

## Messung instationärer, dreidimensionaler Effekte kavitierender Strömungen an einem Einzelprofil mit Hilfe der PIV / LIF – Messtechnik.

**R. Bachert, B. Stoffel**

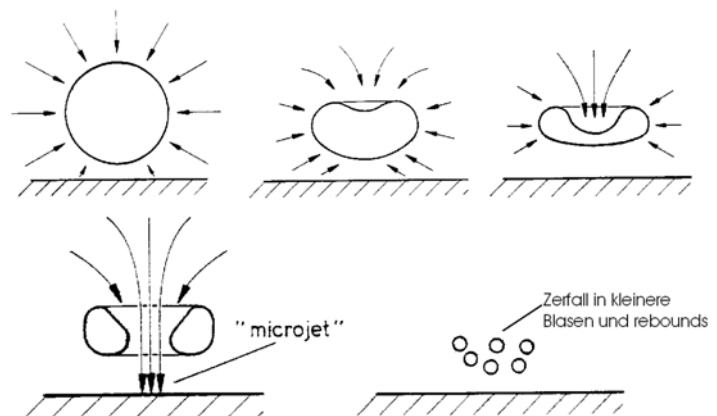
Fachgebiet für Turbomaschinen und Fluidantriebstechnik  
Technische Universität Darmstadt  
Magdalenenstrasse 4, 64289 Darmstadt, Germany  
Tel.: +49-6151-16-2653, Fax.: +49-6151-16-2453  
e-mail: [rbachert@tfa.tu-darmstadt.de](mailto:rbachert@tfa.tu-darmstadt.de)

### 1 Einleitung

Fällt der Druck in einer Flüssigkeit unter den Dampfdruck, entstehen im Allgemeinen mit Dampf gefüllte Blasen, die bei Druckanstieg mit sehr hoher Geschwindigkeit rückkondensieren. In Strömungsmaschinen zeigt sich diese örtlich begrenzte Phasenänderung in Flüssigkeiten infolge hydrodynamischer Druckabsenkung. Geschieht dies in der Nähe einer festen, die Strömung begrenzenden Wand, kann dieser Blasenkolaps den Wandwerkstoff schädigen. Die Strömung ist in diesen Fällen in der Regel durch eine instationäre Zweiphasenströmung charakterisiert. In fluidtechnischen Anlagen, insbesondere in Kreiselpumpen, kann Kavitation zur Zerstörung der fluidführenden Bauteile in den Bereichen der kollabierenden Blasen führen. Zu Anfang erfährt der Werkstoff eine Verdichtung bzw. plastische Verformung, die im weiteren Verlauf in Erosion übergeht. [Abbildung 1.1](#) zeigt den schematischen Verlauf der Rückkondensation einer Einzelblase.

### 2 Versuchsbeschreibung

Die im vorliegenden Artikel präsentierten Ergebnisse zeigen die dreidimensionalen Effekte in kavitierenden Strömungen durch Variation der Geometrie des Versuchsobjektes sowie strömungsspezifischer Parameter. Die Experimente wurden an einem geschlossenen Kreislauf mit den entsprechenden optischen Zugangsmöglichkeiten durchgeführt. Der Querschnitt der Messstrecke beträgt 50mm x 100mm (Breite x Höhe). Untersucht wurden zwei Platteneinzelprofile mit unterschiedlichen Vorderkantenpfeilwinkeln und Anstellwinkeln bei verschiedenen Kavitationszahlen. [Abbildung 2.1](#) zeigt den Versuchsprüfstand mit der Messstrecke. In dieser werden für die Versuche die Platteneinzelprofile implementiert. Die Untersuchungen sollen zur Analyse der Phänomene dienen und exemplarische Ergebnisse für die Validierung von numerischen Berechnungsergebnissen für die kavitierende Strömung und deren Auswirkung auf die Energieumsetzung in Kreiselpumpenlaufrädern liefern. Die hier vorgestellten Untersuchungen waren Teil des Forschungsvorhabens „*Entwicklung und experimentelle Validierung eines Codes zur numerischen Berechnung kavitierender Strömungen in Kreiselpumpen*“, das vom Forschungsfond Pumpen im VDMA initiiert und gefördert wurde.



