

ERWEITERUNG DER ZEITVERSCHIEBUNGSTECHNIK AUF BLASENMESSUNGEN AN KAVITATIONSKANÄLEN

ENHANCEMENT OF THE TIME-SHIFT-TECHNIQUE TO BUBBLE MEASUREMENTS AT CAVITATION CHANNELS

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

Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Albert Einstein Str. 2, 18059 Rostock

Zeitverschiebungsverfahren (ZVV), Blasencharakterisierung, Kavitation, Kavitationskanal
Time-Shift-Technique (TST), Bubble measurements, Cavitation Channel

Zusammenfassung

Der Beitrag behandelt die Adaption des Zeitverschiebungsverfahrens zur Charakterisierung von Blasen. In bisherigen Experimenten wurde das ZVV an Wassertropfen im Vergleich zur Phasen-Doppler-Technik validiert, die Größenbestimmung von irregulären Partikeln gezeigt und eine Konzentrationsbestimmung in Emulsionstropfen durchgeführt.

Vorgestellt wird die Generierung des Zeitverschiebungssignals für Blasen anhand von Simulationen. Diese zeigen, dass die Reflexion zur Zeitverschiebungsmessung genutzt werden kann. Dargestellt wird weiterhin die Anwendung des Zeitverschiebungsverfahrens bei der Größenbestimmung von Einzelblasen in einer Laborblasensäule. Dies stellt einen ersten Nachweis dar, dass die Größenbestimmung von Blasen mit dem System möglich ist. Zur Erzeugung der ZV-Signale wird ein modifizierter Aufbau mit einer astigmatischen Laserdiode und mehreren Zeitverschiebungsempfängern verwendet. Weiterhin werden erste Messungen von Blasen in einem Kavitationskanal präsentiert.

Einleitung

Die Charakterisierung von Tropfen und Partikeln spielt für eine Vielzahl industrieller Anwendungen eine große Rolle um Prozesse zu verstehen oder zu überwachen. Das Zeitverschiebungsverfahren als optische Punktzähltechnik erlaubt die Charakterisierung von Tropfen und Partikeln. In bisherigen Veröffentlichungen wurde die Validation des Systems im Vergleich zur kommerziell erhältlichen Phasen-Doppler-Technik an einem Wasserspray präsentiert (Kretschmer et al. 2006). Das große Anwendungspotential der Technik wurde an Hand der Untersuchung von irregulär geformten Partikeln wie Eiskristallen und Schneeglomerationen gezeigt (Kretschmer et al. 2007). Zudem wurden Experimente zur Konzentrationsbestimmung von Sekundärflüssigkeiten in Emulsionstropfen erfolgreich durchgeführt (Kretschmer and Damaschke 2010). Eine detaillierte Beschreibung des Systems hinsichtlich der Signalentstehung und Änderung für verschiedene Partikelklassen sind in (Kretschmer 2011) zu finden. Dort wird ebenfalls der Einfluss verschiedener Systemparameter, wie Lichtschnittausdehnung, Polarisierung, Spektralbreite der Lichtquelle oder Empfängerwinkel und Empfängerapertur diskutiert.

Im Rahmen des vom BMWI geförderten Verbundprojektes Korrelation von Kavitationseffekten und Erosion unter Berücksichtigung von Wassereigenschaften und Nachstrom (KonKav)

werden die Kavitationskanäle K22 und HYKAT der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) der K15A der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) sowie der Kavitationskanal K27 an der TU-Berlin und der K21 der Universität Rostock quantitativ hinsichtlich Ihrer Wasserqualität verglichen. Die Bestimmung der Wasserqualität bezieht sich dabei neben den Größen wie Sauerstoffsättigung und Zugspannungsfestigkeit hauptsächlich auf die Keimkonzentration, da diese entscheidenden Einfluss auf die Kavitationserscheinungen hat. Problematisch für z.B. Phasen-Doppler Messungen sind jedoch der eingeschränkte optische Zugang, die Justage aufgrund der Aberrationen sowie das Vorhandensein von Feststoffpartikeln und Blasen. Eine Unterscheidung beider dispersen Phasen ist notwendig, da im Wesentlichen die Blasen als Kavitationskeime wirken. Das Zeitverschiebungsverfahren bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Phasen-Doppler Technik, da es in Rückstreuung misst, kompakt aufgebaut und einfach traversiert werden kann und das Potential besitzt Blasen und Feststoffpartikel voneinander zu unterscheiden. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit, wird die prinzipielle Eignung der Zeitverschiebungstechnik für Blasenmessungen demonstriert und erste Messungen an Blasensäulen und im Kavitationskanal K21 der Universität Rostock vorgestellt.

