

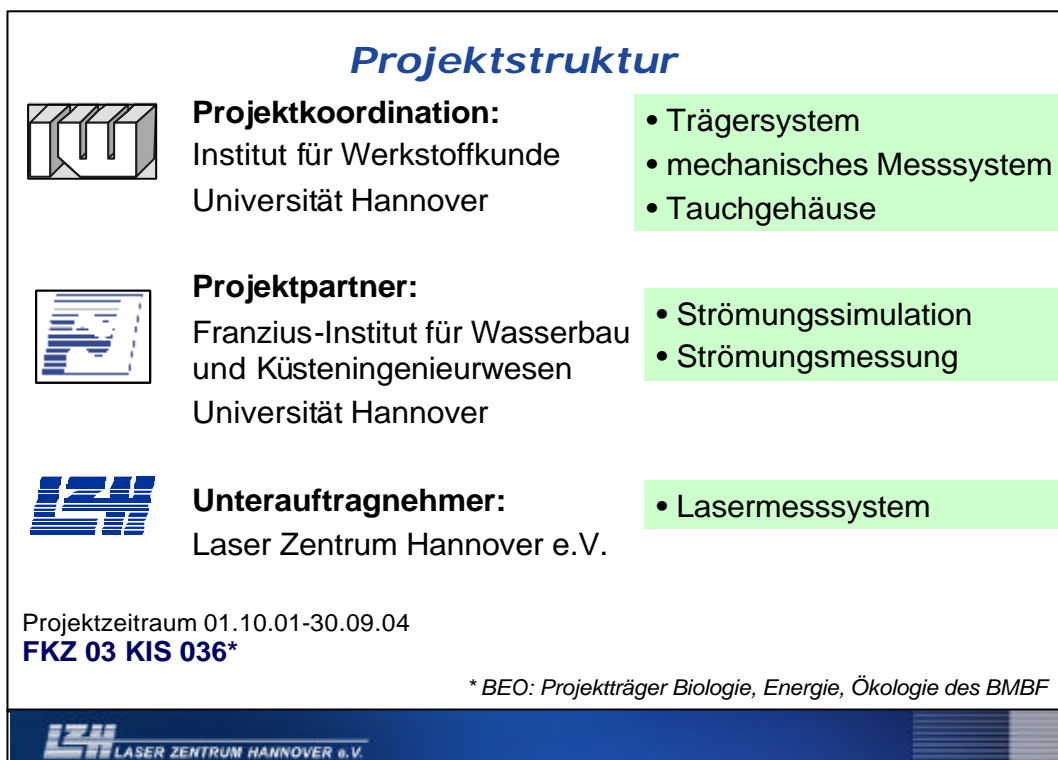
## Entwicklung eines stationären in-situ 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluß

H. Haferkamp, J. Bunte, S. Barcikowski, J. Walter  
Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, D-30419 Hannover, E-mail: wt@lzh.de

### Einleitung

Für Wasserbauwerke, die hochturbulenten Strömungen ausgesetzt sind, fehlen Langzeitmonitoring-Möglichkeiten, die über tatsächliche Belastungen der Bauwerke Auskunft geben. Ziel des vorgestellten Projektes ist die Entwicklung eines 3D-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände, um entsprechende Belastungen von Wasserbauwerken ermitteln zu können.

Dazu werden zum einen mechanische und berührungslose, lasergestützte Sensoren für den Langzeiteinsatz im Bereich eines zu betrachtenden Bauwerkes entwickelt, zum anderen wird für ein ausgewähltes Bauwerk ein numerisches Modell der Strömungszustände aufgebaut /1/.



**Abb. 1:** Projektstruktur und Aufgabenverteilung

Mit Hilfe des zu entwickelnden 3-D Particle-Image-Velocimeters (3D-PIV) werden zeitlich und räumlich hochaufgelöste Daten über den aktuellen Strömungszustand gewonnen. Die mechanischen Strömungssensoren liefern dazu Randwerte, die als Eingangsgröße für das Particle-Image-Velocimeter genutzt werden können. Anhand der gemessenen Strömungsdaten wird im Rahmen des Gesamtprojektes (Abb. 1) das numerische Modell des Wasserbauwerkes kalibriert und validiert /2/.