**Abbildung 1.1** Wandnaher Blasenkolaps [4]

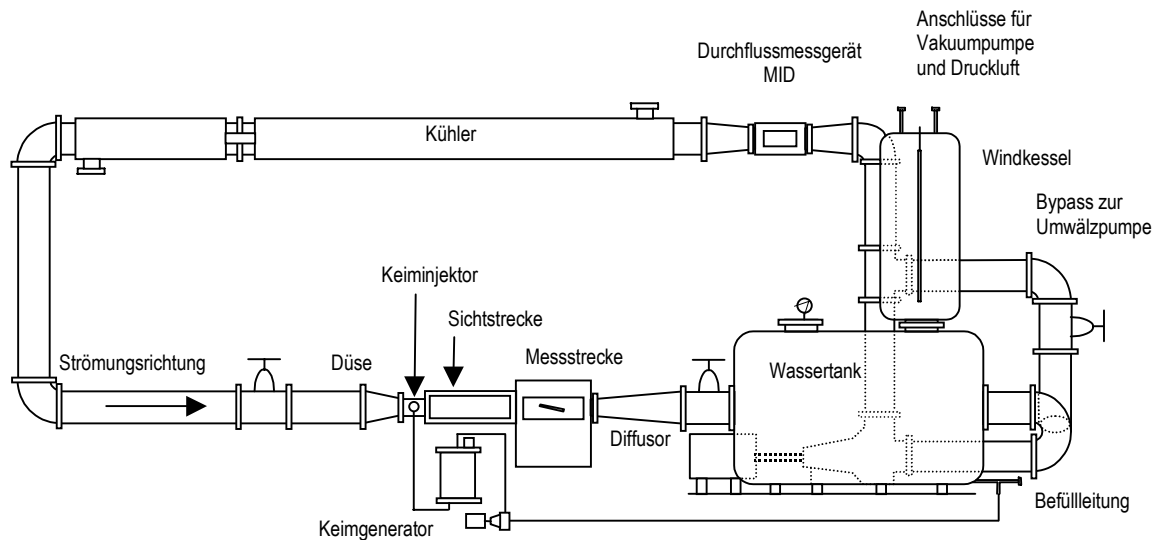


Abbildung 2.1 Versuchsprüfstand

Die optische Zugänglichkeit für den Laser wie für die Bildaufnahmeoptik ist durch Sichtfenster in der Messstrecke gewährleistet. Der verwendete Nd-YAG-Laser beleuchtet die Strömungsprofile vertikal, d.h. es wird ein vertikaler Lichtfächer parallel zur Strömungsrichtung aufgespannt. Die CCD Aufnahmeoptik ist im rechten Winkel horizontal angeordnet. Die Anwendung der fluoreszierenden Tracerpartikel erlaubt die Erfassung kavitierender Strömungszustände mittels PIV und lässt einen Einblick in die Kavitationszone selbst zu. Bei der Anwendung konventioneller Tracerpartikel stören die Reflexionen des Laserlichtes an den Grenzflächen zwischen Flüssigkeits- und Dampfphase die Bildaufnahme durch Überblendung, so dass keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden können.

Um bewusst dreidimensionale Kavitationszonenbildung zu erreichen, werden Strömungsprofile mit gefeilter Vorderkante eingesetzt. Die Vorderkantenschräge, auch Pfeilwinkel genannt, wird variiert, wodurch ein zusätzlicher, die Dreidimensionalität beeinflussender Parameter hinzukommt (Abbildung 2.2). Die Varianten haben einen Pfeilwinkel von  $15^\circ$  bzw.  $25^\circ$ .

