

# **BMBF Forschungsvorhaben 03KIS036**

Stationäres 3D-Strömungsmesssystem  
für hochturbulente Strömungszustände  
unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss

## **Abschlussbericht**

für den Zeitraum

01.10.2001 – 30.09.2004

Teil A: Zusammenfassung

Teil B: Institut für Werkstoffkunde

Mechanisches Anströmkörper-Messsystem, Entwicklung des Trägersystems und der Tauchgehäuse

**Teil C: Laser Zentrum Hannover**

**Erfassung von turbulenten Strömungen mittels PIV-System (Particle Image Velocimeter)**

Teil D: Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen

Numerische Simulationen und physikalische Versuche

von

Dipl.-Phys. J. Walter, Dr.-Ing. S. Barcikowski, Dr.-Ing. J. Bunte,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp

### **Projektkoordination:**

Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde

### **Projektpartner:**

Universität Hannover, FRANZIUS-INSTITUT

FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN

### **Unterauftragnehmer:**

Laser Zentrum Hannover e.V.

März 2005

# **Abschlussbericht Teil C**

## **Erfassung von turbulenten Strömungen mittels PIV-System (Particle Image Velocimeter)**

Laser Zentrum Hannover e.V.

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp

Projektleitung: Dr.-Ing. J. Bunte

Dr.-Ing. S. Barcikowski

Projektbearbeitung: Dipl.-Phys. J. Walter

Hollerithallee 8, 30419 Hannover

Tel.: 0511 / 2788 – 0 Fax: 0511 / 2788 – 100

e-Mail: {om, bk, wt}@lzh.de

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		Seite:
C 1	Einleitung	C-1
C 2	Aufgabenstellung	C-2
C 3	Stand der Technik	C-3
C 4	Theorie des 3D-PIV Verfahrens zur Strömungsmessung	C-4
C 5	Untersuchungen mit dem PIV-System	C-8
C 5.1	Randbedingungen	C-8
C 5.1.1	Messorte	C-8
C 5.1.2	Hardwarekomponenten	C-9
C 5.2	Installation und Messungen mittels PIV System an der Umlaufrinne	C-10
C 5.2.1	Messungen mit dem Particle Image Velocitymeter	C-11
C 5.2.2	Messsystem	C-11
C 5.2.3	Randbedingungen	C-11
C 5.2.4	Versuchsaufbau	C-12
C 5.2.5	Versuchsdurchführung	C-13
C 5.2.6	Zwischenergebnisse	C-13
C 5.2.7	Modifikation und Neuinstallation des PIV Systems	C-16
C 5.3	Fortlaufende Versuche an der Strömungsrinne	C-19
C 5.4	Aufbau des lasergestützten Messsystems am GWK	C-20
C 5.5	Naturmessungen in Gandersum am Emssperrwerk	C-22
C 6	Datenerfassung und -transfer	C-25
C 7	Auswertung und Ergebnisse	C-26
C 8	Zusammenfassung und Ausblick	C-27
C 9	Veröffentlichungen	C-28
C 10	Anlagen	C-29
	Anlage 10.1 Zeitplan des Projektes	C-29
	Anlage 10.2 Arbeitsschritte des Projektes	C-30

## Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1-1:** Struktur des BMBF-Projektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“
- Abb. 4-1:** Verfahrensprinzip eines 3-D PIV-Systems
- Abb. 4-2:** Abbildungsmodell zur direkten linearen Transformation (DLT)
- Abb. 4-3:** Abbildungsmodell zum „XYZ-Polynom zur dritten Potenz“
- Abb. 4-4:** Überlappung der Gesichtsfelder der Kameras
- Abb. 5-1:** Hardware – Hauptkomponenten
- Abb. 5-2:** Umlaufrinne des Franzius-Instituts in Hannover - Marienwerder
- Abb. 5-3:** Skizze des Aufbaus und Anordnung der Komponenten (Schema) Blickwinkel in Richtung der Hauptströmung
- Abb. 5-4:** Versuchsaufbau Umlaufrinne Marienwerder (Übersicht)
- Abb. 5-5:** Einzelaufnahme (Image) mit Streulichtreflexen
- Abb. 5-6:** 2D-Vektorfelder bei drei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten
- Abb. 5-7:** 2D-Vektorfelder einer gestörten und einer ungestörten Strömung
- Abb. 5-8:** Umlaufrinne; modifizierter Aufbau des PIV-Systems
- Abb. 5-9:** Versuchsaufbau Marienwerder mit „getauchtem“ Laserkopf (Skizze)
- Abb. 5-10:** Zusammenhang zwischen PIV Arbeitsbereich, Trübung und Seeding
- Abb. 5-11:** PIV-Image und Vektorfeld mit Hindernis im Strömungsfeld
- Abb. 5-12:** Tiefenprofil basierend auf 2D-PIV Messungen, ADV-Sonde und Numerik
- Abb. 5-13:** Großer Wellenkanal und Beobachtungsfenster der PIV Messung
- Abb. 5-14:** Großer Wellenkanal, Strömungsfeld einer Welle
- Abb. 5-15:** Emssperrwerk; Trägersystem mit PIV-Messsystem
- Abb. 5-16a:** Gezeiten am Emssperrwerk; Messungen vom 7.10.2004; 2D-PIV
- Abb. 5-16b:** Gezeiten am Emssperrwerk; Messungen vom 7.10.2004; NLWK Aurich
- Abb. 5-17:** Messungen im Bereich des Hufeisenwirbels, Prinzipskizze, Strömungsfeld ( $t=0$  s)

## Tabellenverzeichnis

- Tab. 5-1:** Chronologie der Praxisversuche
- Tab. 5-2:** Einflussgrößen auf die Genauigkeit des Messsystems

# 1 Einleitung

Mit dem Bescheid vom 28.11.2001 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) erhielt das Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover eine Zuwendung für die Bearbeitung des Vorhabens „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ in Zusammenarbeit mit dem Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover und dem Laser Zentrum Hannover e.V.

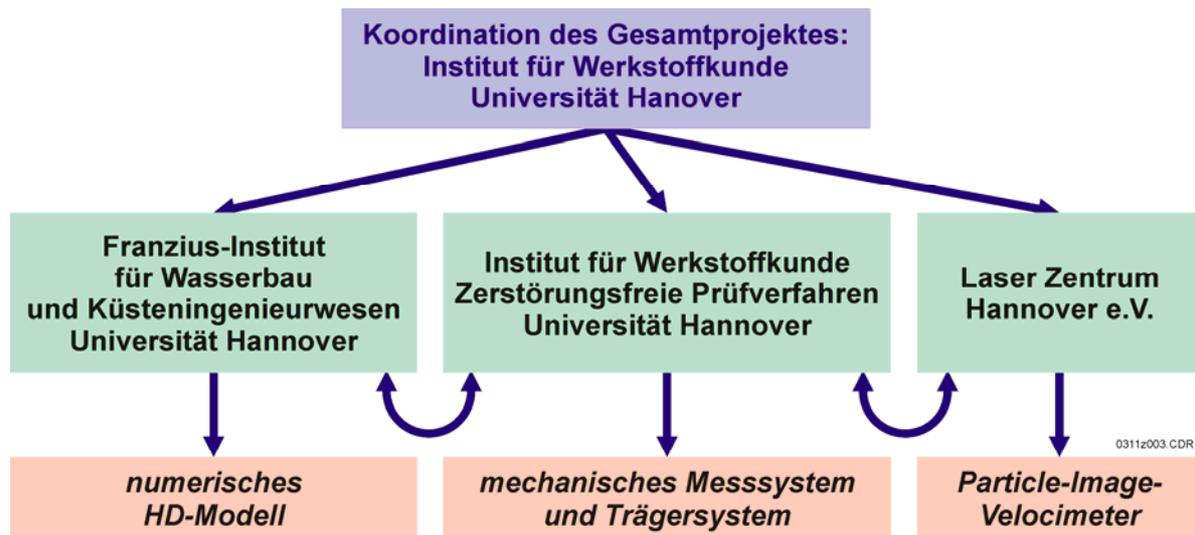


Abb. 1-1: Struktur des BMBF-Projektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“

Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist es, ein stationäres 3D-Strömungsmesssystem, bestehend aus Particle-Image-Velocimeter, mechanischem Strömungsmesssystem und Trägersystem für hochturbulente Strömungszustände zu entwickeln, aufzubauen, im Wasserlabor zu testen und anhand des ausgewählten Fallbeispiels Emssperrwerk zu erproben. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten werden zum Aufbau eines numerischen Modells für das gewählte Fallbeispiel genutzt.

Die Ergebnisse des ersten Projektjahres (01.10.2001 bis 30.09.2002) wurden im 1. Zwischenbericht vom Oktober 2002 zusammengefasst. Die anschließend durchgeführten Arbeiten im 2. Zwischenbericht (01.10.2002 bis 30.09.2003) dokumentiert. Diese und die seitdem durchgeführten Arbeiten werden im vorliegenden Abschlußbericht zusammenfassend dargestellt.

## 2 Aufgabenstellung

Zu Beginn erfolgt eine Analyse der Randbedingungen. Es werden physikalische, chemische, biologische und technische Parameter erfasst und bewertet. Aufbauend auf einer Datenrecherche und –analyse bereits erhobener Daten im Bereich des ausgewählten Bauwerkes (Emssperrwerk) und Analyse der naturräumlichen Umgebungsbedingungen entsteht so eine breite Basis von Informationen, die der Definition des Anforderungsprofils an die Messsysteme dient.

Ausgehend von den gesammelten Daten können die einzelnen Komponenten der Sensoren, des Trägersystems, der Datenübertragung und Datenpräsentation geplant werden. Anschließend erfolgt die Definition eines geeigneten Messprogramms für den Aufbau eines laserbasierten 3D-Particle Image Velocity (PIV) Systems zur Messung der turbulenten Strömungen /1/. Parallel findet die Entwicklung der Sensoren und die Entwicklung der Module für Datenübertragung und Datenpräsentation statt. Im Anschluss daran erfolgt der Aufbau und die Erprobung eines versorgungsabhängigen Modellsystems unter Verwendung einer geeigneten Laseranordnung, optimierter Hard- und Software zur Steuerung und Datenerfassung und angepasster Kamerasysteme. Die Optimierung der Systeme zur Kalibrierung und Validierung des Messsystems basiert auf der Grundlage der bereits erhobenen Daten und Messreihen im Labor- und Modellversuch.

Für den konkreten Einsatz erfolgt die Zusammenführung der einzelnen Prototypen der Projektpartner und die Integration in das Trägersystem der Universität Hannover. Daraus resultiert der Einbau und die Erprobung des Prototypen am ausgewählten Bauwerk in Gandersum /8/. Abschließende Aufgabe ist die Durchführung von Naturmessungen zur Feinkalibrierung (Auswahl des Turbulenzmodells) des numerischen HD-Modells. Messreihen zum Vergleich von lasergestütztem und mechanischem Messsystem vervollständigen die Arbeitspakete. Prognoserechnungen zur Optimierung des Bauwerkes und Erarbeitung konkreter Handlungsalternativen werden als Ergänzung und zur Anpassung des PIV-Systems durchgeführt.

Parallel erfolgt die technische Dokumentation des entwickelten Messsystems. Die Arbeiten und Messreihen werden dokumentiert und ein Abschlußbericht des Forschungsvorhabens erstellt.

### 3 Stand der Technik

Im Bereich der Meeresmesstechnik sind für die Messung von turbulenten Strömungen im hohen und höchsten Geschwindigkeitsbereich bisher keine Messgeräte realisiert, die im dauerhaften Betrieb wartungsfrei über längere Zeiträume einsetzbar sind. Bisher kommen lediglich Messpfähle zum Einsatz, die als Trägersystem im Küstenvorfeld fungieren und mit unterschiedlichen Wertegeräten (Windgeschwindigkeit, Temperatur, Seegang bzw. Tidenhub) bestückt sind. Speziell in Hochgeschwindigkeitsbereichen existieren keine praxistauglichen Verfahren [1], da die Belastungen durch turbulente Strömungen mit Geschwindigkeiten bis zu 14 m/s sowie durch Treibgut, Wellengang und Salzwasser einen dauerhaften Einsatz verhindern.