Signalgenerierung für Luftblasen

Die Zeitverschiebungstechnik bestimmt die Positionsdifferenz der Einfallspunkte auf der Partikeloberfläche. Abgesehen von der Proportionalität des Abstandes der Einfallspunkte von der Partikelgröße sind die relative Lage der Einfallspunkte und die beitragenden Streulichtordnungen abhängig vom Brechungsindex und Streulichtwinkel. Dementsprechend müssen zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors zwischen Zeitverschiebung und Partikelgröße sowie zur Identifikation der Streulichtordnungen Streulichtsimulationen durchgeführt werden. In Abbildung 1 (links) ist ein Zeitverschiebungssignal in 30° Rückstreuung für eine 100µm große Blase in Wasser dargestellt. Es ergibt sich ein ausgeprägtes Zeitverschiebungssignal mit mehreren Anteilen. Zur Identifikation der Streulichtanteile ist in Abbildung 1 (rechts) das Zeitverschiebungssignal mittels Debye Reihen in Streulichtanteile zerlegt worden (Albrecht et al. 2003). Die größten Signalanteile tragen die Oberflächenreflexion und die Brechung 2. und 3. Ordnung bei.

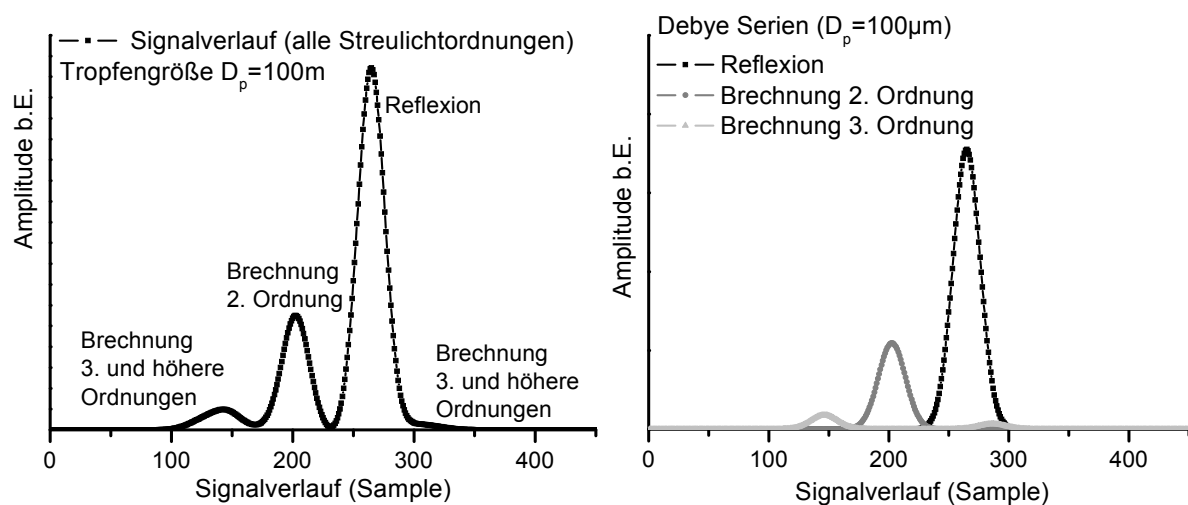


Abb. 1: Zeitverschiebungssignal einer 100µm großen Blase in Wasser (links) sowie Signalanteile der Streulichtordnungen ermittelt über Debye Reihen (rechts)

Es ist zu erkennen, dass das amplitudenstärkste Signal von der Reflexion des Laserstrahls auf der Blasenoberfläche erzeugt wird, gefolgt von der Brechung 2. und 3. Ordnung. Höhere Brechungsordnungen haben keinen signifikanten Einfluss auf das Gesamtsignal.

Zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors zwischen Zeitverschiebung und Partikelgröße wurden die Zeitverschiebungssignale für einen Durchmesserbereich von 15µm bis 250µm simuliert und die Zeitverschiebung zwischen den Signalmaxima bestimmt. Die Abhängigkeit ist in Abbildung 2 gezeigt. Für große Partikel ergibt sich der erwartete monotone lineare Zusammenhang. Der Anstieg der Funktion beträgt 0,265 µs/µm. Die Simulationen wurden mit einer Geschwindigkeit von 1m/s durchgeführt. Damit berechnet sich die Partikelgröße aus der Zeitverschiebung der Reflexionspeaks zu

$$d_p = F_{Ref} \Delta t = 3,77 \frac{\mu\text{m}}{\mu\text{s}} \Delta t$$

Der Korrekturfaktor kann auch mit Hilfe der geometrischen Optik bestimmt werden. Der Einfallswinkel der Reflexion θ_i auf der Kugeloberfläche und der inverse Korrekturfaktor ergeben sich bei bekanntem Streuwinkel ϑ zu

$$\theta_i = 90^\circ - \frac{\vartheta}{2} \quad \frac{1}{F_{Ref}} = \sin(\theta_i)$$

Für den angenommenen Fall der 30° Rückstreuung ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von $F_{Ref} = 3,86 \mu\text{m}/\mu\text{s}$. Die Abweichung von 2,3% geht wahrscheinlich auf den Einfluss anderer Streulichtordnungen zurück. Der Korrekturfaktor für die Brechung 2. Ordnung beträgt nach der geometrischen Optik $F_{Bre2} = 14,03 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ und für die beiden Lösungen der Brechung 3. Ordnung $F_{Bre3a} = -1,86 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ und $F_{Bre3b} = 3,891 \mu\text{m}/\mu\text{s}$. Die Anteile sind entsprechend in der rechten Grafik der Abbildung 1 anhand der lokalen Maxima der Streulichtordnungen nachvollziehbar. Damit ist die Reflexion nicht nur die Streulichtordnung mit der höchsten Intensität sondern besitzt auch fast die stärkste Sensitivität.

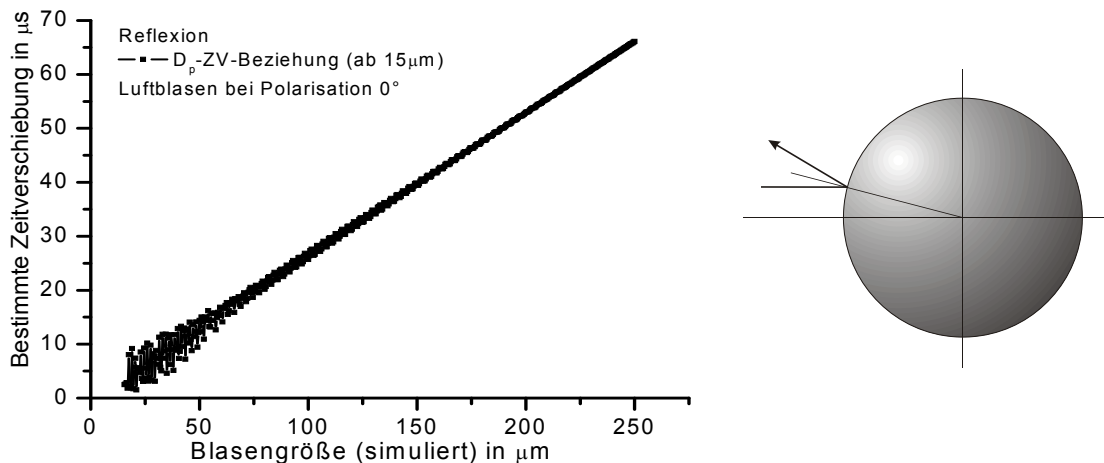


Abb. 2: Simulierte Zeitverschiebung für Luftblasen in Wasser für 0° / 45° / 90° Polarisation