Durch einen so genannten „Keimgenerator“, mit in der Anlage integriertem „Keiminjektor“, konnten Mikrokeime in den Wasserkreislauf eingebracht werden. Hierdurch war es möglich die „Wasserqualität“, d.h. den Keimgehalt und somit die für den Kavitationsbeginn ausschlaggebende Zugspannungsfestigkeit des Wassers, zu beeinflussen [2] [4] [5]. Durch auf der Saugseite der Profile angebrachte Druckmessbohrungen konnte zusätzlich zu den Lasermessungen der statische Druck und damit der  $c_p$ -Verlauf ermittelt werden. Die Untersuchungen wurden durch horizontale und vertikale Aufnahmen des Kavitationsgebietes (konventionelle Bilderfassung mittels CCD-Camera und stroboskopischer Auflichtbeleuchtung) und den daraus gewonnenen Mittelwerten und Standardabweichungen der Helligkeitsverteilung ergänzt. Diese geben Informationen über das statische bzw. dynamische Verhalten der Dampfgebiete in der Kavitationszone.

Die vorgenommenen Messungen mit Hilfe des PIV/LIF Lasersystems erfolgten in drei zur Strömungsrichtung parallelen Ebenen. Diese Ebenen lagen in der Mitte des Kanals, sowie 5mm von den begrenzenden Seitenwänden entfernt. Die hier gezeigten Ergebnisse beschränken sich auf die Messungen in der vorderen Lichtschnittebene, (siehe vertikale Lichtschnittebene Abbildung 3.2) da hier der 3D-Charakter der Strömung und der Kavitation besonders stark in Erscheinung tritt. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug bei allen Versuchen  $c=13\text{m/s}$ , die Reynoldszahl  $Re=8,67 \times 10^5$ .