Im Bereich der grundlegenden Messverfahren existiert jedoch eine Vielzahl von Verfahren für die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten sowohl in Gasen als auch in Fluiden. Die eingesetzten Messprinzipien lassen sich in mechanische, elektrische, optische und akustische Verfahren unterteilen. Während in der Meteorologie im wesentlichen mechanische Anemometer eingesetzt werden, um Windgeschwindigkeiten zu ermitteln, wird dieses Messverfahren in der Meeresmesstechnik nicht eingesetzt, da die Verschmutzungsgefahr nur kurzzeitige Messungen erlauben würde. Andererseits nehmen in der Tierwelt viele Arten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen mit Hilfe von mechanischen Sensoren hochpräzise auf (Barthaare). In der Meerestechnik werden speziell die akustischen Verfahren eingesetzt, da diese, mit einer entsprechenden Software ausgestattet, die Messung ganzer Strömungsprofile berührungslos ermöglichen. Sie sind jedoch laut Herstellerangaben nicht für den Bereich mit hoher Biomasseproduktion geeignet, da ein Bewuchs der Schallwandler zu einem Ausfall der Messung führt. Außerdem führt ein erhöhter Lufteintrag, wie er beispielsweise hinter Sperrwerken existiert, zu nicht auswertbaren Messergebnissen akustischer Meßsysteme, da die Grenzschichtübergänge die Messung verfälschen.

Aus den gleichen Gründen kommen bisher optische Sensoren, die in Laboren bereits erfolgreich eingesetzt werden, nicht zum Einsatz. Optische Verfahren zur Strömungsmessung von Fluiden mit Schwebstoffgehalt lassen sich hinsichtlich ihres Prinzips in vier wesentliche Gruppen unterteilen:

- PTV (Particle Tracking Velocimetry)
- LSV (Laser Speckle Velocimetry)
- LDA (Laser Doppler Anemometer)
- PIV (Particle Image Velocimetry)

Bei der PTV und dem LDA dienen individuelle Partikel (Sediment und Plankton im Wasser) zur Analyse. LSV und PIV hingegen bedienen sich entweder der Analyse und statistischen Auswertung von Speckle-Mustern, die durch Lichtstreuung an verschiedenen Partikeln entstehen (LSV) bzw. der statistischen Bildauswertung von zeitverzögert (ms Bereich) aufgenommenen Bildern von Partikeln innerhalb einer Laserlichtschnittebene (PIV). Nachteile der PTV und LDA Technik liegen in der Notwendigkeit, für 2D / 3D Analysen den Messpunkt als Funktion der Zeit zu bewegen, welches bei zeitlich instationären Strömungen zu fehlerhaften Aussagen führen kann.

Bei der Analyse turbulenter Strömungen kommen die Vorteile des PIV zum Tragen. PIV-Messungen erlauben die simultane Aufnahme einer Vielzahl von Punkten durch die Analyse der von Partikeln reflektierten Strahlung. Die Geschwindigkeit wird durch die statische Auswertung des Partikelversatzes, der mittels CCD-Kameras aufgenommen wird, innerhalb der Zeitspanne zwischen zwei Belichtungsimpulsen berechnet. Durch Verwendung von Strahlführungskomponenten lassen sich unterschiedliche geometrische Anordnung von Laser und Kamera realisieren. Mögliche optische Verzerrungen lassen sich durch die Scheimpflugkorrektur an den Kameras korrigieren. Ferner muss die zu untersuchende Strömung eine ausreichende Partikel-Konzentration aufweisen. Durch eine intelligente Hardware- und Softwaresteuerung (Leistung- bzw. Empfindlichkeitsregelung sowie optimierte Merkmalsextraktion bei der Bildverarbeitung) kann auch bei Auftreten unterschiedlicher Partikelgrößen oder Blasen ein größtmöglicher Informationsgehalt extrahiert werden.

PIV-Verfahren erlauben die Messung von Geschwindigkeiten im Bereich von einigen mm/s bis Überschall bei vergleichbarer Genauigkeit und Auflösung eines LDA. Ferner bietet die PIV Technik die Option mittels 2 CCD-Kameras die Geschwindigkeitsvektoren in einem quasi 3D-Bereich zu bestimmen.

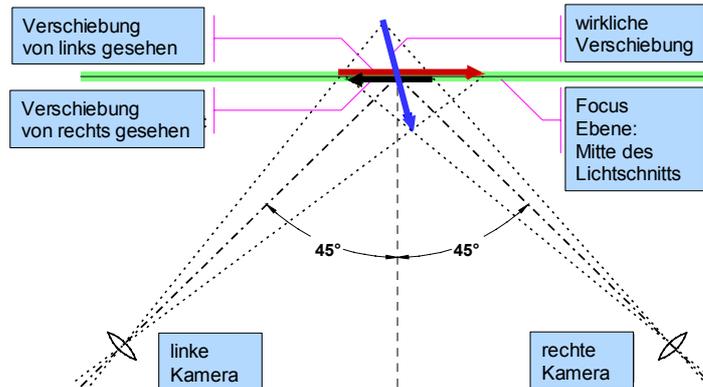
Typischer Einsatzbereich dieser Verfahren ist derzeit vor allem der Forschungs- und Entwicklungsbereich, da das Verfahrenspotenzial für industrielle Anwendungen zwar erkannt, aber eine Umsetzung in industrielle Applikationen bisher nur in Einzelfällen erfolgt ist. Die in einem Trägersystem integrierte PIV-Messapparatur bietet hier neue Ansätze hinsichtlich eines breitenwirksamen Einsatzes optischer Messverfahren in den o.g. Anwendungsbereichen unter natürlichen Bedingungen.

#### **4 Theorie des 3D-PIV Verfahrens zur Strömungsmessung**

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 eine geeignete Software vergleicht diese Aufnahmen (Images), so dass das Auswertesystem eine 3-D Interpretation durchführen kann. Man ist mit nur einer Kamera sehr gut in der Lage, Bewegungen nach oben, unten oder seitwärts zu erkennen. Eine Beurteilung von Objektbewegungen in Richtung der Beobachtungsachse ist jedoch nur mit erheblichen Ungenauigkeiten, anhand der von der Kamera detektierten scheinbaren Veränderung in der Objektgröße möglich. Wie mit der 2-D Messung misst 3D-PIV die Verschiebung anstelle der eigentlichen Geschwindigkeit. Hierbei betrachten die Kameras ein Strömungsfeld aus verschiedenen Winkeln (siehe Abb. 4-1). Die genaueste Bestimmung der Verschiebung (bzw. Geschwindigkeit) wird bei einem Beobachtungswinkel von  $90^\circ$  zwischen den beiden Kameras erreicht. Im Falle eines eingeschränkten optischen Blickfeldes aufgrund vorgegebener geometrischer Randbedingungen (Gehäuse) können andere Winkel mit reduzierter Genauigkeit benutzt werden. Die Voruntersuchungen des Systemanbieters und eigene Experimente /4/ zeigen, dass dabei mit zunehmend spitzerem Winkel zwischen den Kameras sich die Verzerrungen in den Abbildungen vergrößern

und die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung in den Randbereichen des Beobachtungsfeldes abnimmt. In einem variablem Kamera-Blickwinkel von 30-120° sind Auswertungen von 3-D PIV Messungen mit hinreichender Genauigkeit (Fehler < 20 %) möglich.

### Verfahrensprinzip eines 3D-PIV-Systems



Die reale 3D Bewegung ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ) ergibt sich aus zwei 2D Verschiebungen, die von der linken und rechten Kamera aufgenommen werden

Abb. 4-1: Verfahrensprinzip eines 3-D PIV-Systems

Für jeden Vektor in einer 3-D Vektor-Darstellung werden drei reale Verschiebungen ( $DX, DY, DZ$ ) von einem Paar von 2-D Verschiebungen ( $Dx, Dy$ ) bestimmt, die jeweils von der linken und rechten Kamera gesehen werden. Grundlegende Aufgabe ist die Lösung von vier Gleichungen mit drei Unbekannten in Form einer mathematischen Matrix. Je nachdem welches numerische Modell benutzt wird, um die Abbildung der Kameras zu beschreiben, kann diese Gleichung linear oder nicht-linear sein.

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 sogenannten direkten linearen Transformation (DLT) führt.

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

Abb. 4-2: Abbildungsmodell zur direkten linearen Transformation (DLT)

Dabei stehen die Großbuchstaben X, Y, und Z für das reale Koordinatensystem; die Kleinbuchstaben x und y repräsentieren die Abbildungskordinaten. Das DLT - Modell (Abb. 4-2) 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 (Übergang Luft – Wasser).

Für Experimente, bei denen signifikante Nichtlinearitäten in der Kameraabbildung vorliegen, liefert das Auswertesoftwarepaket „Flow Manager 3-D PIV“ mehrere polynomische Abbildungsmodelle, welche zur Beschreibung der tatsächlichen Bewegung eine höhere Eignung aufweisen.

Eine solches Abbildungsmodell ist das x, y, und z Polynom zur dritten Potenz:

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

Abb. 4-3: Abbildungsmodell zum „XYZ-Polynom zur dritten Potenz“

Hierbei sind alle A - Koeffizienten 2-D Vektoren, die getrennte Polynome für die Abbildungskordinaten x und y produzieren. Zu beachten ist, dass polynomische Abbildungsmodelle (Abb. 4-3) empirisch sind und deswegen keine physikalische Argumentation notwendig ist. Dieses rein mathematische Modell ist, wie theoretische Betrachtungen /2/ dokumentieren, geeignet, die Gegebenheiten im Strömungsfeld bei komplexer Brechung exakter darzustellen als eine DLT (Abb. 4-2).

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.

Dies erzeugt zwei 2-D Vektorfelder, welche das reale Strömungsfeld, wie es von der jeweils linken und rechten Kamera aufgenommen wird, darstellt. Nach erfolgter Kamerakalibrierung lassen sich aufgenommene 2D-Informationen zu einem 3D-Strömungsfeld weiterverarbeiten. Offensichtlich sind 3-D Berechnungen nur möglich, wenn Informationen von beiden Kameras zur Verfügung stehen. Aufgrund einer perspektivischen Verzerrung bildet jede Kamera eine trapezförmige Region des Lichtschnitts ab. Bei optimaler geometrischer Ausrichtung (Kamerawinkel 90°) der zwei Kameras werden die entsprechenden Bildausschnitte sich nur teilweise überlappen (Abb. 4-4), so dass für die Weiterverarbeitung ein geringer Anteil der erfassten Informationen nicht genutzt werden kann.

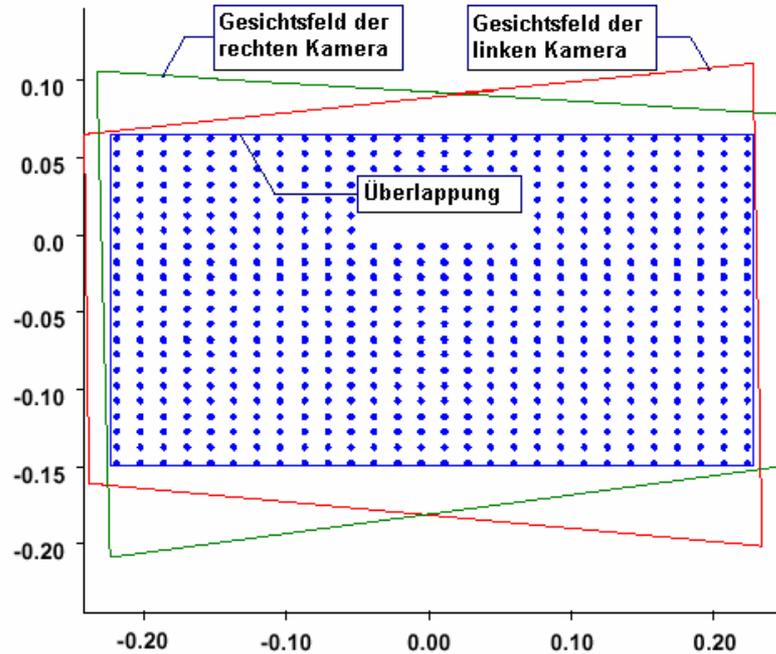


Abb. 4-4: Überlappung der Gesichtsfelder der Kameras

Im Bereich der Überlappung (Abb. 4-4) 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.

## 5 Untersuchungen mit dem PIV-System, LZH

### 5.1 Randbedingungen

#### 5.1.1 Messorte

Die Erprobung des PIV-Systems erfolgte in der Umlaufrinne in Hannover Marienwerder und der Strömungsrinne am Schneiderberg in Hannover. Die Versuche an diesen Standorten werden im folgenden zusammenfassend beschrieben und durchgeführte Messungen mit dem PIV-System und, falls eingesetzt, mit der ADV-Sonde aufgeführt. Die Validierung des Systems erfolgte am GWK (Großer Wellenkanal) des FZK in Marienwerder /9/. Die Naturmessungen werden anschließend in Gandersum am Emssperrwerk durchgeführt.

