3. Speziell für die Messung ohne Blasen (links) ist die Verteilungsfunktion offensichtlich falsch, da davon ausgegangen werden kann, dass keine Blasen in der Strömung vorhanden sind. Aufgrund der statistischen Verteilung der Feststoffsignale in der Phasenebene kann jedoch eine Korrektur erfolgen. Das Vorgehen ist in Abbildung 4 dargestellt.

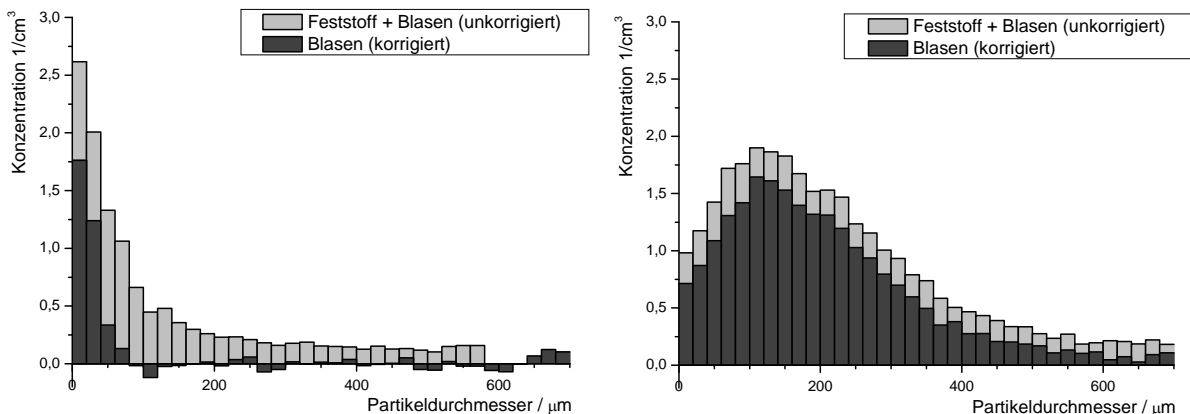


Abb. 3: Unkorrigierte und korrigierte Blasengrößenverteilungen für die zwei Betriebszustände aus Abbildung 2 ohne Kavitation (links) und mit Kavitation (rechts).

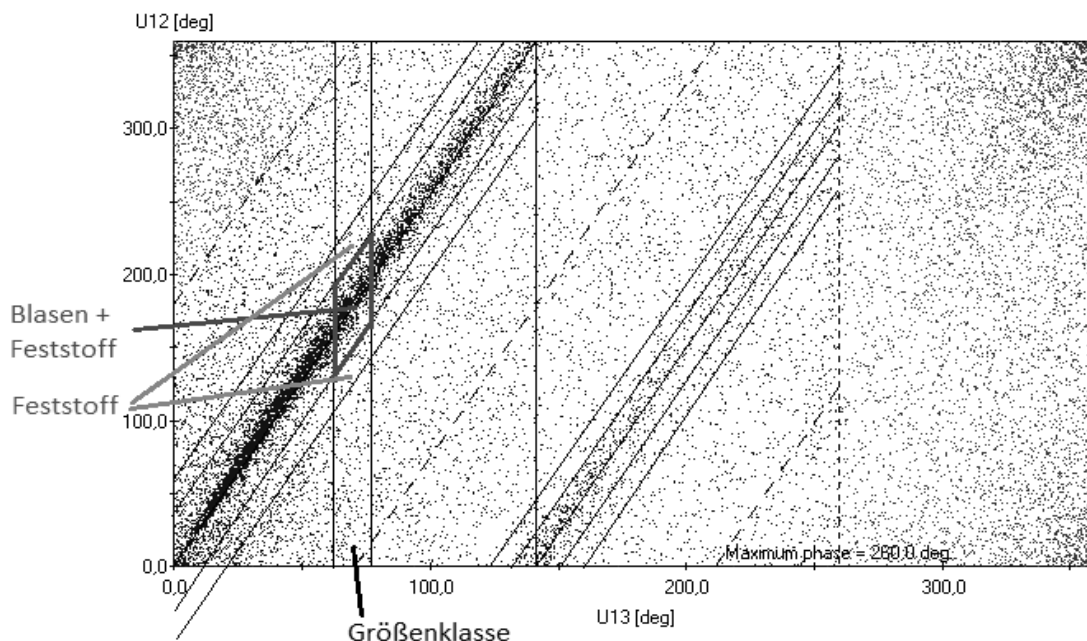


Abb. 4: Phasendiagramm mit eingetragenen Bereichen zur Korrektur der Durchmesserverteilung