Das Gesamtsystem stellt ein Werkzeug zur Langzeitbeobachtung von hochturbulenten Gewässern dar, mit dessen Hilfe es möglich sein wird, hochaufgelöste und hochgradig instationäre hydrodynamische Modelle des Gewässers zu kalibrieren /1/.

## Theoretische Grundlagen

Das 3-dimensionale-PIV Verfahren basiert auf dem gleichen fundamentalen Prinzip wie das räumliche menschliche Sehvermögen. Bei der technischen Umsetzung nehmen zwei Kameras unterschiedliche Bilder von der Messebene auf und ein geeigneter Algorithmus vergleicht diese Aufnahmen (Images), so dass das Auswertesystem eine 3-D Interpretation durchführen kann /4/.


$$\begin{bmatrix} kx \\ ky \\ k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Abbildungsmodell zur direkten linearen Transformation (DLT)

- Durchführung der 3-D Kalibrierung benötigt ein numerisches Modell
- Beschreibung von 2-D Bildern im dreidimensionalen Raum
- Polynomische Abbildungsmodelle empirisch
- Rein mathematisches Modell
- Gegebenheiten im Strömungsfeld bei komplexer Brechung exakt darstellen

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \tilde{A}_{000} + \tilde{A}_{100} \cdot X + \tilde{A}_{010} \cdot Y + \tilde{A}_{001} \cdot Z + \tilde{A}_{110} \cdot XY + \tilde{A}_{101} \cdot XZ + \tilde{A}_{011} \cdot YZ + \tilde{A}_{200} \cdot X^2 + \tilde{A}_{020} \cdot Y^2 + \tilde{A}_{002} \cdot Z^2 + \tilde{A}_{300} \cdot X^3 + \tilde{A}_{210} \cdot X^2Y + \tilde{A}_{120} \cdot X^2Y + \tilde{A}_{030} \cdot Y^3 + \tilde{A}_{120} \cdot XY^2 + \tilde{A}_{021} \cdot Y^2Z + \tilde{A}_{120} \cdot XZ^2 + \tilde{A}_{012} \cdot YZ^2 + \tilde{A}_{111} \cdot XYZ$$

Abbildungsmodell zum „XYZ-Polynom zur dritten Potenz“



**Abb. 2:** Mathematisches Abbildungsmodell zum 3D-PIV (Quelle: Dantec Dynamics)

Zur Durchführung der 3-D Kalibrierung wird ein numerisches Modell benötigt, welches beschreibt, wie Objekte im dreidimensionalen Raum auf die 2-D Bilder der beiden Kameras übertragen werden. Ein Beispiel eines solchen Abbildungs-Modells ist das „Lochkamera“-Modell, welches auf den Regeln der geometrischen, linearen Optik beruht und zu der direkten linearen Transformation (DLT) führt (Abb. 2). Dabei stehen die Großbuchstaben X, Y, und Z für das reale Koordinatensystem; die Kleinbuchstaben x und y repräsentieren die Abbildungskordinaten. Das DLT - Modell ist nicht in der Lage, nicht-lineare Phänomene zu beschreiben, wie sie z.B. bei Abbildungsverzerrungen durch die Kameraoptik oder komplexer Brechung auftreten. Dies ist der Fall bei Messungen durch ein Glasfenster oder beim Übergang Luft – Wasser /3/.

Für Experimente, bei denen signifikante Nichtlinearitäten in der Kameraabbildung vorliegen, weisen polynomische Abbildungsmodelle zur Beschreibung der tatsächlichen Bewegung eine höhere Eignung auf. Eine solches Abbildungsmodell ist das x, y, und z Polynom zur dritten Potenz (Abb. 2). Hierbei sind alle A-Koeffizienten 2-D Vektoren, die getrennte Polynome für die Abbildungskordinaten x und y produzieren. Zu beachten ist, dass polynomische Abbildungsmodelle empirisch sind und deswegen keine physikalische Argumentation notwendig ist.