**Tabelle 5-1:** Chronologie der Praxisversuche und Messungen

<b>Zeitraum</b>	<b>Ort</b>	<b>durchgeführte Messungen</b>	<b>Ergebnisse Bemerkungen</b>
Juli 02 – Sept. 02	Umlaufrinne Marienwerder	Ermittlung Randbedingungen, Trübung	Definition des Einsatzbereiches
Sept. 02 – Dez. 02	Strömungsrinne Schneiderberg	Stat. Lastfall	Tiefenprofil
Jan. 03 – Juni 03	Umlaufrinne Marienwerder	Einfache Störungen in der Strömung	Erfassung der Strömungsablenkung
Juli 03	GWK Marienwerder	Wellengang	Erfassung der Strömungswirbel
Aug. 03 – Juli 04	Strömungsrinne Schneiderberg	Dyn. Lastfall	Erfassung der zeitlichen Veränderung
Sept. 04 – Dez. 04	Emssperrwerk Gandersum	Naturmessungen	Gezeitenverhalten Hufeisenwirbel

Die zeitliche Abfolge der Versuche und Messungen an den verschiedenen Standorten wird in Tabelle 5-1 wiedergegeben.

### 5.1.2 Hardwarekomponenten

Das Messsystem besteht aus folgenden Komponenten:

- Laser (Wellenlänge: 532 nm, Doppelpuls, Pulsenergie: 120 mJ, Pulsdauer: 5 ns, Repetitionsrate: max. 15 Hz)
- CCD Kamera (1280 x 1024 Pixel, 12-bit Auflösung)
- Kamera Objektiv (Brennweite 60 mm)
- fernbedienbare Kamerahalterung, Mechanik zur Blickwinkelkorrektur
- PIV Prozessor (FlowMap 1500, 1Gbyte Speicher, TCP/IP Protokoll)
- Optiken, Spiegel und PIV-Software

#### Hardware - Hauptkomponenten



**Laserkopf**



**Laserversorgungseinheit**



**Steuer- und Auswerteeinheit**



**CCD Kamera**

*Abb. 5-1: Hardware – Hauptkomponenten*

Diese Komponenten (Abb. 5-1) werden auf ein variables Trägersystem montiert. Die Position der Einzelkomponenten kann den jeweiligen Versuchsbedingungen angepasst werden. Eine kompakte Bauweise /2/, wie sie für den Einsatz im Tauchgehäuse erforderlich ist, kann damit erreicht werden.

## 5.2 Installation und Messungen mittels PIV-System an der Umlaufrinne

Die Umlaufrinne / Marienwerder des Franzius-Instituts besteht aus zwei sich 22 m voneinander entfernt gegenüberliegenden Halbkreisen mit einem Durchmesser von 5,90 m (Abb. 5-2). Zwischen den beiden Halbkreisen sind auf der einen Seite eine gerade Fließstrecke mit Sichtfenstern zur Strömungsbeobachtung und gegenüberliegend 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. Dies gilt ebenso für die zwei zum Befüllen und Leeren der Rinne vorgesehenen Pumpen.



Abb. 5-2: Umlaufrinne des Franzius-Instituts in Hannover - Marienwerder

Alle Pumpen können elektronisch über Computer geregelt werden, so dass die Steuerung von Versuchen mit wechselnder Strömungsgeschwindigkeit, Änderung der Strömungsrichtung und des Wasserspiegels sehr exakt auch über einen längeren Zeitraum möglich ist.

Da die sich in der Umlaufrinne befindliche Wassermenge relativ klein und konstant ist, kann die in den Versuchen erforderliche Trübung mit verhältnismäßig kleinen Mengen an Schwebstoffen erreicht und über einen langen Zeitraum gehalten werden. Dies ist insbesondere in der Phase der Erprobung eine Voraussetzung für die Kalibrierung des PIV-Gerätes.

Die Umlaufrinne verfügt über folgende technische Spezifikationen:

- Umlaufgeschwindigkeit regelbar, abhängig vom Füllstand
- Wasserstand von 0 m bis 1,0 m
- 4 einstufige Kreiselpumpen (Weise & Monski – Typ PL XII)
- Zeit zum Befüllen und Leeren bei max. Wasserstand: ca. 1,2 h

### 5.2.1 Messungen mit dem Particle Image Velocimeter

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 im Hinblick auf ein reproduzierbares Ergebnis zu optimieren und der Einfluss unterschiedlicher Tracerpartikel bzw. Seedings (Art, Form, Größe und Menge) /5/ systematisch zu untersuchen.

### 5.2.2 Messsystem

Die Komponenten des Messsystem sind in Abschnitt 5.2 ausführlich beschrieben. Nach vollständiger Installation der Einzelkomponenten für den Versuchsbetrieb in Marienwerder wurden die Umlaufrinne und das Messsystem auf Funktionsfähigkeit geprüft und in Betrieb genommen.

### 5.2.3 Randbedingungen

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

Die bestimmenden Randbedingungen sind die Einflüsse der optischen Übergänge zwischen den Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex (Luft, Glas, Wasser) /5/. Weitere Parameter (Tab. 5-2) stellen die Abstände der Systemkomponenten untereinander und der Beobachtungswinkel sowie die Korrektur der auftretenden Abbildungsverzerrungen (Scheimpflug-Korrektur) /2/ dar.

**Tabelle 5-2:** Einflussgrößen auf die Genauigkeit des Messsystems

Randbedingung/Parameter	Wert	Einfluss
Brechungsindex	Luft := 1 Glas := 1,5 Wasser := 1,333	Grad der Reflektion, bestimmt die mathematische Transformation (siehe 4.1.1)
Abstand	0,80 –1,90 m	Anzahl der Kalibrationspunkte reduziert sich mit Abstand
Winkel	30-120°	Abbildungsfehler werden größer bei Winkeln $\neq 90^\circ$
Scheimpflugwinkel	- 20 bis + 20°	Änderung der Lage des Ursprungs im Koordinatensystem

### 5.2.4 Versuchsaufbau

Die einzelnen Komponenten des Messsystems werden an einem variablen Trägersystem aus Aluminiumprofilen befestigt. Die Kameras und der Laser befinden sich auf einer Linie in unterschiedlichen Ebenen (Höhe). Der Laserlichtschnitt wird von oben durch die Wasseroberfläche aufgespannt (Abb. 5-3 u. 5-4). Der Blickwinkel der Kameras beträgt  $30^\circ$  zur Hauptströmungsrichtung. Der Abstand Kameras - Lichtschnittebene beträgt 1,90 m.

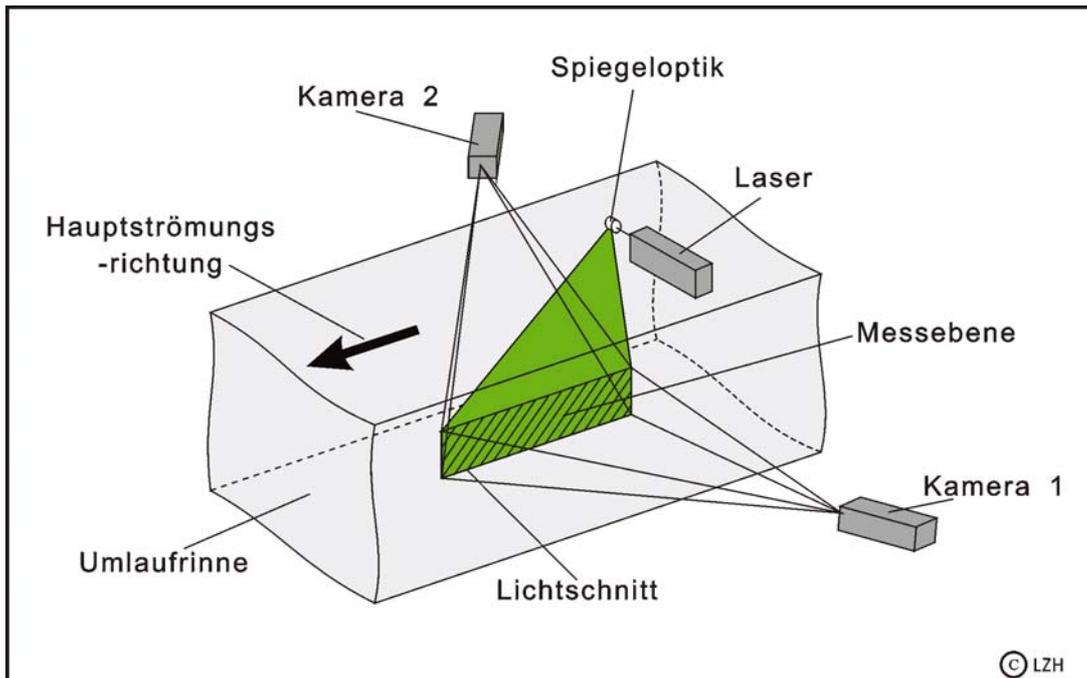


Abb. 5-3: Skizze des Aufbaus und Anordnung der Komponenten (Schema)  
Blickwinkel in Richtung der Hauptströmung

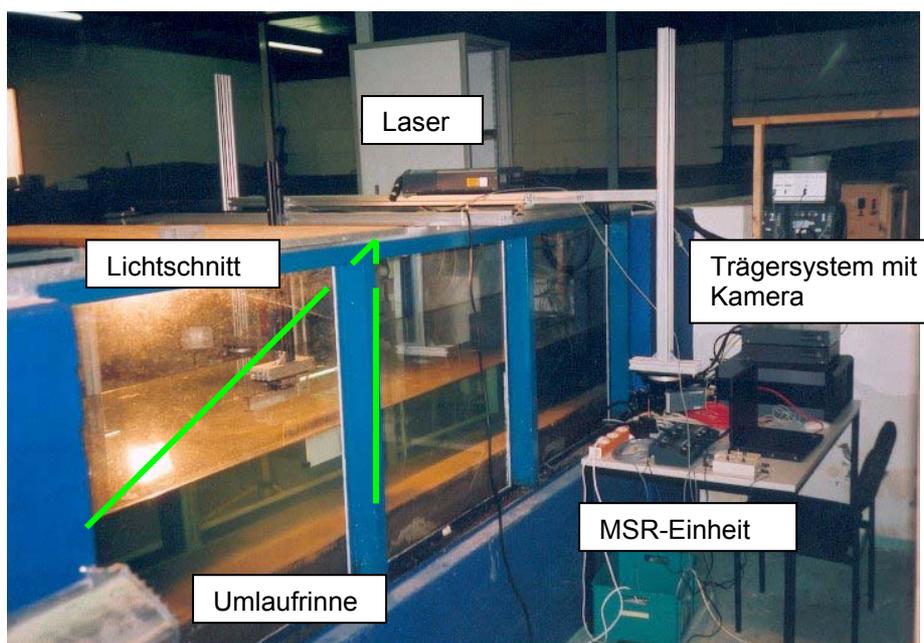


Abb. 5-4: Versuchsaufbau Umlaufrinne Marienwerder (Übersicht)

### 5.2.5 Versuchsdurchführung

Zur der Optimierung der Abbildungsqualität und Bilderfassung der beiden Kameras wird das auf dem Kalibriertarget abgebildete Punktgitter unter Einsatz verschiedener Leuchtmittel unterschiedlich ausgeleuchtet. Eine Minderung der Reflektionen an den Glasoberflächen ist erforderlich. Da ein Einsatz Antireflex-beschichteter 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.

Es werden folgende Versuchsreihen mit unterschiedlichen Seedings betrachtet:

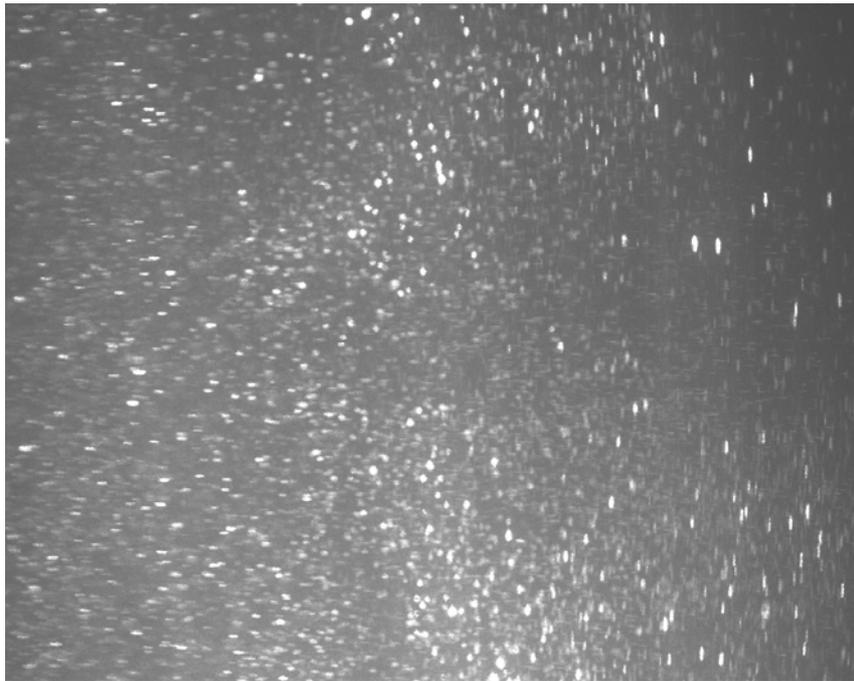
- Kunststoffgranulat; v: langsam, mittel, schnell bei ungestörter Strömung
- Kunststoffgranulat; v: langsam, mittel, schnell bei gestörter Strömung (turbulent)
- Mischsand; v: langsam, mittel, schnell bei ungestörter Strömung
- Mischsand; v: langsam, mittel, schnell bei gestörter Strömung (turbulent)

v:= Geschwindigkeit in relativen Einheiten (400, 800, 1200 U/min an der Kreiselpumpe)

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

### 5.2.6 Zwischenergebnisse

Während der Kalibrierungsphase ist in Abhängigkeit von den Randbedingungen eine Anpassung der Software-Parameter erforderlich. Nach erfolgreicher Einrichtung und Kalibrierung zeigen die resultierenden Abbildungen (Abb. 5-5) eine gute Sichtbarkeit der Streulichtreflexe auf den Einzelaufnahmen /7/.