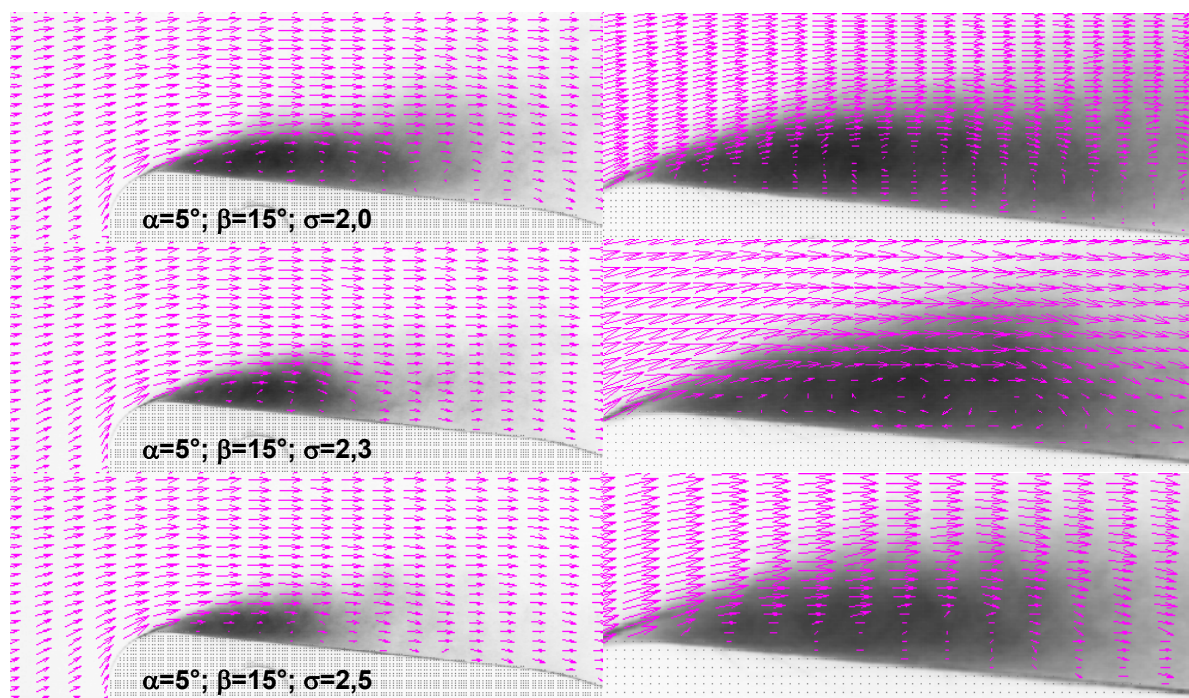


Abbildung 2.2 Strömungsprofile  
Strömungsrichtung von links nach rechts

Für die PIV-Messungen standen ein DANTEC PIV-System mit einem New-Wave 15Hz Doppelpulslaser (max. Pulsenergie 50mJ), eine PCO-Sensi-Cam sowie eine Sony CV-M10 CCD-Kamera zur Verfügung. Als Tracerpartikel wurden fluoreszierende PMMA-Rhodamin B Partikel (1-20 $\mu$ m) eingesetzt. Die Bildaufnahme beider Kameras erfolgte über das System getriggert zeitgleich, so dass ein Doppelbild der Tracerpartikel (PCO Kamera mit Filter) und ein Bild der Kavitationszone (Sony Kamera ohne Filter) entstand. Die Doppelbilder wurden einer Kreuzkorrelation und einer anschließenden Maskierung zugeführt, wodurch die integralen Geschwindigkeiten ermittelt wurden. Durch nachfolgendes Überblenden des erhaltenen Vektorplots mit dem Bild der Kavitationszone entstanden aussagekräftige Ergebnisse, welche die instationären Geschwindigkeitseffekte in der Kavitationszone sowie in der Außenströmung zeigen. Durch Mittelung über eine Anzahl von Aufnahmen wurden die integralen Mittelwerte der Geschwindigkeit, bzw. der Kavitationsausdehnung erhalten. Hierdurch konnten der so genannte Reentrant-jet innerhalb der Kavitationstasche, sowie die Strömungszustände in der abschwimmenden Kavitationswolke erfasst werden.

### 3 Ergebnisse

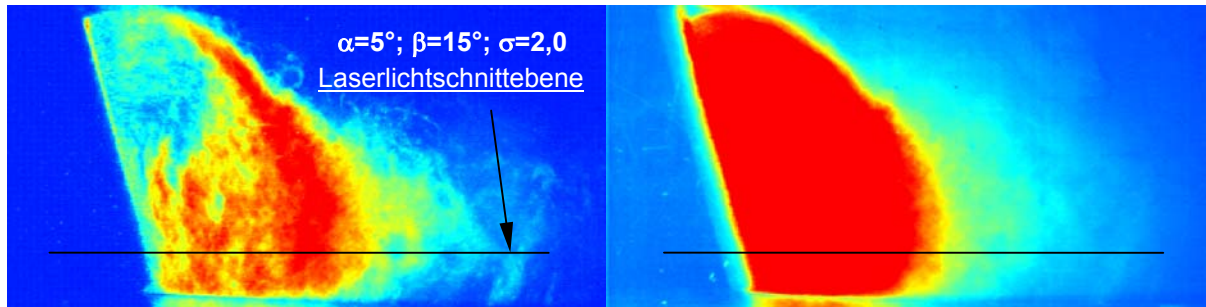
Die Mittelwerte der Messungen, d.h. die Mittelung der Geschwindigkeiten sowie der Ausdehnung der Kavitationsgebiete, geben Aufschluss über das statische Verhalten der Kavitation. Die Mittelwerte, die in [Abbildung 3.1](#) zu sehen sind, entstanden aus jeweils 35 Aufnahmen. Die Bilder zeigen die Ergebnisse für das Profil mit Pfeilwinkel  $\beta=15^\circ$  und Anstellwinkel  $\alpha=5^\circ$  bei den  $\sigma$ -Zahlen 2,0; 2,3 und 2,5. Rechts sind jeweils Ausschnittsvergrößerungen der Kavitationsgebiete zu sehen (Strömungsrichtung von links nach rechts). Um den Kontrast der nachfolgenden Aufnahmen zu erhöhen, sind sie als Negativbilder (Farbumkehrbilder) dargestellt