Zu den Blasensignalen einer Größenklasse im Sphäritätsband addieren sich die Feststoffsignale (Bereich Blasen+Feststoff). Die Anzahl dieser Feststoffsignale kann jedoch aus der Dichte der Signale in der Umgebung geschätzt werden (Bereich Feststoff). Dementsprechend wurde jeweils der prozentuale Anteil in den Verteilungsfunktionen abgezogen. Die korrigierten Durchmesserverteilungen sind in Abbildung 3 als dunkelgraue Histogramme zu sehen. Ab der vierten Größenklasse konnte der Einfluss störender Feststoffpartikel nahezu

eliminiert werden. In den ersten drei Größenklassen war die Korrektur aufgrund der höheren Signaldichte im Bereich ($0^\circ, 0^\circ$) nicht vollständig möglich. Für den konkreten Anwendungsfall der Blasenmessung in Kavitationskanälen ist dies jedoch kaum störend, da kleine Blasen nur geringe Konzentrationen aufweisen. Zu erkennen ist dies in Abbildung 4. Die Dichte der Blasen signale im Bereich der Sphärizitätsgeraden nimmt zu kleinen Phasendifferenzen hin ab. Grund hierfür ist, dass die am Modell und am Propeller generierten Blasen bis zur Messposition eine relativ lange Wegstrecke zurücklegen und dabei bereits in Lösung gehen. Verifiziert wurde dies anhand einer Messung mit einem Kavitator. Bei diesem Versuch wurden die Blasen direkt vor dem Phasen-Doppler-Messvolumen generiert. Abbildung 5 zeigt u.a. das Phasendiagramm. Zu erkennen sind Blasen signale auch für kleinere Phasendifferenzen. Dies zeigt, dass das System sensitiv gegenüber kleinen Blasen ist, diese aber in den eigentlichen Kavitationsmessungen nicht vorhanden sind.

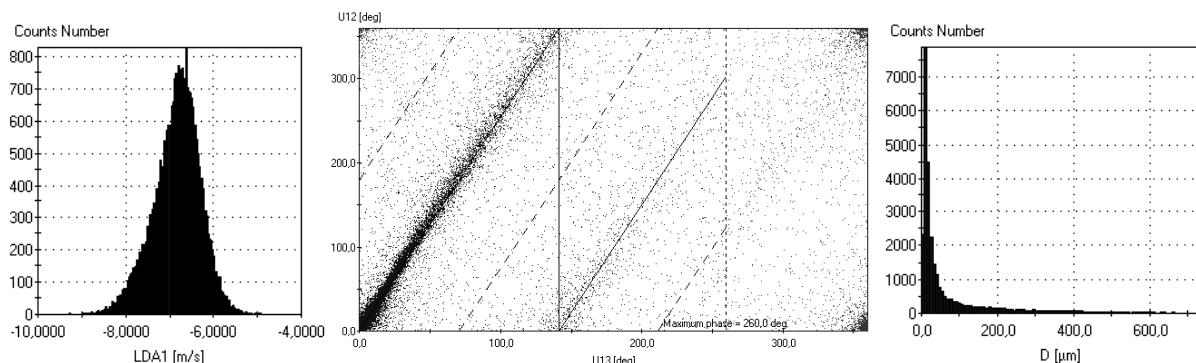


Abb. 5: Geschwindigkeitsverteilung (links), Phasendiagramm (Mitte) und Partikelgrößenverteilung (rechts) für Referenzmessungen direkt hinter einem kavitierenden Körper.