*Abb. 5-5: Einzelaufnahme (Image) mit Streulichtreflexen*

Einen geringen Einfluss üben Luftblasen und eine unruhige Wasseroberfläche (im Rahmen bestimmter Parameterwerte für Wellenlänge, Frequenz und Amplitude) aus. Unterschiedliche Tracerpartikel führen zu reproduzierbaren Ergebnissen, die die Strömungsverhältnisse im Beobachtungsfenster der Umlaufrinne wiedergeben. Auch der gemessene Geschwindigkeitsbereich entspricht der Größenordnung des realen Strömungsfeldes. Unterschiedliche Geschwindigkeitsgebiete in drei Abstufungen (langsam, mittel und schnell) lassen sich bei ungestörter Strömung wiederfinden (Abb. 5-6).

In den folgenden Abbildungen wird die Darstellung des Auswertesystems wiedergegeben, wie sie später der Echtzeitanzeige am Messort in der Praxis entspricht.

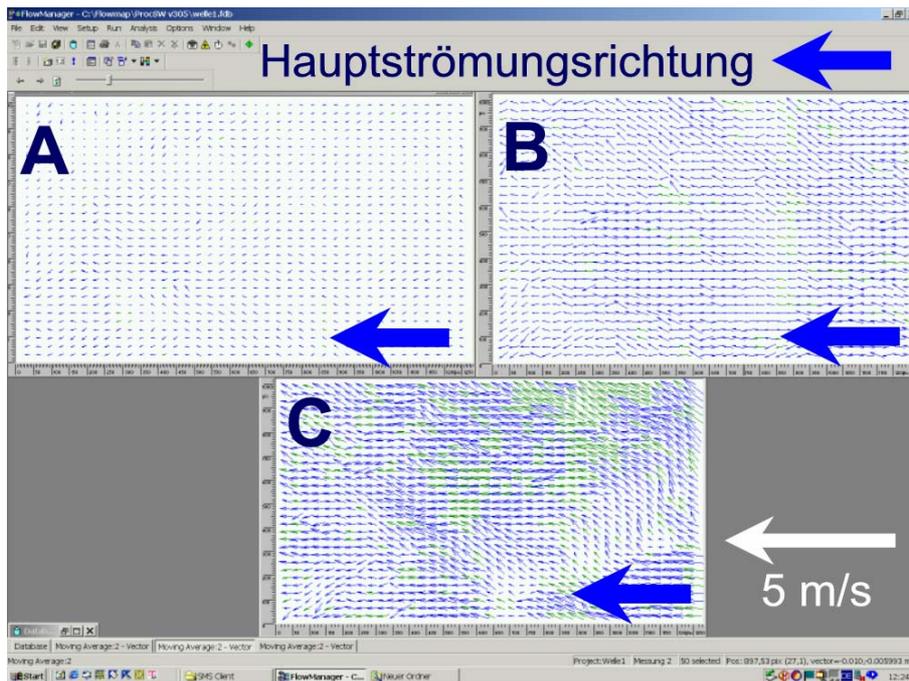


Abb. 5-6: 2D-Vektorfelder bei drei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten  
 Mittelwerte Bsp. A:=0,2 m/s; Bsp. B:=0,5 m/s; Bsp. C:= 0,7 m/s  
 Maßstab: 5 m/s, siehe unten rechts

Die Beträge der Vektoren verändern sich erwartungsgemäß analog zum Strömungsgeschehen. Man erkennt in den Abbildungen klare Unterschiede zwischen gestörter und ungestörter Strömung (Abb. 5-7).

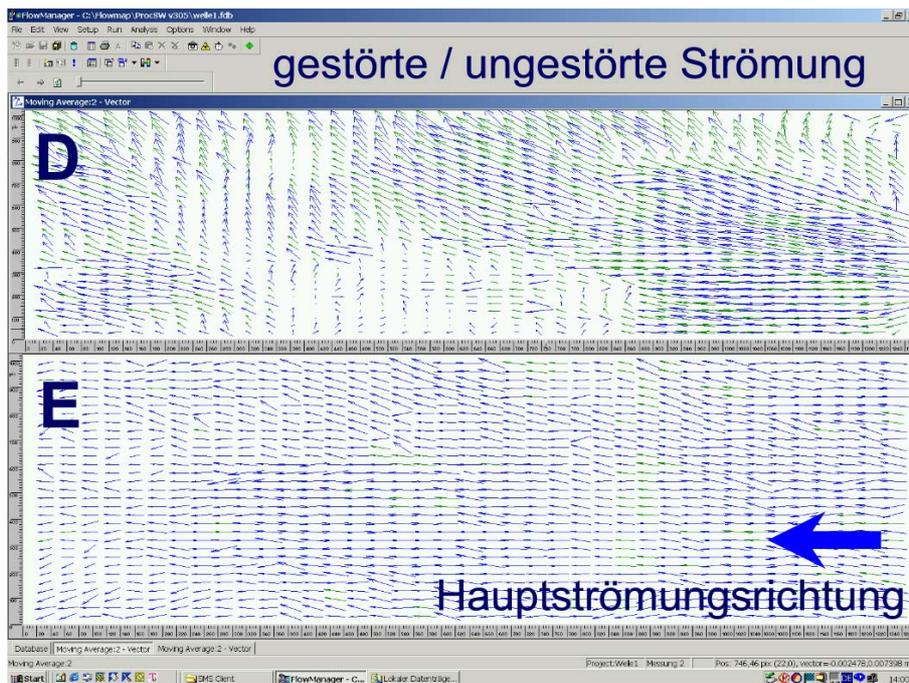


Abb. 5-7: 2D-Vektorfelder einer gestörten (Bsp. D) und einer ungestörten (Bsp. E) Strömung

Die Auswertung der gewonnenen Bilder ergibt Strömungsfelder, die reale Bedingungen im Wasser beschreiben. Richtung und Größenordnung der ermittelten Geschwindigkeitsvektoren nach Auswertung der 2D-Strömungsbilder entsprechen den eingestellten Bedingungen.

Der Einfluss in Größe und Masse verschiedener Tracerpartikel auf die Ergebnisse wird erkennbar. So ergibt sich für große Partikel mit optimalen Reflektionseigenschaften eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung aufgrund der Neigung zur Sedimentation. Während bei kleinen und somit leichten Partikeln die Reflektionseigenschaften abnehmen und die schwerkraftbedingte y-Komponente an Bedeutung verliert. Eine Vermischung unterschiedlicher Seedings führt zu einer Mittelung. Der Einsatz der gewählten Tracerpartikel verdeutlicht den Einfluss der inhomogenen Partikelgrößen und Partikelverteilung auf das Messergebnis in Hinblick auf die Praxis. Damit wird für den späteren Einsatz des Systems der Zustand am natürlichen Gewässer nachgestellt.

Die eingestellten Geschwindigkeitsbereiche (Abb. 5-6) werden differenziert dargestellt. Die Abbildungen 5-6 und 5-7 zeigen die Möglichkeiten einer Echtzeitdarstellung der später in der Praxis durchgeführten Messungen.

### 5.2.7 Modifikation und Installation des PIV Systems an der Umlaufrinne

Im 6. und 7. Quartal (Januar 2003 bis Juni 2003) wurden die Untersuchungen an der Umlaufrinne des FI in Marienwerder nach vorübergehender Verlegung des Systems an die Strömungsrinne wiederaufgenommen. Aus dem Versuchsaufbau am Strömungskanal wird die modifizierte Positionierungseinheit für den Laserkopf übernommen, die es ermöglicht den Lichtschnitt in Größe und Abstand zur Messebene durch Verschieben (in x-y-Richtung) anzupassen. Der Laserkopf befindet sich hierbei oberhalb der Wasseroberfläche (Abb. 5-8).



Abb. 5-8: Umlaufrinne; modifizierter Aufbau des PIV-Systems

Die Variation der Lichtschnittgröße wird in mehreren Versuchsreihen durchgeführt, um die Ausleuchtung der Partikel am Hindernis zu optimieren. Dabei zeigt sich die ausreichende Flexibilität des Messsystems, um Anpassungen an die jeweils vorgefundenen baulichen (geometrischen) Randbedingungen vorzunehmen.

Für den Abstand zwischen Laser und Messebene von  $> 2$  m beleuchtet das Laserlicht einen als Messfeld geeigneten Bereich von  $400 \times 750$  mm. Durch die Verwendung von Kameraobjektiven unterschiedlicher Brennweite (35-60 mm) kann der optimale Bildausschnitt gewählt werden. Es erfolgt eine Optimierung der einfachen Höhenverstellung (in y-Richtung) für die Kameras zur Einstellung des Gesichtsfeldes aus dem Aufbau vom Schneiderberg.

Zur Nachahmung eines Tauchgehäuses wird im nächsten Schritt ein nach oben offenes Glasgehäuse zur Aufnahme des Laserkopfes in den Versuchsaufbau integriert, wie in Abb. 5-9 dargestellt. Der Ursprung des Laserstrahls zur Erzeugung des Lichtschnitts befindet sich in diesem Aufbau unterhalb der Wasseroberfläche. Dieser Aufbau dient zur Erarbeitung weiterer praxisrelevanter Parameter für Messungen unter realistischen Betriebsbedingungen.

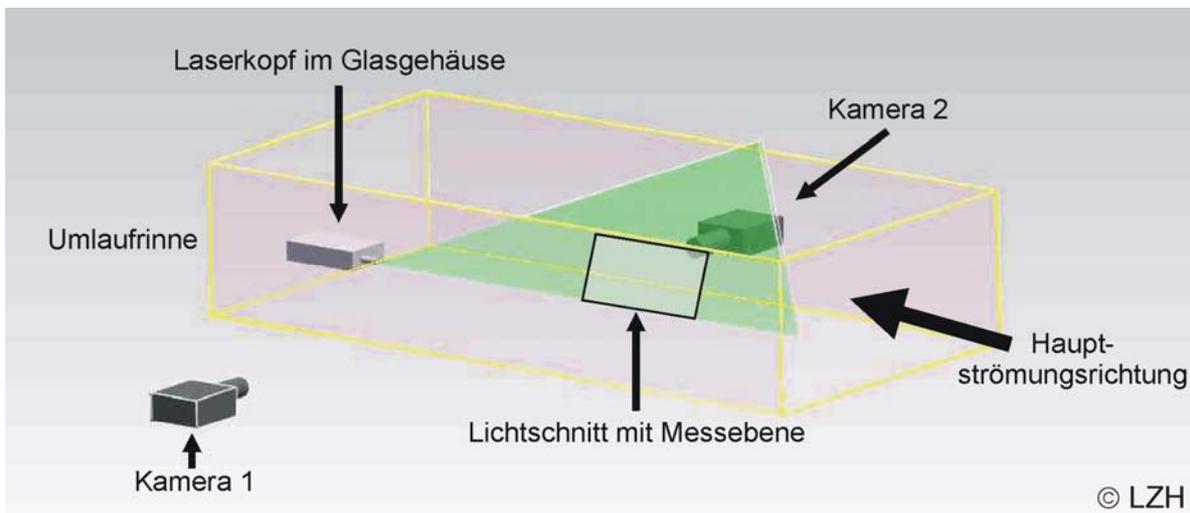


Abb. 5-9: Versuchsaufbau Marienwerder mit „getauchtem“ Laserkopf (Skizze)

Parallel dazu erhielt das LZH im Januar durch den Kontakt zum Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWK seit Jan. 05 NLWKN) in Aurich die online Messdaten des Jahres 2002 für Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Temperatur, Trübung und Geschwindigkeit an den Messstellen Pogum, Terborg und Gandersum zur Einschätzung der Randbedingungen am gewählten Naturfallbeispiel der Unterems.