Die dreidimensionalen Messungen in der Praxis beginnen mit der Verarbeitung konventioneller 2-D PIV Kameraabbildungen, die simultan mit der linken und rechten Kamera aufgenommen werden. Nach erfolgter Kamerakalibrierung lassen sich aufgenommene 2D-Informationen zu einem 3D-Strömungsfeld weiterverarbeiten. Aufgrund einer perspektivischen Verzerrung bildet jede Kamera eine trapezförmige Region des Lichtschnitts ab /3/. Im Bereich der Überlappung werden in einem rechtwinkligen Gitter Abfragepunkte gesetzt. Zum Einsatz kommt hierbei ein Kalibriertarget der Größe 270 x 200 mm, auf dem sich eine endliche Zahl von Punkten in rechtwinkliger Anordnung befinden. Der für die Auflösung des Systems relevante Abstand der Punkte beträgt dabei 5 mm. Zur Festlegung des Koordinatensystems und Bestimmung des Ursprungs variiert die Punktgröße in drei Stufen. Damit werden Objekte (Tracer, Seeding) zwischen 0,5 und 1,5 mm zur Bestimmung der Verschiebung im Strömungsfeld optimal erfasst /6/.

Die genaueste Bestimmung der Verschiebung (bzw. Geschwindigkeit) wird bei einem Beobachtungswinkel von 90° zwischen den beiden Kameras erreicht. Im Falle eines eingeschränkten optischen Blickfeldes aufgrund vorgegebener geometrischer Randbedingungen (Gehäuse) können andere Winkel mit reduzierter Genauigkeit benutzt werden. In einem variablem Kamera-Blickwinkel von 30-120° sind Auswertungen von 3-D PIV Messungen mit hinreichender Genauigkeit (Fehler < 20 %) möglich.

## Anlagentechnik

Um den besonderen Anforderungen bzgl. der Einsatzbedingungen gerecht zu werden, muss eine Anpassung der Standard PIV-Komponenten erfolgen. Es kommt ein Laser mit einer Pulsenergie von max. 120 mJ zum Einsatz, der für eine große Trübung seitens des zu durchstrahlenden Mediums optimiert ist. Die Wellenlänge (532 nm) weist eine hohe Transmission bei den Bedingungen im Wasser auf. Die Länge der Versorgungsleitungen muss den Entfernungen am realen Bauwerk entsprechen. Es kommen CCD Kameras mit angepasster räumlicher und zeitlicher Auflösung zum Einsatz. Zur Anwendung kommen variable Kameraobjektive (Brennweite von 35 – 60 mm) für die Wahl des Gesichtsfeldes. Eine Bedingung ist die Fernbedienbarkeit einzelner Komponenten für die Einrichtung im Tauchexperiment /5/.



**Abb. 3:** Hauptkomponenten 3D-PIV

Das Messsystem besteht aus folgenden Komponenten:

- Laser (Wellenlänge: 532 nm, Doppelpuls, Pulsenergie 120 mJ, Pulsdauer: 5 ns)
- zwei CCD Kameras (1280 x 1024 Pixel, 12-bit Auflösung)
- Kamera Objektive (Brennweiten 35-60 mm)
- fernbedienbare Kamerahalterung, Mechanik zur Blickwinkelkorrektur
- PIV Prozessor (FlowMap 1500, 1Gbyte Speicher, TCP/IP Protokoll)
- Optiken, Spiegel und PIV-Software

Diese Komponenten (Abb.3) werden auf ein variables Trägersystem montiert (Abb.4). Die Position der Einzelkomponenten kann den jeweiligen Versuchsbedingungen angepasst werden. Eine kompakte Bauweise, wie sie für den Einsatz im Tauchgehäuse erforderlich ist, kann damit erreicht werden /1/.