Im Gegensatz zur Zeitverschiebungs-Durchmesser Beziehung bei Wassertropfen in Luft liegt keine Polarisationsabhängigkeit vor. Die Oszillationen bzw. Mehrdeutigkeiten unterhalb ca. 60µm resultieren aus den Interferenzen zwischen den beteiligten Streulichtordnungen. Sie entsprechen dabei den Streulichtkeulen, die lokal die Intensität über der Empfängerapertur beeinflussen. Dabei verschiebt sich die Position des Hauptmaximums der Reflexion. Untersuchungen an Wassertropfen in Luft haben gezeigt, dass die Oszillationen mittels einer Breibandquelle oder mittels einer größeren Apertur reduziert werden können (Kretschmer 2011). Die dargestellte Durchmesserbeziehung ist für einen Punktempfänger und eine Lichtschnitt-

dicke von 15µm berechnet worden. Zu erwarten ist eine eindeutige Zuordnung bis zu einer Partikelgröße im Größenbereich des Laserlichtschnitts, wenn, wie in den Experimenten, ein ausgedehnter Empfänger genutzt wird.

Messsystem

Um Kavitationsexperimente quantitativ beschreiben zu können, soll im Rahmen des vom BMWI geförderten Projektes KonKav (Korrelation von Kavitationseffekten und Erosion unter Berücksichtigung von Wassereigenschaften und Nachstrom) die Wasserqualität in verschiedenen Kavitationskanälen untersucht werden. Dies erfordert eine Analyse des am Kavitationsgeschehen teilnehmenden Keimspektrums und damit eine Unterscheidung von Blasen und Feststoffpartikeln sowie eine Blasengrößenbestimmung in der Anströmung der Flügelprofile. Eingesetzt werden kann die Phasen-Doppler Messtechnik zur Größenbestimmung der Blasen. Diese erfordert jedoch zwei optische Zugänge und ist aufgrund der unabhängig zu traversierenden Sende- und Empfangsoptik aufwendig zu justieren. Dementsprechend soll perspektivisch die Zeitverschiebungstechnik in den Kavitationskanälen genutzt werden. Der optische Zugang zu den Kanälen durch Plexiglasscheiben und die größeren räumlichen Abmessungen der Messstrecke bedingen eine höhere Laserleistung für die Generierung des Laserlichtschnitts als in den bisherigen Anwendungen des Zeitverschiebungsverfahrens (Kretschmer 2011). Daher wird eine blaue Laserdiode mit 445 nm Wellenlänge und einer maximalen Laserleistung von 1W verwendet. Diese ist in eine kommerzielle Laser-Doppler-Sendeoptik der Firma Dantec Dynamics integriert worden. Um vergleichende Messungen an den verschiedenen Kanälen durchführen zu können, muss der Messaufbau kompakt und leicht zu positionieren sein. Sende und Empfangsoptiken wurden daher auf einen gemeinsamen Träger montiert. Sowohl der schematische Aufbau als auch das realisierte Messsystem sind in Abbildung 3 dargestellt.