Nach dem Abschluss der manuellen Auswertung der durchgeführten Versuche vom Schneiderberg erfolgt eine erste Analyse der generierten Datenformate am LZH und eine Diskussion der Ergebnisse mit dem Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (FI). Eine Recherche zur Definition geeigneter Verarbeitungssoftware ist vereinbart.

Parallel wird zur Automatisierung der Auswertung und Verknüpfung der Messdaten des 3D-PIV-Systems in drei unterschiedlichen Höhen der Wassersäule (übereinanderliegende Messebenen) ein Makro programmiert. Somit ist die automatische Generierung eines Gesamttiefenprofils möglich.

Im Fortgang der Arbeiten werden die praxisrelevanten Bedingungen im Gewässer nachgestellt. Bei den Untersuchungen zu den verschiedenen Seedings (Tonerde, Feinsand, Rund-

sand) erfolgen sowohl Versuche mit monodispersen Partikelverteilungen, als auch mit Mischungen aus unterschiedlichen Fraktionen (0,5-1,5 mm und 0,05-0,5 mm) in variierenden Mischungsverhältnissen. Die Tonerde nimmt dabei eine Sonderstellung ein.

Durch unterschiedliche ins Wasser eingebrachte Sedimente lässt sich gezielt die Trübung verändern. Die Ermittlung des optimalen Arbeitsbereichs des PIV-Systems erfolgt in Abhängigkeit der nach NTU-Standard in mg/l kalibrierten Trübung (Abb. 5-10). Dabei zeigt sich sehr deutlich der Einfluss der Partikelgröße auf die Qualität der Streulichtreflexe der zur Auswertung herangezogenen Einzel-Images. So gilt der ermittelte niedrigste Schwellenwert von < 75 mg/l für eine weitgehend homogene Verteilung von Tonerde aus kleinsten Partikeln (< 0,01 mm). Versuche mit zunehmender Partikelgröße und inhomogener Größenverteilung des Seedings ergeben, dass bei veränderten Bedingungen der Schwellenwert eine flexible Größe darstellt und sinnvolle Geschwindigkeitsmessungen oberhalb eines Schwellenwertes der Trübung von 350 mg/l (Wert bei homogenem Seeding mit Partikeln bis zu 1,5 mm) möglich sind /5/.

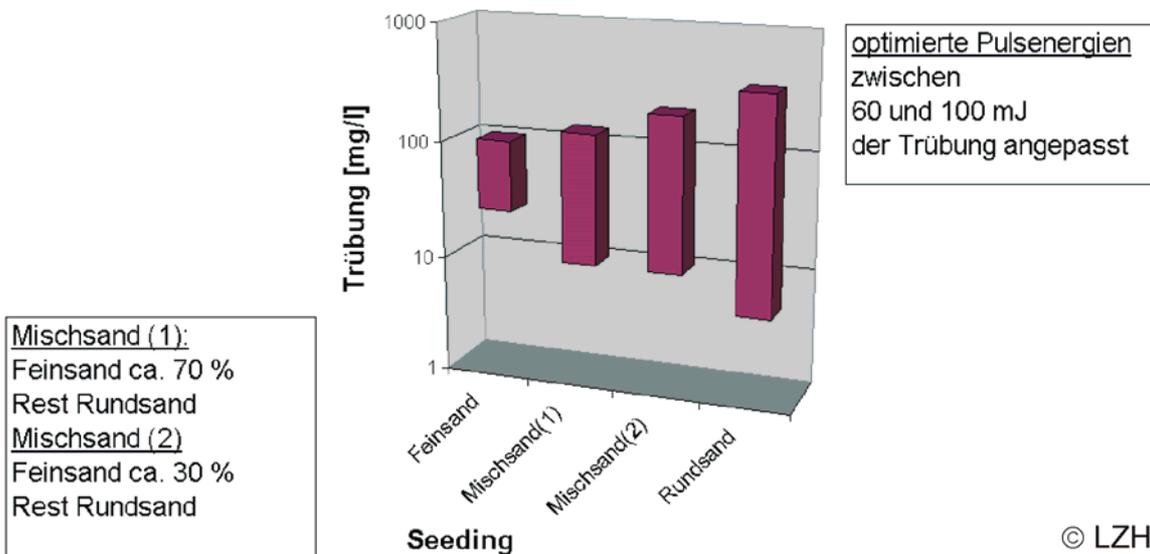


Abb. 5-10: Zusammenhang zwischen PIV Arbeitsbereich, Trübung und Seeding

Die Beobachtungen zeigen, dass bei ausschließlicher Verwendung der Tonerde als Seeding (Partikel < 0,01 mm) sich im Wasser eine Suspension bildet. Es entsteht unter diesen Verhältnissen kein Lichtschnitt im flüssigen Medium. Beim Auftreffen des Lichtes auf die Suspension bildet sich ein heller halbkugelförmiger Bereich aus Streulicht.

Für die notwendige optimale Streuung des Laserlichtes an den Seeding Partikeln ist das richtige Verhältnis von Pulsenergie und Partikelverteilung ausschlaggebend. Die Einstellungen der Parameter sind bei jeder Messkampagne für die jeweils vorgefundenen Bedingungen am Messort zu ermitteln und anzupassen. Die im Labor systematisch untersuchten Szenarien mit homogener Verteilung des Seedings zeigen, dass mit optimierten Pulsenergien und Belichtungszeiten Messungen in einem bestimmten Parameterfenster immer möglich sind. In der Natur sind Situationen mit inhomogenen Sedimenten (Form und Größe) die Regel. Die natürliche Verteilung der Streupartikel am Gewässer lässt, bei angepassten Parametern im Rahmen der im Labormaßstab bestimmten Messfenster, befriedigende Messungen in der Praxis zu.

Um turbulente Strömungszustände zu erzeugen wird ein Hindernis in die Rinne eingebaut. Abb. 5-11 zeigt das Hindernis im PIV-Image und das errechnete Vektorfeld der Strömungsgeschwindigkeit

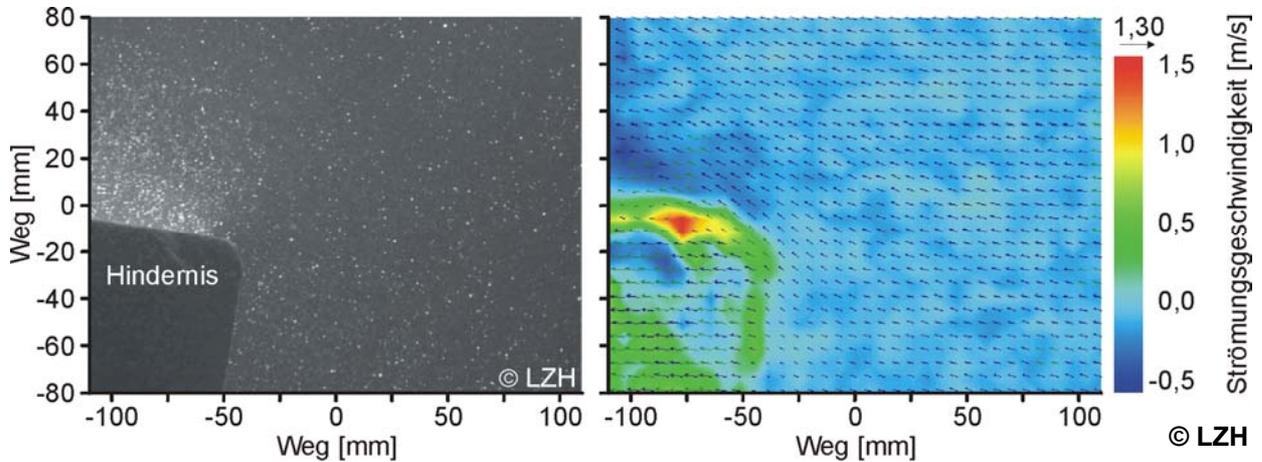


Abb. 5-11: PIV-Image und Vektorfeld mit Hindernis im Strömungsfeld

### 5.3 Fortlaufende Versuche an der Strömungsrinne

Im 5. Quartal (Oktober 2002 bis Dezember 2002) der Projektlaufzeit wurde der bestehende Aufbau des PIV-Systems in der Versuchshalle des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (FI) am Schneiderberg zur Durchführung weiterer Versuche modifiziert.

Ziel ist die Simulation praxisrelevanter Lastfälle von Hubtoren unter Einbeziehung der online Ergebnisse als 3D-Vektorfelder. Die Aufnahme von Tiefenprofilen basierend auf 2D-Vektorfeldern zeigt erst nach mehreren Versuchsreihen ausreichende Kongruenz mit den Messungen mittels ADV-Sonde und der numerischen Simulation (Abb. 5-12).

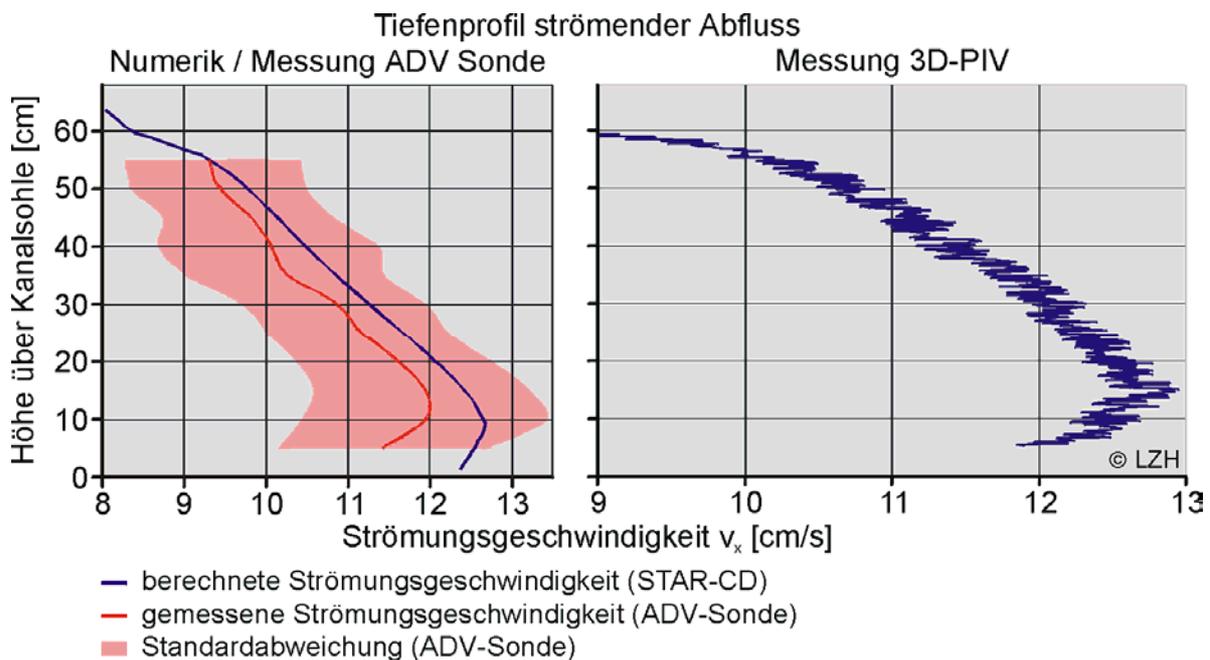


Abb. 5-12: Tiefenprofil basierend auf 2D-PIV Messungen, ADV-Sonde und Numerik

Online wird die Strömungscharakteristik mit Hauptgeschwindigkeitskomponente in x-Richtung (parallel zur Hauptströmung) realisiert und erfolgt als Bildschirmanzeige. In z-Richtung zeigen sich vereinzelt Geschwindigkeitskomponenten als Artefakte (Einzelereignisse). Am 25.11.2002 fand am Franzius-Institut das Treffen der Gutachter unter Beteiligung aller Projektpartner statt, bei dem eine erfolgreiche Demonstration der Funktionalität des lasergestützten Messsystems an der Strömungsrinne stattfand.

Anschließend erfolgten umfangreiche Anpassungen der einzelnen Komponenten des Systems und die Installation einer einfachen vertikalen Verschiebeeinheit für die Kameras, um die Aufnahme von Tiefenprofilen (Abb. 5-12) basierend auf 2D Messungen zu ermöglichen. Dabei konnten Tiefenprofile über die ganze Höhe 65 cm (Lastfall1: strömender Abfluss) der Wassersäule (bis 3 cm über dem Grund und 3 cm unter der Wasseroberfläche) in der Strömungsrinne /5/ gemessen werden.

Wie aus Abb. 5-12 hervorgeht, zeigen sich bei den Untersuchungen sehr gute Übereinstimmungen zwischen der numerischen Simulation der Strömungsgeschwindigkeit und der Messung mit dem PIV-System. Die umfangreiche manuelle Auswertung der Daten erfolgt unter Zuhilfenahme kommerzieller Tabellenkalkulationssoftware.