**Abbildung 3.1** Kavitationszustände, Mittelwerte

Die Wolkengenerierung selbst wird durch den so genannten Reentrant-jet, eine Rückströmung unterhalb der Kavitationstasche mit Staupunkt am Ende der Tasche, verursacht. Hierbei strömt der Reentrant-jet unterhalb der Kavitationstasche in Richtung zur Vorderkante und schnürt beim Erreichen dieser die überwiegend aus Flüssigkeit bestehende Kavitationstasche ab, welche dann als Wolke in Strömungsrichtung abschwimmt. Es bildet sich unmittelbar erneut eine Ablösung, eine neue Kavitationstasche entsteht und der Vorgang wiederholt sich. In [Abbildung 3.1](#) ist bei jedem Zustand der Reentrant-jet deutlich zu erkennen.

In [Abbildung 3.2](#) ist über die Helligkeitsverteilung der CCD-Aufnahmen die Standardabweichung und der Mittelwert gebildet. Als konventionelle Aufnahmen der Kavitation dienen Mittelwert und Standardabweichung der Helligkeitsverteilung der Beurteilung der dynamischen und statischen Gebiete der Kavitationszone.

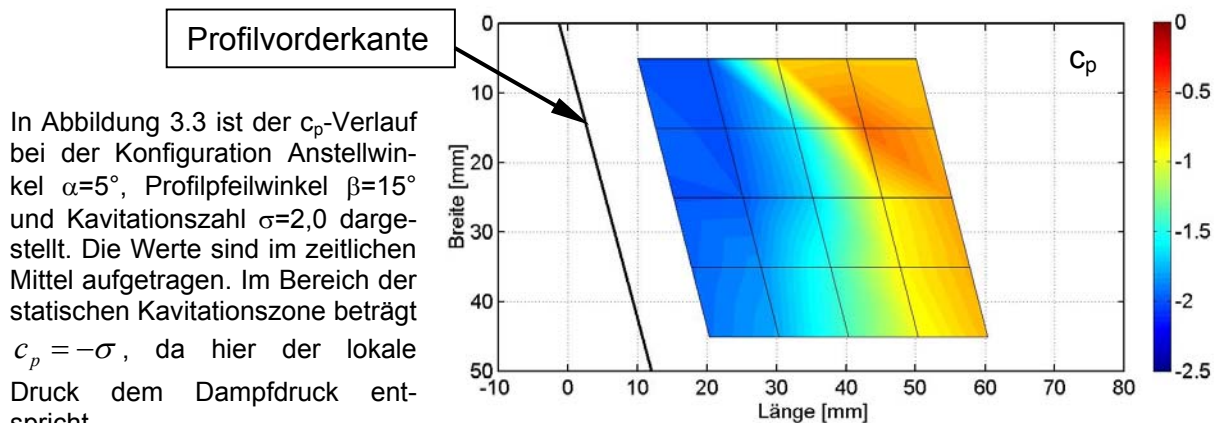


**Abbildung 3.2** Standardabweichung und Mittelwert der Helligkeitsverteilung

Die Standardabweichung (links) gibt Aufschluss über die Fluktuationen bzw. die periodische Generierung von Wolken in der Kavitationszone respektive an deren Rändern. Rote bzw. helle Bereiche in den ausgewerteten Aufnahmen zeugen von starken Instationaritäten, blaue bzw. dunkle Bereiche weisen auf statische Gebiete in der Kavitationszone hin. Beim Mittelwert (rechts) kennzeichnen rote bzw. helle Bereiche in der Kavitationszone Gebiete mit hohem Dampfgehalt. Solche mit wenig oder keinen Dampfzonen erscheinen blau bzw. dunkel. Die Intensität des Bildes ist eine Funktion der Beleuchtung. Die Helligkeits- bzw. Farbverteilung kann also keine Information über die Verhältnisse der Dampfverteilung und der Dichte des Fluids über verschiedene Betriebszustände geben.