## Einsatz an Umlauf- und Strömungsrinnen

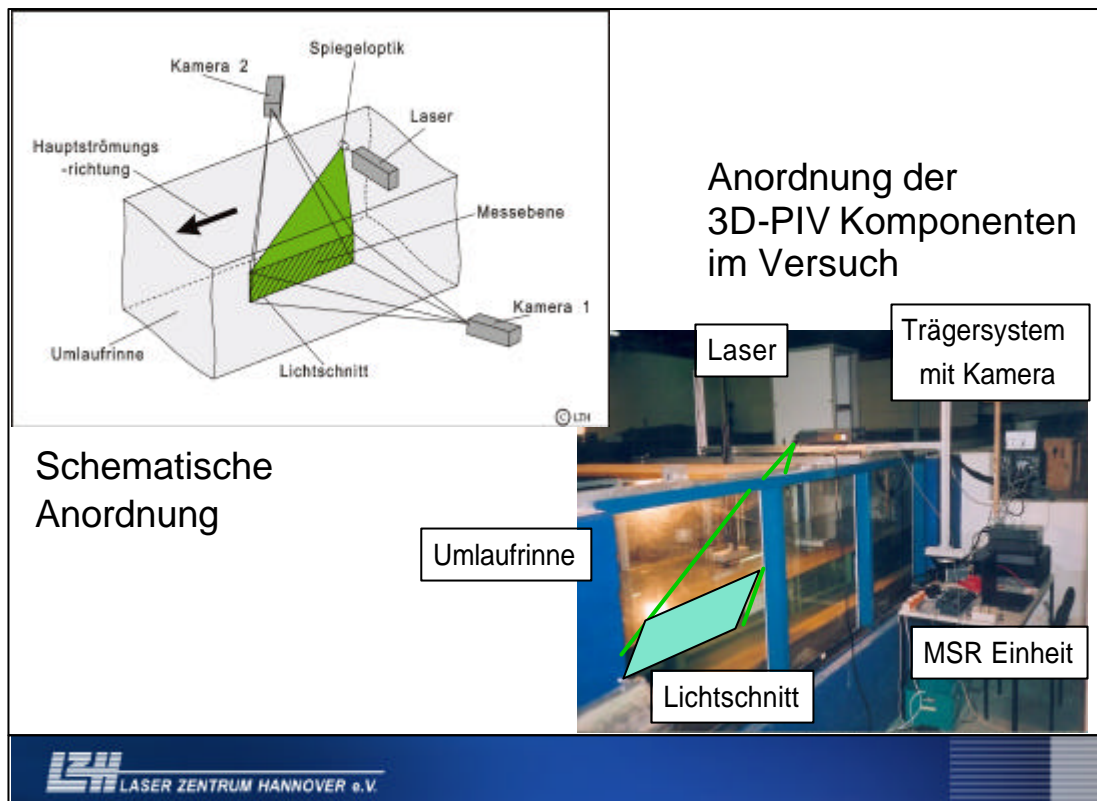
Die einzelnen Komponenten des Messsystems werden an einem variablen Trägersystem aus Aluminiumprofilen befestigt. Die Kameras und der Laser befinden sich in der gleichen vertikalen Ebene senkrecht zur Strömungsrichtung, sind aber in der Höhe (horizontal) unterschiedlich positioniert. Der Laserlichtschnitt wird von oben durch die Wasseroberfläche aufgespannt (Abb. 4) Der Blickwinkel der Kameras beträgt  $30^\circ$  zur Hauptströmungsrichtung. Der Abstand Kameras - Lichtschnittebene beträgt 1,90 m.

Die Umlaufrinne besteht aus zwei sich 22 m voneinander entfernt gegenüberliegenden Halbkreisen mit einem Durchmesser von 5,90 m. Zwischen den beiden Halbkreisen sind auf der einen Seite eine gerade Fließstrecke mit Sichtfenstern zur Strömungsbeobachtung und 4 Pumpen zur Erzeugung einer Strömung in eine der beiden Umlaufrichtungen angeordnet. Die Strömung kann über für jede Pumpe separat zur Verfügung stehende Drehzahlmesser stufenlos gesteuert werden.