#### 5.4 Aufbau des lasergestützten Messsystems am GWK

Wie langfristig geplant, ergab sich die Möglichkeit im 8. Quartal (Juli 2003 bis Sept. 2003) das 3D-PIV Messsystem am Großen Wellenkanal (Abb. 5-13) des Forschungszentrums Küste zu installieren.



© LZH

Abb. 5-13: Großer Wellenkanal und Beobachtungsfenster der PIV Messung

Der Große Wellenkanal besteht aus einer überdachten Trogkonstruktion. Bei einer Breite von 5 m und einer Tiefe von 7 m beträgt die nutzbare Länge 307 m. Die hydraulisch angetriebene Wellenmaschine (900 kW) ist als kombinierte Translations- und Rotationsmaschine

mit einem maximalen Hub von  $\pm 2,1$  m und einer aufgesetzten, um  $\pm 10^\circ$  drehbaren Klappe ausgebildet und kann regelmäßige Wellen und Seegang unter Tief- und Flachwasserbedingungen simulieren. Es lassen sich regelmäßige Wellen mit Wellenhöhen bis 2,0 m und Wellenspektren mit signifikanten Wellenhöhen bis etwa 1,3 m erzeugen.

Die Einsteuerung des Seegangs für die Wellenmaschine erfolgt über einen Regelkreis, der in der Lage ist, die am Bauwerk reflektierten Wellen an der Wellenmaschine zu absorbieren. Dies ermöglicht Langzeitversuche mit konstant bleibenden Energieinhalten (für regelmäßige und unregelmäßige Wellen). Ferner können transiente Wellenzüge genutzt werden, um hohe Einzelwellen ("freak waves") zu generieren.

Die Versuche finden in einem seitlichen Schacht bei Entfernung 177 m am GWK statt. Der optische Zugang ist durch Glasfenster (Abb. 5-13) ermöglicht, die sich in Segmenten über die ganze Höhe der möglichen Wassersäule erstrecken. Zur Versorgung steht Wasser aus dem naheliegenden Mittellandkanal zur Verfügung, das eine natürliche Partikeltrübung aufweist [7].

Dabei zeigt sich, dass die im natürlichen Gewässer enthaltenen Partikel, Schwebstoffe und Sedimente geeignet sind, um daraus mittels PIV Verfahren Vektorfelder zu generieren. Ein zusätzliches künstliches Seeding ist nicht erforderlich. Der in Abb. 5-14 abgebildete Geschwindigkeitsbereich gibt die realen Verhältnisse wieder. Vergleichsmessungen wurden mittels Flügelradanemometer durchgeführt und zeigen, soweit im turbulenten Bereich eine exakte mechanische Messung möglich ist, gute Übereinstimmungen ( $\pm 20\%$ ) mit den Ergebnissen der 2D/3D-PIV Messungen.

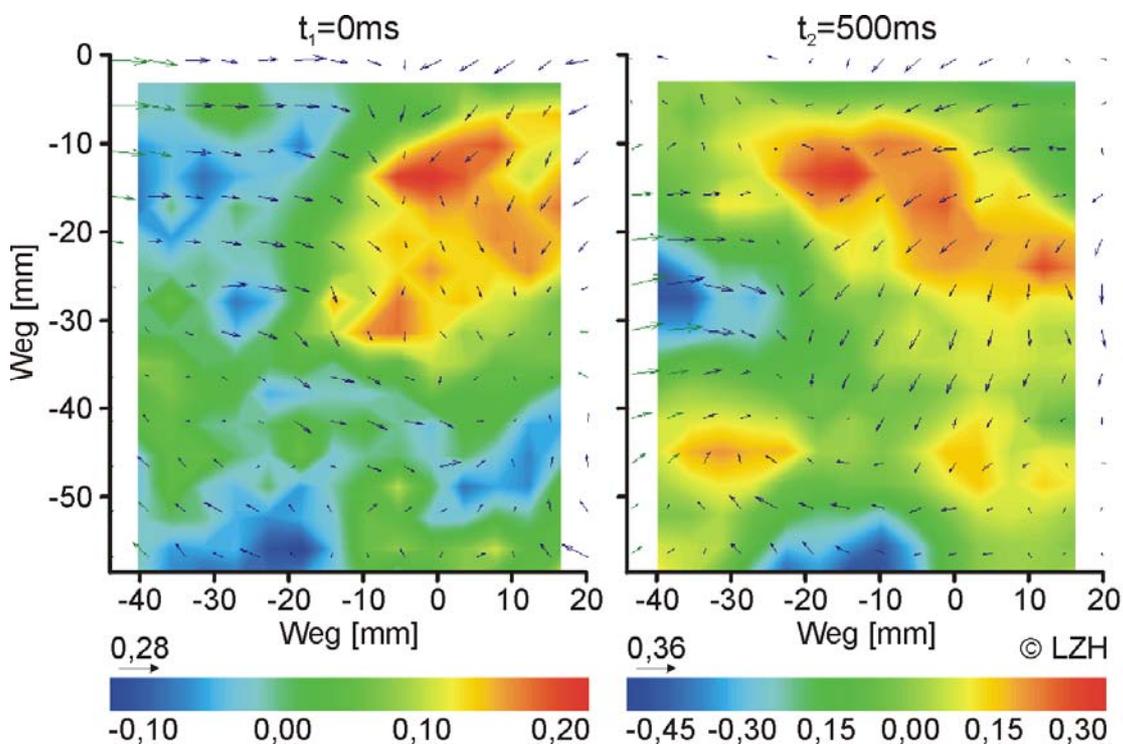


Abb. 5-14: Großer Wellenkanal, Strömungsfeld einer Welle

Der Lichtschnitt schneidet die in Hauptströmungsrichtung durchlaufende Welle horizontal in einer zur Ausbreitungsrichtung parallelen Ebene. Deutlich lassen sich Geschwindigkeitskomponenten in z-Richtung, senkrecht zur Hauptströmungsrichtung (x-Richtung) erkennen, die ein Indiz für auftretende Turbulenzen sind. Ebenfalls erkennt man die gegenläufigen Vektoren von Wirbeln in der Messebene /9/.

Die Trübung beträgt 80-95 mg/l. Die 3D-Vektorfelder zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ( $t_1$ ,  $t_2$ ) zeigen dabei die Bewegung der durch die Wellen erzeugten Turbulenzen und Wirbel, die sich relativ zur Strömungsrichtung fortbewegen und sich ausdehnen oder kollabieren (Abb. 5-14).

### 5.5 Naturmessungen in Gandersum am Emssperrwerk

Die Betreiber des Emssperrwerks in Gandersum (Ostfriesland) ermöglichen einen in-situ Einsatz. Die Installation und Inbetriebnahme des PIV-Messsystems erfolgt am 15. und 16. September 2004. Dabei werden zum einen mechanische und berührungslose, lasergestützte Sensoren für den Langzeiteinsatz im Bereich eines Pfeilers (Abb. 5-15) eingesetzt, zum anderen wird für dieses Bauwerk ein neu erstelltes numerisches Modell der Strömungszustände kalibriert und validiert. Die am Sperrwerk unter Einfluss der Tide über mehrere Stunden gemessenen, zeitlich und räumlich hochaufgelösten Strömungsdaten fließen als Stützpunkte in das numerische Modell ein. Das System ist dabei mehrere Tage im Einsatz und wird zur Anpassung an die Randbedingungen kalibriert.



Abb. 5-15: Messaufbau am Emssperrwerk; Trägersystem mit PIV-Messsystem

Am 7. Oktober werden beim Ortstermin in Gandersum Messungen in einer Tiefe von 0,5 m durchgeführt. Dabei handelt es sich um grundlegende Versuche zur Kalibrierung des PIV-Systems und die Optimierung der Parameter (Belichtungszeit, Messintervall etc.) an die aktuellen Randbedingungen. Die Messreihe dient der Untersuchung der Hauptströmungsrichtung und der Darstellung der Verhältnisse (Abb. 5-16a/b) zu unterschiedlichen Tidebedingungen (Gezeiten). Außerdem wird der Einfluss der verschiedenen tageszeitlichen Bedingungen (Sonnenstand, Bewölkung, Wind bzw. Wellengang) protokolliert.

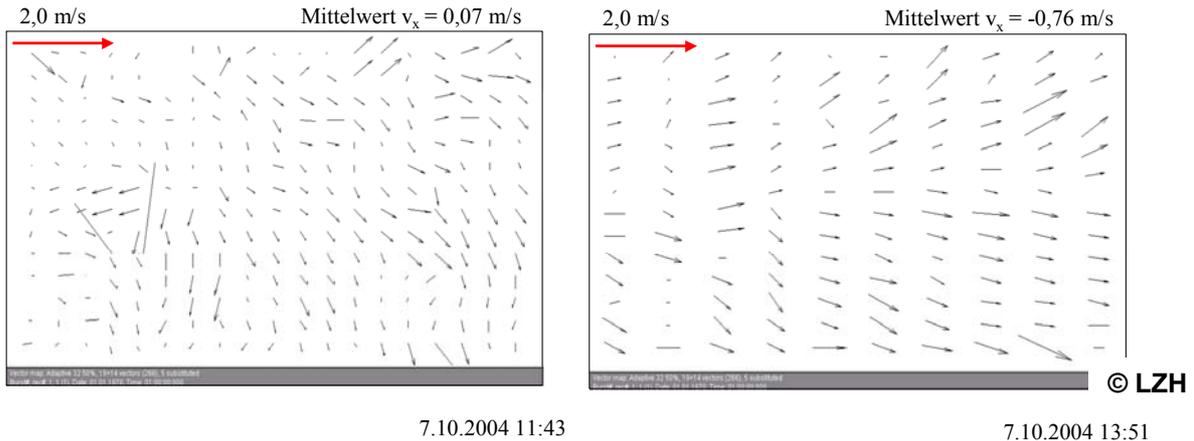


Abb. 5-16a: Einfluss der Gezeiten am Emssperrwerk; Messungen vom 7.10.2004; 2D-PIV

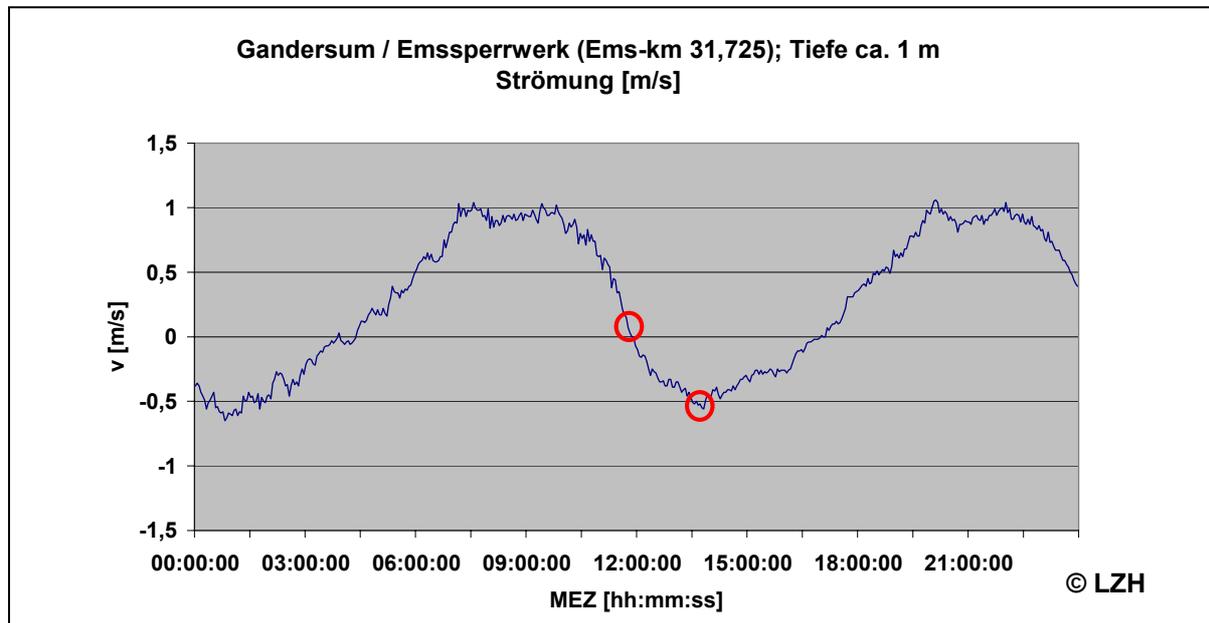
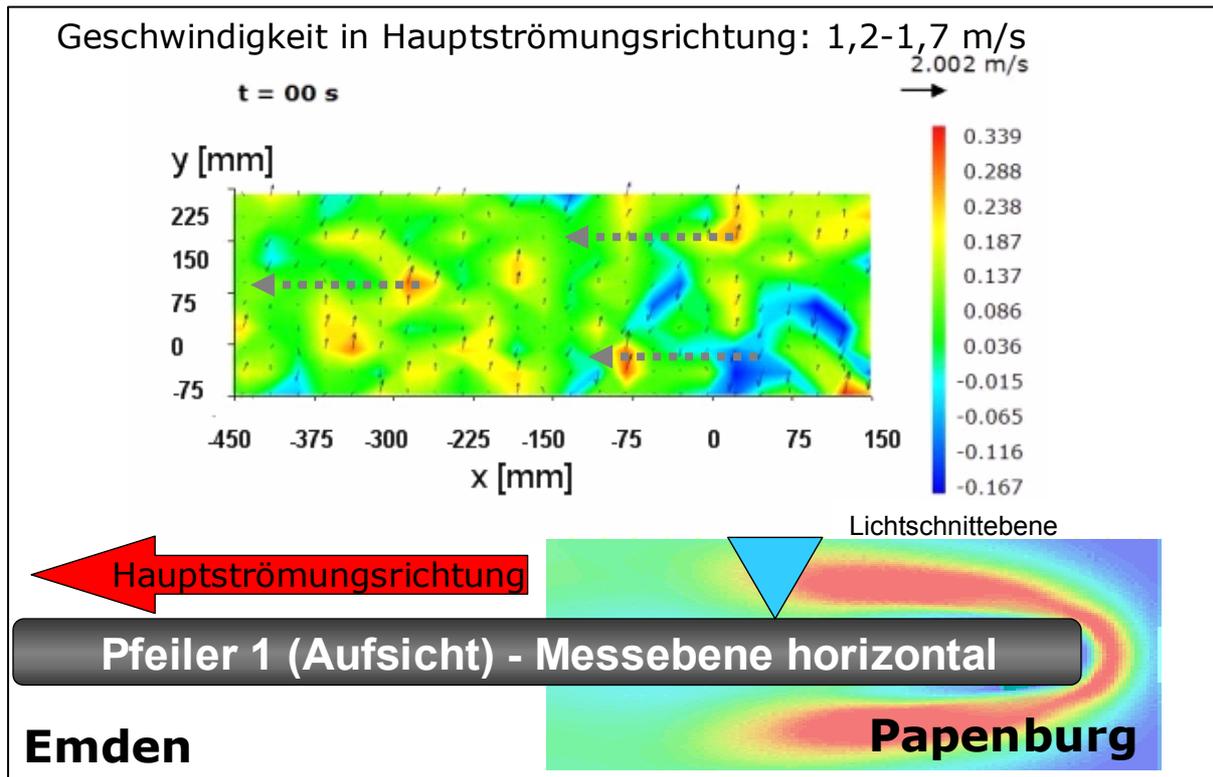