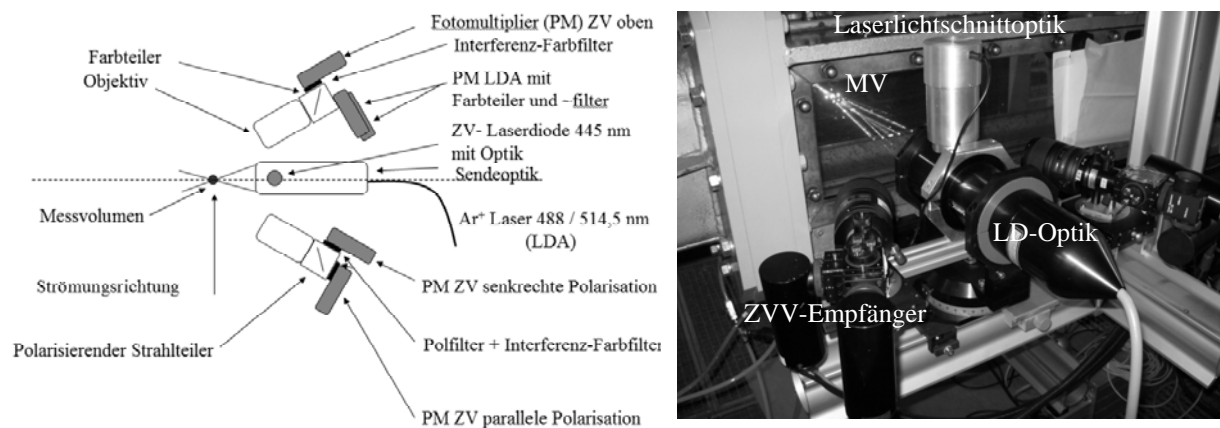


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Messsystems (links), Messsystem am Kavitationskanal (rechts)

An der oberen bzw. linken Empfängeroptik wird über einen farbselektiven Strahlteiler eine Trennung des LDA-Signals mit 488 bzw. 514,5nm von dem ZV-Signal mit 445 nm vorgenommen. Die LDA-Anteile werden über ein weiteres wellenlängenspezifisches Teilelement auf die beiden Komponenten (Geschwindigkeit in Strömungsrichtung und die Querkomponente) aufgeteilt und je einem Fotomultiplier (PM) zugeführt. Die Zeitverschiebungssignale werden ebenfalls über einen PM zur nachfolgenden Digitalisierung verstärkt. Die untere Optik empfängt ausschließlich ZV-Signale, wobei diese über einen Polarisationsstrahlteiler in die senkrechte und parallele Komponente geteilt und je einem PM zugeführt werden. Grund hierfür ist, dass in den zu untersuchenden Wasserströmungen sowohl Feststoff- als auch

Blasen vorhanden sind. Die Streuung an den Blasen ist polarisationserhaltend. Wie in Kretschmer 2011 dargestellt wurde, depolarisieren Feststoffpartikel mit einer rauen Oberfläche und Inhomogenitäten das einfallende Licht. Entsprechend kann durch Vergleich der beiden Polarisationskomponenten und Analyse der Struktur der Zeitverschiebungssignale eine Trennung zwischen beiden Phasen vorgenommen werden. Da die eingesetzten Farb- und Polarisationssteiler keine 100% Trennung der Komponenten ermöglichen, befinden sich vor jedem Fotomultiplier entsprechende Interferenz- bzw. Polarisationsfilter um ein Übersprechen zwischen den Kanälen zu vermeiden.

Die Signalaufnahme erfolgt mit einem Datenerfassungssystem der Firma National Instruments (NI PXI-Express). Insgesamt sind 4 Datenerfassungskarten mit jeweils zwei Kanälen im System implementiert. Zwei Karten, bzw. 4 Kanäle mit maximal 100MHz Samplerate und 14bit (NI-5122) erfassen die drei Zeitverschiebungssignale (2×polarisiert und 1×depolarisiert). Vier weitere Kanäle mit 250MHz Samplerate und 10bit (NI-5114) erfassen zum einen die beiden Laser-Doppler Geschwindigkeitssignale über die Zeitverschiebungsoptiken (oberer Empfänger in Abbildung 3 links). Zum anderen werden die zwei weiteren Kanäle dazu genutzt, entweder koinzidente Geschwindigkeitsmessungen in Rückstreuung durchzuführen oder koinzident Signale einer Phasen-Doppler Sonde zu erfassen. Eine Erfassung der Phasen-Doppler Signale mit dem Datenerfassungssystem und nicht mit dem vorhandenen kommerziellen Prozessor ist notwendig, da aufgrund der Zeitregime und Verarbeitungsschritte im kommerziellen Phasen-Doppler Prozessor keine direkte koinzidente Kopplung beider Systeme möglich ist. Für den direkten Vergleich einzelner Partikel müssen die Daten synchron mit dem Datenerfassungssystem aufgenommen werden.