Bei diesem Betriebszustand ist das dynamische Gebiet in der Kavitationszone auf der in Strömungsrichtung rechten Seite deutlich zu erkennen (rot bzw. hell). In diesem Bereich findet die Wolkengenerierung statt. In Strömungsrichtung links zeigt sich eine statische, anhaftende Kavitation (blau bzw. dunkel).

Die Oberfläche der Strömungsprofile wurde zur Klärung der Druckverhältnisse auf der Profilsaugseite, an der alle Untersuchungen stattfanden, mit Druckmessbohrungen versehen. Die gewonnenen  $c_p$ -Verläufe unterstützen die durch die PIV / LIF und CCD-Aufnahmen gewonnenen Ergebnisse.



In Abbildung 3.3 ist der  $c_p$ -Verlauf bei der Konfiguration Anstellwinkel  $\alpha=5^\circ$ , Profilpfeilwinkel  $\beta=15^\circ$  und Kavitationszahl  $\sigma=2,0$  dargestellt. Die Werte sind im zeitlichen Mittel aufgetragen. Im Bereich der statischen Kavitationszone beträgt  $c_p = -\sigma$ , da hier der lokale Druck dem Dampfdruck entspricht.

Mit zunehmender Kavitationszahl verkleinert sich die Kavitationszone, wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist. Der  $c_p$ -Verlauf folgt analog.

**Abbildung 3.3**  $c_p$ -Verteilung;  $\sigma=2,0$

Bei Vergrößern des Pfeilwinkels von  $15^\circ$  auf  $25^\circ$  erfährt die Geschwindigkeit an der Profilvorderkante eine größere Querkomponente, so dass die dynamischen Teile der Kavitationszone, d.h. die Gebiete in denen die Wolkengenerierung statt findet, stärker an den Rand (in Strömungsrichtung rechts) des Strömungsprofils abgedrängt werden. Die Kavitationstasche wächst in horizontaler und vertikaler Richtung an, wobei die vertikale Ausdehnung in stärkerem Maße zu nimmt. In [Abbildung 3.4](#) sind die Kavitationszustände als Mittelwerte für das Strömungsprofil mit Pfeilwinkel  $\beta=25^\circ$ , Anstellwinkel  $\alpha=5^\circ$  bei  $\sigma=2,0$  dargestellt. Auch bei diesem Pfeilwinkel zeigt sich bei den drei untersuchten Kavitationszahlen im Mittel immer eine Rückströmung (Reentrant-jet) unterhalb der Kavitationstasche.

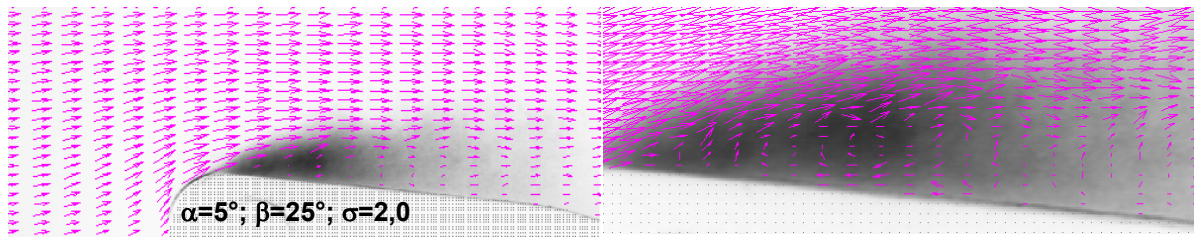


Abbildung 3.4 Kavitationszustände, Mittelwerte

Die instationären Zustände, d.h. die Einzelbilder der Kavitationszone, geben Aufschluss über die Generierung der Dampfstrukturen und das Abschwimmen mit der Strömung. In [Abbildung 3.5](#) wird die Dynamik des Vorgangs deutlich, die Ergebnisse zeigen das Ablösen und den Zerfall der abschwimmenden Dampfstrukturen innerhalb eines Zyklus.