Abb. 5-16b: Gezeiten am Emssperrwerk; Messungen vom 7.10.2004; NLWK Aurich

Der Vergleich von 2D-PIV Messwerten und Strömungsmessungen der Sonde des NLWK (ca. 500 m landeinwärts vom Emssperrwerk) in den Abbildungen 5-16a und b zeigt die gute qualitative und quantitative Übereinstimmung der Ergebnisse. Die Abweichungen von  $\pm 20\%$  sind mit der Entfernung der Messorte voneinander und den örtlichen Gegebenheiten (NLWK Messung im Freistrom, PIV-Messung in unmittelbarer Bauwerknähe) zu erklären.

Weitere Messreihen werden am 25. Oktober aufgenommen. Die Tauchgehäuse mit den Kameras werden dabei vollständig getaucht, so dass sich die Messebene in einer Tiefe von 1,5 m befindet. Unter diesen Voraussetzungen sind Detailmessungen im Bereich des Hufeisenwirbels möglich. Diese Messungen werden nach Ermittlung der aktuellen Randbedingung und Einstellung der optimierten PIV-Parameter durchgeführt. Es werden mehrere Versuchsreihen durchgeführt und Stichproben ausgewertet. Die vollständige Auswertung (Abb. 5-17) erfolgt dann zu einem späteren Zeitpunkt. Der Zeitaufwand für eine Auswertung vor Ort parallel zu den Messungen ist nicht zielführend.



© LZH

Abb. 5-17: Messungen im Bereich des Hufeisenwirbels, Prinzipskizze, Strömungsfeld ( $t=0$  s)

Die Abbildung 5-17 stellt die Messung im Hufeisenwirbel in 1,5 m Tiefe dar. Die dabei auftretenden Einzelwirbelstrukturen (gelb, rot, blau) bewegen sich (visualisiert durch graue Pfeile) mit der Hauptströmungsrichtung nach links /9/. Die vektorielle Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung ist in der Abbildung nicht wiedergegeben.

Die Messungen zeigen, dass das stationäre 3D-Strömungsmesssystem, bestehend aus Particle-Image-Velocimeter, mechanischem Anströmkörper-Strömungsmesssystem, Trägersystem und Tauchgehäusen sich in der Praxis bewährt. In Zusammenarbeit mit dem NLWK-Projektteam Emssperrwerk wurde dieser Messort für das Strömungsmesssystem ausgewählt. Der Anbau erfolgt an Pfeiler 1 Nordseite in Nebenöffnung 1 gegenüber der Betriebskanzle. Diese Position ist gut einsehbar und ebenerdig zu erreichen. Die geforderten, untersuchten Randbedingungen werden an der gewählten Position erfüllt:

- Hohe Strömungsgeschwindigkeiten infolge Ebb- und Flutstrom,
- stark variierende Wasserstände innerhalb einer Tide sowie
- die Trübung des Wassers variierende Schwebstofffracht.

Durch die Positionierung des Laserkopfes oberhalb der Wasseroberfläche ist die maximale Tauchtiefe des PIV beschränkt. Die Anordnung ermöglicht eine Erzeugung der Lichtschnittebene bis ca. 4 m Tiefe unterhalb der Wasseroberfläche. Hierzu ist eine Verbindung des Laserkopfes über ein Periskop mit einer unter Wasser befindlichen Optik erfolgt, die nach der Umlenkung des Laserstrahls durch ein Prisma die Lichtschnittebene aufspannt.

## **6 Datenerfassung, -transfer und -konvertierung**

Für die Auswertung physikalischer Modellversuche, der Naturmessungen und deren Vergleich mit numerischen Simulationen, wurde ein standardisiertes Vorgehen entwickelt, das die Vergleichbarkeit auch mit zukünftigen Untersuchungen sicherstellt.

Für die Auswertung und den sich anschließenden Vergleich mit numerischen Simulationsergebnissen kommt das Programm MATLAB zum Einsatz. Aufsetzend auf dem Programmsystem MATLAB wurden durch die Projektpartner entsprechende Module für den Vergleich und die statistische Auswertung des Datenmaterials entwickelt:

1. Der zusammen mit dem PIV-System nutzbare MATLAB-Link macht es möglich die FlowManager Software durch ein einfaches, effizientes und flexibles Werkzeug bei der Datenverarbeitung und Darstellung der Ergebnisse zu erweitern. Mit dem MATLAB-Link ist man in der Lage, während der Messung Daten aus der FlowManager Datenbank des PIV in die MATLAB Oberfläche zu transferieren und Datenanalysen gemäß den eigenen Spezifikationen unter Verwendung der MATLAB Skripts durchzuführen und die Ergebnisse den gewählten Anforderungen entsprechend darzustellen.

Sollte der direkte Link zu MATLAB nicht Online genutzt werden, so ist auch der Import abgespeicherter ASCII Dateien möglich. Und im Anschluss daran die Aufbereitung der Daten und Darstellung in einem gemeinsam mit den Projektpartnern definierten Format.

2. Die Ablage der aufgezeichneten Daten des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems erfolgt ebenfalls in einem Format, welches eine Weiterverarbeitung in MATLAB ermöglicht. Hier stehen ein Single-Block-Format sowie die ASCII-Ausgabe zur Verfügung, wobei diese deutlich mehr Speicherplatz benötigt.
3. Die in den numerischen Simulationen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erzeugten Daten sind effizient zu analysieren und auszuwerten. MATLAB arbeitet auf Matrizenbasis und ist daher bei gleicher oder höherer Qualität in der Bearbeitung schneller, als das im Simulationsprogramm integrierte Tool für Auf- und Weiterverarbeitung von Simulationsergebnissen.

Ein Abgleich von Daten der ADV-Sonde, Modellrechnung, mechanischem Anströmkörpermesssystem und 3D-PIV Strömungsmessung ist mit Hilfe dieses Tools gewährleistet und die Darstellung der Ergebnisse kann einheitlich als Graph oder Tabelle erfolgen.

## 7 Auswertung und Ergebnisse

Der Einsatz des lasergestützten PIV Strömungsmesssystems an Orten mit unterschiedlichen Strömungsbedingungen (Strömungsrinne, Umlaufrinne, Großer Wellenkanal, Emssperrwerk) verifiziert die Robustheit und Mobilität des Gesamtsystems. Die mechanische Flexibilität bei der Anordnung der Komponenten ist ein wesentlicher Vorteil bei der Anpassung an die jeweiligen baulichen bzw. geometrischen Randbedingungen. Das modulare System wird den verschiedenen Aufgaben der Betreiber von Wasserbauwerken gerecht. Die Modifikation einzelner Komponenten und selbstentwickeltes, kompatibles Zubehör (Anschlussleitungen, Tauchgehäuse, Periskop) bedeuten eine wesentliche Erweiterung der PIV-Technik und stellen einen signifikanten Fortschritt in der Anwendung dar. Das verfügbare Zubehör kann dabei auch für andere Anwender von PIV Systemen von Nutzen sein.

Die Untersuchungen an der Umlaufrinne haben die Zuverlässigkeit des PIV-Systems unter einfachen strömungstechnischen Verhältnissen gezeigt. Es werden die Randbedingungen für mögliche künstliche Seedings und natürliche Trübung bestimmt. Dabei zeigt sich kein einfacher mathematischer Zusammenhang zwischen den vorhandenen, erforderlichen Partikeln und dem Messbereich des PIV-Systems. Die geeigneten Parameter sind standortspezifisch und müssen bei jedem Standortwechsel neu ermittelt werden. Es zeigt sich ein komplexer Zusammenhang zwischen vorgefundener Trübung, zusätzlichen oder natürlichen Seedings und der am Laser zu wählenden Intensität. Es besteht keine einfache mathematische Verknüpfung von einzustellender Intensität und Trübung. Vielmehr ist die Zusammensetzung des Seedings entscheidend für die Qualität der PIV-Ergebnisse. Die gefundenen Daten sind Standort spezifisch und ergeben jeweils eine individuelle Parametermatrix. Wie die Praxisversuche im Modellmaßstab zeigen, sind die im natürlichen Gewässer enthaltenen Partikel geeignet, ausreichend gute Streulichtreflexe zur PIV-Messung zu generieren.

Die Messungen am Großen Wellenkanal (GWK) haben gezeigt, dass mit natürlichem Seeding (Wasser des Mittellandkanals) und bei Wellengang qualitativ und quantitativ ausreichend genaue Messungen des Strömungsfeldes möglich sind. Mit den Untersuchungen an der Strömungsrinne wird gezeigt, dass sich eine gute Übereinstimmung von Modellrechnungen und Messungen, sowohl beim statischen, als auch im dynamischen Lastfall am Hubtormodell erzielen lässt.

In Gandersum am Emssperrwerk zeigt sich die Flexibilität und Stabilität der Systemkomponenten unter natürlichen Randbedingungen und im Taucheinsatz. Die Messreihen geben die Strömungsverhältnisse makroskopisch genau wieder. Detailmessungen im Bereich des Hufeisenwirbels zeigen die hohe örtliche Auflösung des PIV-Systems und lösen neben den Hauptströmungskomponenten auch im Zentimetermaßstab Wirbelstrukturen auf. Die aufgezeichneten Rohdaten lassen zur Zeit keine Online Darstellung am Auswerterechner zu. Weitere in den Messkampagnen ermittelte Rohdaten liegen noch vor.

Mit dem Aufbau, der Installation und Erprobung des Prototypenmesssystems am ausgewählten Bauwerk und der Durchführung von Natur- und Vergleichsmessungen zur Feinkalibrierung des numerischen HD-Modells sind zu Projektende die geplanten Arbeitspakete abschließend erfüllt und sehr gute qualitative und quantitative Ergebnisse erzielt worden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten einer ADV-Sonde zeigt zufriedenstellende Übereinstimmungen. Dies lässt den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den räumlich und zeitlich wesentlich höher aufgelösten PIV-Messdaten sinnvoll und sehr aussichtsreich erscheinen. Insbesondere ein Vergleich der sich bildenden Wirbelstrukturen wird mit den PIV-Messdaten möglich. Nach 24 Monaten Projektlaufzeit ist die Zusammenstellung und Abstimmung der Komponenten abgeschlossen. Die nötige mechanische und steuerungstechnische Flexibilität des lasergestützten Gesamtsystems zur Anpassung an verschiedene Randbedingungen, wie Trübung, Platzbedarf und Beobachtungsfeldgröße, an unterschiedlichen Einsatzorten ist erreicht. Basierend auf umfangreichen Softwaretests erfolgte eine Auswahl von Parametersätzen, die die Konstellation im Praxisversuch berücksichtigen.