**Tab. 1:** Einflussgrößen auf die Genauigkeit des Messsystems

Randbedingung/Parameter	Wert	Einfluss
Brechungsindex	Luft := 1,0 Glas := 1,5-1,9 Wasser := 1,3	Grad der Reflektion, bestimmt die mathematische Transformation
Abstand (Kamera-Lichtschnitt)	0,80 –1,90 m	Anzahl der Kalibrierpunkte reduziert sich mit Abstand
Winkel (Kamera-Lichtschnitt)	$30^\circ$ - $120^\circ$	Abbildungsfehler werden größer bei Winkeln $> 90^\circ$
Scheimpflugwinkel	- $20^\circ$ bis + $20^\circ$	Änderung der Ursprungslage im Koordinatensystem

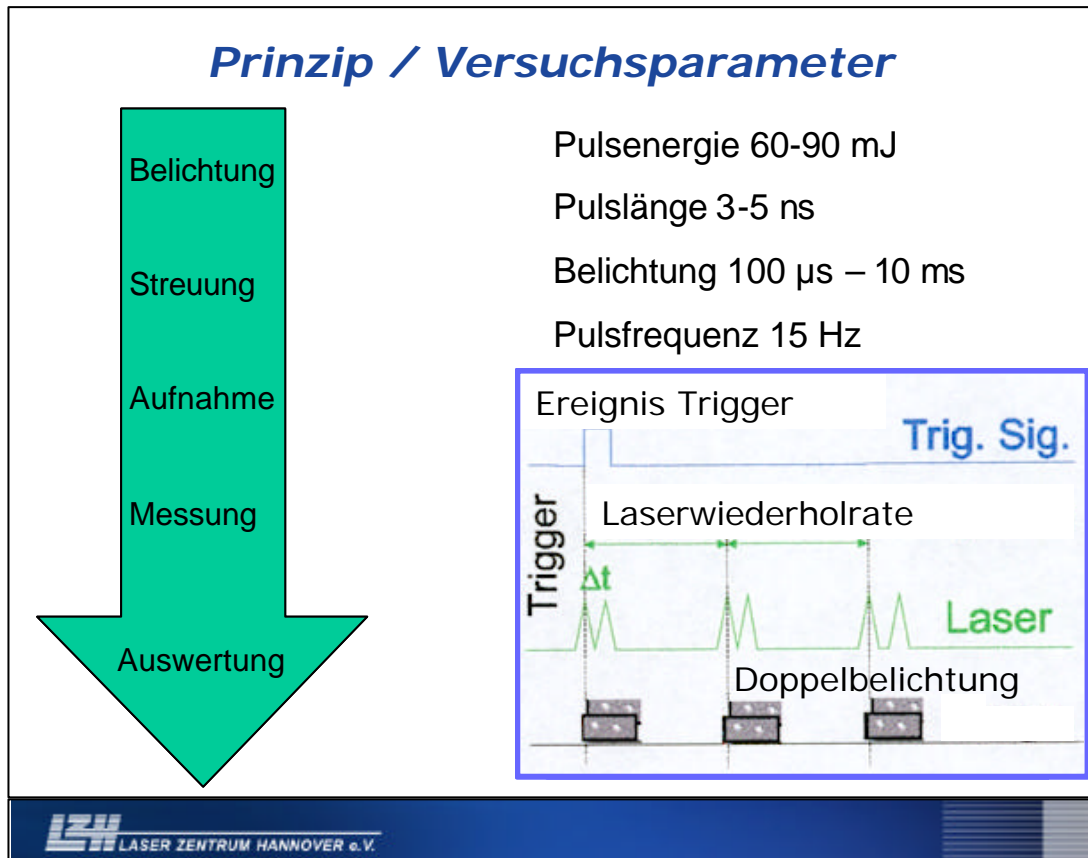
Die bestimmenden Randbedingungen sind die Einflüsse der optischen Übergänge zwischen den Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex (Luft, Glas, Wasser) /6/. Weitere Parameter (Tab. 1) stellen die Abstände der Systemkomponenten untereinander und der Beobachtungswinkel sowie die Korrektur der auftretenden Abbildungsverzerrungen (Scheimpflug-Korrektur) dar /3/.