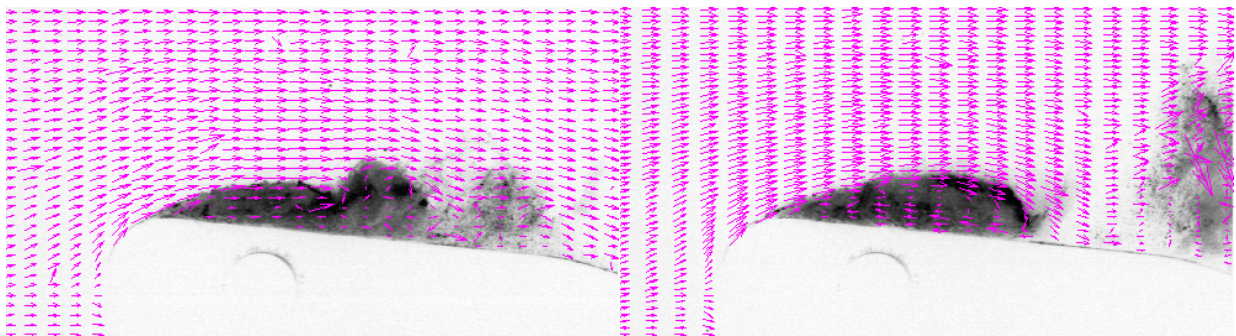


Abbildung 3.5 Instationäre Kavitationszustände;  $\alpha=5^\circ$ ;  $\beta=25^\circ$ ;  $\sigma=2,0$

Die Zweiphasenströmung, bestehend aus Dampf und Wasser, zeigt im Verlauf der abschwimmenden Wolken ein hochdynamisches Verhalten. So ist die Frequenz, mit der die Wolken generiert werden, konstant. Diese Periodizität folgt im allgemeinen dem Strouhal-Gesetz, das dem Quotienten aus dem Produkt einer charakteristischen Frequenz und einer Länge zu einer charakteristischen Geschwindigkeit einen konstanten Wert zuordnet. Charakteristische Größen sind in diesem Fall die Ablösefrequenz der Dampfstrukturen sowie die mittlere Länge der Kavitationstasche und die Geschwindigkeit der Strömung an der Phasengrenze. Mit den gemessenen Werten der Geschwindigkeit an der Phasengrenze von 19m/s, der mittleren Kavitationstaschenlänge von 37mm und dem in der Literatur [1] [3] angegebenen Wert der Strouhal-Zahl von 0,25 kann die Frequenz für das Profil mit  $\alpha=5^\circ$ ;  $\beta=15^\circ$ ;  $\sigma=2,0$  mit 130 1/s abgeschätzt werden.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche an den Platteneinzelprofilen wurden an einem geschlossenen Kreislauf mit einer integrierten Messstrecke durchgeführt. Die Messstrecke erlaubt eine optische Zugänglichkeit für die entsprechende Bildaufnahmeeinrichtung und den Laser zur Erzeugung des Lichtschnitts. Des weiteren steht am Strömungskanal ein so genannter Keimgenerator zur Beeinflussung der „Wasserqualität“, d.h. der für den Kavitationsbeginn verantwortlichen Kavitationskeime, zur Verfügung. Die Weiterentwicklung der Particle Image Velocimetry (PIV) in Verbindung mit der Laser Induced Fluoreszenz (LIF) brachte die Möglichkeit, die Strömungsgeschwindigkeiten in- und außerhalb der Kavitationszone als Feld zu ermitteln. Die Untersuchungen zeigen die Kavitationszustände an zwei Platteneinzelprofilen mit unterschiedlichen Vorderkantenschrägungswinkeln. Diese so genannten Pfeilwinkel beeinflussen die dreidimensionale Struktur der sich ausbildenden Kavitationstasche. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen die Stadien der Wolkengenerierung und geben im zeitlichen Mittel Auskunft über das statische Verhalten der Kavitation. Die instationären wie auch die gemittelten Geschwindigkeiten zeigen, in Verbindung mit dem Bild der Kavitationszone, auch die Strömungsverhältnisse innerhalb der Kavitationstasche und den für die Wolkengenerierung verantwortlichen Reentrant-jet. Die parallel dazu durchgeführten statischen Druckmessungen auf der Profilloberfläche zeigen die Druckverhältnisse unter der Kavitationstasche sowie im wolkengenerierenden Gebiet. Durch herkömmliche Aufnahmen der Kavitation mit Hilfe der CCD Bilderfassung und deren Auswertung in Form von Mittelwertbildung