Ausgewählte Messergebnisse

Am HYKAT wurden Messungen des Blasenspektrums bei leerer Messstrecke für verschiedene Sauerstoffsättigungen und Drücke vorgenommen. Bei anfangs 104% Sauerstoffsättigung trat beim Übergang von 0,75 bar auf 0,5 bar Druck in der Messstrecke eine zweigipflige Blasengrößenverteilung mit Maxima bei $30\mu\text{m}$ und $70\mu\text{m}$ auf. Bei niedrigerem gelöstem Gasgehalt setzt die Blasengenerierung in der Strecke erst bei niedrigerem Druck ein. Es bleibt die Grenze bei ca. $25\mu\text{m}$ unter der kaum Blasen auftraten.

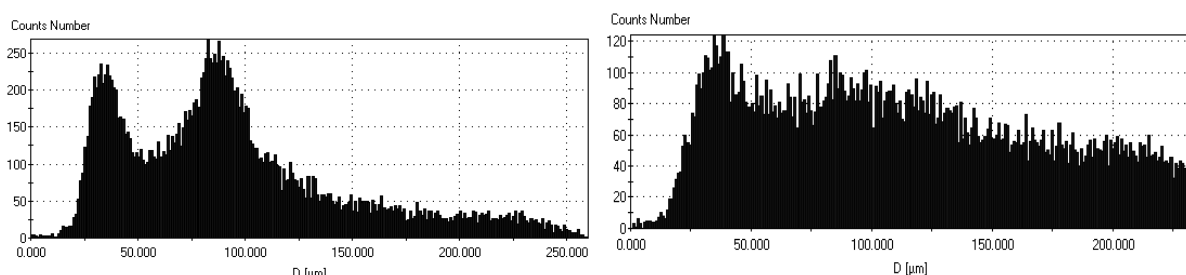


Abb. 6: Blasengrößenverteilung am HYKAT links: 104%O₂, 0,5bar rechts: 92,2%O₂, 0,45bar

Ein Beispiel für die Blasengenerierung durch das Modell zeigen die Messungen am 2D-Profil im K15A der SVA-Potsdam. Nach Anwendung der oben beschriebenen Korrektur zur Eliminierung der Signale von Feststoffpartikeln tritt die Größenverteilung der Blasen deutlich hervor, die am kavitierenden Tragprofil erzeugt werden und einmal im Tank umlaufen (Bild 7b).