**Abb. 4:** Anordnung der 3D-PIV Komponenten für Feldversuche an einer Umlaufrinne

Sondierende Versuche dienen der Optimierung der Abbildungsqualität und Bilderfassung der beiden Kameras. Dazu wird das auf dem Kalibriertarget abgebildete Punktgitter unter Einsatz verschiedener Leuchtmittel (Glühlampenarrays, Nebelscheinwerfer, Halogenbrenner) unterschiedlich ausgeleuchtet. Eine Minderung der Reflektionen an den Glasoberflächen ist erforderlich. Da ein Einsatz Antireflexbeschichteter Glasoberflächen an der Umlaufrinne nicht möglich ist, werden dazu die Beleuchtungswinkel variiert. In Zusammenarbeit mit der Fa. Dantec Dynamics wird eine Parameteranpassung, die die eingestellten Beleuchtungsverhältnisse berücksichtigt, in der Software vorgenommen. Als Erkenntnis der Optimierung der Beobachtungsqualität kann festgehalten werden, dass für den Einsatz des Systems in getauchtem Zustand eine Antireflexbeschichtung der Glasoberflächen zur Anwendung kommen sollte. Bei den hier beschriebenen Versuchen an der Umlaufrinne in Marienwerder wurden die Randbedingungen (u.a. Beleuchtungsverhältnisse) ermittelt, unter denen eine Kalibrierung des Systems durchgeführt werden kann. Im Anschluß an eine Kalibrierung sind die Positionen (Winkel, Entfernung) von Kamera und Laserlichtschnitt in Hinblick auf ein reproduzierbares Ergebnis zu optimieren und der Einfluss unterschiedlicher Tracerpartikel bzw. Seedings (Art, Form, Größe und Menge) /6/ systematisch zu untersuchen.

Die Fortsetzung der Versuche finden an der Strömungsrinne des Franzius-Instituts statt. Die Strömungsrinne am Schneiderberg besteht aus einem 22 m langen und 1 m breiten oberirdischen Becken, das auf Pfeilern steht. Auf der einen Seite befindet sich ein regelbarer Zulauf und ein Ablauf auf der anderen Seite. In der Mitte der geraden Fließstrecke befinden sich Sichtfenster zur Strömungsbeobachtung. Die Strömung kann über für die Drehzahl einer Pumpe des Zulaufs und der Regelung des Abflussvolumens stufenlos gesteuert werden.



**Abb. 5:** Prinzip der PIV Messung und eingestellte Versuchsparemtern

Zur Beurteilung der Empfindlichkeit des Systems kommen verschiedene Sandsorten zur Anwendung. Diese unterscheiden sich in Form und Größe der Sandkörner.

Die im Rahmen der Versuche variablen Prozessparemtern werden im Verlauf der Experimente den Randbedingungen angepasst und optimiert.