und Standardabweichung über der Helligkeitsverteilung der Aufnahmen, lassen sich Aussagen über statische und dynamische Gebiete innerhalb der Kavitationszone machen. Diese korrelieren mit den  $c_p$ -Verläufen der statischen Druckmessung.

Die ermittelten Daten dienen auch der Validierung eines Codes zur numerischen Berechnung kavitierender Strömungen. In Zukunft sollen weitere Untersuchungen zum Reentrant-jet und den sich einstellenden strömungsspezifischen Parametern gemacht werden. Auch eine genauere Untersuchung der sich einstellenden Frequenz bei der Wolkengenerierung soll folgen.

## 5 Nomenklatur

$\alpha$	Profilanstellwinkel	[ ° ]
$\beta$	Profilvorderkantenwinkel (Pfeilungswinkel)	[ ° ]
$\rho$	Dichte	[ kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Kavitationszahl	[ - ]
	$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho c_\infty^2}$	
$c_p$	dimensionsloser Druck auf der Profilerseite	[ - ]
	$c_p = \frac{p_{loc} - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho c_\infty^2}$	
$c_\infty$	Strömungsgeschwindigkeit stromauf des Profils	[ m/s ]
$f_c$	Wolkenablösefrequenz	[ 1/s ]
$l_c$	mittlere Kavitationstaschenlänge	[ m ]
$p_\infty$	Druck in der Außenströmung	[ bar ]
$p_{loc}$	Druck lokal	[ bar ]
$p_v$	Dampfdruck	[ bar ]
Str	Strouhal-Zahl	[ - ]
	$Str = \frac{f_c l_c}{v_c}$	
$v_c$	Geschwindigkeit an der Phasengrenze	[ m/s ]

## 6 Literaturverzeichnis

- [ 1 ] Hofmann Michael, „*Ein Beitrag zur Verminderung des Potentials kavitierender Strömungen*“ genehmigte Dissertation, TU-Darmstadt 2001; Shaker Verlag Aachen 2001
- [ 2 ] Isay W. G. „*Kavitation*“ 3. erweiterte Auflage, Schiffarts-Verlag Hansa Hamburg
- [ 3 ] Sauer Jürgen, „*Instationär kavitierende Strömungen - Ein Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) und Blasendynamik*“ genehmigte Dissertation TH Karlsruhe 2000
- [ 4 ] Stoffel B „*Kavitation*“ Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, TU-Darmstadt 2003
- [ 5 ] Striedinger R., Bachert B., Brunn B. „*Die Bedeutung der Wasserqualität und von Maßstabsgesetzten in Kreiselpumpen*“ AIF Forschungsvorhaben Nr. 12408, Fachgebiet Turbomaschinen und Fluidantriebstechnik TU-Darmstadt 2001