Die Datenerfassungskarten haben jeweils einen internen Speicher von 500MB. Für eine effektive Nutzung ist dieser Speicher segmentiert und nur die eigentlichen Signale werden nach Überschreiten eines Amplitudentriggers separat abgelegt. Aufgrund der geringen Partikeldichte und des geringen Prozentsatzes der Signalzeit an der Messzeit können so trotzdem mehrere tausend Signale ohne Totzeit gespeichert werden. Die Auswertung der Signale erfolgt offline mit LabView. Nach einer Filterung zur Rauschunterdrückung werden für die Zeitverschiebungssignale die lokalen Maxima im Signal mit verschiedenen Auswerteverfahren bestimmt. Zur Validierung der Signale werden die geschätzten Parameter der verschiedenen Auswerteverfahren miteinander verglichen.

Messungen

Abbildung 4 zeigt einen Versuchsaufbau zur Verifikation der Zeitverschiebungstechnik mittels einer elektrolytisch generierten Blasensäule. Rechts oben ist in Abbildung 4 beispielhaft die Korrelation zwischen den geschätzten Zeitverschiebungen aus unterschiedlichen Auswerteverfahren dargestellt. Soweit beide Verfahren gleiche Zeitverschiebungen liefern gehen die Partikel in die Größenstatistik ein. Ein Histogramm für die Blasensäule ist in Abbildung 4 rechts unten zu sehen. Zu erkennen ist, dass die Blasen wie zu erwarten eine lokale Größenverteilung aufweisen. Die Zeitverschiebungssignale im unteren Bereich werden wahrscheinlich nicht von Blasen sondern von anderen Partikeln innerhalb der Wasserströmung generiert.

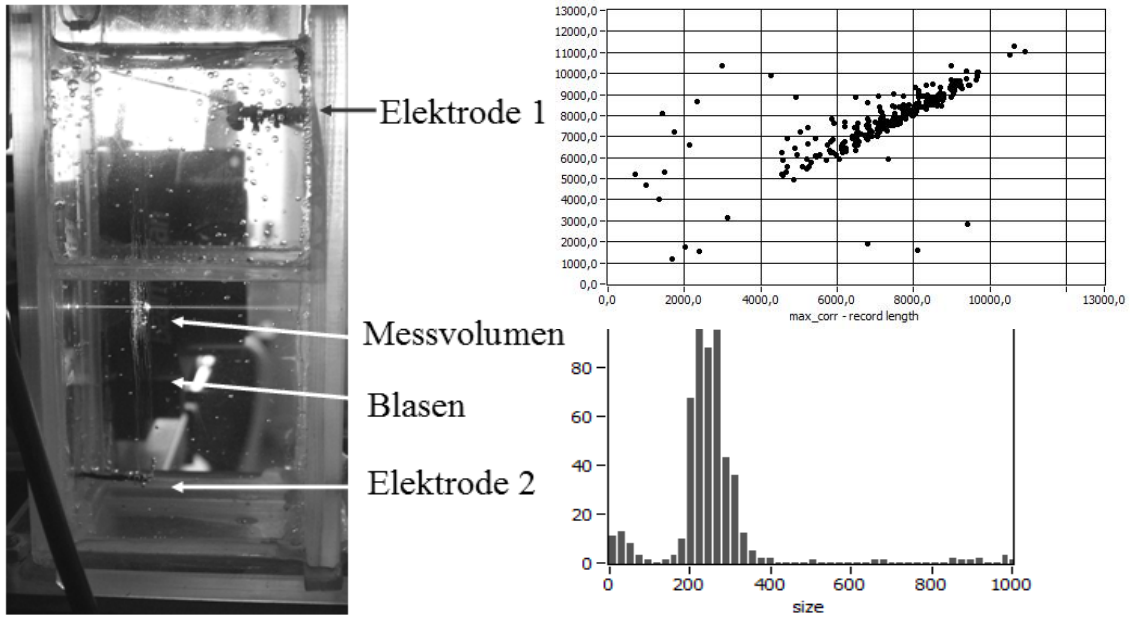


Abb. 4: Messungen an Blasensäule, Links: Messaufbau, Oben: Zeitverschiebungsschätzung, Unten: Größenhistogramm