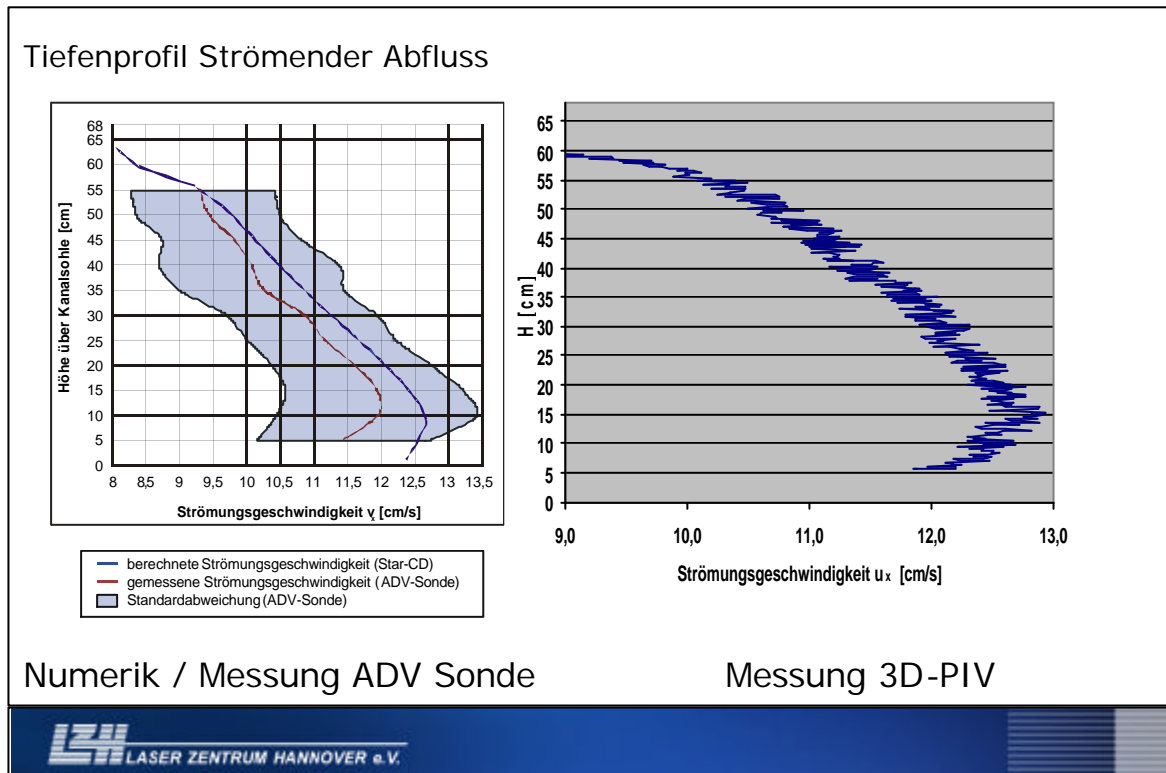
## Ergebnisse

Für die Auswertung der Messergebnisse des PIV-Systems werden diese mit den Ergebnissen der numerischen Simulationen der jeweiligen Versuchsanlage und den Ergebnissen aus Messungen mit einer ADV-Sonde verglichen.



Einen geringen Einfluss üben im flüssigen Medium enthaltene Luftblasen und eine unruhige Wasseroberfläche (im Rahmen bestimmter Parameterwerte für Wellenlänge, Frequenz und Amplitude) aus. Unterschiedliche Tracerpartikel (Größe: 0,5 – 1,5 mm, Form: sphärisch oder undefiniert) führen zu qualitativ und quantitativ reproduzierbaren Ergebnissen, die die Strömungsverhältnisse im Beobachtungsabschnitt der Umlauf- bzw. Strömungsrinne wiedergeben. Der gemessene Geschwindigkeitsbereich entspricht der Größenordnung des realen Strömungsfeldes. Unterschiedliche Geschwindigkeitsintervalle in drei Abstufungen (0,2 m/s; 0,5 m/s; 0,7 m/s) lassen sich bei ungestörter horizontaler Strömung wiederfinden.

Zur Darstellung der möglichen Datendichte aus den Messungen mit dem PIV-Gerät und den numerischen Simulationen werden in ausgewählten Schnitten Isolinienplots der Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet. Da ein direkter Vergleich dieser Vektorfelder aufgrund der darin programmintern vorgenommenen (softwarebedingten) Mittelungsprozesse nicht zu führen ist, werden aus den Messdaten des PIV-Systems, den Punktmessungen der ADV-Sonde und den Ergebnissen der dreidimensionalen Simulationen an ausgewählten Stellen Strömungsprofile über die jeweilige Wassertiefe erzeugt. Durch diese Reduktion auf eine gemeinsame Datenbasis ist eine Auswertung im Hinblick auf eine Überstimmung der Ergebnisse zwischen den einzelnen Messverfahren und der numerischen Simulation möglich.



**Abb. 6:** Gegenüberstellung der Tiefenprofile von ADV Sonde und 3D-PIV



In den Diagrammen (Abb. 6) ist auf der x-Achse jeweils die Strömungskomponente in Hauptströmungsrichtung, hier horizontal zum Boden der jeweiligen Versuchsanlage, aufgetragen. Die y-Achse gibt die Lage der Messwerte über die Höhe an.

Bei dem Vergleich der Messergebnisse aus den physikalischen Modellversuchen und den numerischen Simulationen wird in der Messebene und für den untersuchten Lastfall die gemessene Strömungsgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung (x-Richtung) der rechnerischen gegenübergestellt (Abb. 6). In den Abbildungen sind für die Darstellung der gemessenen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeit und der Breite der Strömungsrinne gemittelte Werte für die jeweiligen Messpunkte aufgetragen.