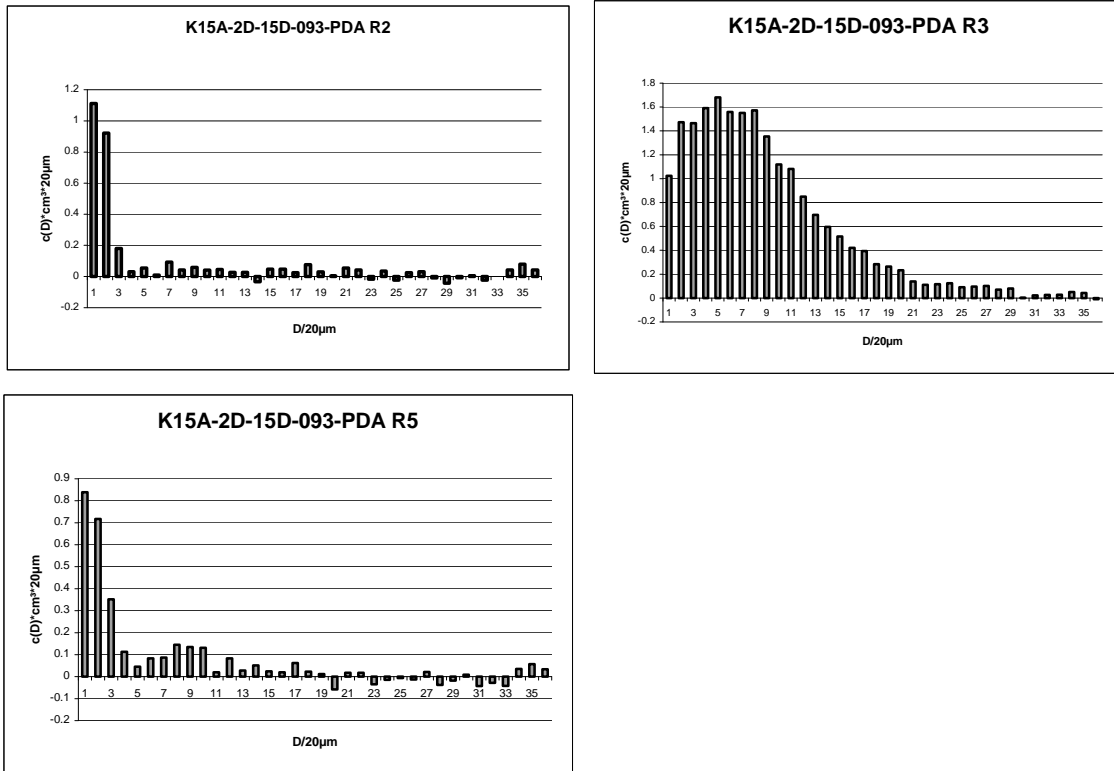


Abb. 7: Blasenspektren bei Einsatz der Kavitation ($\sigma=5,5$), bei Kavitation ($\sigma=3$) und bei Verschwinden der Kavitation ($\sigma=6,3$) aufgrund von Druckänderungen

Schlussfolgerungen

Das PDA-Verfahren konnte an allen untersuchten Kanälen zur Keimpektrummessung verwendet werden. Trotz Verwendung der größtmöglichen Abtastfläche waren für die aufgetretenen Blasenkonzentrationen Messzeiten von mindestens 10min erforderlich. Eine Messzeitverkürzung bedarf Änderungen an der Optik zur weiteren Vergrößerung der Abtastfläche und u.U. eine Erhöhung der Laserleistung.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt, der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam und dem Fachgebiet Dynamik maritimer Systeme der TU Berlin für die Unterstützung während der Versuche. Ein Dank geht ebenfalls an den Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Rostock für die äußerst umfangreiche Nutzung der Kavitationskanals, an Herrn Dr. Weitendorf für die kompetente Beratung und an das Institut für Fluidodynamik & Schiffstheorie der TU Hamburg Harburg für die Kooperation bei der Planung der Versuche. Die Arbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Verbundvorhabens KonKav (Forschung zur Korrelation von Kavitationseffekten und Erosion unter Berücksichtigung von Wassereigenschaften und Nachstrom) gefördert.

Literatur

- Albrecht H.-E., Borys M., Damaschke N. und Tropea C. (2003) Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Springer-Verlag.
- Arndt, R. E. A. and B. H. Maines (1994). Viscous effects in tip vortex cavitation and nucleation NRC, Naval Studies Board, 20th Symp on Naval Hydrodynamics, Santa Barbara, CA.
- Arndt, R. E. A. and B. H. Maines (1994). Further studies of tip vortex cavitation. Symp. on Cavitation. Tokyo.
- Asher W. E. und Farley P. J. (1995) Phase-Doppler anemometer measurement of bubble concentrations in laboratory-simulated breaking waves. J. Geophys. Res. 100(C4): 7045-7056.
- Brenn G., Braeske H. und Durst F. (2002) Investigation of the unsteady two-phase flow with small bubbles in a model bubble column using phase-Doppler anemometry. Chemical Engineering Science 57(24): 5143-5159.
- Lain S., Bröder D. und Sommerfeld M. (1999) Experimental and numerical studies of the hydrodynamics in a bubble column. Chemical Engineering Science 54(21): 4913-4920.
- 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.
- Tsochatzidis N. A., Guiraud P., Wilhelm A. M. und Delmas H. (2001) Determination of velocity, size and concentration of ultrasonic cavitation bubbles by the phase-Doppler technique Chemical Engineering Science 56(5): 1831-1840.