Je nach Aufgabenstellung bewährt sich das 3D-PIV-Messsystem im 2D- oder 3D-Modus zur Visualisierung von Geschwindigkeitsbereichen, Erstellung von Tiefenprofilen und Darstellung von Turbulenzen. Der Einsatz des Systems an Orten mit unterschiedlichen Strömungsbedingungen (Strömungsrinne, Umlaufrinne und GWK) verifiziert die große Robustheit und Mobilität des Gesamtsystems. Die mechanische Flexibilität bei der Anordnung der Komponenten ist ein wesentlicher Vorteil bei der Anpassung an die jeweiligen baulichen bzw. geometrischen Randbedingungen. Weiterhin ermöglicht die flexible Positionierung des Strömungsmesssystems, bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen des Sperrwerkes Strömungsmessungen in unterschiedlichen Wassertiefen und Entfernungen von der Pfeilerwand.

Weitere wichtige Einsatzbereiche der beschriebenen Messtechnik sind Standorte, die einen ganzjährigen Betrieb erfordern und bei denen es durch Strömung, Tide und Wellengang in Ausnahmefällen zu einer kritischen Belastung kommen kann. Daher soll auch das Potenzial zum Einsatz des entwickelten Gesamtmesssystems in Bereichen des Küstenmonitoring /3/ und der Meerestechnik auf Schiffen und an Messstationen der Meeresforschung geprüft werden.

Aus den aufgenommen Einzelbildern des PIV-Systems lassen sich zusätzliche Informationen zum Sedimenttransport ermitteln. Die Aufnahmen der in Zeit und Ort genau definierten Streulichtreflexe des natürlichen Seedings bieten die Möglichkeit der Visualisierung der Sedimentbewegung. Eine Auswertung bezüglich Größe, Form und Zusammensetzung (organische bzw. anorganische Bestandteile) wird zur Zeit geprüft.

Die Weiterführung der bereits abgeschlossenen Arbeitsschritte kann mit der Planung von parallelen Versuchen der Systeme (PIV-System, mechanisches System und ADV-Sonde) erfolgen. Dazu besteht die Möglichkeit die Verfahren zeitgleich an unterschiedlichen Standorten für weiterführende Modell- und Praxisversuche zu installieren. Mit Blick auf mögliche Untersuchungen zum Sedimenttransport kann das PIV-System unabhängig von anderen Messsystemen genutzt werden. Eine enge Zusammenarbeit mit interessierten Instituten, Forschungslaboren, Behörden und mit öffentlichen Aufgaben beauftragten Betrieben ist dabei angestrebt.

## 9 Veröffentlichungen

/1/ Matheja, A.; Scheffermann, J.; Zimmermann, C.: „Entwicklung eines stationären 3D-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“, 4. FZK-Kolloquium „Küsten-Morphodynamik und Küstenschutzbauwerke“, Hannover, 20.03.2003

/2/ Raffel, M.; Willert, C.E.; Kompenhans, J.: „Particle image velocimetry – a practical guide“; Springer Verlag, Berlin (D) , 1998

/3/ Stute, U.; Walter, J.; Barcikowski, S.; Bunte, J.; Haferkamp, H.: „Development of an in-situ 3D-particle image velocimeter (PIV) for coastal and river monitoring“, 1st Workshop Coastal Zone, Ghent, Belgium, 5-7th June 2003

/4/ Walter, J.; Bunte, J.; Haferkamp, H.: „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

/5/ Walter, J.; Barcikowski, S.; Bunte, J.; Haferkamp, H.: „Entwicklung eines stationären in-situ 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“, 11. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S. 42.1-42.10, Braunschweig 09.-11.09. 2003

/6/ Walter, J.; Bunte, J.; Haferkamp, H.: „PIV Messsystem für hochturbulente Strömungszustände in der Praxis“, PIV/LIF User Meeting (Dantec Dynamics), 18.-19. Mai 2004 in Wolfsburg

/7/ Walter, J.; Bunte, J.; Haferkamp, H.: „Einsatz eines stationären 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“, 12. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S.35.1-35.11, Karlsruhe 07.-09.09. 2004

/8/ Walter, J.; Barcikowski, S.; Bunte, J.; Haferkamp, H.: „Stationäres 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände“, Hrsg. Laser Zentrum Hannover e.V., LZH-aktuell Ausgabe 40, Mai 2002

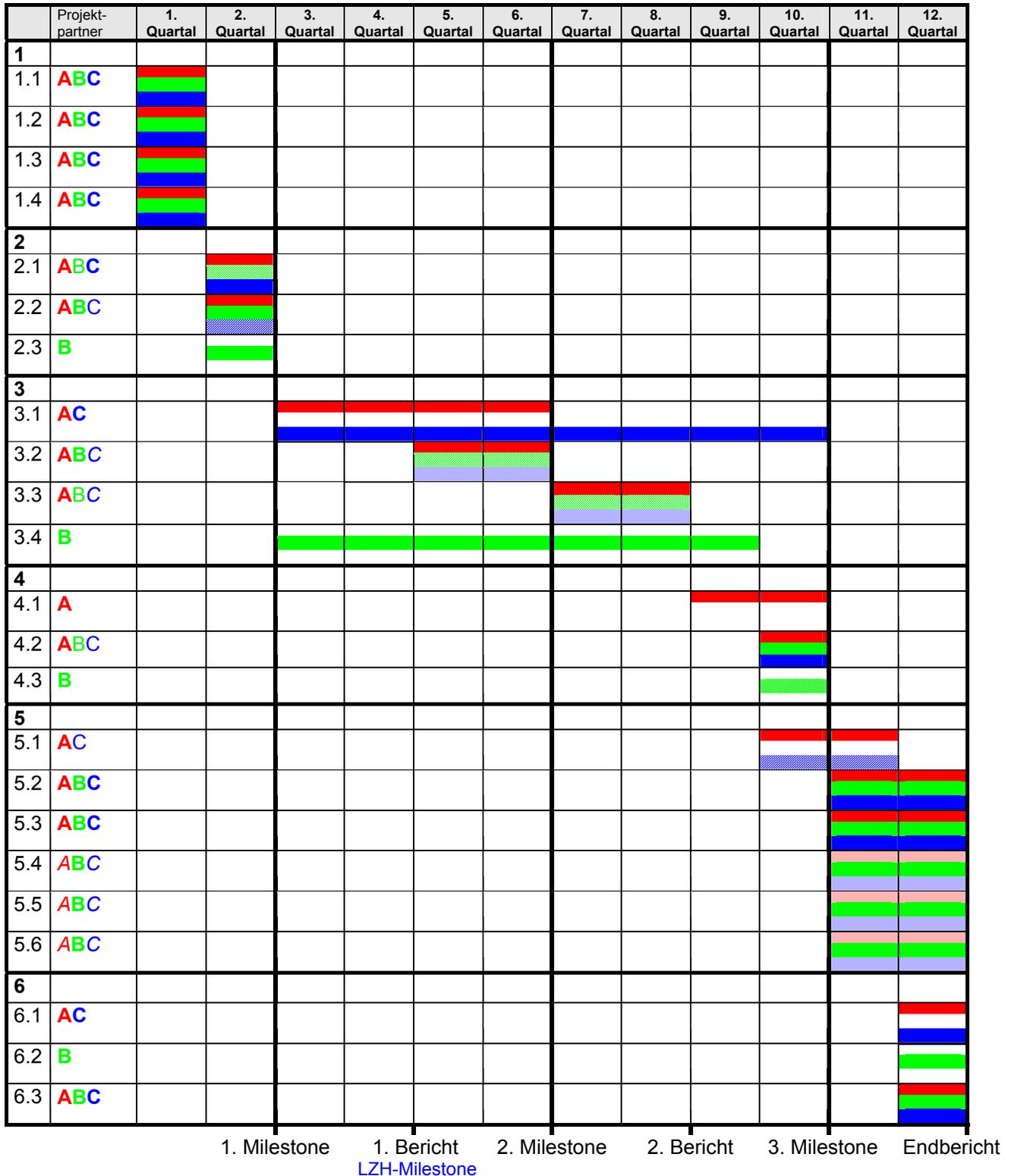
/9/ Walter, J.; Barcikowski, S.; Haferkamp, H.: „Anwendung der Lasertechnik für Messungen von Strömungen und Transportprozessen in der Natur und im GWK“, 5. FZK-Kolloquium "Seegang, Küsten- und Offshorebauwerke", S. 141-148, Hrsg. Forschungszentrum Küste (ISSN 1610-5249), Hannover, 08.03.2005

### INTERNET

„Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ NOKIS, Nord- und OstseeKüstenInformationssystem, 2003 <http://nokis.baw.de/npublic/research/PTJ/03KIS036.htm>

## 10 Anlagen

### 10.1 Zeitplan des Projektes



Bearbeiter:

**A** – Instituts für Werkstoffkunde

**B** – Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen

**C** – Laser-Zentrum Hannover e.V.

**Fett:** Hauptbearbeitung

Normal: Teilbearbeitung

*Kursiv:* Beratung / Abstimmung

## 10.2 Arbeitsschritte des Projektes

	Beteiligte	Arbeitsschritt
<b>1</b>		<b>Analyse der Randbedingungen</b>
1.1	<b>ABC</b>	Physikalische Randbedingungen
1.2	<b>ABC</b>	Chemische und biologische Randbedingungen
1.3	<b>ABC</b>	Technische Randbedingungen
1.4	<b>ABC</b>	Datenbeschaffung und -analyse bereits erhobener Daten im Bereich des ausgewählten Bauwerkes und Analyse der naturräumlichen Randbedingungen
<b>2</b>		<b>Definition des Anforderungsprofils</b>
2.1	<b>ABC</b>	Anforderungsprofil Sensorik und Trägersystem
2.2	<b>ABC</b>	Anforderungsprofil Datenübertragung und Datenpräsentation
2.3	<b>B</b>	Definition eines geeigneten Messprogramms für den Aufbau eines numerischen 3D-Modells
<b>3</b>		<b>Entwicklung</b>
3.1	<b>AC</b>	Entwicklung der Sensorik
3.2	<b>ABC</b>	Entwicklung der Module für Datenübertragung und Datenpräsentation
3.3	<b>ABC</b>	Konzeption eines Trägersystems
3.4	<b>B</b>	Entwicklung eines Modellkonzepts, Gebietsabgrenzung, Spezifizierung von Randbedingungen und Auswahl des zu verwendenden Programmsystems
<b>4</b>		<b>Fertigung und Erprobung eines Modells</b>
4.1	<b>A</b>	Fertigung und Erprobung eines Modells
4.2	<b>ABC</b>	Optimierung des Systems
4.3	<b>B</b>	Aufbau, Kalibrierung und Validierung des numerischen HD-Modells auf der Grundlage der bereits erhobenen Daten
<b>5</b>		<b>Aufbau und Erprobung eines Prototypen</b>
5.1	<b>AC</b>	Aufbau des Prototypen am UWTH
5.2	<b>ABC</b>	Einbau und Erprobung des Prototypen am ausgewählten Bauwerk
5.3	<b>ABC</b>	Durchführung von Naturmessungen zur Feinkalibrierung (Auswahl des Turbulenzmodells) des numerischen HD-Modells
5.4	<b>ABC</b>	Feinkalibrierung des numerischen HD-Modells
5.5	<b>ABC</b>	Beurteilung der verwendeten Lösungsansätze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (Turbulenzmodell, Solverstabilität, Diskretisierung des Zeithorizonts)
5.6	<b>ABC</b>	Prognoserechnungen zur Optimierung des Bauwerkes und Erarbeitung konkreter Handlungsalternativen
<b>6</b>		<b>Dokumentation und Abschlußbericht</b>
6.1	<b>AC</b>	Technische Dokumentation des entwickelten Messsystems
6.2	<b>B</b>	Dokumentation der numerischen Modelluntersuchungen und abschließende Beurteilung der angewandten Methodik
6.3	<b>ABC</b>	Abschlußbericht des Forschungsvorhabens

Bearbeiter:

**A** – *Instituts für Werkstoffkunde*

**B** – *Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen*

**C** – *Laser-Zentrum Hannover e.V.*

**Fett:** Hauptbearbeitung

Normal: Teilbearbeitung

*Kursiv:* Beratung / Abstimmung