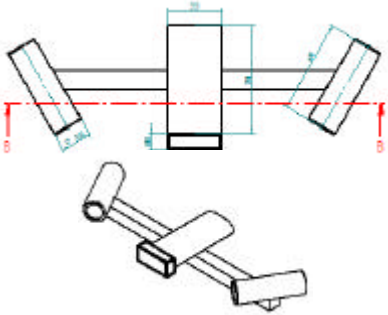

Die mittels des PIV-Systems gewonnen Rohdaten bedürfen einer geeigneten vollständigen Transformation (2D=>3D) und anschließender statistischer Auswertung /4/. Ein exakter Vergleich der Messergebnisse aus den Versuchen mit dem PIV-System und den numerischen Simulationen zeigt, dass bei der vorliegenden Datenbasis bereits sehr gute Kongruenz erzielt wird.


## Ausblick

In den geplanten Experimenten werden schrittweise die Hardware und Software des Messsystems angepasst und optimiert.

**Weiteres langfristiges Vorgehen**

- Erhöhung der Mobilität des kompletten Systemaufbaus am Modell
- Erprobung einer vertikalen Führung (z-Achse)
- Erweiterung und Anpassung des Gesichtsfeldes
- Beschichtung der relevanten optischen Elemente mit einer Anti-Reflex-Schicht
- Ermittlung der Betriebskosten und Prüfung der Zuverlässigkeit
- Konzeption eines Tauchgehäuses
- Installation u. gemeinsame Versuchsdurchführung am Fallbeispiel an der Ems bei Gandersum



**Abb. 7:** Ausblick

Dabei sollen die Objektive der Kameras modifiziert werden, um das Gesichtsfeld des Systems zu verbessern und die Abstände der Systemkomponenten zu variieren.

Des Weiteren ist beabsichtigt, die Mobilität des kompletten Systemaufbaus am Modell zu erhöhen. Dazu soll die Möglichkeit einer horizontalen und vertikalen Führung getestet werden. Der mechanische Aufbau wird den späteren Bedingungen im Tauchgehäuse angenähert.

Die Datenmenge soll angeglichen und reduziert werden /7/. Die statistische Auswertung soll beschleunigt werden. Parallel findet die Validierung der Daten statt und verschiedene Transformationen der Rohdaten werden erprobt.

Die Konzepte für die Konstruktion des Tauchgehäuses werden insbesondere unter den Aspekten der Fertigung und der Montagemöglichkeiten diskutiert. Von der ursprünglichen Planung eines Gesamtgehäuses /1/ wird zu Gunsten von drei einzelnen Tauchgehäusen abgewichen (Abb. 7). Die Spezifikation der Versorgungs- und Datenleitungen sowie Auswahl der Steckverbindungen begleiten diese Phase.

### Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung (FKZ 03 KIS 036).

### Literaturhinweise

- /1/ Haferkamp, H.; Bunte, J.; Walter, J., „Konzept eines stationären 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluß“, 10. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S.14.1-14.7, Rostock 10.-12.09. 2002
- /2/ Drewes, U.; Römisch, K.; Zimmermann, C.; Schwarze, H., Dücker, H.P. und Miller, C. (1995): "Modellversuche zum Kolkschutz vor Kaimauern", Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Nr. 50.
- /3/ Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle image velocimetry – a practical guide; Springer Verlag, 1998, Berlin (D)
- /4/ Fincham A.; Delerce G. 2000 , Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms, Experiments in Fluids, 29, S.13-22
- /5/ Fincham, A.; Spedding, G. 1997, "Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow." Experiments in Fluids, 23, S449-462
- /6/ Firmenschrift "FlowMap 3D-PIV-System", Dantec Measurement Technology A/S 2000 , (DK)
- /7/ Haferkamp, H.; Bunte, J.; Barcikowski, S.; Stute, U.; Walter, J., „Development of an in-situ 3D-particle image velocimeter (PIV) for coastal and river monitoring“, 1<sup>st</sup> Workshop Coastal Zone, Gent, Belgien, 5.-7. Juni 2003