In Abbildung 5 sind erste Messungen aus dem Kavitationskanal K21 der Universität Rostock dargestellt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 3 auf der rechten Seite zu sehen. Dargestellt ist in Abbildung 5 wiederum die Korrelation der geschätzten Zeitverschiebungen für zwei Schätzverfahren: zeitliche Maximalwertbestimmung und Maximalwertbestimmung durch Kreuzkorrelation der Signale. Zu erkennen ist deutlich dass beide Verfahren für den Großteil der Signale gleiche Zeitverschiebungen schätzen. Auch ist zu erkennen, dass die Anzahl der Partikel mit großen Zeitverschiebungen abnimmt. Für kleine Zeitverschiebungen tritt eine Häufung auf, was sich mit Phasen-Doppler Messungen an dem Kavitationskanal deckt. Diese zeigen neben einem Blasengrößenspektrum sehr viele kleine Feststoffpartikel, die entsprechend kleine Zeitverschiebungssignale generieren.

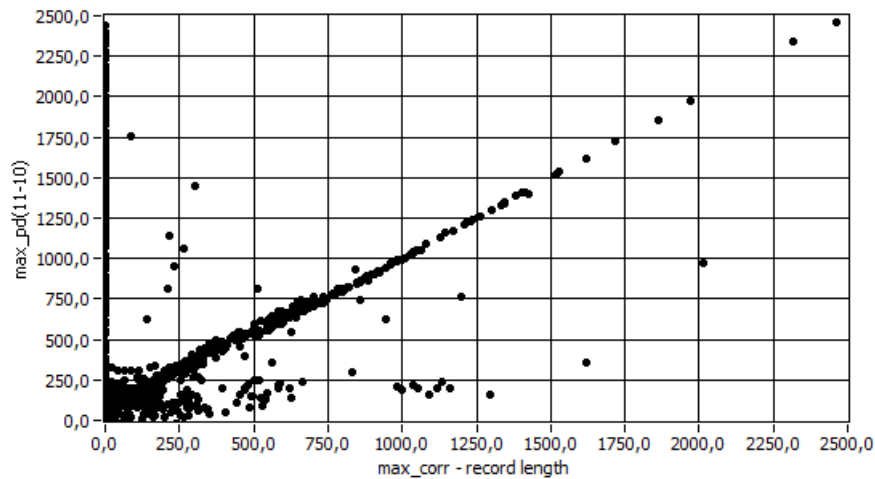


Abb. 5: Validierungsprüfung am Kavitationskanal K21 der Uni Rostock

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich beim Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Rostock für die Unterstützung bei der äußerst umfangreichen Nutzung der Kavitationskanals. 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., and Tropea C. (2003) Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Springer-Verlag.
- Kretschmer A. (2011) Partikelcharakterisierung mit dem Zeitverschiebungsverfahren. Dissertation, University of Rostock, Rostock.
- Kretschmer A., and Damaschke N. (2010) Konzentrationsbestimmung mit dem Zeitverschiebungsverfahren (ZVV). Proceedings of 18. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 7.-9. Sep. 2010, Cottbus.
- Kretschmer A., Damaschke N., Semidetnov N., and Tropea C. (2006) Application of the Time-Shift Technique for Spray Measurement. p. 10-02. Proceedings of 13th Int. Symp on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, 26.-29.06.2006, Lisbon Portugal.
- Kretschmer A., Damaschke N. (2007) Messung irregulärer Partikel mit dem Zeitverschiebungsverfahren, Proceedings of 15. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 4.-6. Sep. 2007, Rostock.